農業生產模型

——氣候、土壤和作物

中國農業科技出版社

Printed in China

农业生产模型

——气候、土壤和作物

H.范柯伦　J.沃尔夫　主编

杨守春　王涌清　陈同斌
孙昭荣　刘菊生　译

杨守春　王涌清　胡文林　校

中国农业科技出版社

内 容 提 要

本书介绍了采用数学模型的方法，对气候、土壤和作物进行定量研究，可在较短时间内，用较少的人力物力的投入，得到可靠而优化的结果。全书共分九章，并有习题练习解答等附录。本书注重系统性、综合性，具有较强的科学性，因地因时制宜的观点明确，内容丰富，对于提高农业科研水平有很大借鉴和指导作用，也可作为农业院校重要参考教材。

农业生产模型

——气候、土壤和作物

H. 范柯伦　J. 沃尔夫 主编

译校者：杨守春　王涌清　陈同斌

孙昭荣　刘菊生　胡文林

责任编辑：林　泉

封面设计：马　钢

*

中国农业科技出版社出版

（北京海淀区白石桥路30号）

新华书店北京发行所发行　　各地新华书店经售

北京新华印刷厂印刷

*

开本：787×1092毫米1/32　印张：17.3125　字数：310千字

1990年6月第一版　　1990年6月第一次印刷

印数：1—2000册　定价：7.50元

ISBN 7-80026-112-3/S·81

序　言

本书把读者引导到受环境条件和管理措施影响的农业生产的定量研究方面，目的在于帮助接触这些课题的读者，熟悉用这一方法进行农业生产潜力的基本估算。为了便于直接应用本书所介绍的理论，教材中包括了许多练习和例题。

本书所介绍的方法，是由一个研究世界粮食供应以及农业生产潜力和限度问题的多学科研究小组——世界粮食研究中心(SOW)提出来的。

出版这本模拟专著的直接目的是为一门有关上述问题的国际课程提供教材。该课程由瓦赫宁根农业大学的J.H.德鲁博士与世界气象组织的D.A.赖克斯博士的密切合作，共同开设的，并在财政上得到了国际合作荷兰理事会(DGIS)、欧洲共同体(EC)和联合国粮农组织(FAO)的支持。本书是根据作者们在讲课期间提出的讲稿和C.T.德威特教授的宝贵意见编写而成。在讲课期间和本书编辑阶段，得到了D.M.詹森先生和H.H.范拉尔夫人的很大帮助，P.W.J.尤索尔为本书列选参考文献，R.赫尔德夫人为多数稿件的初版打字，M.A.博斯夫人完成手稿的定稿工作以及G.C.比克霍夫先生准时完成绘图，对于他们卓有成效的工作深表感谢。

H.范柯伦

J.沃尔夫

撰 稿 人

Berkhout J. A. A., 世界粮食研究中心，c/o C.A.B.O.,P. O. Box 14, 6700 AA, 荷兰瓦赫宁根。

Driessen, P. M., 农业大学土壤地质系，P. O. Box 37,6700 AA,荷兰瓦赫宁根。

Faber,D. C.,世界粮食研究中心,c/o C. A. B. O., P. O. Box 14,6700 AA,荷兰瓦赫宁根。

Heemst, H.D.J. van, 农业生物研究中心，P. O. Box 14, 6700 AA,荷兰瓦赫宁根。

Keulen, H. van, 农业生物研究中心，P. O. Box 14, 6700 AA,荷兰瓦赫宁根。

Laar, H.H. van, 农业大学理论产量生态学系，P. O. Box 430,6700 AA, 荷兰瓦赫宁根。

Rijsdijk, F. H., Fyto consult bv, Boeslaan 21, 6703 EN, 荷兰瓦赫宁根。

Schouten, H., Directie Organisatie en Efficiency, Ministerie van Landbouw en Visserj, P.O. Box 20401, 2500 EK,荷兰海牙。

Wit, C.T.de, 农业大学理论产量生态学系，P.O. Box 430, 6700 AA, 荷兰瓦赫宁根。

Wolf, J., 世界粮食研究中心，c/o C.A.B.O., P. O. Box 14,6700AA, 荷兰瓦赫宁根。

译者的话

农业生产是一个很复杂的问题，它受自然条件、社会经济和作物本身等各种因素的影响。为了研究农业生产的最优效果，在现代农业科学技术中，已采用模型的研究方法，通过模型对影响农业生产的因素进行研究，可以在较短时间内，用较少人力、物力和财力，得到可靠而优化的结果。

《农业生产模型》一书就是用数学模型的方法，对影响农业生产最重要的因素——气候、土壤和作物等方面定量研究农业生产的科学专著。该书由荷兰农业科学家集体编写而成，全书共分九章，主要内容有：从植物同化作用、呼吸作用和干物质的积累等基本原理分析了作物的生产潜力；从水分蒸发蒸腾、水分平衡、水分利用，研究了有效水分和作物产量的关系；从作物产量和营养需求，研究了土壤有效养分、施肥量和作物产量的关系；建立农业生产模型基本数据的收集和处理；耕作制度、土壤改良农业信息的应用；对作物生产的计算机模型等方面作了深入的探讨。为了加深对书中各章内容的理解和便于在生产实际中应用，各章节中都安排了若干练习，书末有习题解答，并附有模型程序清单。

本书具有以下一些突出的特点：

1.注重了系统性和综合性。本书把农业生产作为一个大系统来研究，既考虑到影响农业生产的各种自然因素，如气候、土壤、作物生理特性等，同时又考虑了物质投入、劳动生产率、生产管理等人为因素和社会经济条件。从本书农业

生产模型的总体设计看，也是以多目标、多因素来全面分析农业生产问题的。

2.具有较强的科学性。由于综合是在分析基础上进行的，因此本书各章节从不同影响产量因子所建立的子模型中，考虑的参数项和变量非常全面，深入细致，既涉及微观范畴，又联系宏观领域。如作物潜在产量模型重点研究温度、辐射与作物生理、作物物候间的关系；水分限制产量模型侧重考虑气候-土壤-作物的水分平衡与产量关系；养分模型则考虑产量与作物吸收、养分回收和施肥量之间的关系进行建模等等，所有模型都是在科学的定量化、规范化基础上严谨仔细地建立的。

3.因地、因时制宜观点明确。农业生产是自然再生产与经济再生产结合的复杂过程，各地条件千差万别。本书在建立农业生产模型过程中，坚持了实行分类处理的原则。如将生产条件分成四类建模，即①由辐射、温度决定作物潜在产量的模型；②以水分限制为主的生产模型；③水分、养分同时限制的生产模型；④低投入农业生产模型（自给性为主的农业）。在土壤改良方面，也分成四类情况建模。

总的看来，本书在定量研究农业生产方面，内容丰富，全面系统，科学性强，对于提高农业科研水平有很大借鉴和方法性指导作用，同时也可作为农业大专院校的重要参考教科书。本书可供气象、土壤、植物营养、农学、农业经济等有关专业的科研单位、技术行政部门和高等院校师生，特别是研究生、科技人员、科技管理人员阅读和参考。

本书由刘寄陵同志终审并提出了宝贵意见，特此致谢。

译　者

1988年8月

目 录

第一章 引言 …… (1)
第二章 作物潜在产量 …… (11)
2.1 生理学原理 …… (11)
2.1.1 单叶的CO_2同化作用 …… (13)
2.1.2 冠层的CO_2同化作用 …… (15)
2.1.3 呼吸作用 …… (20)
2.1.4 干物质积累过程 …… (24)
2.2 作物物候学和干物质分配 …… (26)
2.2.1 引言 …… (26)
2.2.2 水稻的发育和干物质分配 …… (31)
2.2.3 玉米的发育和干物质分配 …… (34)
2.2.4 木薯的发育和干物质分配 …… (38)
2.3 作物潜在产量的一个简单模型 …… (41)
2.3.1 引言 …… (41)
2.3.2 一个实例 …… (43)
2.3.3 同测定值比较 …… (60)
第三章 根据土壤有效水分确定作物产量 …… (64)
3.1 潜在蒸发蒸腾量 …… (64)
3.1.1 引言 …… (64)
3.1.2 辐射 …… (65)
3.1.3 蒸发 …… (70)
3.1.4 潜在蒸发蒸腾 …… (76)

3.2 土壤水分平衡 …… (77)
3.2.1 土壤水分动力学的基本原理 …… (80)
3.2.2 水分平衡中的各项参数 …… (88)
3.2.3 生长季节中各时期土壤水分平衡方程的解 …… (116)
3.2.4 对一个时间间隔做水分平衡分析后的变量校正 …… (118)
3.3 水分利用与作物生产的关系 …… (123)
3.3.1 蒸腾系数的概念 …… (123)
3.3.2 蒸腾系数的应用 …… (129)
3.3.3 养分状况的影响 …… (131)
3.3.4 蒸腾系数和水分利用率 …… (134)
3.4 水分限制生产的简单模型 …… (136)
3.4.1 引言 …… (136)
3.4.2 试验详情 …… (137)
3.4.3 实际计算过程 …… (138)
第四章 根据有效养分确定作物产量 …… (163)
4.1 作物产量和养分需要量 …… (163)
4.1.1 引言 …… (163)
4.1.2 养分供应和作物效应 …… (163)
4.1.3 产量-吸收关系 …… (169)
4.1.4 施肥量-吸收量的关系 …… (183)
4.1.5 元素间的相互作用 …… (192)
4.2 养分要求和肥料需要量 …… (194)
4.2.1 养分限制的识别 …… (195)
4.2.2 从不施肥土壤中吸收的养分量 …… (197)
4.2.3 肥料养分的回收 …… (199)
4.2.4 肥料养分的需要量 …… (206)
第五章 基本数据的收集和处理 …… (215)
5.1 引言 …… (215)
5.2 气象数据 …… (220)

5.2.1 辐射 …… (221)
5.2.2 气温 …… (221)
5.2.3 大气湿度 …… (222)
5.2.4 风速 …… (223)
5.2.5 降雨量 …… (223)
5.2.6 潜在蒸发蒸腾 …… (224)
5.3 土壤数据 …… (225)
5.3.1 土壤物理数据 …… (225)
5.3.2 土壤化学数据 …… (239)
5.4 植物数据 …… (250)
5.4.1 光合能力 …… (250)
5.4.2 呼吸损失 …… (252)
5.4.3 物候学 …… (254)
5.4.4 干物质的分配 …… (256)
5.4.5 气孔的作用 …… (260)
5.4.6 养分需要量 …… (262)
5.4.7 若干附加的数据 …… (262)
第六章 耕作制度 …… (264)
6.1 作物农时、宜耕性及劳动需要量 …… (264)
6.1.1 引言 …… (264)
6.1.2 作物农时 …… (265)
6.1.3 宜耕性 …… (266)
6.1.4 劳动需要量 …… (267)
6.1.5 人类活动的选择 …… (273)
6.1.6 泰国东北部移栽水稻、玉米和木薯的作物活动农时和劳动需要量 …… (274)
6.2 低投入农业 …… (278)
6.2.1 引言 …… (278)
6.2.2 基本需要 …… (278)

6.2.3 农业体系中的产量平衡 …… (281)
6.2.4 轮垦 …… (285)
6.2.5 水稻单作 …… (288)
6.2.6 泰国东北部一个混作实例 …… (291)
6.3 杂草和病虫害 …… (294)
6.3.1 引言 …… (294)
6.3.2 杂草模型 …… (295)
6.3.3 除草 …… (298)
6.3.4 病虫害 …… (305)
6.3.5 多周期性群体生长的动态 …… (312)
6.3.6 养分状况与病虫害的相互影响 …… (320)
6.3.7 气候的影响 …… (322)
6.3.8 其他影响群体生长的因素 …… (322)
6.3.9 杂草和病虫害的防治 …… (323)
第七章 土壤改良 …… (327)
7.1 改良 …… (327)
7.1.1 引言 …… (327)
7.1.2 改良的效果 …… (328)
7.1.3 一个模拟实例 …… (333)
7.1.4 改良所需的劳力投入量 …… (338)
第八章 农业信息的应用 …… (346)
8.1 世界粮食研究中心社会-经济模型中的农业信息应用 …… (346)
8.1.1 引言 …… (346)
8.1.2 研究的特点和结构：一种模拟方法 …… (347)
8.1.3 农用能源 …… (356)
8.1.4 社会经济因素 …… (357)
8.1.5 地区规划 …… (357)
8.1.6 国际贸易和援助 …… (358)

8.1.7 小结 …… (360)
第九章 作物生产的计算机模型 …… (361)
9.1 作物生产的FORTAN模型 …… (361)
9.1.1 引言 …… (361)
9.1.2 模拟模型的描述 …… (362)
9.1.3 模拟模型的变量数据库 …… (392)
9.1.4 模型的程序清单(见附录4) …… (398)
9.1.5 缩写词表 …… (398)
附录1 练习答案 …… (410)
附录2 符号表 …… (473)
附录3 参考文献 …… (486)
附录4 模型的程序清单 …… (496)
附录5 模拟专题方面已出版的著作 …… (540)

第一章

引言

C.T.de Wit

农业可以解释为人类借助动植物，以太阳作为能源生产有用有机物的活动。农业生产所要求的最低限度的资源是土地和劳力，加上阳光和雨水。如果有足够的土地可供利用，对于许多土壤类型和气候条件来说，今天的农业系统已经发展到可使生活中的粮食、衣物、住所和燃料得到满足。除非条件非常有利，这些农业系统是生产不出比最低需要量更多的产品的。但是，人是在有住所条件下发展起来的特种动物，人类文明的发展又是同都市生活的发展紧密相联的。为了维持大量非农业人口的生计，农业人口的生产力必须大大高于自身的生计水平。只有在一个充分鼓励使用农用生产资料的经济结构内，非农业部门能为农民生产那些资料时，这才有可能。

虽然不可能对上述生产资料作出明确的分类，但它们可以分别归入节省劳力、提高产量和生产保护这三种类型，例如机械、化肥和农药。虽然生产保护的发展不能离开化学工业，但只有生产保护的投入才能使其在制造和使用过程中消耗能量较少。因此，夸张一点说，现代农业可以解释为将不可食用的矿物能(矿物油和天然气)，通过植物、动物和太阳转

化为可食用能的人类活动。

在第二次世界大战以前，美国农业的重点仍然放在机械化方面。拖拉机代替了马，从前为马生产饲料的土地，可以为其他目的栽种作物。美国以这一方式进行经营，就全国范围来看农业产量得到了很大提高，但是，每公顷产量提高甚少；从图1可以看出，小麦产量每年仅增加3公斤/公顷左右。同一时期的欧洲，把农业生产的重点放在提高土地单位面积的生产力方面，但是，结果也不很理想，每年增长的幅度大约为：英国4公斤/公顷，荷兰18公斤/公顷。

第二次世界大战后的几年，小麦年产量增加很快。如图1所示，美国和英国的年增长量达50～80公斤/公顷。一般来说，产量的这种持续增长可能是改良土壤、施用化肥、控制病害和引进品种(它们能使增加的投入获得更充分的利用)等措施共同作用的结果。在许多地区，小麦产量仍然很低，

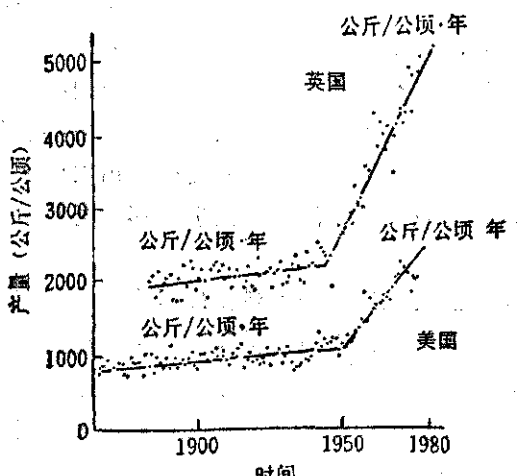


图1 近百年来英国和美国的平均小麦产量

以致绝对产量每年增长 50－80 公斤/公顷，则相当于相对产量每年增加 2 %以上。

其他作物的增长情况也大致如此。在工业化国家，这种产量增长的势头超过了人口的增长速度。由此而产生的多余的粮食和土地被更多地用于奶类和肉类生产，有些土地还可派作其他用场。

与此对比，非洲、南美、亚洲的谷物年产量平均每年分别增加10，19和25公斤/公顷(图 2)，略高于第二次世界大战前世界上工业化国家的增长速度。这一情况表明，生产的某些知识和手段在逐步由北向南传播。然而产量以这样的速度增加实在太慢，不足以防止饥饿和营养不良。例如在非洲，当平均谷物产量为 1000 公斤/公顷时，每年增加10公斤/公顷，增长率亦仅为 1 %，在近十年，就是这样的低增长率也还是估计过高的。产量的这种增长速率远远低于 2 ～ 3 %的年人

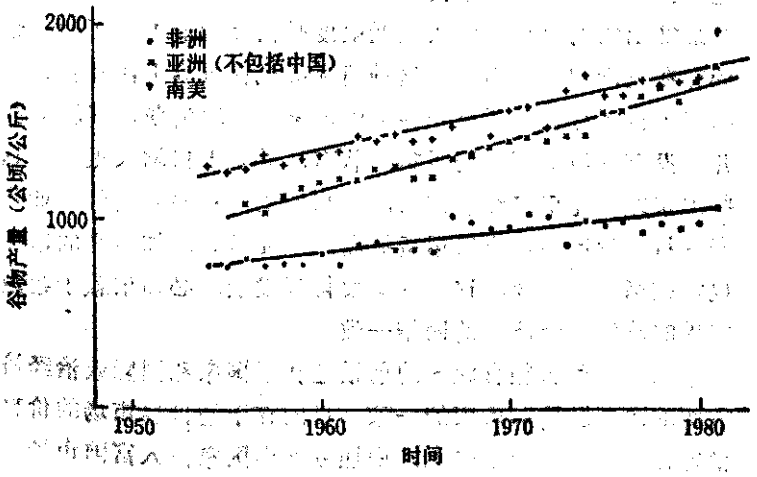


图2 1954～1980年非洲、亚洲和南美的平均谷物产量

口相对增长率。直到目前，这一差距虽然由于扩大耕地面积多少得到缓解，但是，在家庭或村庄的社会经济结构内，通过简单手段即可改良的土地正在日益减少，要作进一步改良必须采用更加先进的技术。因此，要改善这一地区的粮食状况，或者不得不采用机械来扩大耕地面积，或者要增加投入，如增施化肥，以提高单位面积产量。这两条途径的实行都要求有一个开放的经济，使农民在出售他的农产品时，可以收入足够的钱，以支付必要生产资料的开支。虽然贸易条件通常并不那么有利，但是，就已知的农业生产过程而言，那种认为没有上述技术手段，也可以从实质上改善世界粮食生产状况的主张还没有被证实是可行的。

上面举例所用的平均产量数字中隐含着许多差异。某些发展中国家具有丰富的资源和促进农业发展的经济结构。那里的价格水平，至少可以使一些农民有能力支付改良土壤、施肥、防治病虫和采用良种的费用。但是，政策还不能使那些最贫困的人口具有购买最低限度必需品的能力，因而还继续存在饥饿和营养不良。这种情况甚至在世界上比较富裕的国家中也还存在。还有一些贫困国家，土壤瘠薄，气候不利，几乎没有其他资源，处于封闭状态，并且人口增长很快。这些国家即使能出口经济作物，也只能引进那些必需的农业生产资料。货物的进出口运费提高，致使这条增加生产的途径也常被堵塞。因此，这些国家要得到发展，必须依赖于超越国界的政治和经济上的团结一致。

因此，改善粮食状况的前景还在于国家和国际政治经济方面的改善。国际政策的一致，目的在于把世界市场的价格稳定在一个合理的水平上，增加发展中国家渗入富国市场的机会，为发展中国家和贫困国家创造更加有利的地位。其

次，这种国际政策的一致还必须有国家的发展战略作补充，使农民能够增加产量，特别是能够改善贫困农民的生产状况。这些范围广泛的问题已经成为阿姆斯特丹和瓦赫宁根世界粮食研究中心从事研究的焦点。就本项研究而言，为了分析和改进各国政府和国际机构的政策，正在提出强调农业的国家经济模型，并使这些模型与全球模型连接。这些国家经济模型包括那些计算生产潜力，并能区分不同地区和不同农产品的农业生产模型。研究中心的那部分工作集中在确定农业生产的自然和农学因子上，这也是本书将要论述的主题。

本书所追求的主要目的是使读者熟悉这些过程，即以定量估算的方法决定一个地区农业生产的技术可行性，这些定量估算的内容包括不同控制措施下主要作物产量水平的估算，以及达到期望产量所需投入的估算。这种方法必然是简化了的，所以不应当把定量估算的结果看作是最后的答案，而是把它看作对可行性和限制性作进一步分析的框架，这种可行性和限制性是以仅从田间工作才能得到的实际知识为依据的。

图 3 采用图解分级分析步骤来说明这一方法。图中第二行的矩形代表决定生产潜力的基本因子，其中气候和土壤在一定地区具有固定的性质，它们与土壤改良水平相结合可以描述土地的质量。农作物的特性因品种不同而有变化，有关这方面的改善程度也可以适当地进行确定。因此，对于一定质量的土地来说，生产潜力在相当长一段时间内是不会变化的，并可以对其进行比较精确的计算。

在作进一步的分析时，目的不是定义一个描述产量与生长因子全部可能的组合之间相互关系的生产函数，因为受农

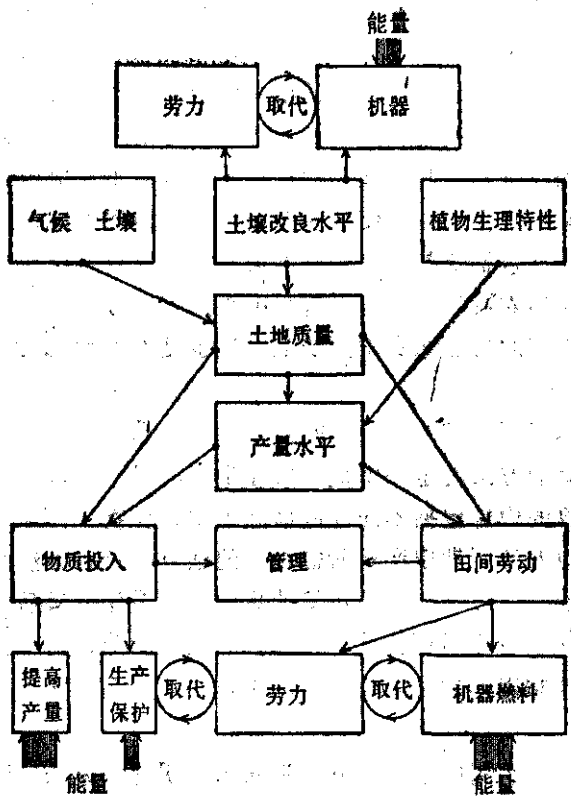


图3 分级分析步骤的图解说明

业生产特点的限制，对这样一种生产函数不存在唯一解。代替的办法是建立生长因子的合理组合，使之形成与土地质量水平相一致的产量水平。因此，产量水平可以被看作是取决于作物特性和土地的因变量，同时又可看作是支配实现目标产量所要求的投入的自变量。这种关系从图 3 箭头指示的方向反映出来：箭头指向产量水平时表示产量是因变量，背离产量水平时箭头表示自变量。

就要求的投入而论，可以划分为田间工作和物质投入。必要的田间工作可用物理项加以描述，例如，犁地、耙地、除草的需要量以及供应线和运输线的长度等。这些活动需要的时间在很大程度上不取决于产量的高低，因为这些工作无论如何是必须做的。但是，可用来做这些工作的总时间却强烈地依赖于土壤类型和天气条件。在田间工作的实施过程中，手工劳动与依靠重型机械和需要消耗矿物能的活动之间，可以互相替代。物质的投入可以分为提高产量的投入和生产保护投入。提高产量的投入，如水分、矿物元素和氮素的投入，所需数量直接受要求的产量水平、土壤类型和气候条件的影响。这类投入的特点是它们不能为劳力所代替。与此相反，对于生产保护的投入，如杀生物剂，可以进行替代，例如，集中劳力除草与使用除草剂，人工消灭害虫与使用杀虫剂之间可以互相替代。

土地的质量水平，一方面由土壤内在性质和当地盛行的气候条件所决定，另一方面又取决于土壤改良水平。在所建立的系列化分级中，改良水平可以划分为四个等级(7.1节)。最低的改良级系指几乎处于荒地状况的土地，在这种土地上生产粮食的农业活动受到限制，只能收集薪柴和集中放牧。在第二改良等级中，土地已进行过清理，可以作比较永久的、有休闲期或无休闲期的农业利用。此时的水分状况完全受气候条件的支配，只能依靠简单修整地形和修建简易水坝来避免可能发生的洪水。下一个等级中土地改良是平整土地，建设简易梯田和开沟控制过多的水分。最高的改良等级系指条件对作物生长有利的土地，土地平整，可以完全控制水分，具有必要的设施，当需要灌溉时有足够的水分可供利用。

除了说明一个地区的土地现状外，用数量来表示土地上升到较高的质量水平所需要的改良活动也是重要的。对于移动植被和石块的数量，搬运土方的数量和需要建设的设施等这一表示方法特别适用。有关这方面的分析可以图3第1行表示。虽然用手工劳动也可以改良土壤，但是，正如上述，这常常只是一种理论上的可能性，因为大多数易于改良的土地面积已被改良利用。因此，可以得出结论，即使在中华人民共和国，应用机械手段也是必然的。因此，根据可资利用的设备，按不同技术等级对改良活动加以描述可能更好些。

在进一步分析时，生产状况也可以分为四个级别。最高级生产状况能保证水分、矿物元素和氮素有最佳的供应，因此，作物产量仅由作物类型、盛行的辐照度和温度状况来决定。计算生长旺盛的绿色作物表面的潜在生长（2.1节）和发育（2.2节）的模型，在这里是适用的。其他模型，提供潜在蒸腾率，可以得到总需水量（3.1节）。对于多数地区来说，充足的实验数据对判断栽培主要作物的可行性，规定所谓农事历，如规定播种、出苗、开花、成熟等的时间是有用的（6.1节）。可以将理论研究成果与田间资料相结合，提出有关作物的简单计算模型，以得出干物质产量和蒸腾的时间过程以及作为输出的经济产量（2.3节）。

对于第二级生产状况，假设氮素和矿物元素的供应仍然是最佳的，但要考虑有效水分对蒸发和作物产量的影响（3.3节）。对覆盖作物供应水分主要依靠降雨，有时则依赖灌溉补充。水分消耗主要是由环境条件和作物对土壤的覆盖度决定的，其中最重要的是土壤的物理性质和气候条件。根据土壤和气象数据可以计算水分平衡（3.2节）。这就可以确定什么时候水分过多，什么时候缺水，与第一级生产状况比较，水分

过多或短缺都会引起生长速率的下降(3.4节)。这些模型也可用来计算适宜进行田间操作的工时数，这是农业系统分析中的重要参数(6.1节)。

在第三级农业生产状况，除水分和辐照度以外，植物的氮素和磷素养分有时也限制作物生长。由于每年需要大量的氮素，所以要特别强调施用氮肥，注意氮肥的价格和土壤-植物-大气系统中氮的迁移性。将作物吸收的氮量与产量之间的关系，以及作物吸收的氮量与施肥量或肥料氮的回收率之间的关系分开考虑，就可以确定氮素对产量的影响和达到第二级生产状况的产量水平所需的氮量(4.1节)。磷也可以同样的方式处理。

肥料氮的回收率取决于植物吸收、有机质矿化、土壤微生物固定、淋洗和反硝化(气态氮的形成过程)等过程的相对重要性。正在对这些过程进行模拟研究，但目前仍然需要依赖肥料实验的结果。这项研究还要对来自天然来源的有效氮数量进行测定。肥料磷的回收率则取决于这样一些因素，如土壤组成中有铝和钙的存在，就会使有效磷变为对植物无效的形态。氮肥和磷肥的交互作用可以根据植物组织中的P/N比进行探讨(4.2节)。至于钾、钙、镁之类的矿物元素是否供应充足，pH是否处于适宜的范围，可以通过土壤分析手段很容易作出评价。

维持生计的农业是第四级生产状况的一个具体例子，即几乎不使用任何外部投入。一般的作业方法是基于下述概念：在没有外部输入的条件下，任何农业系统都会向限制生长的主要因子的输入和输出的平衡移动(6.2节)，在这个平衡点的产量水平必须高于某一最低产量，使耕种措施的努力是有价值的。土壤养分，特别是氮素极大地限制许多生产状况中的产

量，这意味着，改善耕作措施的效果必须根据其对限制元素的吸收所产生的暂时性或永久性的影响来判断。由于在土壤肥力低的条件下改善低产状况的可能性非常有限，所以改善作物管理措施不同于施肥，不管这是否涉及改良品种、较好的耕作或病虫防治，它们的影响都是不能积累的。

当然，在任何产量水平时，病虫和杂草都可能产生干扰，可以将高产状况下特别重要的病害和低产状况下特别重要的昆虫杂草为害加以区分，分开讨论它们的影响(6.3节)。根据危害程度评价，可以区分开不同的为害类型。

本书在很大程度上是以近十年提出的一些复杂模拟模型为依据的，其中许多模型已在模拟专著丛书中论述过。但是，目前本书所讨论的模型已经过简化，从而使全部计算可以用一个简单的科学袖珍计算器即可进行。为了扩大应用范围，这样做仍嫌太麻烦了，为此，本书介绍了一个FORTRAN程序(第9章)，此程序允许用户在多数家庭计算机上进行这些计算。

任何模型，当然也包括本书所介绍的计算系统，都是复杂真实世界的简化表示。因此，所得结果总是应当以实际经验和田间实验结果作印证，如果作物种植在正常生长条件的极限范围内，就更是如此。

（王涌清译　杨守春校）

第 二 章

作物潜在产量

2.1 生理学原理

H. D. J. van Heemst

在农业生产中，通过光合作用，太阳能被转化固定在生物体中以备未来利用。在这一过程中，来自空气中的CO_2按照下列反应转化成碳水化合物$(CH_2O)_n$：

$$CO_2+H_2O+\text{太阳能}\rightarrow CH_2O+O_2 \qquad (1)$$

这一过程也称为CO_2同化作用。所生产的碳水化合物部分被用来构成植物干物质的建造材料，如纤维素、蛋白质、木质素和脂肪，部分作为各个植物过程的能量来源。从同化过程产生的碳水化合物释放的能量可以用以下方程进行描述：

$$CH_2O+O_2\rightarrow CO_2+H_2O+\text{化学能} \qquad (2)$$

这一过程称为呼吸作用。同化过程期间形成的碳水化合物，大约有40%的重量为呼吸作用所消耗。从同化作用速率中减去呼吸作用速率，就可得出植物干重的增长速率，即生长速率。图4以图解方式介绍夏季小麦的生长速率和总的干物质积累作用的时间过程。通过确定干物质积累曲线各点的斜率，就可从中得到生长速率。

生长速率可分为三个阶段：（1）第一阶段，作物是由互

不遮光的各个植株所组成，生长速率增加；（2）第二阶段，作物完全覆盖土壤，生长速率不变；（3）第三阶段，作物成熟，生长速率下降。

在第一阶段，大部分同化产物投入叶片的生长。因为相邻的植株很小，相互遮光很难起作用，所以此时叶面积的增长是伴随截获的能量呈正比增加的，单株重量每日以恒定的比例呈指数增长。一旦作物表面密闭后，叶生长越快，截取的能量并不一定越多，因此，生长速率保持恒定，植株总重量呈线性增加。在最后阶段，叶片衰老以致生长速率下降。

总的干物质积累过程，大部分是在第二阶段完成的。因此，作物总的干物质产量是由线性生长阶段生产速率的大小和这一阶段的长短决定的。

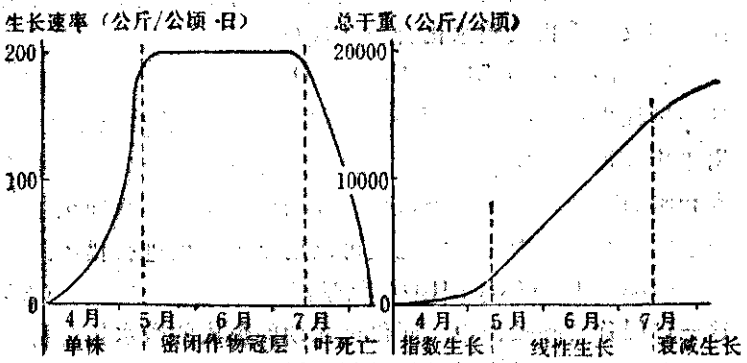


图4　夏季小麦的生长速率和总干物重随时间变化过程的图示

线性生长周期的长短是种和栽培种的属性，而且也受环境条件的影响（见2.2节）。实际生长速率主要受环境条件的影响，例如阳光照射和温度，养分和水分的供应以及杂草、病虫害的发生情况等均影响生长速率。

用最佳方式供应水分和养分，在不存在杂草和病虫害的

情况下，生长速率是由太阳辐射和温度决定的，并被称为潜在的生长速率。当讨论到植物生长的基本过程时，一般均假定这些条件都得到满足。下面将介绍一个计算潜在干物质产量的简单模型，这一模型可应用到不同地区的不同作物上。

2.1.1 单叶的CO_2同化作用

在植物的叶片中，绿色叶绿体和其他色素吸收光合作用中的有效辐射并用来还原CO_2。并不是全部太阳辐射在光合作用中都是有效的，而只有400至700纳米波长的可见光辐射才是有效的，这种可见光辐射相当于地球总辐射的50%（图5）。

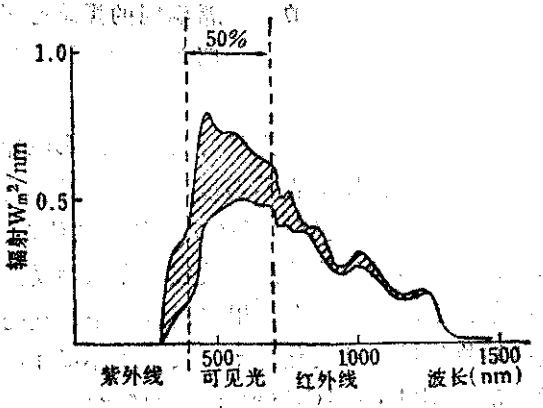


图5 太阳总辐射（上部曲线）和太阳直接辐射（下部曲线）的光谱分布。太阳高度角为30°，大气降水为21毫米（资料来源：Monteith，1973）

将叶片封闭在一间所谓的叶室中，分析以一种已知流动速度通过叶片的进出空气的CO_2浓度，就可以测出叶片的CO_2同化速率。当在不同辐射强度下测定同化作用速率时，就可以得出如图6所表示的C_3和C_4类植物种叶片的光效应曲线。描述这些曲线特征的主要参数是初始光利用率ε、黑暗中的

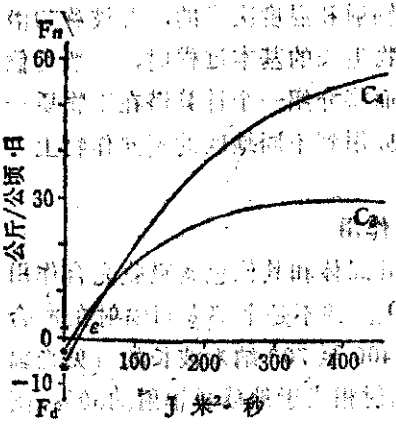


图 6　C_3和C_4类植物种单叶的净CO_2同化作用函数

呼吸作用速率 R_d、高光强度时的最大净 CO_2 同化速率 F_m。最大净CO_2同化速率因环境而定，C_4类植物为 30～90 公斤/公顷（叶）·小时，C_3类植物为 15～50 公斤/公顷（叶）·小时。CO_2 同化作用总速率 F_g 为净速率与同时发生的黑暗呼吸作用之和。常温时的黑暗呼吸作用约略为最大净同化速率的九分之一。

温度对最大净同化速率和黑暗呼吸速率的影响比初始光利用率的影响大得多。图 7 表示温度对C_3和C_4类植物最大同化速率的影响。但是，当温度接近图 7 中的最佳值时，可以获得在控制条件下栽培的植物的温度效应。在植物受波动温度支配的田间条件下，安置光合作用仪器看来是适宜的。实验发现，这些植物的最大叶同化速率，实际上不受 13 °C 以上（对C_4类种）和 8 °C以上（对C_3类种）温度的制约。

虽然C_3和C_4光合作用类型之间在初始光利用率方面的差异很小，但是C_4类植物在光饱和时的同化速率一般较高。C_3和C_4这两个术语指的是光合作用过程中第一稳定产物的碳架长度。这两类植物具有不同的特点（Gifford，1974），例如：（1）C_4光合作用途径中的主羧化酶对CO_2有一种亲和力，比C_3光合作用途径中的主羧化酶高两倍多；（2）在C_3类植物中，呼吸作用在有光的情况下发生，这导致同化速率对周围空气

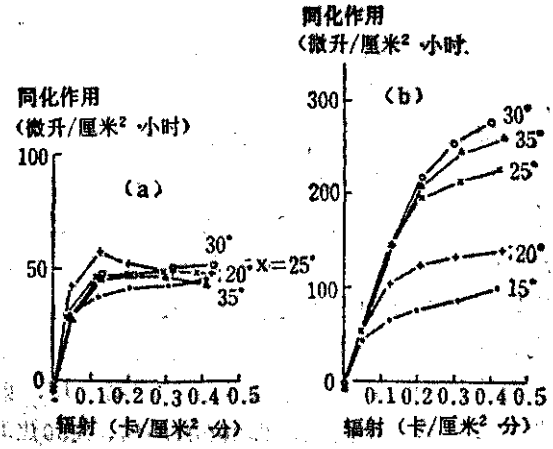


图7 温度与C_3(a)和C_4(b)作物种的最大CO_2同化速率之间的关系

中氧浓度的依赖性，而在C_4植物种中不存在这样的过程；(3)在胞间CO_2浓度大大超过外部CO_2浓度和通过气孔的光强度适宜的条件下，保存在C_4类植物中的内部CO_2浓度约为C_3类植物的一半(Raschke，1975；Goudriaan和van Laar，1978 b)。这最后一个特点将在3.3节作详细讨论。

在温带地区占优势的C_3同化类型品种的实例是小粒谷物，包括水稻在内。在亚热带和热带比较丰富的C_4型品种是玉米、高粱、小米、甘蔗和大部分热带牧草。Downton(1975)和Raghavendra与Das (1978) 已经编辑了C_4型品种的详细目录。

2.1.2 冠层的CO_2同化作用

和单叶的情况相同，作物的CO_2同化速率也取决于射入的可见光辐射。为了简单起见，假定作物具有一水平层的大

叶形成一个密闭面。我们把这一层作为一片大叶看待，当已知光强度时，就可以从图 6 中读出CO_2同化速率，应考虑到，在射入的可见光辐射中，有10%被反射，10%透过叶片，10%被其他色素吸收，它们对光合作用没有贡献，只有余下的70%为叶绿体所吸收。当射入的可见光辐射强度为300焦耳/米^2·秒时，如果作物属于 C_3 植物种，则其 CO_2 同化速率约为 25 公斤/公顷·小时。因为每平方米土壤表面有 1 平方米的叶面积，所以作物的叶面积指数(LAI)为 1 。当另一层大叶位于第一层大叶之下，因为每平方米土壤表面积有 2 平方米的叶面积，则该作物的叶面积指数为 2 。在第二层，射入辐射强度相当于透过第一层的光，即300的10%，或30焦耳/米^2·秒，可产生额外的同化速率约 3 公斤/公顷·小时。结果是具有两层叶的作物同化速率稍有增加。第二层下的外加多层叶将不会使作物的同化速率有实质性的提高。

实际上，作物并不是由多层的紧密接合的叶片所组成，作物的叶片是向不同的方向伸展的，因此，阳光可较为均匀地分布在叶片上。通过测定作物不同水平面的光强度，同时，在同一时间测定相同水平面的累计叶面积，就可用试验方法测定叶冠层中光的消减值。试验结果以图 8 表示，该图描述了相对光强度和累积叶面积指数之间的关系，累积叶面积指数是指从叶冠层的顶部向下逐层计算的叶面积。光的消减值是增加的叶层数的指数。对于

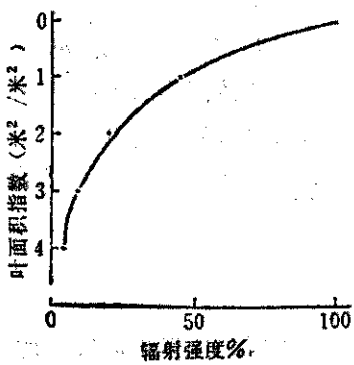


图 8　作物冠层中辐射的消减过程

任一叶面积指数来说，吸收的光辐射比例都可以从图 8 查出。图 8 与图 6 结合使用就可以估算出作物的同化速率。叶面积指数为 4 时，CO_2 同化速率约为 39 公斤/公顷·小时，或者约为多层大分层叶作物同化速率的1.5倍。理由是，在一种实际作物中，光强在叶片上的分布是比较均匀的，因此多数叶片处于光效应曲线直线部分的光强度之下。

上面概括的程序是计算作物CO_2同化速率的一种图解方法。实际情况要比这复杂得多，在实际计算时，还必须考虑直射光和散射光的影响、总的叶面积、叶的分布角度、叶的光学性质以及有关叶冠层内部光分布的太阳高度等。这一问题已用计算机模型解决了(de Wit ,1965; Duncan等,1967; Goudriaan,1977)，这些模型可以计算一天中任何瞬间冠层的同化速率，每一瞬间的同化速率随光合作用中射入的有效辐射而变，有效辐射又取决于太阳高度和天空的云量。

在建立一个模型时，应考虑两种情况：完全晴朗的天空和完全有云的天空。对瞬时速率积分就可产生每日的CO_2固定总量。在表 1 和表 2 中，晴天和阴天每日CO_2固定总量是作为地理纬度的函数给出的，在零级呼吸作用消耗和叶面积指数为 5 的情况下，高光强度时单叶的两种最大总同化速率F_g是：典型C_3类植物为 40 公斤/公顷(叶)·小时，典型C_4类植物为 70 公斤/公顷(叶)·小时。以这些表为基础，高光强度时的各种最大CO_2同化速率可以从 Goudriaan 和van Laar (1978a) 的资料中查找，根据给出的作物类型 (C_3或C_4)、当地的纬度和多云天气所占的比例，就可以计算出任一日期的潜在同化速率。

作物类型决定用哪一种表；在指定的纬度和日期内，通过内插法，就能得到晴天和阴天密闭冠层的同化速率。部分

表1　晴天(F_{cl})和阴天(F_{ov})以及最大的叶CO_2同化速率F_g为40公斤/公顷·日时，叶片呈球面角度分布的密闭冠层的总CO_2同化速率计算值

日　期(日)	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
北半球(月)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
南半球(月)	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6
纬　度												
0° F_{cl}	728	753	768	761	737	720	727	752	768	760	736	720
F_{ov}	306	320	328	324	311	302	306	319	328	324	311	302
10° F_{cl}	652	701	748	779	786	784	785	784	765	720	667	638
F_{ov}	270	295	319	334	336	333	335	336	327	305	277	262
20° F_{cl}	562	634	713	783	820	834	829	802	745	665	583	542
F_{ov}	226	261	300	334	351	356	355	343	316	276	236	216
30° F_{cl}	454	549	659	768	839	869	858	804	708	591	481	429
F_{ov}	175	219	271	324	357	371	366	341	295	239	187	163
40° F_{cl}	333	445	586	737	843	892	873	788	652	497	364	304
F_{ov}	120	169	233	304	354	377	368	329	264	193	133	107
50° F_{cl}	202	324	491	686	833	904	877	757	574	384	234	172
F_{ov}	63	114	187	275	343	375	363	307	224	140	77	52
60° F_{cl}	68	191	375	615	813	915	875	708	474	255	102	39
F_{ov}	15	54	132	236	323	368	351	277	175	83	25	8
70° F_{cl}	0	46	240	527	798	967	896	649	353	114	0	0
F_{ov}	0	10	73	189	302	369	341	240	118	27	0	0

(资料来源：Goudriaan和van Laar，1978a)

阴天日的同化速率可由下列公式获得：

$$F_{gc}=f_o \cdot F_{ov}+(1-f_o) \cdot F_{cl} \qquad (3)$$

其中：F_{gc}为冠层总的CO_2同化速率(公斤/公顷·日)，

f_o为阴天日所占的比例(完全晴天日时f_o为0，完全阴天日时f_o为1)，

F_{ov}为完全阴天日的总CO_2同化速率(公斤/公顷·日)，

F_{cl}为晴天的总CO_2同化速率(公斤/公顷·日)。

表2 晴天(F_{cl})和阴天(F_{ov})以及叶片最大同化速率F_g为70公斤/公顷·日时，叶呈球面角分布时的密闭冠层的总同化速率(公斤/公顷·日)计算值

日期(日)	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
北半球(月)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
南半球(月)	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6
纬度												
0° F_{cl}	959	995	1017	1007	973	947	958	993	1018	1007	971	947
F_{ov}	326	341	350	346	331	321	325	340	351	346	331	321
10° F_{cl}	852	922	989	1032	1039	1035	1037	1038	1012	949	873	832
F_{ov}	285	313	340	357	358	356	357	359	349	324	294	277
20° F_{cl}	726	827	937	1035	1086	1103	1097	1062	983	870	755	698
F_{ov}	237	276	319	356	375	381	379	366	336	292	248	226
30° F_{cl}	577	707	860	1011	1109	1149	1134	1060	927	765	613	542
F_{ov}	182	229	287	345	381	396	391	363	313	251	195	170
40° F_{cl}	410	562	755	962	1108	1175	1150	1033	845	633	452	372
F_{ov}	123	176	245	322	377	402	392	349	278	201	138	110
50° F_{cl}	236	397	620	885	1086	1183	1145	982	733	477	278	198
F_{ov}	65	117	194	289	362	398	384	324	234	145	78	53
60° F_{cl}	71	220	460	779	1046	1182	1129	905	591	301	109	40
F_{ov}	15	58	136	246	340	388	369	290	181	85	25	8
70° F_{cl}	0	47	277	649	1006	1222	1132	810	421	121	0	0
F_{ov}	0	10	74	195	314	385	356	249	120	28	0	0

(资源来源：Goudriaan和van Laar，1978a)

从测定的实际每日总辐射和列入表3的全晴天每日总辐射，可以得出阴天日所占的比例。

完全阴天日的总辐照接近完全晴天日的总辐照乘以0.2。于是：

$$f_o=(H_g-H_a)/(H_g-0.2H_g) \quad (4)$$

其中：H_g为全晴天的总辐照(焦耳/米^2·日)，

H_a为测定的总辐照(焦耳/米^2·日)。

如果冠层还未密闭，比如在生长周期的开始和结尾时，则入射辐射不能被全部截获，并且与密闭冠层相比，CO_2同化作用下降。如前面讨论的那样，可从作物截取的辐射比例估算其下降量：

$$f_h=(1-e^{-k_c \cdot LAI})$$

其中：f_h为作物截取光的比例；（5）

k_c为可见光的消光系数，其值取决于作物几何形状，介于0.5和0.8之间。

练　习　1

计算你所在地区，晴天和阴天，C_3和C_4类作物全年每月月中的每日总的CO_2同化作用，假定作物是一密闭的冠层。

练　习　2

假设LAI＝1.5，重复练习1。

CO_2同化速率迄今一直以吸收CO_2的数量来表示，吸收的CO_2在作物中被还原成碳水化合物或糖$(CH_2O)_n$，为了得到以CH_2O表示的同化速率，可以将CO_2表示的同化速率乘以30/44（CH_2O与CO_2分子量之比）。

2.1.3　呼吸作用

同化过程中产生的糖，可以转化成结构干物质，积累和作为储备暂时贮存起来，或者作为能源被利用。植物有两个过程需要能量：一方面是为了离子梯度的保持和降解的结构蛋白质的再合成；另一方面是为了主要的光合作用产物转化成结构植物物质。这些过程均产生CO_2，因此，属于呼吸过

表 3 标准晴天日的总辐射H_g（10^6焦耳/米^2·日）

日 期(日)	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
北半球(月)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
南半球(月)	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6
纬 度												
0°	28.00	29.44	30.32	29.90	28.52	27.54	27.94	29.36	30.34	29.88	28.46	27.54
10°	24.34	26.88	29.34	30.86	30.96	30.68	30.82	31.02	30.18	27.90	25.10	23.60
20°	20.00	22.46	27.36	30.76	32.44	32.92	32.76	31.68	28.96	24.98	21.00	19.06
30°	15.18	19.30	24.42	29.62	32.90	34.24	33.74	31.28	26.74	21.34	16.34	14.10
40°	10.12	14.60	20.64	27.48	32.36	34.58	33.72	29.86	23.60	16.80	11.34	9.00
50°	5.22	9.60	16.14	24.40	30.88	34.02	32.82	27.50	19.60	11.92	6.38	4.22
60°	1.22	4.68	11.16	20.50	28.62	32.86	31.20	24.30	14.94	6.84	2.00	0.64
70°	0.00	0.76	5.96	15.98	26.12	32.18	29.70	20.56	9.78	2.20	0.00	0.00
80°	0.00	0.00	1.26	11.32	25.74	33.44	30.48	17.62	4.44	0.00	0.00	0.00
90°	0.00	0.00	0.00	9.72	26.04	33.98	30.94	17.46	0.38	0.00	0.00	0.00

（资料来源：Goudriaan和van Laar，1978a）

程：第一个过程称为维持呼吸作用，第二个过程称为生长呼吸作用。

维持呼吸作用

植物蛋白质，特别是叶片中的蛋白质主要由酶组成，酶的寿命很有限，在20°C的温度下，每日以0.1左右的相对速率变质，必须进行再合成。蛋白质转化速率随温度而定，Q_{10}的变化系数约为2（Penning de Vries等，1979），这意味着，温度增加10°C，蛋白质转化速率增加1倍。

植物细胞液泡中的离子浓度比周围组织高，这引起离子由液泡向周围渗透。为了维持所要求的内部浓度，离子必须按照浓度梯度被吸收，穿过细胞膜要求有效的输送，这都需要能量。

虽然缺乏有关维持呼吸作用的精确资料，但在现有生物量成分的基础上，可以得出相对维持呼吸作用速率的估算。表4列出的是4组作物的估算值，每组近似地具有同样的化学组成。

表4　20°C时的相对维持呼吸作用速率R_m（公斤/公斤·日）和转化效率E_g（公斤/公斤）

作物组	R_m	E_g
块根/块茎作物	0.010	0.75
谷类作物	0.015	0.70
种子富含蛋白质的作物	0.025	0.65
种子富含油的作物	0.030	0.50

生长呼吸作用

最初的光合产物转化成植物结构物质，如纤维素、蛋白质、木质素和脂肪等，要求有建造这些物质的基质；为了合成最终产物、输送糖类以及吸收氮和矿物质，需要能量。因

此，部分同化的糖类通过呼吸作用为合成新的植物成分提供能量，另一部分同化的糖类在合成过程中作为废物而损失。生长呼吸作用的大小是由所形成的最终产物的成分所决定的。因此，最初的光合作用产物转化成植物结构物质的效率因该物质的成分不同而异。生产脂肪和木质素的代价较高；结构碳水化合物和有机酸相对较低廉；蛋白质和核酸居中（表5）。

表5　基质（糖类）转化为植物成分的效率 E_g（公斤/公斤）

化合物		Eg
碳水化合物		0.826
含氮化合物（氨基酸、蛋白质和核酸的标准混合物），来自	NO_3^-	0.404
	NH_4^+	0.616
有机酸		1.104
木质素		0.465
脂肪		0.330

（资料来源：Penning de Vries，1975）

表4中也给出了所列4组作物的转化效率。高温时，最初的光合产物转化成植物结构物质的速率发生变化，但转化效率保持不变，因为生物化学途径不受温度的影响。最初的光合产物转化为植物结构物质在很大程度上都在晚上发生，温度低的夜晚可能阻碍这种转化，使白天形成的同化物不能全部转化成结构物质。结果，碳水化合物和淀粉在植物体内积累，通过生物化学反馈或对叶绿体的生理危害，最终可能影响同化速率。在这样的条件下，同化速率实际上是由植物转化同化产物的能力所决定的。

2.1.4 干物质积累过程

以这一节介绍的各个过程为基础，作物表面结构干重每日增加速率可以通过下列公式作近似计算：

$$\triangle W = E_g \cdot (F_{gs} - R_m \cdot W) \qquad (6)$$

其中：$\triangle W$为结构干重的增加速率(公斤/公顷·日)；

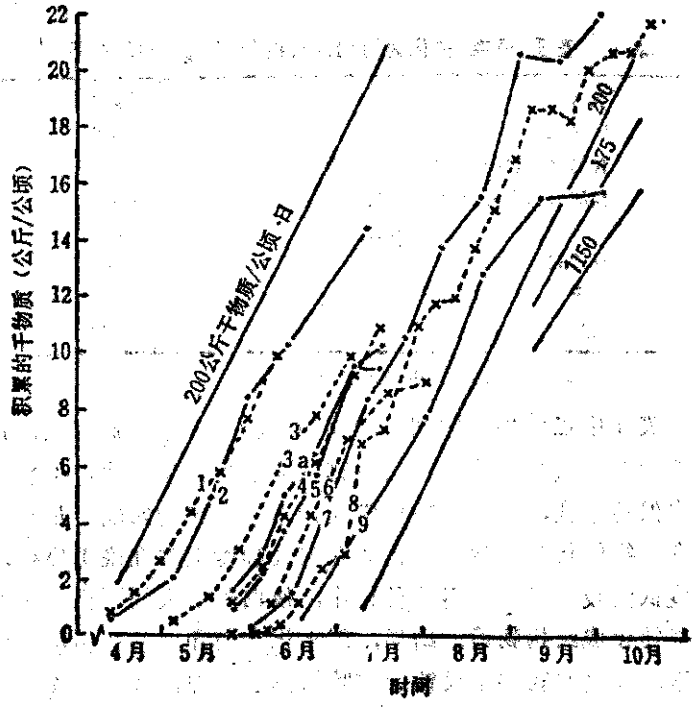


图9 在接近最佳条件下，荷兰主要农作物的生长速率与200，175和150公斤/公顷·日等几种生长速率的比较。1.草被；2.小麦；3.燕麦+大麦；3a.燕麦+豌豆；4.燕麦；5.豌豆；6.大麦；7.马铃薯；8.糖用甜菜；9.玉米(资料来源：Sibma，1968)

E_g为碳水化合物转化成干物质的效率(公斤/公斤)；

F_{gs}为以碳水化合物表示的作物总同化速率(公斤/公顷·日)；

R_m为相对维持呼吸作用速率(公斤/公斤·日)，见表4；

W为作物各生命部位的总干重(公斤/公顷)。

在温暖湿润的气候条件下，例如在荷兰，按方程6计算的潜在生长速率，在生长季节约为200公斤/公顷·日(表6)。这些估算为Sibma(1968)进一步用试验所证明，如图9所示，他计算了接近最佳条件下种植的多种大田作物的生长曲线。荷兰的主要农作物实际上都具有同样的斜率。C_4类作物玉米表现同样的斜率是因为在荷兰，玉米是在它的温度范围限度内生长。

表6　荷兰德比尔特(52°N)潜在生长量计算方案的例子

(假设呼吸作用的总损失为40%)

月份	H_a	H_g	f_o	F_{cl}	F_{ov}	F_{gc}	F_{gs}	ΔW
5月	16.92	30.43	0.55	829	339	560	382	229
6月	18.60	33.78	0.56	906	374	608	414	249
7月	16.45	32.50	0.62	877	361	557	380	228
8月	14.57	26.86	0.57	747	301	493	336	202

H_a=长期平均的实际总辐射(10^6焦耳/米²·日)；

H_g=北纬52°，晴日的总地面辐射(10^6焦耳/米²·日)(通过表3的线性内插值获得)；

f_o=阴天日所占的比例(方程4)；

F_{cl}=完全晴日的总CO_2同化速率(公斤/公顷·日)(表1或表2的插值)；

F_{ov}=完全阴天的总CO_2同化速率(公斤/公顷·日)(表1或表2的插值)；

F_{gc}=实际冠层总CO_2同化速率(公斤/公顷·日)(方程3)；

F_{gs}=以碳水化合物表示的冠层总同化速率($(30/44\times F_{gc})$)；

ΔW=潜在生长量(公斤/公顷·日)($0.6\times F_{gs}$)。

练 习 3

根据表 6 提出的方案，计算你所在地区C_3类作物每月的潜在生长量。如果没有辐射资料可供利用，可根据你自己的经验估计阴天的比例（阴云天气：$f_o=1$；主要是晴天：$f_o=0$）。

2.2 作物物候学和干物质分配

H. D. J. van Heemst

2.2.1 引言

图 4 表示夏季小麦在其生长周期中地上部干物质积累的时间过程。就生长速率而论，可以分为三个阶段（见前面2.1节）。但是，一种作物不仅要积累重量，而且要通过连续的物候发育阶段：一种谷类作物在播种或定植后至开花前这一段时间，首先要形成根、叶和茎，接着是开花，开花之后是结籽、灌浆和作物成熟。图10以图示形式说明水稻作物的各个物候学阶段。

生长和发育之间的区别是，生长被解释为整个植株或不同植物器官在重量或体积上的增加，而发育被定义为通过连续的物候学阶段；它是以营养生长和繁殖器官出现的顺序和速率来表示其特征的。生长与发育这两个阶段往往是密切相关的，这可能就是在说到生长时经常用到发育一词的原因。

不同器官出现的顺序是种的属性，不同种之间可以各异，并且几乎与环境无关。但是，器官出现的时间和速率则取决于环境条件，所以变化很大。谷类作物发育的重要事件是出苗、始花、顶生小穗形成、开花以及籽粒充实的开始和结束。对于块茎作物来说，块茎开始膨大也是发育的重要事件。

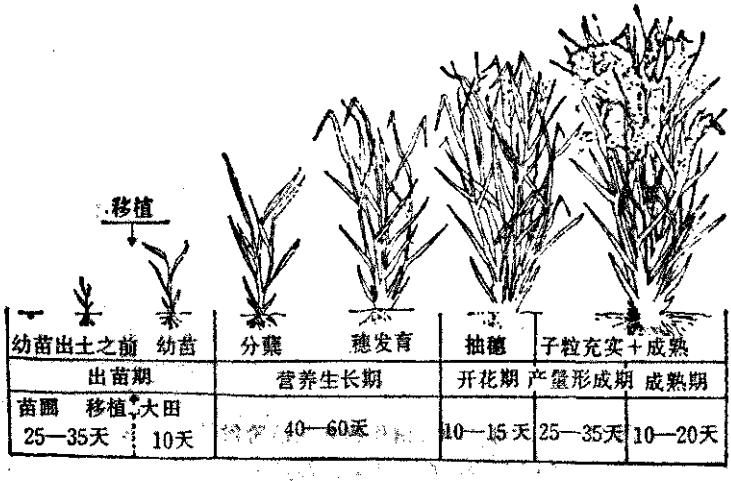


图10 水稻的发育阶段

(资料来源：Doorenbos 和 Kassam，1979)

影响物候发育的主要环境条件是温度和白昼长短。许多植物种或栽培种，例如冬小麦、冬黑麦和糖用甜菜需要一个低温期以诱发开花，在这一时期发生的这一过程称为春化阶段或春化作用。温带气候的夏季作物和热带作物则不需要诱发开花的低温期。对于冬季作物，首先必须满足低温要求。就所有的作物而论，较高温度一般均可缩短一定的物候期。van Dobben (1979) 收集了在不同的常温下生长的许多作物从出苗到开花这一段时间长短的数据(图11)。出苗离开花的天数与温度的相关曲线的形状表明天数与温度的乘积为一常数，这一乘积就是温度总和，或所谓热量单位(TU 以日度数为单位表示)。获取物候期TU 值的最普通方法是将高于临界值的每日平均温度相加，不同种或栽培种的临界温度范围变动于 0 和10°C之间(表 7)。有时存在一种最适温度，那么，

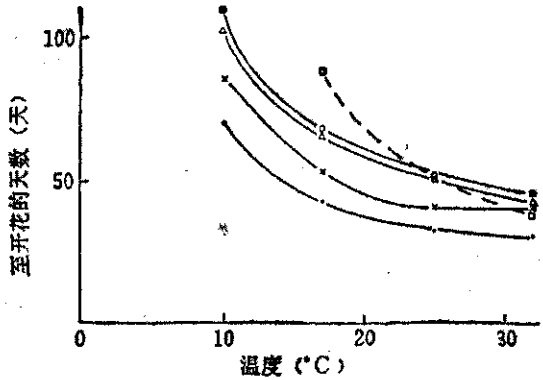


图11　温度对各种大田作物开花前阶段长短的影响。（•）黑麦；（•）小麦；（△）亚蔴；（□）玉米；（×）豌豆。（资料来源：van Dobben，1979）

超过最适的温度在计算中可由最适温度本身来代替。

因此，温度越高，作物的总生长期就越短，换言之，也就是发育速度越快。如果以数字大小来表示发育阶段，数值范围规定为0到2，且以0表示出苗，1表示开花和2表示成熟，则发育速率可视为每单位时间累积的那部分的大小。一般来说，谷类作物并不是在其生育期的中期开花，所以，在同样的温度下，开花以前的发育速率不同于开花以后的发育速率。例如，如果在特定的环境中，某一作物品种出苗和开花之间的时间间隔是50天，而开花和成熟之间的时间间隔为25天，那么，开花阶段以前的平均发育速率是1/50或0.02/日，而开花阶段以后的平均发育速率为1/25或0.04/日。通过将每日发育速率相加，得到的0和2之间的数字值可视为发育阶段。

练 习 4

将图11中小麦和玉米的图形变换为发育速率对温度的曲线。你在这些曲线中发现了什么？

对某些种或栽培种而言，由于昼长或者夜长的影响，温度对发育速率的作用有所不同，这种作用称之为光周期。根据这一机制，可将植物分为三个组：（1）光期纯感植物，发

表7 用于计算不同植物种TU值的指示临界温度值，T_0(°C)

作 物	T	作 物	T_0
玉 米	10	鹰嘴豆	4
大 豆	10	小 麦	0—5
高 粱	7—10	水 稻	0—10
豌 豆	4		

育速率对昼长敏感；（2）长日照植物，长昼的出现短夜可以诱发开花；（3）短日照植物，出现短昼长夜可以诱发开花。当一个新种或栽培种引进一个地区时，即便它起源于一个大约相同的纬度因而具有相同的光周期，对昼长的这种反应仍可能是一个重要的特征。理由是，由于降雨型式的差异，两个地区的生长季节可能不一致。不对昼长的影响做定量论述，因为我们假定，在每一个地区，栽培的都是具有适当昼长反应的种。

虽然控制物候学发育和生物产量的基本过程能单独地起作用，但这两种现象是密切相关的。如果发育速率快，线性生长期就会缩短，则生物产量就低（见1·2节）。而且，作物的总生物量一般不会增长，但作物的贮藏器官，如块茎、

籽粒或荚却在增长。这些贮藏器官只是在生长周期的后期，在根、茎、叶已经形成后才增长。生长周期短，造成营养生物量低，特别是对截取光辐射起作用的叶量低，必然导致作物减产。相反，投入营养器官的生物量过多，也可能使贮藏器官的产量相对地降低，因为在那样的情况下，维持呼吸作用就会增强。因此，不仅总生物量的产量是有意义的，而且生物量在各个植物部位的分配也是重要的。某一时间，叶、茎、根以及贮藏器官在总生物量中所占的比例，取决于以前的生长速率和增加的干物质在不同植物部位的分配，而生长速率又由过去的气候和叶面积指数所控制。一个固定的分配模式，例如分配系数是发育阶段的函数，并不必然导致不同器官的分配比率不变。关于这一点可用一个简单的例子来说明。

假设一种大田作物在某一时间包含有1000公斤/公顷的叶和400公斤/公顷的茎。在以后的10天(第一期)内，平均生长速率为200公斤/公顷·日；叶和茎的分配系数分别为0.6和0.4。在此之后的10天(第二期)内，由于有效能量降低了很多，生长速率仅为100公斤/公顷·日，叶和茎的分配系数分别变为0.3和0.7。第二期结束时，叶的重量应为$1000+0.6\times200\times10+0.3\times100\times10=2500$公斤/公顷。而茎的重量为$400+0.4\times200\times10+0.7\times100\times10=1900$公斤/公顷。叶-茎比值为1.32。现在假设第一期的生长速率为100公斤/公顷·日，第二期为200公斤/公顷·日。又假设分配模式相同。那么，在第二期结束时，叶的重量应为$1000+0.6\times100\times10+0.3\times200\times10=2200$公斤/公顷，茎的重量为$400+0.4\times100\times10+0.7\times200\times10=2200$公斤/公顷，因此，叶-茎比值为1.00。

在这个例子中，假设发育模式和分配系数的时间过程是相同的。但是，每年的发育模式不是完全相同的，因为这是作物对环境条件差异的反应。因此，分配模式与作物年龄不可能相关。供给不同植物部位的现有同化产物的分配，经常以依赖于作物发育阶段的分配模式来表示。这些构型是每种作物的属性。除温度以外，环境条件对分配模式的影响，特别是对潜在产量的影响是很小的，因此这里对其他环境不予以考虑。

在本节的下一部分将讨论新形成的干物质在不同植物器官中的分配，它与作物的发育阶段有关。现以水稻、玉米和木薯等作物为例加以说明。

2.2.2 水稻的发育和干物质分配

水稻全生育期的长短取决于品种、温度和对白昼长短的敏感度，从移植到成熟一般为 90 至 150 天（图 10）。短生育期品种为光期纯感植物，长生育期品种为短日照植物。

水稻是顶生花序，这决定水稻表现一种固定的发育模式：开花以后，叶、茎和根形成过程停止，重量增加的器官只有穗。发育速率与温度的关系是种-品种的属性之一，这种关系需要通过试验来建立（5.4 节）。举一个例子，两个栽培种，中等生育期的育种品系 B9C/Md/3/3 和短生育期栽培种 IR5，从移栽到开花这一段时间的TU值分别为 2700 和 2150 日°C，取临界温度为 0°C（van Keulen，1976）。20°C 时，这两个周期的持续时间可以计算为 2700/20 或 135 天和 2150/20 或 108天。与这一温度相关的发育速率分别为 1/135 或 0.0074/日和 1/108或0.0093/日。两个栽培种开花以后时期的 TU 值约等于 650日°C。

练　习　5

计算温度分别为20°C和25°C时，两个栽培种开花以后的持续时间和发育速率。

两个栽培种开花以后阶段TU值的相似性不是一种巧合，小麦的情况也是这样，生长在相同环境条件下的两个栽培种之间在生长周期方面的差异，主要是由于从出苗至开花这一段时间的长短不同所致(Nuttonson，1955，1958)。

在田间实际情况下，可以从出苗、开花和成熟的日期，以及来自最近气象站的气温数据(不应与实验地点相差太大)推算发育速率。

练　习　6

在泰国北部的清迈省，旱稻育种品系 Khicbangx RDI在两个地区种植：帕布琼(海拔高度800米，平均最高温度27°C，平均最低温度20°C)和长希安(海拔高度1200米，平均最高温度24°C，平均最低温度17°C)。

帕布琼和长希安两地的出苗期为6月8日和6月5日，开花期为9月16日和10月1日，成熟期为10月13日和11月2日。

计算两地开花前和开花后的平均发育速率以及这两个阶段的TU值。可以假设临界温度为0°C。

建立平均温度与此栽培种的发育速率之间的关系。

图12a表示，移植(发育阶段0)和开花(发育阶段1)之间的这一段时间，增加的干物质总量作为水稻发育阶段的函数

按比例分别分配到根和新梢中。图 12b 表示移植和开花之间的这一段时间，新梢增加的干物质作为水稻发育阶段的函数在叶片和茎之间的分配。假设开花之后，增加的干物质全部分配给繁殖器官。

如果发育阶段 0.5 时的生长速率为 200 公斤/公顷·日，那么，增加的干物质总量的 0.92，或 184 公斤/公顷·日被分配到新梢。分配到新梢的部分又以 0.5 的比例分配，即有 92公斤/公顷·日分配到叶片和 92 公斤/公顷·日分配到'茎'。

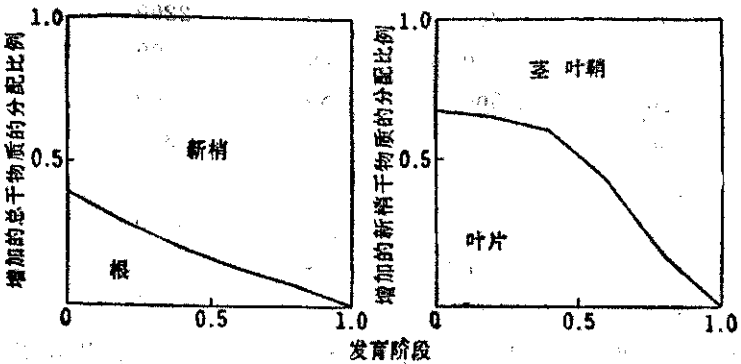


图 12 发育过程中水稻植株各部位的分配系数

练 习 7

在同一地区种植两个旱稻栽培种，每隔 10 天定期地收割，两个栽培种A和B地上部生物量的干重列于下表。

品种A		品种B	
收割时间（天）	生物量（公斤/公顷）	收割时间（天）	生物量（公斤/公顷）
0	50	0	50
10	100	10	100
20	200	20	200
30	400	30	400
40	800	40	800
50	1400	50	1400
60	2200	60	2200
70	3300	70	3300
80	4600	80	4600
90	6300	90	6300
100	8400	100	8100
110	10500	110	9500
120	11900		
125	12500		

0天为出苗；从出苗到开花，品种A为95天，品种B为80天。计算不同收获时间两个品种叶、茎和籽粒的干重。计算中使用的分配系数在图12中给出。假设温度状况恒定。

（注：图12的分配系数是发育阶段而不是年龄的函数）

2.2.3 玉米的发育和干物质分配

当日平均温度在20°C以上时，玉米从出苗到成熟的全生育期为：短生育期品种80～110天，中生育期品种110～140天。在低温条件下，玉米多数作为饲料作物种植，因为与低温，特别是与生长季节后期的低温相关的生长期的延长，不

允许玉米如期成熟。

玉米被认为是光期纯感植物或短日照植物。花分为雄花和雌花两部分。雄花是长在植株顶部的穗状花；雌花是沿茎中部节的穗轴中长出的(图13)。吐丝表示开花以前的时期结束。出苗和吐丝之间的间隔周期受遗传因子和环境条件的影响。对于多数普通的栽培种来说，从吐丝到成熟的时间在正常环境条件下是相同的，平均为50～55天。

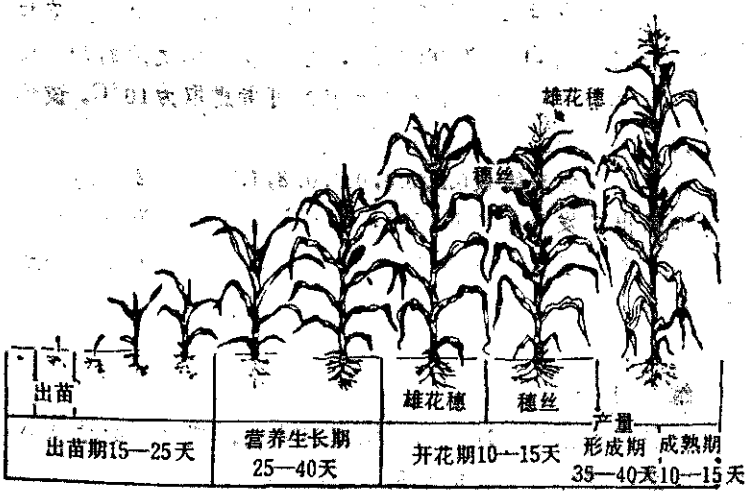


图13 玉米的发育阶段 (资料来源：Doorenbos和Cassan，1979)

测定出苗到抽丝的温度需要量，最常用的方法是对日平均温度直接求和，基础温度取10°C。Mederski 等(1973)为品种Ohio401、DekalbXL45 和 Pioneer3306 建立的TU值分别为：出苗和吐丝之间为 625，640 和 755 日°C，吐丝以后时期为650，655和635日°C。后一TU值可能因对成熟的定义不同而异。在他们的个例中，成熟被定义为在籽粒基部产生一黑色层的时刻，这一黑色层标志着籽粒有效充实期的结束。与水

稻相似，3个栽培种吐丝以后时期的TU 值几乎相同，皆为650日°C。20°C时，这一时期的平均周期为650/(20--10)=65天；25°C时，平均周期则为650/(25—10)=43天(基础温度为10°C)。相应的发育速率分别为1／65或0.0154／日，和1／43或0.0233／日。

练 习 8

在一个地方种植一个玉米种(气温资料列于表8)出苗和吐丝这段时期的TU值为760日°C，吐丝和成熟之间的TU 值为660日°C。两个时期温度临界值都可考虑取为10°C。该作物6月1日出苗。

计算到达发育阶段0.2，0.4，0.6，0.8，1.0，1.5和2.0的日期。

如果出苗发生在6月15日，上述计算日期应为何时？

对于两个出苗期计算在吐丝前和吐丝后两个时期的平均发育速率。

练 习 9

一种玉米作物以10天的间隔定期收割。把收割的植株分成叶和茎，植株各部位的干重如下：

日 期	叶重(公斤／公顷)	茎重(公斤／公顷)
6月10日	200	0
6月20日	1400	300
6月30日	2800	800
7月10日	4500	2000
7月20日	5700	3800

出苗期是6月1日；吐丝期为8月5日。

画出作为作物发育阶段函数的分配到叶片中的增重比例

表 8　练习 8 采用的平均气温

日期	6 月	7 月	8 月	9 月
1	16	20	24	33
2	15	22	26	30
3	14	21	25	30
4	16	19	26	29
5	18	18	27	28
6	17	18	24	30
7	16	20	25	29
8	13	19	24	28
9	10	21	26	29
10	9	21	27	28
11	12	22	28	27
12	16	23	30	30
13	20	30	31	26
14	23	20	28	25
15	22	24	31	26
16	19	24	30	25
17	18	23	29	24
18	18	22	28	27
19	16	23	31	24
20	20	26	32	25
21	22	22	31	24
22	21	23	30	22
23	24	24	29	23
24	21	23	29	22
25	20	24	30	23
26	19	26	26	22
27	20	25	33	24
28	19	26	28	25
29	23	25	29	24
30	18	24	26	23
31		25	33	

的图形。假设温度状况不变。

用练习9中对吐丝前使用的同样方法，从所得到的试验数据中可以建立玉米的分配模式(图14)。

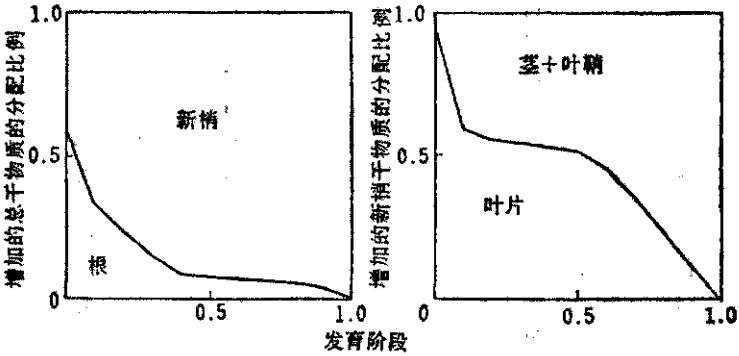


图14　玉米发育过程中植株各部位的分配系数

2.2.4　木薯的发育和干物质分配

就农业生产而论，木薯是一种几乎完全通过茎插条繁殖的多年生植物。现存的许多栽培种，其发育模式根据周围的气候条件不同而异。短生育期栽培种在移植后6～12个月收获；长生育期栽培种常常可以留在田间达两年或两年以上。与水稻和玉米不同，木薯的经济产物不是籽粒，而是贮藏根，这种根主要由淀粉组成。如果环境条件对开始贮藏有利，主要是在光周期控制之下，贮藏根在移植后8周左右开始形成。在短日照条件下，贮藏根很快开始出现，但当日照长度超过10～12小时，贮藏根的出现延缓，并且产量必然降低。因此，木薯多数种植在北纬15°和南纬15°之间。

木薯的发育可以分为三个阶段：

——定植，

——生长早期和叶的形成，

——叶的形成和贮藏根的淀粉积累同时进行，持续期可达一年以上。图15表示生育期为两年的木薯不同植株部位的

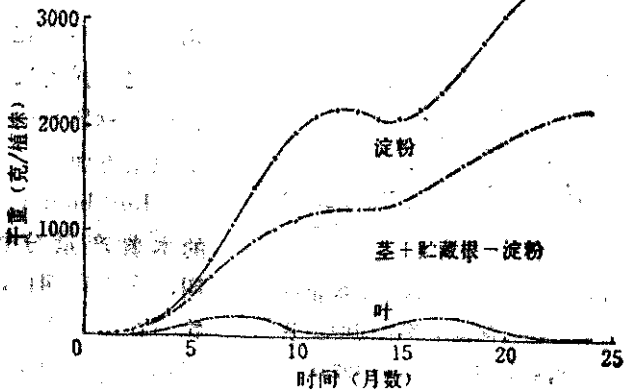


图 15　木薯在生育过程中不同植株部位的干重

（资料来源：Cours，1984）

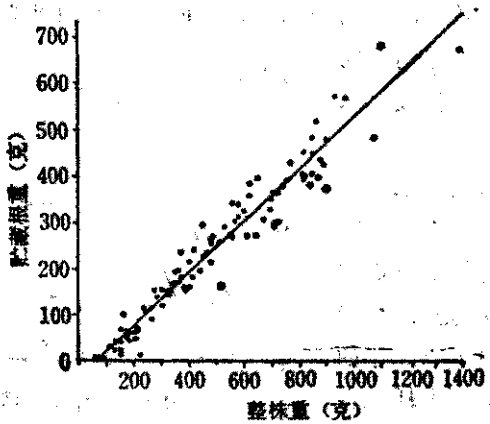


图 16　木薯植株整株干重和贮藏根干重之间的关系

（资料来源：Boerboom，1978）

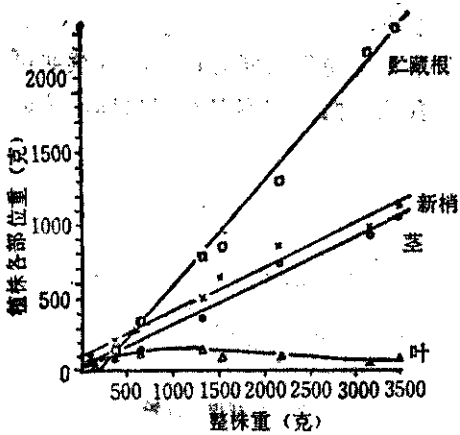


图17　木薯栽培种整株干重和植物各部位干重之间的关系

（资料来源，Boerboom，1978）

干物质积累过程。该图表明，根中淀粉的积累从定植后四个月开始，叶重呈现增与减的季节性变化，这种变化方式也反映在其他植物器官的干物质积累方面。

Boerboom(1978)的木薯产量分析表明，在生育期内，干物质在贮藏根和茎或新梢中的分配不随时间而变(图16和17)。描述不同植株部位分配模型的主要参数是：贮藏根生产开始时的植株总重，由X轴上的截距表示；贮藏根生产效率，由图16和图17中回归线的斜率表示。

以对水稻采用的同样方法，用试验数据来确定分配系数(图18)。对于目前的程序来说，生长周期限于1年，因为要确定更长生长周期的分配系数是不可能的，这是由于第二年的叶片形成主要消耗现存贮备，而不消耗当前的干物质产量(图15)。

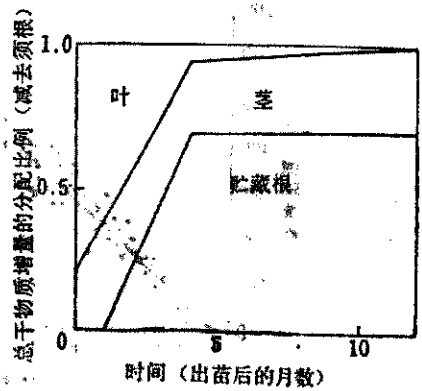


图18　生育过程中木薯各植株部位的分配系数

图18的自变量不象水稻和玉米那样是发育阶段，而是出苗后的时间。这个图形所涉及的试验是在布伊滕佐尔格（印度尼西亚的爪哇）进行的。该地光周期为12小时左右，即处于最佳光照条件下。之所以采用这样的描述是因为，确定完成不同发育阶段的温度需要量，或者从已有的数据中确定发育速率似乎是不可能的。为了达到数据处理的一致性，可以假设一种全年恒定的发育速率，把X轴上的标尺定为0到1，即采用1／365或0.00274／日的发育速率。

2.3 作物潜在产量的一个简单模型

H. van Keulen

2.3.1 引 言

在2.1节中，作物潜在产量被解释为在整个生育期间，以最优方案供应水分和全部基本营养元素，并且在没有杂草和病虫侵扰的情况下，绿色作物地上部的总干物质产量。从这一概念出发，正如2.2节概括的那样，通过考虑特定作物种或栽培种的物候学发育以及有关干物质在植株不同器官中的分配，就可以进一步估算出潜在产量，即在经济上有用的植株部位的产量。这一节将仅以辐射和温度状况为依据，介绍一种计算若干作物总干物质产量和经济产量的方案。

这一计算方案的原理是，从某一时间点开始进行重复计算，在这个时间起点上，作物状况可通过由试验数据确定的或由其他已知关系估算的数量项来加以描述。对于多数作物来说，一个适宜的时间起点就是出苗，出苗被解释为幼苗由依靠种子贮备生长，过渡到依靠同化过程中形成的碳水化合物生长的那一时间。移栽的水稻是一种特殊情况，秧苗在苗

床上生长到一定时间后连根拔起，并再移植到它生长至最后成熟的大田。那么，移栽的时间就是一个较好的起点。

计算开始时，作物的状态是通过可测定的数量描述的，例如植株地上部的重量、根和在同化过程中有效的绿叶面积的重量。从这种状态和从各个时期的环境条件出发，可以计算出诸如同化作用和呼吸作用等有关过程的速率。这些基本过程控制着各种可计算量的变化速率。当知道了相应时间间隔内的变化速率和开始时的数量，就可得出该期结束时的数量，用数学符号表示为：

$$Q_{t+\Delta t}=Q_t+R_q\cdot\Delta t \qquad (7)$$

其中：$Q_{t+\Delta t}$是时间$t+\Delta t$时的数量；

Q_t是时间t时的数量；

R_q是时间间隔Δt期间数量Q的变化速率；

Δt是开始期和结束期之间的时间间隔。

练　习　10

如果Q的单位是公斤／公顷，Δt的单位是天，R_q的单位是什么？假设$Q_t=200$，$R_q=15$和$\Delta t=10$，$Q_t+\Delta t$应是多少？

然后，对下一个时间间隔重复这些计算，并如此继续下去，直至该作物生长周期的结束为止。用这种方法可以得出生长曲线，即积累的干物质产量(2.1节)。根据2.2节给出的系数，利用每一时间间隔内生产的干物质的分配关系，就可以算出不同器官的重量。分配系数是植物生长发育阶段的函数，因此这个量也必须计算。可以应用2.2节提出的方法，将生长过程中的平均大气温度相加，并将某一时间的累积温度和除以完成某一物候阶段所要求的温度之和，所得到的比值

即为所要求的量，将其定义为发育阶段。

本方法遵循这样的假设，即在一个时间间距开始时计算出的变化速率在该段时间内不变化。这一假设限制了所使用的时间间距。在理论上，必须采用无限小的时间间距，因为即使在一个很小的时间间距上变化速率也存在不同的数值，它们可能导致下一个小的时间间距内出现不同的变化速率。但是，从实际观点看，那几乎是不可能的。此外，即使时间间距是有限的，这种偏差也常在合理的限度内。在我们的方法中，选择10天作为时间间距，这样做一方面可以在袖珍计算器上以合理的时间进行为期几百天的全生育期的计算，另一方面也可为我们所追求的目的产生一个可以接受的结果。

上述计算方法的原理也是系统分析和模拟中采用的状态可变方法的基本原理。该方法将不在本书中详细阐述；有关这种方法的说明参见 de Wit和Goudriaan(1978)与Penning de Vries和van Laar(1982)。

练　习　11

在生物科学中，生长速率，即数量增加的速率常与现有数量呈正比，因而：

$R_q = a.Q_t$

当Q_o＝5公斤／公顷(Q_o是时间为0时的数量)和比例系数a＝0.1日时，取Δt为5天，计算30天为期的数量Q的时间过程。当Δt＝3天时，重复上述计算。比较这两种结果，你注意到了什么？对其差异进行解释。

2.3.2　一个实例

这个例子涉及到用水稻品种IR8做的一项试验，该品种

是国际水稻研究所培育的高产品种(HYV) 之一。试验在南美洲苏里南的帕拉马里博(北纬 5 °49′，西经55°09′)进行，水稻于1972年 11 月 10 日移栽(van Slobbe,1973)。计算中用的气温从试验期间报告的 10 日平均值获得，辐射以报告的日照持续时间的月平均值计算(3.1节)。这些数据被用来计算潜在的总CO_2同化作用(2.1节)，结果列于表 9 。

表 9　在苏里南的帕拉马里博以 CH_2O 表示的潜在每日总同化作用

日　期	F_{gm}(公斤/公顷·日)	日　期	F_{gm}(公斤/公顷·日)
1 月15日	332	7 月15日	417
2 月15日	344	8 月15日	454
3 月15日	368	9 月15日	
4 月15日	364	10月15日	
5 月15日	354	11月15日	336
6 月15日	378	12月15日	283

这一计算程序表 10 中作了详细说明；以下正文中的有关字母系指表 10 中的行次，由表的最后第一列(24 列)给出。

表 10　潜在产量计算表

项　次	1	2	3	4	5	6	7	8
日　期	T_a	TSUM	DVS	GASS	MRES	ASAG	DMI	FR
1　11月 2	27.2	272	0.18	60.5	2.1	58.4	40.9	0.35
2　11月 3	26.3	535	0.36	127.2	8.2	119.0	83.3	0.165
3　12月 1	25.8	793	0.53	216.0	20.7	195.3	136.7	0.075
4　12月 2	26.4	1057	0.70	260.4	41.2	219.2	153.4	0.07
5　12月 3	26.3	1320	0.88	295.0	64.2	230.8	161.6	0.07
6a　1 月 1 — 7	26.0	1502	1.00	316.0	88.5	227.5	159.3	0.025
6b　1 月 8 —10	26.0	1580	1.10	316.0	71.2	244.8	195.8	0
7　1 月 2	26.0	1840	1.43	332.0	75.7	256.3	205.0	0
8　1 月 3	26.0	2100	1.75	336.0	91.7	244.3	195.4	0
9　2 月 1 — 8	26.0	2308	2.00	319.6	107.6	212.0	169.6	0

续表

项目	次期	9 IWRT	10 WRT	11 FL	12 IWLV	13 WLV	14 FS	15 IWST	16 WST
			40						
1	11月2	14.3	183	0.395	16.2	100			0
2	11月3	13.7	320	0.445	37.1	262	0.255	10.4	104
3	12月1	10.3	423	0.48	65.6	633	0.39	32.5	429
4	12月2	10.7	530	0.40	61.4	1289	0.445	60.8	1037
5	12月3	11.3	643	0.265	42.8	1903	0.53	81.3	1850
6a	1月1—7	4.0	671	0.06	9.6	2331	0.665	107.6	2925
6b	1月8—10	0	671	0	−48.0	2398	0.225	35.8	3176
7	1月2	0	671	0	−45.1	2254	0	0	3176
8	1月3	0	671	0	−36.1	1803	0	0	3176
9	2月1—8	0	671	0	−28.8	1442	0	0	3176
						1212	0	0	3176

项目	次期	17 FG	18 IWGR	19 WGR	20 LAI	21 TADW	22 TDW	23 TDWL	24 行次
1	11月2				0.25	100	140	140	a
2	11月3	0	0	0	0.65	366	549	549	b
3	12月1	0	0	0	1.6	1062	1382	1382	c
4	12月2	0	0	0	3.2	2326	2749	2749	d
5	12月3	0	0	0	4.75	3753	4283	4283	e
6a	1月1—7	0	0	0	5.8	5256	5899	5899	f
6b	1月8—10	0.69	125.6	879	6.0	6453	7124	7124	g1
7	1月2	1.0	195.8	1466	5.6	7040	7711	7567	g2
8	1月3	1.0	205.9	3516	4.5	9090	9761	9166	h
9	2月1—8	1.0	195.4	5470	3.6	11044	11715	10757	i
		1.0	169.6	6827	3.0	12402	13073	11886	j

a 行指时间为零时的状态，因为它涉及移栽的水稻，所以选择移栽那天为零。移栽后的根干重等于 40 公斤/公顷（第10列）；地上部干重为 100 公斤/公顷，全部由叶片组成（第 13 列）。假设叶片的面积和重量之间有一恒定的比值，则为同化

过程截取太阳能的绿色面积可以从叶片的重量计算出。这一比值称为比叶面积，以每公斤叶片干物质具有的绿色面积的平方米数表示。对于水稻来说，这一比值为25，那么绿色面积就是2500米^2/公顷。以此为基础，可以算出叶面积指数(LAI)即叶面积对土表面积的比值，由于1公顷面积是10,000米^2，所以移栽时的叶面积指数等于0.25（第20列）。

b行描述生长期第一个10天的状态。这期间平均气温为27.2°C（第1列），积温即为272日°C（第2列）。如2.2节解释的那样，积温是衡量作物物候发育阶段的量度。假设基础温度为0°C，则品种IR 8开花前期的温度需要量为1500日°C。发育阶段（第3列）是通过求累积的温度和与数值1500日°C的比值计算出的，即272/1500＝0.18。

表11　截取光不完全时总同化作用的降低系数

LAI	降低系数	LAI	降低系数
0.	0.	2.5	0.86
0.25	0.13	3.0	0.91
0.5	0.33	3.5	0.94
1.0	0.55	4.0	0.96
1.5	0.70	4.5	0.98
2.0	0.80	5.0	1.0

表9列出的以CH_2O表示的潜在每日总同化作用F_{gs}值是对全年每月月中而言的，单位是公斤/公顷·日。对表9列出的两个数值进行内插可以得到任一10天的值。对于11月的第二个10天来说，此值可以直接从表中查出：336公斤/公顷·日。这一数值代表潜在的总同化作用，即通过一个密闭的可以截取全部射入能量的绿色冠层所实现的同化作用。当叶面积指数为0.25时，只能截取部分太阳能，因此由环境支配的潜力就不能发挥出来。不同LAI值的降低系数列于表11，

它是由 2.1 节的方程 5 计算得来的。LAI＝0.25 时，降低系数等于 0.18。第 4 列介绍的是总同化速率(GASS)：

GASS＝336×0.18＝60.5 公斤/公顷·日

正如 2.1 节所阐述的那样，为了维持现存的结构，同化过程中固定的部分能量为作物的呼吸作用所消耗。对于水稻植株的营养生长物质来说，在开花阶段以前，特别是在潜在的生产状况中物质的氮素含量较高时，我们假设相对维持呼吸速率为每日每公斤干物质需消耗 0.015 公斤 CH_2O。因此，以 CH_2O 表示的维持呼吸作用速率，可用现有总的生命干物质(第 23 列)乘以相对维持呼吸作用速率R_m而求得：

维持呼吸作用速率 (MRES) ＝140×0.015＝2.1 公斤/公顷·日(第 5 列)

用于作物干重增加的有效同化产物的数量，等于总同化量与维持呼吸作用的速率之差：

有效同化产物数量(ASAG)＝60.5－2.1＝58.4 公斤/公顷·日(第 6 列)

最初的同化产物转化成植物结构物质必然再失去能量。在现在的方法中，这种生长呼吸作用是由其补数——转化效率E_g来表示的(2.1节)。这意味着干物质增重等于转化效率乘有效同化产物。对于平均组成的营养物质来说，E_g＝0.7。于是：

干物质增重(DMI)＝0.7×58.4＝40.9 公斤/公顷·日(第 7 列)

干物质的总增加量同时也为不同植株部位的生长所利用。在早期阶段，存在根、叶片、叶稍和茎的生长。在潜在的生长条件下，分配到每个器官的增量部分主要由作物的物候阶段决定(2.2 节)。在表 12 中，分配到每一器官的比例是作

为发育阶段的函数给出的。

根、叶和茎加叶鞘的分配系数的瞬时值可以从此表通过内插法读出。自变量，即发育阶段取 10 天期间的开始和结束之间的中值，因此，对于这一时期应为：(0+0.18)/2=0.09。

表 12　作为发育阶段函数的干物质在不同植物器官中的分配系数

发育阶段	f_r	f_l	f_s	f_g
0	0.6	0.375	0.025	0
0.1	0.325	0.40	0.275	0
0.2	0.225	0.425	0.35	0
0.3	0.14	0.46	0.4	0
0.4	0.075	0.485	0.44	0
0.5	0.075	0.475	0.45	0
0.6	0.07	0.42	0.51	0
0.7	0.07	0.32	0.61	0
0.8	0.055	0.21	0.735	0
0.9	0.04	0.1	0.36	0.5
1.0	0.	0.	0.	1.0
2.0	0.	0.	0.	1.0

第 8 列介绍的是分配到根的部分，其分配系数等于 0.35。于是，根干重的增长速率为：

根干重增长速率(IWRT)＝0.35×40.9

＝14.3公斤/公顷·日(第 9 列)

此期结束时根系的重量，可以从第 9 列的增长速率乘以时间间距的长度，加上前 10 天结束时的重量而获得(a行，第10列)。于是：

根系重 (WRT)＝40＋14.3×10＝183 公斤/公顷 (第 10 列)

发育阶段为 0.09时，干物质增长量分配到叶片的比例可

以从表 12 中得到，其分配系数为 0.395，于是可以计算出叶片干重的增长速率为：

叶片干重的增长速率(IWLV)＝0.395×40.9

＝16.2 公斤/公顷·日(第12列)

10 天结束时，叶片的重量可以通过增长速率乘以 Δt，再与 10 天开始时的数值(a行，第13列)相加而获得。因此：

叶片重(WLV)＝100＋16.2×10＝262 公斤/公顷(第13列)

地上部植物物质的余下部分在本方法中指定为‘茎’。‘茎’不仅由真实茎组成，而且还包括叶鞘和叶耳。对于现在的 10 天来说，发育阶段为 0.09 时，增长量分配到茎的比例可从表 12 中得出，其分配系数为 0.255。茎干物质的增长速率等于分配系数乘以总的干物质增长速率：

茎干物质增长速率(IWST)＝0.255×40.9

＝10.4 公斤/公顷·日(第15列)

10天结束时，茎的重量可从增长速率乘以时间间距的长度，再加上前10天结束时的重量(a行，第16列)得到：

茎的重量(WST)＝0＋10.4×10

＝104 公斤/公顷　　(第16列)

这10天期间作物仍然处于营养生长阶段，所以分配到籽粒的比例为零，第 18 和 19 列也保持为零。

10天结束时的叶面积指数，可以通过叶片干重(第13列)乘以比叶面积25，并考虑到地表面积而获得：

叶面积指数(LAI)＝$262\times25\times10^{-4}$

＝0.65 米²/米²　　(第20列)

10天的全部计算完成时，为了有助于同测定的数据相比较，还要计算3个辅助变量。第21列介绍的是地上部的总干重，它是叶片(第13列)、茎(第16列)和籽粒(第19列)干重之和。于是：

地上部总干重(TADW)＝262＋104＋0

＝366公斤/公顷

植物生长的总干重(第22列)等于地上部干重加根系干重(第10列)：

植物生长总干重(TDW)＝262＋104＋0＋183

＝549公斤/公顷

受维持呼吸作用支配的生命物质总干重（TDWL，第23列）等于植物生长的总干重，因为没有出现死亡的物质。即这种计算方法把第一个10天的处理程序全部做完，就可以重复下一个10天进行计算。

第2期（c行）的条件与前一期的条件没有根本的差别，所以对C行的计算不作详细的论述。

c行给出11月最后10天的状态。本期平均大气温度为26.3°C(第1列)，结束时作物的积温，可以通过这10天的263日°C加上此期开始时积温值(b行第2列)而获得。因此，c行第2列的值等于：

积温(TSUM)＝272＋263＝535日°C

发育阶段的相应值等于第2列的值除以该品种开花前期要求的温度和(1500日°C)：

发育阶段(DVS)＝535/1500＝0.36　　(第3列)

11月最后10天的潜在总同化值可以从表9中通过内插法求得：

总同化值(GRA)＝336＋1/3×(283－336)

$=318$公斤/公顷·日

括号内的第1个值和第2个值分别是12月月中和11月月中的每日潜在总同化量。为了考虑由于叶面积指数低不能完全拦截阳光的影响，潜在同化作用必须乘以表11中叶面积指数为0.65的降低因数：

$$0.33+(0.15/0.5)\times(0.55-0.33)=0.40$$

因此，在第4列中介绍的总同化速率应为：

总同化速率 (GASS) $=318\times0.40=127.2$ 公斤/公顷·日

这一时期的维持呼吸作用，可以从开始时的活植物总干重（第23列）和相对维持呼吸作用速率（0.015公斤 CH_2O/公斤干物质·日）计算：

维持呼吸作用(MRES) $=549\times0.015$

$=8.2$公斤/公顷·日（第5列）

在营养生长的结构干重中增加的有效碳化合物等于：

有效同化产物(ASAG) $=127.2-8.2$

$=119.0$公斤/公顷·日（第6列）

以此为基础，再考虑到转化效率，可以计算出干重增加的总速率：

干物质增长速率(DMI) $=119.0\times0.7$

$=83.3$公斤/公顷·日（第7列）

当采用发育阶段的适当值时，可以从表12中得到不同植物器官的分配系数：

发育阶段(DVS) $=0.18+0.5\times(0.36-0.18)=0.27$

于是得出：

根的分配系数(FR) $=0.165$ （第8列）

叶片的分配系数(FL) $=0.445$ （第11列）

茎的分配系数(FS) $=0.39$ （第14列）

籽粒的分配系数(FG)＝0　(第 17 列)

根干重的增加速率可以根据总干重的增加量乘以分配系数来计算：

根干重增加速率(IWRT)＝0.165×83.3

＝13.7公斤/公顷·日(第 9 列)

10天结束时的总根重等于：

根重(WRT)＝183＋13.7×10＝320公斤/公顷(第 10 列)

叶干重的增加速率可以通过FL 和 DMI 相乘而获得，所以：

叶干重增加速率(IWLV)＝0.445×83.3

＝37.1公斤/公顷·日(第12列)

10 天结束时的干重可以通过增量与已经存在的干重相加得到：

叶重(WLV)＝262＋37.1×10＝633公斤/公顷(第13 列)

茎干重的增加速率可以从干重的总增加量和分配到茎的部分予以计算：

茎重增加速率(IWST)＝0.39×83.3

＝32.5公斤/公顷·日(第15列)

10天结束时的总茎重等于：

茎重(WST)＝104＋32.5×10＝429公斤/公顷(第 16 列)

10天结束时的叶面积指数可从叶片干重中求得：

叶面积指数(LAI)＝633×25×10^{-4}

＝1.6米^2/米^2　(第 20 列)

10天结束时的地上部总干重等于：

地上部总干重(TADW)＝633＋429＋0

＝1062公斤/公顷　(第21列)

植物生长总干重为：

TDW＝633＋429＋0＋320＝1382 公斤/公顷 (第 22 列)

因此，这也就是全部生命物质：

生命物质总干重(TDWL)＝1382公斤/公顷(第23列)

d，e和f行的计算完全按前面计算的相同模式进行，这里不再赘述。

g行给出1月头10天的状态。

第1列：本期的平均气温为26.0°C。

第2列：本期结束时的积温等于

1320＋260＝1580日°C!

可以看出，这是一个超出开花的点。温度和发育的关系在开花前和开花后是不同的，因此，这10天不能在1行内处理，而要分成两部分。第1部分包括直到开花期的那一段时间，这部分时间长短可由开花要求的积温剩余部分来确定，

即：

(1500－1320)/26.0＝7天

于是，第6个10天可以描述如下：

g1行给出本期头7天的状态。

第1列：本期的平均气温为26°C。

第2列：本期结束时的积温等于：

1320＋7×26.0＝1502日°C

第3列：相应的发育阶段经计算为：

1502/1500＝1.0(即开花期)

第4列：本期潜在的总同化速率可从表9获得：

283＋2/3×(332－283)＝316公斤/公顷·日

拦截光的系数等于1(表11)，于是总同化速率等于：316公斤/公顷·日

第5列：从覆盖物总干重中计算出维持呼吸作用速率：

5899×0.015＝88.5公斤/公顷·日

第 6 列：用于结构物质增加的有效同化产物等于：

316.0－88.5＝227.5 公斤/公顷·日

第 7 列：结构物质干重增加的速率等于：

227.5×0.7＝159.3 公斤/公顷·日

第 8 列：发育阶段 0.94 时分配到根的比例可从表 12 查出，等于 0.025

第 9 列：根干重的增加速率等于：

0.025×159.3＝4 公斤/公顷·日

第 10 列：本期结束时根的总干重等于：

643＋4×7＝671 公斤/公顷

第 11 列：分配到叶片的比例等于：0.06

第 12 列：叶片干重增加速率等于：

0.06×159.3＝9.6 公斤/公顷·日

第 13 列：本期结束时叶片总干重为：

2331＋9.6×7＝2398 公斤/公顷

第 14 列：分配到茎的干重比例等于：0.225

第 15 列：本期结束时茎的干重增长速率等于：

0.225×159.3＝35.8 公斤/公顷·日

第 17 列：从表 12 得到的分配到籽粒的干重比例等于 0.69。这一时期是在开花之前，但是，本期产生的同化产物的基本部分暂时贮存在茎中，以后再转移到成长的籽粒中(Yoshida,1980)。因此，在本方法中就将这部分同化产物直接加到籽粒干重中。

第 18 列：籽粒干重的增加速率等于：

159.3×0.69×0.8/0.7＝125.6 公斤/公顷·日

考虑到这样的事实，即最初光合作用产物转化成籽粒结构干物质的效率高于营养生长干物质的转化效率，因此引进 0.8/

0.7 的比率。

第 19 列：本期结束时的籽粒干重等于：

125.6×7＝879 公斤/公顷

第20列：本期结束时的叶面积指数可由叶片干重计算出来：

$2398\times25\times10^{-4}=6.0$米^2/米^2

第 21 列：地上部总干重等于：

2398＋3176＋879＝6453 公斤/公顷

第 22 列：植物生长的总干重等于：

2398＋3176＋879＋671＝7124 公斤/公顷

第 23 列：目前尚无死亡的物质，所以DWLV 等于 7124 公斤/公顷

g2行给出 1 月份上旬余下 3 天的状态。

第 1 列：本期平均温度为 26°C。

第 2 列：本期结束时的积温等于：

1502＋ 3 ×26.0＝1580 日°C

第 3 列：开花期以后，发育阶段数值大小在开花期的数值 1 到成熟时的数值 2 之间变化。开花以后到成熟，这个品种(和多数其他品种)要求的温度和为800 日°C。发育阶段是由本期结束时的积温，减去开花前阶段的积温，除以 800，再加上开花时的数值 1 计算的，于是有：(1580－1500)/800＋ 1 ＝1.10

第 4 列：潜在总同化速率等于前 7 天的数值 316 公斤/公顷・日

第 5 列：维持呼吸作用速率是由总干物重计算得到的。但是，相对维持呼吸作用速率在开花以后 从 0.015 变为 0.01 公斤 CH_2O/公斤干物质・日。这一变化主要与开花后植物生

长物质的氮含量减少有关，甚至当供给植物的氮素很丰富时也是如此。因此，维持呼吸作用速率应为：

7124×0.01＝71.2公斤/公顷·日

第6列：用于干物质增加的有效同化产物等于：

316－71.2＝244.8 公斤/公顷·日

第7列：考虑转化效率后，本期干重增加速率等于：

244.8×0.8＝195.8 公斤/公顷·日

第8，9和10列：开花以后，地上部器官增长停止，籽粒增长明显加快，没有更多的同化产物分配到根系。

第11列：开花以后叶片也停止生长，因此FL＝0

第12列：叶的生命时间有限，因此，一定时间后叶开始衰老和停止功能。开花以后，当基本物质向发育的种子转移时，这一衰老过程加快了；因此，有效叶片的重量在开花后下降；假设下降的相对速率是恒定的，即每日有一恒定比例的叶片衰老。这个常数值等于0.02公斤叶片每公斤叶片每日。叶片干重下降的速率等于WLV×0.02，因此有：

2398×0.02＝48 公斤/公顷·日

第13列：本期结束时活叶片的干重等于：

2398－48×3＝2254 公斤/公顷

第14和15列：开花以后，茎干重没有增加，因此，这两列的数值都是零。

第16列：茎干重保持不变，即为3176公斤/公顷

第17列：开花以后，全部有效同化产物为增长的籽粒所独占，因此，这一比例等于1。

第18列：本期籽粒干重的增加速率等于：

1×195.8＝195.8公斤/公顷·日

第19列：本期结束时的籽粒干重等于：

$879+195.8\times3=1466$ 公斤/公顷

第 20 列：叶面积指数可由叶干重求得：

$2254\times25\times10^{-4}=5.6$ 米^2/米^2

第 21 列：总的地上部干重等于：

$2254+3176+1466+144=7040$ 公斤/公顷

第 22 列：总的冠层干重等于：

$7040+671=7711$ 公斤/公顷

第 23 列：受维持呼吸作用支配的活组织干重等于：

$7711-144=7567$ 公斤/公顷

h行给出 1 月第二个 10 天的各有关参量。

第 1 列：本期平均气温为 26.0°C。

第 2 列：本期结束时的积温等于：

$1580+260=1840$ 日°C

第 3 列：相应的发育阶段等于：

$(1840-1500)/800+1=1.43$

第 4 列：潜在总同化速率等于 332(表 9)，叶面积指数允许充分拦截阳光，因此总同化速率等于：

$332\times1=332$ 公斤/公顷·日

第 5 列：维持呼吸作用速率用活组织重量予以计算：

$7567\times0.01=75.7$ 公斤/公顷·日

第 6 列：对生长有效的同化产物等于：

$332-75.7=256.3$ 公斤/公顷·日

第 7 列：考虑转化效率后，结构干重的增长速率为：

$256.3\times0.8=205.0$ 公斤/公顷·日

第 8 列和第 9 列：数值仍然是零

第 10 列：根重保持不变：671 公斤/公顷

第 11 列：分配到叶的比例为零

第 12 列：活叶片重的下降速率接近于：

$2254 \times 0.02 = 45.1$ 公斤/公顷·日

第 13 列：本期结束时活叶片干重等于：

$2254 - 45.1 \times 10 = 1803$ 公斤/公顷

第 14 列和第 15 列：数值为零

第 16 列：茎重不变，等于 3176 公斤/公顷

第 17 列：分配到籽粒的比例为 1.0

第 18 列：籽粒干重的增加速率等于总干重增加速率：

205.0 公斤/公顷·日

第 19 列：本期结束时籽粒总干重为：

$1466 + 205.0 \times 10 = 3516$ 公斤/公顷

第 20 列：本期结束时的叶面积指数等于：

$1803 \times 25 \times 10^{-4} = 4.5$ 米^2/米^2

第 21 列：植物地上部总干重等于：

$1803 + 3176 + 3516 + 595 = 9090$ 公斤/公顷

第 22 列：植物的总干重等于：

$9090 + 671 = 9761$ 公斤/公顷

第 23 列：活组织总干重等于 9166 公斤/公顷

对 i 行的计算完全可以仿效前一行的模式进行，这里不再讨论。

j 行给出 2 月头 10 天的状态。

第 1 列：本期平均气温为 26.0°C。

第 2 列：本期结束时的积温等于：

$2100 + 260 = 2360$ 日°C

第 3 列：相应的发育阶段为：

$(2360 - 1500)/800 + 1 = 2.075$

因为发育阶段 2 相当于成熟期，故本期的持续时间仅为：

〔800－(2100－1500)〕/26.0＝8

因此，到成熟只有 8 天。

第 2 列：直到本期结束时的积温等于：

2100＋8×26.0＝2308

第 3 列：本期结束时相应的发育阶段为：

1＋(2308－1500)/800＝2.0

第 4 列：2 月头 10 天的总同化速率等于：

332＋2/3×(344－332)＝340 公斤/公顷·日

拦截光的降低系数等于 0.94，因此，本期总同化速率应等于：

340×0.94＝319.6 公斤/公顷·日

第 5 列：维持呼吸作用速率可由活组织总干重计算：

10,757×0.01＝107.6 公斤/公顷·日

第 6 列：用于干重增加的有效同化产物等于：

319.6－107.6＝212 公斤/公顷·日

第 7 列：考虑到转化效率后，总干重的增加速率等于：

212.0×0.8＝169.6 公斤/公顷·日

第 8 列和第 9 列：分配到根的比例和根生长量均为零。

第 10 列：根干重维持原数 671 公斤/公顷。

第 11 列：分配到叶片的比例为零。

第 12 列：叶片干重的下降速率为：

1442×0.02＝28.8 公斤/公顷·日

第 13 列：成熟时的活叶干重等于：

1442－28.8×8＝1212 公斤/公顷

第 14 列和第 15 列：分配到茎的比例和茎干重的增长量均为零。

第 16 列：茎干重不变，等于 3176 公斤/公顷。

第 17 列：分配到籽粒的比例等于 1。

第 18 列：籽粒干重增长速率等于：

169.6 公斤/公顷·日。

第 19 列：成熟时的籽粒总干重等于：

5470＋169.6×8＝6827 公斤/公顷

第 20 列：成熟时绿色叶面积指数由叶片干重计算：

$1212\times25\times10^{-4}=3.0$

第 21 列：地上部总干物质等于：

1212＋3176＋6827＋1187＝12402 公斤/公顷

第 22 列：收获时植物总干重等于：

12402＋671＝13073 公斤/公顷

第 23 列：收获时活组织总重等于：

11886 公斤/公顷

2.3.3 同测定值比较

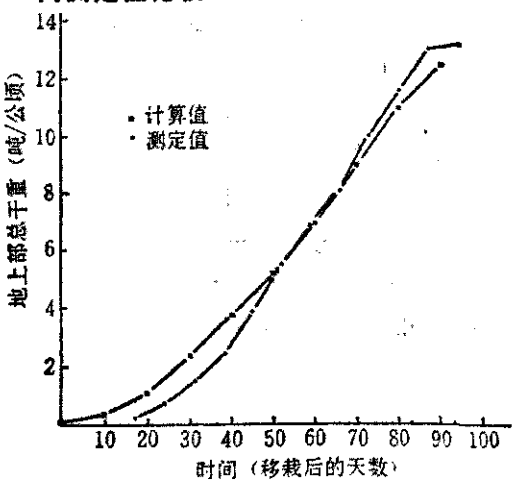


图19 在苏里南帕拉马里博栽种的水稻地上部干物质积累的测定值和计算值的比较

在图 19 中，将计算的干物质生产的时间过程与测定的数据进行了比较，证明两者之间存在令人满意的一致。测定的籽粒产量（含水量为 12%）为 7.5 吨/公顷，测定值非常接近计算值 7.7 吨/公顷(6827×1.12)。

前面分段概述的计算程序，也运用于菲律宾洛斯巴诺斯国际水稻研究所的一套数据。在一项最高年产量试验中，采用了三个不同的栽培种，全年栽种水稻(Yoshida等，1972)。第一个栽培种是IR8，对它采用了与前一节完全相同的参数。另外两个为早熟栽培种，分别是 IR-747-B_2 和IR-677-98。对于这三个种来说，从移栽到开花要求的积温被定为 1100 日°C，即温度为 20°C 时的发育速率为 0.0182/日。

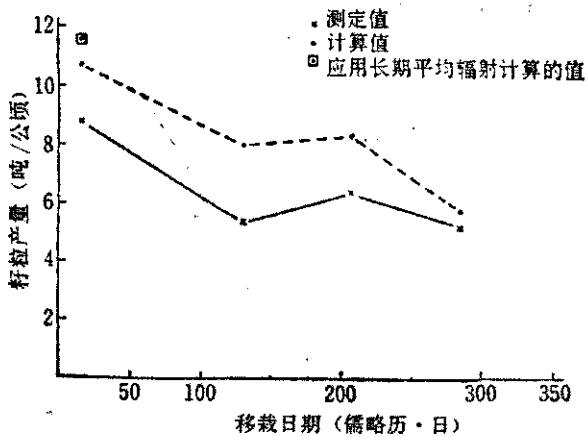


图 20　菲律宾洛斯巴诺斯国际水稻所不同移栽期水稻籽粒产量的测定值和计算值

图 20 给出这项试验的计算结果与测定数据。该图表明，测定数据和计算结果在籽粒产量随移栽时间变化的型式是相同的，但计算结果始终偏高。因此，试验中由天气条件控制

的潜在产量似乎没有得到充分实现。产生差异的原因只能靠推测，但是施用125～150公斤N/公顷的氮肥，其中三分之二以上作为基肥施用，这对于达到6000公斤/公顷以上的产量来说似乎是很不够的(4.1节)。因此，作者们得出，最高年产量可能超过28 000公斤/公顷的结论似乎是有根据的。如图20表明的那样，根据长期平均辐射资料计算的结果可以认为，1971年辐射情况是不利的，这更支持了上述结论。

图21表示种植在以色列内盖夫沙漠中部，在灌溉条件下的春小麦的测定和计算的生长曲线(Hochman，1982)。该试验用的品种Lachish要求的积温是，出苗到开花为1500日°C，开花到成熟为850日°C，两者的基础温度皆为0°C。模型中用的分段函数将在3.4节给出，在3.4节，同样的试验被用来说明

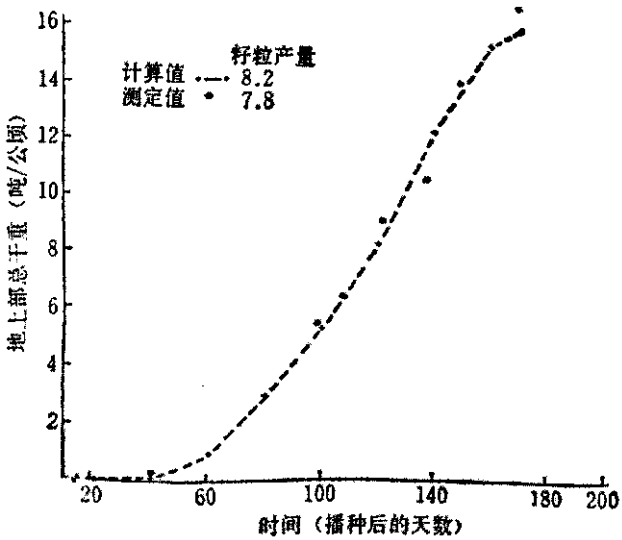


图21　在以色列种植的春小麦，其计算和测定的地上部干物质积累过程

水分短缺对产量的影响。

这些例子说明，在作物特性和气候条件的基础上，可以较为精确地估算出作物的潜在产量。

练 习 12

计算1月20日在洛斯巴诺斯移栽的水稻品种IR8的籽粒产量。本计算所用的基础数据列于表13中。假定每月3个10天周期与表10相同。F_{gs}值为月平均值，而不是如表9所列的适用于月中的值。

表13 练习12的基础数据，以CO_2表示F_{cl}和F_{ov}，以CH_2O表示F_{gs}，菲律宾洛斯巴诺斯，北纬14°

月份	H_a（焦尔/米²·日）	T_a（°C）	H_g（焦尔/米²·日）	f_o —	F_{cl}（公斤/公顷·日）	F_{ov}（公斤/公顷·日）	F_{gs}（公斤/公顷·日）
1月	14.07	23.4	22.60	0.47	616	252	303
2月	18.31	24.5	25.11	0.34	674	281	368
3月	20.03	24.8	28.55	0.37	734	311	393
4月	23.81	25.3	30.82	0.28	781	334	447
5月	21.00	27.0	31.55	0.42	800	342	414
6月	18.48	26.0	31.58	0.52	804	342	385
7月	16.80	26.0	31.60	0.59	803	343	363
8月	15.70	25.3	31.28	0.62	791	339	348
9月	15.96	25.9	29.69	0.58	757	323	344
10月	15.16	25.9	26.78	0.54	698	293	327
11月	13.31	25.3	23.46	0.54	633	261	295
12月	12.31	24.2	21.78	0.54	600	244	278

（王涌清译　杨守春校）

第 三 章

根据土壤有效水分确定作物产量

3.1 潜在蒸发蒸腾量

J. A. A. Berhout和H. van Keulen

3.1.1 引言

大气是植物同化过程所需的CO_2的主要来源。CO_2的供应速度，一方面取决于大气与植物吸收部位之间的CO_2浓度差异；另一方面，也取决于CO_2的运输阻力，其中一部分存在于植物叶片的气孔中(参阅3.3节)。

植物的水分状况影响CO_2的供应速度。因为植物的水势影响气孔的开放，因此，也影响到运输阻力。当植物根系吸水量与气孔蒸腾损失量之间出现负平衡，使植物含水量低于某一临界值时，植物的气孔就关闭，并持续到吸水量与蒸腾量恢复平衡时，气孔才张开，但此时含水量较低。因而，蒸腾与同化和土壤水分供应之间存在着直接而又复杂的相互关系(见3.2节)。

本节的讨论中，蒸腾过程是在植物不受水分供应的限制即所谓潜在蒸腾的条件下，来进行测定的。然后用彭曼(1956)公式进行分析。在这一方法中，水汽的移动被看作是为水汽蒸发提供能量的辐射源和空气湍流共同作用的结果。根据标

准气象站的数据，用上述方法可以求算水分的潜在蒸发蒸腾量。

3.1.2 辐射

太阳的温度为6000 K，可以向任何绝对温度在0K以上的黑体辐射能量。太阳常数，即在地球处于日地平均距离时，正好位于地球大气上界而垂直于入射辐射的平面所接收的平均太阳辐射能量。其数值为1.4千焦耳/米^2·秒。

练 习 13

在旧单位制中，太阳常数用卡/厘米^2·分表示。以这种单位表示的太阳常数的数值为多少？

经过大气层时，由于大气中的臭氧、水汽、云和尘埃的存在，一部分辐射能被吸收、散射和反射。在少数气象站，总辐射是直接测定的；而其他气象站，很可能是根据实测的日照时数，用经验公式来估算总辐射的平均值。这一关系式就是埃斯屈朗方程：

$$R_1 = R_A(a_A + b_A \cdot nN^{-1})$$

式中，

R_1为实际接收的辐射(焦耳/米^2·日)。

R_A为Angot值，或假定没有大气时到达地面的辐射理论值(焦耳/米^2·日)。R_A值与一年中不同日期和纬度的函数关系列于表14。

nN^{-1}为实际日照时数(n)与晴天时每天的最长日照时数(N)之比，两者的单位均为小时。大多数气象站都记录实际日照时数，而最长日照时数可从表15查出。

表14 Angot值(10^7焦/米^2·日)与纬度和日期的函数关系

北 纬	Angot 值															
(度)	13日/1月	4/2	26/2	21/3	13/4	6/5	29/5	22/6	15/7	8/8	31/8	23/9	16/10	8/11	30/11	22/12
90	—	—	—	—	1.77	3.23	4.18	4.51	4.16	3.20	1.75	—	—	—	—	—
80	—	—	0.03	0.65	1.77	3.18	4.12	4.44	4.10	3.16	1.75	0.64	0.03	—	—	—
70	—	0.10	0.55	1.28	2.20	3.13	3.93	4.24	3.91	3.11	2.17	1.27	0.54	0.10	—	—
60	0.30	0.61	1.15	1.87	2.66	3.39	3.91	4.10	3.89	3.35	2.63	1.85	1.14	0.61	0.30	0.21
50	0.86	1.21	1.75	2.41	3.06	3.63	4.01	4.14	3.99	3.60	3.03	2.38	1.73	1.20	0.85	0.74
40	1.46	1.82	2.31	2.87	3.38	3.81	4.07	4.15	4.05	3.77	3.34	2.83	2.28	1.80	1.46	1.33
30	2.07	2.38	2.80	3.24	3.62	3.89	4.05	4.08	4.02	3.85	3.58	3.20	2.77	2.36	2.06	1.95
20	2.64	2.89	3.22	3.52	3.74	3.86	3.91	3.91	3.89	3.83	3.70	3.48	3.18	2.87	2.62	2.53
10	3.15	3.33	3.54	3.69	3.75	3.74	3.69	3.65	3.67	3.71	3.71	3.65	3.49	3.30	3.13	3.07
0	3.58	3.67	3.75	3.75	3.65	3.50	3.37	3.31	3.35	3.47	3.61	3.70	3.71	3.64	3.56	3.53
−10	3.92	3.92	3.85	3.69	3.45	3.18	2.96	2.88	2.95	3.15	3.41	3.65	3.81	3.88	3.90	3.91
−20	4.16	4.05	3.84	3.52	3.14	2.76	2.48	2.37	2.47	2.74	3.10	3.48	3.80	4.01	4.14	4.18
−30	4.29	4.07	3.72	3.24	2.74	2.27	1.95	1.82	1.94	2.25	2.70	3.20	3.67	4.03	4.27	4.36
−40	4.32	3.99	3.46	2.87	2.25	1.73	1.38	1.24	1.37	1.71	2.23	2.83	3.43	3.95	4.30	4.43
−50	4.26	3.80	3.15	2.41	1.71	1.16	0.81	0.69	0.80	1.15	1.69	2.38	3.11	3.77	4.24	4.42
−60	4.15	3.54	2.73	1.87	1.13	0.59	0.28	0.20	0.28	0.58	1.11	1.85	2.70	3.52	4.13	4.38
−70	4.18	3.28	2.25	1.28	0.53	0.10	—	—	—	0.10	0.53	1.27	2.23	3.26	4.16	4.52
−80	4.38	3.33	1.82	0.65	0.03	—	—	—	—	—	0.03	0.64	1.80	3.31	4.36	4.74
−90	4.45	3.39	1.82	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1.80	3.35	4.42	4.81

表15 最大日照时数(小时)与纬度和日期的函数关系

纬度（北纬或南纬，度）	最大日照时数											
	15日 1或7月	15 2或8	15 3或9	15 4或10	15 5或11	15 6或12	15 7或1	15 8或2	15 9或3	15 10或4	15 11或5	15 12或6
0	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1
10	11.7	11.8	12.0	12.4	12.5	12.7	12.7	12.5	12.2	11.9	11.7	11.5
20	11.1	11.5	12.0	12.6	13.1	13.3	13.2	12.9	12.3	11.7	11.3	11.0
30	10.4	11.2	11.9	12.9	13.6	14.0	13.9	13.3	12.4	11.5	10.8	10.3
40	9.9	10.7	11.8	13.3	14.3	14.9	14.7	13.9	12.5	11.2	10.1	9.5
50	9.2	10.2	11.6	13.8	15.3	16.2	15.9	14.6	12.6	10.9	9.3	8.3
60	7.5	9.2	11.6	14.6	17.0	18.5	18.0	15.9	12.9	10.3	7.2	6.4
70	3.1	7.4	11.4	16.2	18.5			18.7	13.4	9.2	4.7	
80		1.9	10.6						14.8	6.0		

a_A和b_A为经验常数。

上述两个经验常数的数值取决于地理位置或纬度（Glover 和 McCulloch，1958）和气候（Rietveld，1978）。粮农组织（Frere 和 Popov，1979）采用的表征值是：

寒带和温带地区，$a_A=0.18$，$b_A=0.55$

干旱的热带地区，$a_A=0.25$，$b_A=0.45$

湿润的热带地区，$a_A=0.29$，$b_A=0.42$

对于每周或每月的平均值，埃斯屈朗方程的结果很好。

练　习　14

泰国廊曼气象站的地理位置是北纬13°55′，东经100°36′（湿润的热带地区）。测得的每日日照时数的月平均值(n)为：

1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
7.1	5.9	5.9	5.1	4.4	4.0	3.7	2.9	3.3	3.9	4.9	5.9

根据方程（8）、表14和表15计算R_1。

到达地面的太阳辐射有一部分被反射回去。“反射率”(albedo) 这一术语就是表示反射部分的比例。其数值是由地表特性（如开阔的水面、干土、土壤的水分、植被等）和太阳倾角共同决定的。对于水面和完全被绿色植物覆盖的地面，平均反射率的表征值为 0.05 和0.25（Penman，1963）。

大气（包括云）和地面的温度均在绝对温度 0K以上，两者都存在热辐射。此辐射的强度与温度有一定比例关系。由于大气是部分透光的，而地面温度又高于大气，所以，太阳射出的辐射以长波辐射为主。现已有经验公式，可以在气温、湿度和云量的基础上，计算出净射出长波辐射。彭曼（1956）

曾从Brunt方程(Brunt, 1932)得到下式：

$$R_B=\sigma(T_a+273)^4\cdot(0.56-0.079e_a^{0.5})\cdot(0.1+09.nN^{-1})$$

式中， (9)

R_B为净射出长波辐射(焦/米^2·日)。

σ为波耳兹曼常数(4.9×10^{-3}焦/米^2·日·开^4)。

T_a为百叶箱高度上的平均气温(°C)。加上常数273则换算为绝对温度。

e_a为百叶箱高度上的实际水气压(毫巴)。

nN^{-1}为实际日照时数与最大日照时数之比〔见方程(8)〕。

同样，对于时间不到一周的计算，方程(9)也不太适合。

练 习 15

e_a是大气中水汽压的测定值，表示这一水汽分压的单位是毫巴。可根据下述表达式将其转换为其它量纲：

(a) 1毫巴＝100帕。帕(P_a)是国际单位制(SI)中帕斯卡(Pascal)的缩写。

(b) 1毫巴＝$T_k/0.217\times W_w$。W_w是大气中的水汽含量(公斤/米^3)，T_k表示绝对温度(K)。

(c) 1毫巴＝0.75毫米汞柱。毫米汞柱是指水银柱高度。在彭曼(1948, 1956)原来的工作中，常用它作为水汽压的单位。

方程(9)中当e_a以毫巴表示时，系数为0.079。当e_a以公斤/米^3(20°C)，或毫米汞柱为单位时，系数的值应为多少？值为多少？

练　习　16

泰国廊曼气象站每天观测结果的月平均值如下：

月份	气温(°C)	水汽压(毫巴)	月份	气温(°C)	水汽压(毫巴)
1	26.0	22.5	7	28.2	28.7
2	27.4	25.6	8	28.0	30.2
3	28.9	27.9	9	28.2	29.8
4	29.8	29.8	10	28.1	29.3
5	29.3	30.2	11	27.4	27.0
6	28.7	29.2	12	25.6	22.7

计算月平均射出长波辐射(R_B)。

净辐射的方程式为：

$$R_N = R_I(1 - r_a) - R_B$$

式中，

R_N为净辐射(焦/米^2·日)

R_I为入射短波辐射(焦/米^2·日)

r_a为反射率(无量纲)

R_B为净射出长波辐射(焦/米^2·日)

练　习　17

根据廊曼气象站的资料计算开阔水面的月平均净辐射(R_N)。

3.1.3　蒸发

本小节讨论黑色绝热地面上开阔的水面薄层的热量平衡。假定反射率为0.05，根据有关气象资料可计算出吸收的

净辐射〔方程(10)〕。净辐射加热水面，直到其值等于散失到周围大气的显热损失与水分蒸发的热量损失之和。即：

$$R_N = H + LE$$

式中，

R_N为净辐射(焦/米^2·日)，

H为显热损失(焦/米^2·日)，

E为表面的水分损失速度(公斤/米^2·日)，

L为水分汽化的潜热(2450×10^3焦/公斤)，

LE为蒸发的热量损失(焦/米^2·日)。

根据上述公式，水面向周围大气的显热损失，与它们的温度差成正比：

$$H = h_u(T_s - T_a)$$

式中，

H为显热损失(焦/米^2·日)，

h_u为显热传输系数(焦/米^2·日·°C)，

T_s和T_a分别为蒸发面与标准百叶箱高度的温度(°C)。

显热传输系数h_u的数值取决于大气湍流。在确定高度上，h_u可用平均风速的经验公式表示(Penman, 1948)：

$$h_u = a_u(1 + b_u\bar{u})$$

式中，

$\bar{u}$为平均风速(米/秒)，

a_u和b_u分别为经验常数。

对于光滑的地面，在2米的标准高度测定的风速，a_u的表征值为6.4×10^5焦/米^2·日·°C，b_u为0.54秒/米(Frere和Popov, 1979)。

练　习　18

下面是廊曼气象站每天测得的2米高度的风速的月平均值(米/秒)。

1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
2.0	2.5	2.8	2.7	2.5	2.5	2.4	2.5	2.3	2.1	2.1	1.4

计算h_u的月平均值。

与显热的情况类似，水面释放的水汽与水面和周围大气间的水汽压差成正比：

$$E=K_u(e_s-e_a) \tag{14}$$

式中，

E为水汽损失速率(公斤H_2O/米^2·日)，

K_u为水汽传输系数(公斤/米^2·日·毫巴)，

e_s和e_a分别为蒸发面和标准百叶箱高度的水汽压(毫巴)。

水面的空气是处于水汽压饱和状态的。饱和水汽压与水面温度T_s有关。两者的关系可近似地用下式描述(Goudriaan, 1977)：

$$e_s=6.11\times e^{[17.4T_s/(T_s+239)]}$$

式中，

e_s为饱和水汽压(毫巴)，

T_s为水面温度(度)。

显热和蒸发热的交换受湍流和扩散两个物理过程的控制。因此，在显热转换系数和蒸发转换系数之间存在一定的关系(鲍恩比率)，或用下式表示：

$$\gamma = h_u K_u^{-1} \cdot L^{-1}$$

式中，

γ 为湿度计算常数，其数值为 0.66。

练　习　19

什么是干湿表？

γ 的量纲是什么？

将方程(12)、(14)、(15)代入平衡方程(11)，得：

$$R_N = h_u(T_s - T_a) + (h_u/\gamma) \cdot (e_s - e_a) \qquad (17)$$

上述方程中，水面温度 T_s 和蒸发面上空气中的饱和水汽压 e_s 都是未知数。由于它们满足方程(15)的关系式，因此把两个方程联立建立方程组，可以求出蒸发面温度和面上的水汽压。这样，由方程(14)就可求出水面蒸发。

练　习　20

利用练习14、17和18的数据，计算反射率为 0.05时，廊曼地区 1 月份开阔水面薄层的蒸发速率。

为此假定水面温度为20、21、22、23、24°C，先计算显热和蒸发的热量损失。在图上标绘出这些温度点上的两者之和，在同一图中绘出净辐射曲线。从图中查出平衡温度，即水面热量得失相抵时的温度。然后计算蒸发速率。

练习20的作图方法相当麻烦，可以通过把温度与饱和水汽压〔方程(15)〕的关系线性化而使之简化。这种做法是彭曼最先采用的。他采用了以下近似关系：

$$(e_s - e_a) = \Delta(T_s - T_d) \qquad (18)$$

式中，

T_d 为露点，即大气中的水汽开始凝结时的温度；换句话说，也就是大气中的实际水汽压等于饱和水汽压时的温度。方程(18)的关系式可用图 22 描述。

Δ为平均气温与露点之间饱和水汽压曲线的斜率。

练　习　21

水汽压为10、15、20毫巴时，空气的露点温度是多少？

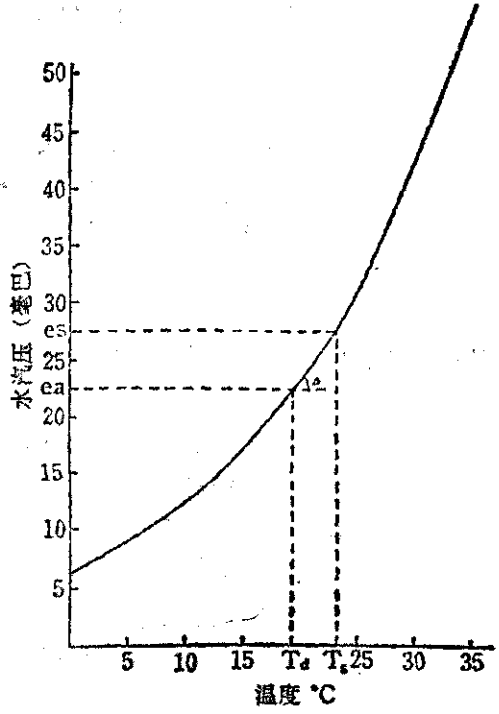


图 22　气温与饱和水汽压的关系。T_a 和T_d分别代表气温和露点；e_s和e_a分别表示大气中的饱和水汽压和实际水汽压。

练　习　22

1月份廊曼地区的Δ值是多少？

计算温度为2，6，8……30，34，38°C时的Δ值，并在图上标绘出各温度点的Δ值。

把方程(18)代入方程(17)，得到：

$$R_N = h_u(T_s - T_a) + (h_u \cdot \Delta/\gamma)(T_s - T_d) \tag{19}$$

式中只有蒸发面温度T_s是未知数。它可以由下式求出：

$$T_s = T_a + \frac{\gamma}{\Delta+\gamma} R_N / h_u - \frac{\Delta}{\Delta+\gamma}(T_a - T_d) \tag{20}$$

练　习　23

证明湿度计算常数γ与饱和水汽压曲线的斜率Δ的单位相同；并求证R_N/h_u的单位为度。

练　习　24

在什么条件下，蒸发面温度等于大气温度？何时前者高于后者？何时低于后者？

推导表示辐射屏蔽良好的干湿表的湿球温度和露点温度之间相互关系的公式。

合并方程(11)、(12)和(20)，得到：

$$LE = \frac{\Delta}{\Delta+\gamma}[R_N + h_u(T_a - T_d)] \tag{21}$$

这就是众所周知的用于自由水面蒸发计算的彭曼(Penman)方程。方程中，$(T_a - T_d)$可以用$(e_d - e_a)/\Delta$替代(e_d是空气温度下的饱和水汽压)。因此，Penman方程可改写成：

$$LE=\frac{1}{\Delta+\gamma}[(\Delta\cdot R_N+h_u(e_d-e_a)] \tag{22}$$

练　习　25

计算1月，3月，5月，7月，9月，11月份廊曼地区自由水面的蒸发速率。

3.1.4　潜在蒸发蒸腾

不透水的角质层可防止植物叶片的水分损失。可是，叶片有许多能通过CO_2的小气孔(3.3节)。气孔内壁是湿润的，因此，气孔内的空气呈水汽饱和状态。与蒸发相比，这些水汽需要克服额外的阻力才能从气孔扩散到叶表面。因此，伸展开的叶片的蒸腾作用低于开阔水面的蒸发作用。另一方面，对于叶面积指数（LAI）大于1的植物冠层，交换面较大。Monteith(1965)考虑到这一因素，因而把原来描述自由水面蒸发的方程进行了修改，用来描述冠层蒸腾。本书不详细介绍他的理论，而只介绍其结果——与方程(22)非常相似的方程：

$$LE=\frac{1}{[(\Delta+\gamma)\cdot(1/h_u+1/C_s)/1/h_u]}\cdot[\Delta R_N+h_u(e_d-e_a)] \tag{23}$$

式中，

C_s是水汽的传导率，单位与h_u相同。

对于作物冠层，C_s表示大量平行叶片的传导率，常称为表面传导率。对于供水良好的作物，即在潜在蒸腾条件下，C_s远远大于h_u。因此，在实际应用中，原来的Penman公式估计作物的蒸腾损失也是很有用的。在缺水时，气孔关闭，

反映为冠层传导率 C_s 减小。

然而，必须考虑水面和绿色作物表面的反射率的差异。对于前者，C_s 为 0.05，而后者大致为 0.25。用此方法计算的水分损失称为在供水良好、郁封、矮小绿色植物表面条件下的潜在蒸发蒸腾。而在种植作物的条件下，无法很好地区分叶片的蒸腾损失与湿润地面的蒸发损失，因而在蒸腾前冠以前缀"蒸发"(evapo)，表示蒸发损失和蒸腾损失的总量。

练 习 26

计算 1 月，3 月，5 月，7 月，9 月，11月份廊曼地区的蒸发蒸腾量。

3.2 土壤水分平衡

P. M. Driessen

在 2.1 节已讨论过，植物生长需要通过表皮层开放的气孔吸收 CO_2。植物吸收的水分大多数又通过上述气孔蒸腾到大气中(见 3.1 节)。水分的日周转可分为：晴天时，根层水分损失不超过 40 000 公斤/公顷·日，相应的作物面蒸腾为 0.4 厘米。如果植物吸收的水分得不到补充，土壤干旱将达到使植物萎蔫，直至最终死亡的程度。根系从土壤吸收水分的吸力等于土壤吸持水分的强度 (tenacity)。这一吸力，俗称为土水势或"基质吸力"，是可以测定的。在水文学中，势(ψ)常常用单位重量土壤水的能量表示，具有长度量纲 (van Bakel, 1981)。植物自由地吸收水分有一个最佳 ψ 范围。大于或小于此范围时，植物表现出协迫作用。它将通过部分或完全关闭气孔控制每天的水分损耗，起主动调节作用。结果

表现为：气孔的关闭防碍 CO_2 输入，降低同化作用，因而干物质产量降低。

因此，任何关于(旱地)作物生产能力的模型都必须注意到土壤水势的变化过程，测定作物出现水分协迫的时间和强度。这样做通常需要借助水分平衡方程。即比较某一时期内已长根的表土中的水分输入和输出，了解两者的差异，从而知道土壤水的变化。这一长根的表土层或称为“根层（root zone)”是由上部(表土）和下部 RD 深度（尚未长根的扎根层深度）组成的连续土层。水分通过上述两个部分进入和离开根区，但也可以直接在根层内移动，即根系的水分吸收。这种吸收几乎完全被蒸发损失。因此，根层土壤水含量的变化速度可用下述水分平衡方程表示：

$$RSM = [IM + (CR - D) - T]/RD \tag{24}$$

式中，

RSM 为根层土壤水含量的变化速率(厘米^3/厘米^3·日)，

IM 为上部根层的净输入速率(厘米/日)，

(CR－D)为下部根层的净输入速率(厘米/日)，

T 为作物蒸腾速率(厘米/日)，

RD 为根层深度(厘米)。

图23描述了作物-土壤-大气系统中，水分的各种输入和输出。如图所示，根层上部的水分供应包括：降雨（速率为 P，单位用厘米/日)、灌溉(速率为 I_e，厘米/日)和可能存在的地面积水（速率为 DS，厘米/日)。地面也存在水分损失(速率为E_a，厘米/日)。因此，地面供应水分的总速率为($P + I_e + DS - E_a$)厘米/日。地面供应的这些水分将以 IM 厘米/日的速率入渗到土壤中。在某些时期，地面供应水分的总速率可能超过水分入渗到该土壤中的最大速率(IM_{max})。此时，多

余的水分就积蓄在地面。地面的最大蓄水能力（SS_{max}，厘米）取决于地面的性质及地面坡度。若多余的水分超过总蓄水能力（$SS_{max}-SS_t$）/Δt，超过的那部分水分则形成径流（SR，厘米/日）而从系统输出。

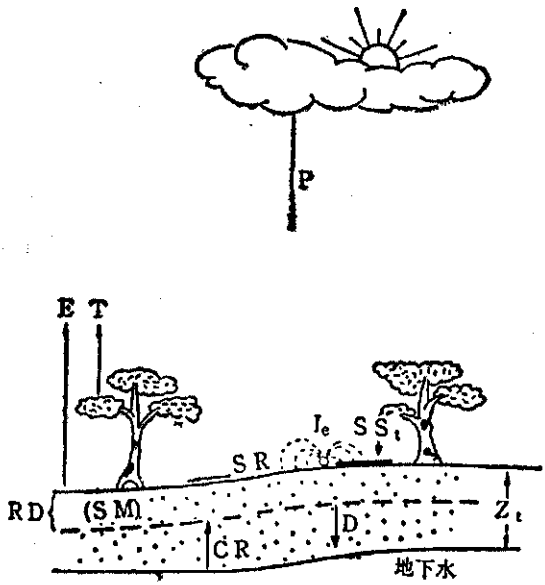


图 23　植物-土壤-大气系统中水分贮存和流动的示意图

由前可知，上部根层的实际入渗速率可表示为：

$$IM=P+I_e-E_a+DS-SR \tag{25}$$

式中，

IM 为实际入渗速率（厘米/日）；

P 为实际降雨速率（厘米/日）；

I_e 为有效灌溉速率（厘米/日）；

E_a 为实际蒸发速率（厘米/日）；

DS 为地面积水减少的速率（厘米/日），当地面积水减少

时，DS为正值，反之为负值；SR为地面径流速率（厘米/日）。

在下部根层(即RD深度)中，根层与地下水之间可能存在水分的垂直移动。地下水进入根层的移动叫毛管上升(CR)；根层水分向地下水移动叫向下渗漏（D）。当然，当CR>0时，不存在水分渗漏(D=0)。反之，CR=0时，不存在水分上升。此外，也有可能出现平衡态，这时CR和D都为0。因此，下部根层的水分移动速率可表示为：

$$(CR-D)=CR-D \tag{26}$$

水分平衡方程(24)可以适合于作物生长周期中的各个时期。根据各个时期开始时系统的状态(见2.3节)，可以求出各个变量的数值。

在讨论水分平衡方程的各项变量之前，简述一下描述土壤水分动力学时所涉及到的几个重要概念是有好处的。

3.2.1 土壤水分动力学的基本原理

土壤水的贮存

土壤是由固体（无机的和/或有机的）颗粒和可以被水分或空气占据的孔隙组成的多孔体。土壤的总孔隙度SM_0（厘米^3/厘米^3)取决于土壤的排列情况和各个土粒的密度（见5.3节)。在完全被水分饱和的土壤中，基质吸力为0。当水分饱和的土壤，受到外加吸力的影响时，最大的孔隙首先开始排水。接着土壤基质产生基质吸力ψ。当基质吸力达到外加吸力的水平时，土壤基质则不再损失水分。换言之，若基质吸力ψ为0，则相应的土壤水含量SM_ψ等于SM_0；若吸力$\psi>0$厘米，则$SM_\psi<SM_0$。SM_ψ的降低与基质吸力ψ的升高并无固定的比例关系。粗的砂质土的大孔隙很多，在

低或中等吸力下就已经损失大量水分。相反，粘土由细颗粒组成，孔隙也小。与大孔隙相比，这些小孔比大孔具有较大的(毛管)吸力。只有当这些强的毛管吸力被同样大的基质吸力所抵消时，水分才能释放出来。由此可以推论，土壤水含量SM_ψ是由基质吸力ψ和所有土壤孔隙的大小及其分布所决定的。后一性质与土壤中颗粒大小分布及其排列大致呈一定的函数关系。

通过图24中细(粘)土、中等细度的土壤(壤土)和粗质(砂)土的典型的SM_ψ与ψ关系式，可以说明上述观点。图中表明，细粒土壤比粗质土壤吸持更多的水分(在此示意图中，忽略了干湿变化过程中的滞后现象，它造成干湿变化过程中ψ-SM_ψ关系曲线的差异)。土壤基质吸力的观测值在0到大

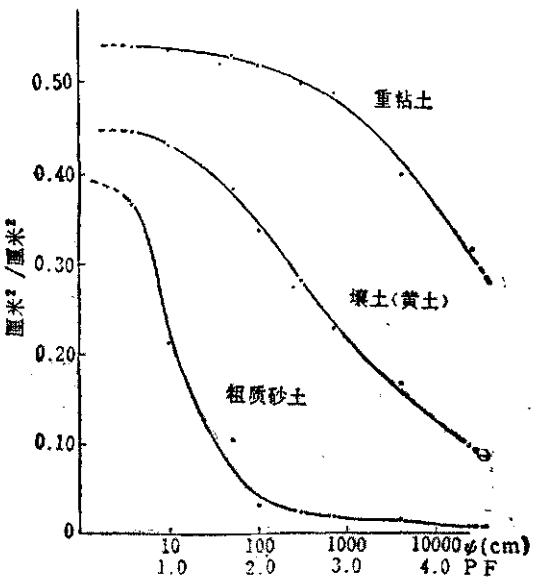


图24　不同质地土壤中$SM_\psi-\psi$的典型函数关系

于 20000 厘米的范围。为了便于绘制在整个范围中描述SM_ψ-ψ 关系的曲线，土壤学家常用 SM_ψ 与 $\log\psi$的关系来表示。这种 SM_ψ-$\log\psi$曲线就叫做土壤的“pF 曲线”。譬如，基质吸力为 16 000 厘米，相应的 pF 值 $\log(16\ 000)=4.2$。在本书中虽不采用这种表示方法，但阅读文献时应该注意。

任何土壤的粒级分布都是可以测定的。为此，在实验室中测定各基质的颗粒大小，并分为下述三级：“砂粒”（直径 0.05～2.00 毫米）、“粉砂粒”（直径 0.002～0.05 毫米）和“粘粒”（直径<0.002 毫米）。

土壤中砂粒、粉砂粒和粘粒的相对比例决定土壤的“质地”类型。图 25 是不同质地类型土壤中，砂粒、粉砂粒和粘粒的含量。如图所示，若土壤含粘粒 0.35 克/克，粉砂粒

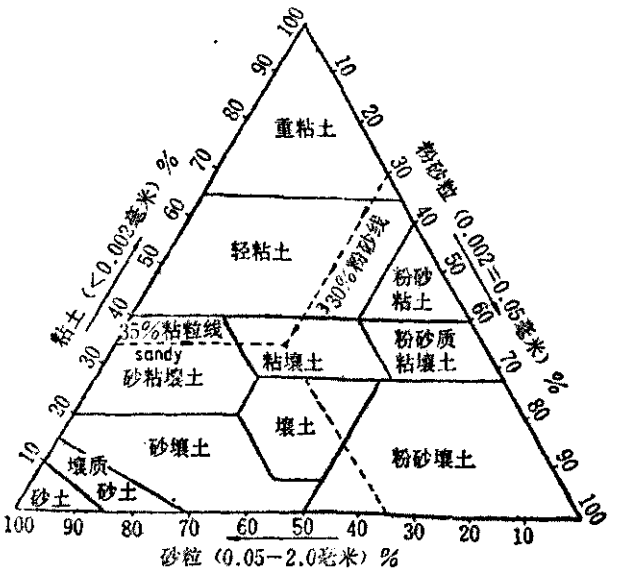


图 25　不同土壤质地类型中砂粒-粉砂粒-粘粒的组成

0.30克/克，则属于“粘壤土”。当然其砂粘含量也就为0.35克/克。

在不太松或太紧的“正常”土壤中，孔隙总体积和孔隙分布与土壤质地类型有良好的相关性。如图24所示，这一关系可以说明：基质吸力随土壤水含量减少而增大；然而，实际上这一关系是由孔隙的两个性质共同决定的。在方程式中，后者常用质地常数 γ 表示。

对在荷兰测定的 $SM_\psi-\psi$ 关系的分析表明，SM_ψ 用下式表述是适宜的：

$$SM_\psi=SM_o\cdot e^{-\gamma\cdot(\ln\psi)^2} \tag{27}$$

表16给出不同土壤质地类型中，SM_o 和 γ 的表征值。方程(27)在某些热带土壤中的适用性有限。这个问题将放到5.3节详细讨论。

练　习　27

一种土壤含粘粒0.20克/克，粉砂0.40克/克。确定其质地类型（根据图25）。若土壤基质吸力 ψ 为1000厘米，确定其土壤含水量（利用方程(27)和表16）。

土壤水分流动

土壤中的水并不是完全静止的，它可以在孔隙中以一定速率移动，该速率与土壤孔隙的“水力梯度”成正比，与其阻力成反比。使水分移动的驱动力称为水头，包括基质力和重力。在水分饱和的土壤中，由于不存在基质吸力，因此水分的流动只受重力的作用。水头 H_n 与流动距离 L_n 的比率就是水力梯度。其相应的孔隙阻力的数值则称为水分传导率。水分传导率取决于水分迁移所经过的所有孔隙的体积及其性质。因此，它是土壤水含量或吸力的函数。水分传导率常用

表16　不同土壤质地类型的 SM_o 和 γ 的表征值

质地类型*	SM（厘米³/厘米³）	γ（1/厘米²）
粗砂土	0.395	0.1000
细砂土	0.364	0.0288
壤质砂土	0.439	0.0330
细砂壤土	0.504	0.0207
粉砂壤土	0.509	0.0185
壤土	0.503	0.0180
黄土性壤土	0.455	0.0169
砂质粘壤土	0.432	0.0096
粉砂粘壤土	0.475	0.0105
粘壤土	0.445	0.0058
轻粘土	0.453	0.0085
粉砂粘土	0.507	0.0065
重粘土	0.540	0.0042
泥炭土**	0.863	0.0112

* 质地分级标准见图25。

** 质地类型变化很大。

符号 k_ψ 表示。在水分饱和的情况下，k_ψ 等于饱和传导率 k_o（厘米/日）；任意两点 n_1 和 n_2 间垂直方向的饱和水流动都遵循达西定律（似类于欧姆定律）：

$$F = k_o \cdot H_n / L_n \tag{28}$$

式中，

F 为任意两点 n_1 和 n_2 之间的水分流动速率（厘米/日），

k_o 为饱和水分传导率（厘米/日），

H_n 为点 n_1 与点 n_2 的总水头差（厘米），

L_n 为点 n_1 与点 n_2 的距离（厘米）。

若 $\psi > 0$ 厘米，总水头包括重力和基质吸力：

$$H_n = \psi + g_n \tag{29}$$

式中，

H_n为任意一点n的总水头(厘米)，

ψ为该点的基质吸力(厘米)，

g_n为该点的重力水头（gravity nead)，等于该点到地下水水位间的垂直距离(厘米)。重力水头g_n方向向下时为负值。

练 习 28

一种荷兰粉砂粘土的地下水位离地面1米，地下10厘米处的含水量为0.3厘米^3/厘米^3。计算该处的基质吸力(利用表16，根据方程(27)求出ψ)和重力水头。

若此土壤不是粉砂粘土而是粘壤土，该处的总水头又为多少？

若$\psi>0$厘米，由于一些孔隙的存在，水分传导率k_ψ低于k_o，并且也不再是水分迁移途径的函数（“不饱和水流”）。此时含水的孔隙一般较小，因此水分移动的阻力较大。这意味着，随吸力的增大，k_ψ迅速递减；k_ψ与ψ不再呈简单的函数关系。若ψ很低，譬如小于10厘米，则大多数土壤不再释放水分。因为在这样低的吸力下，土壤缺乏能够排水的大孔隙。由此推论出，基质吸力低于所谓的“进气值”时，$k_\psi=k_o$。这一影响在图26中可以看出，但在模型中并未考虑。若ψ升高且孔隙可以排水，k_ψ则按照其瞬时值和土壤孔隙的组成特点的函数关系而减少。这种关系可用该质地类型的经验常数α表示：

$$dk_\psi/d\psi=k_\psi\cdot\psi$$

由此式可推导出：

$$k_\psi = k_o \cdot e^{-\alpha \cdot \psi} \tag{30}$$

式中，

k_ψ 是基质吸力为 ψ 时的水分传导率(厘米/日)，

k_o 为该质地类型的饱和水分传导率(厘米/日)，

α 为该质地类型的经验常数(1/厘米)。

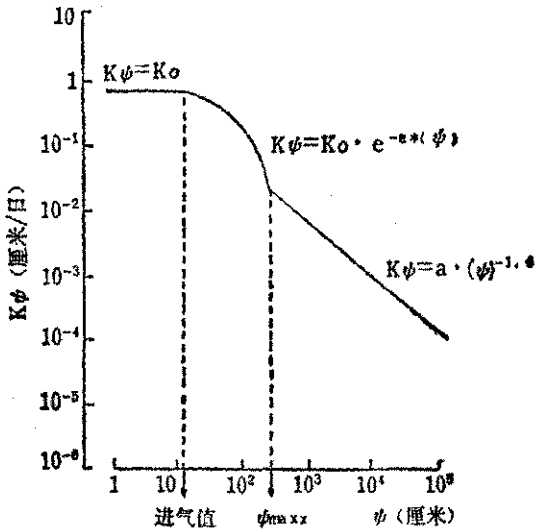


图 26 $k_\psi - \psi$ 的普遍关系曲线(Rijtema, 1965)

不同质地类型土壤的 k_o 和 α 的表征值列于表 17。实验表明，方程(30)并不能够适用于土壤的整个 ψ 值范围。若 ψ 超过该质地类型的吸力极限 ψ_{max}，则只能用经验公式来描述 k_ψ 与 ψ 的关系：

$$k_\psi = a \cdot \psi^{-1.4} \quad (\psi > \psi_{max}) \tag{31}$$

式中，

a 为该质地类型土壤的经验常数(厘米$^{2.4}$/日)，

ψ_{max} 为该质地类型土壤的吸力极限(厘米)。

表 17　不同质地类型土壤的吸力极限ψ_{max}、饱和导水率k_0及常数a和α的表征值

质地类型	ψ_{max}（厘米）	k_0（厘米/日）	a（厘米$^{2/4}$/日）	α（1/厘米）
粗砂土	70	1120	0.030	0.224
细砂土	175	50	10.9	0.0500
壤质砂土	200	26.5	16.4	0.0398
细砂壤土	290	12.0	26.5	0.0243
粉砂壤土	300	6.5	47.3	0.0200
壤土	300	5.0	14.4	0.0231
黄土性壤土	130	14.5	22.6	0.0490
砂质粘壤土	200	23.5	33.6	0.0353
粉砂粘壤土	170	1.5	36.0	0.0237
粘壤土	300	0.98	1.69	0.0248
轻粘土	300	3.5	55.6	0.0174
粉砂粘土	50	1.3	28.2	0.0480
重粘土	80	0.22	4.86	0.0380
泥炭土	50	5.3	6.82	0.1045

资料来源：据Rijtema(1969)进行修改。

*质地类型的分级指标见图25。

**质地类型变化很大。

表 17 列出不同土壤质地类型的 a 和 $\psi_m a_x$的表征值。

测定吸力极限 ψ_{max}后，方程(28)的动力学形式可用来描述不同条件下的水分流动：

$$F = k_\psi \cdot \delta H / \delta L \tag{32}$$

式中，

F 为水分流动速率(厘米/日)，

δH 为水头差(厘米)，

δL 为水分流动距离(厘米)。

练　习　29

根据表17，计算基质吸力为100厘米时，壤土的水分传导率的表征值。当基质吸力$\psi=1000$厘米时，水分传导率的表征值又为多少？

3.2.2　水分平衡中的各项参数

上部根层的水分迁移

实际入渗速率IM是由地面总供水量决定的，但也受水分渗入土壤可能达到的最大入渗速率IM_{max}的影响。这意味着，只有知道IM_{max}和地面水分供应的各种来源〔方程(25)〕，才能确定IM。因此，下面首先讨论这些变量。

最大渗入速率(IM_{max})

水分渗入土壤，结果湿润了表层。被水分湿润的土壤可分为三层：

a.最上部土层，此层完全被水分饱和。

b."湿润锋"，介于被湿润的土壤和未被湿润的土壤之间的一个相对较薄的过渡层。

c.介于a与b之间的"过渡层"，此层土壤水的剖面分布是均匀的。

最大渗入速率是由基质吸力和重力决定的。基质吸力的影响可用土壤"吸着率(sorptivity)"(S,厘米/日$^{0.5}$)表示。当土壤基质吸力为唯一的驱动力时，吸着率的数值就等于土壤吸附水分的速率。吸着率随土壤基质的颗粒分布和初始含水量而变化。

表18列出各种标准土壤质地类型的"标准吸着率S_o"的数值。标准吸着率就是基质完全干燥，即含水量$SM_\psi=0$厘

米^3/厘米^{3}时的吸着率。Stroosnijder(1976)发现，吸着率随土壤含水量增加而直线下降。因而其近似关系式为：

$$S=S_o\cdot(1-SM_\psi/SM_o) \tag{33}$$

式中，

S 为实际吸着率(厘米/日$^{0.5}$)，

S_o为标准吸着率(厘米/日$^{0.5}$)，

SM_ψ为土壤含水量(厘米^3/厘米^3)，

SM_o为总孔隙度(厘米^3·厘米^3)。

随着入渗时间的推延，吸着率的影响相对于重力的影响要降低。最大入渗速率是由过渡层水分传导率(A，厘米/日)决定的一个极限值。A 值取决于过渡层水分含量和基质的几何形状。由于基质的几何形态常常影响土壤质地，所以表18中列出各种质地类型的表征 A 值。

事实上，最大入渗速率（即 IM_{max}，厘米/日）是由基质吸力和重力共同作用的：

$$IM_{max}=S_o\cdot(1-SM_\psi/SM_o)\cdot(\Delta t)^{-0.5}+A \tag{34}$$

练　习　30

雨量计测得在 3 小时内连续降雨 1.5 厘米，若降雨发生在水平、湿润的壤质土（$SM_\psi=0.35$厘米^3/厘米^3）上，地面会积水吗？假设在该土壤附近连续下了 6 小时的雨，而降雨强度不变，问情况是否有所不同？试解释之。

降雨速率(P)

并非全部降雨都能够到达地面并随之发生入渗，有一小部分被作物截获（interception）并直接从植物上进行蒸发。在一定时间内，降雨的分布对截获有很大的影响。当考虑到

表18 不同土壤质地类型的标准吸着率(So)的表征值*和过渡层的渗透性(A)

质地类型	S_o (厘米/日$^{0.5}$)	A (厘米/日)
粗砂土	50.16	119.23
细砂土	21.44	30.33
壤质砂土	19.20	17.80
细砂壤土	17.57	9.36
粉砂壤土	14.46	5.32
壤土	11.73	3.97
黄土性壤土	13.05	8.88
砂质粘壤土	19.05	16.51
粉砂粘壤土	6.15	1.18
粘壤土	4.70	0.76
轻粘土	10.74	2.94
粉砂粘土	3.98	0.80
重粘土	1.93	0.15
泥炭土	7.44	1.86

* 根据Stroonijder(1976)报道的结果。

** 质地类型的分级标准见图25。

植物的蓄水能力有限时，这一点就很明显了。一旦降雨达到植物的蓄水能力时，多余的降雨就落到地面。定量测定截获对土壤水分平衡的影响是困难的。一方面，叶面截获减少了降雨成为有效土壤水分的比例；另一方面，“滞留的雨水(steered drip)”又可以提高植物水分对作物的有效性。截获能在一定程度上减少蒸腾。这取决于作物表面的粗糙程度，风速和作物的表观扩散阻力。这一问题干扰了截获对土壤水分平衡的影响。

考虑到截获的影响不能肯定以及因天气记录不准确而不能对其进行可靠估算，在水分平衡中采用了雨量计测定的降

雨量。

有效灌水速率(I_e)

有效灌水速率就是根层灌溉水的净输入。它可以在田间直接测定，即喷灌时用雨量计收集灌溉水。更常见的做法是，先测定渠首的总供水量，然后用渠首的供水速率乘以总有效系数即得到近似的有效灌水量：

$$I_e = I \cdot E_p \tag{35}$$

式中，

I_e为有效灌水量(厘米/日)，

I 为渠首的供水速率(厘米/日)，

E_p为总有效系数。

总有效系数 E_p由三部分组成。它们分别表示：渠首到田间沟渠的输送中、田间沟渠的水流动中和灌溉水的利用中水分的损失：

$$E_p = E_d \cdot E_f \cdot E_i \tag{36}$$

式中，

E_d为田间利用系数，

E_f 为田间沟渠中的有效系数，

E_i 为水渠输送过程中的有效系数。

表 19 列出 Doovenbos 和 Pruitt (1977)提出的上述各系数的表征值。表中数据表明，在不适宜的条件 F (如沟渠弯曲、狭窄和/或管理不善)，渠首工程的供水总量，大大超过作物可用的净水量。

练 习 31

根据表 19 确定一个小的(<1000 公顷)、管理不好的灌溉系统的总有效系数(E_p)。在一片壤土上种植玉米，每次根

表19 水渠中(E_i)、田间沟渠中(E_f)、水分分配时($E_i \times E_f$)和水分利用时(E_d)灌溉水的有效系数

水渠中的有效系数(E_i)	
1.连续稳定地供水	0.9
2.在2000～7000公顷农田中每次轮灌30～70公顷，且管理良好	0.8
3.一次灌溉面积大(>10000公顷)，一次灌溉面积小(<1000公顷)，灌溉水的输送和管理中也存在问题	
A.根据预测值供水	0.7
B.根据事先的调查进行供水	0.65
田间沟渠的有效系数(E_f)	
1.每个区大于20公顷	
A. 弯曲沟渠	0.8
B. 直线沟渠或管道	0.9
2.每个区小于20公顷	
A.弯曲沟渠	0.7
B.直线沟渠或管道	0.8
水分分配系数($E_i \times E_f$)	
在管理和输送条件下每次供水	
——适合	0.65
——充足	0.55
——不足	0.4
——差	0.3
田间利用系数(E_d)	
1.地面灌溉	
——砂土	0.55
——壤土	0.7
——粘质土	0.6
2.亚表土灌溉	0.8
3.喷灌	
——干热气候	0.6
——温和气候	0.7
——湿冷气候	0.8
4.水稻	0.32

资料来源：Doorenbos 和 Pruitt(1977)

据预定方案进行地面轮灌。方案中计划每个区（<20公顷）由弯曲的田间沟渠供水。

实际蒸发速率(E_a)

地面的实际蒸发取决于：

（1）潜在蒸发速率，即大气的蒸发需要(E_o，厘米/日，见3.1节)。

（2）表土的水分传导率。

（3）冠层的荫蔽的影响〔=f(LAI)〕

若地面供水充足，不种作物时的最大蒸发速率E_m可以看作与潜在蒸发速率E_o相等。只有在特殊情况下，如毛细管渗透性强而地下水位浅或地面积水时，这种情况下才能维持较长的时间。这种现象并不是无害的。尤其是在蒸发量大的半干旱地区，会使大量水溶性盐在地面或接近地面的土层积累，造成不良结果。种植作物时，即使下层的水分供应并不限制蒸发速率，E_m也是小于E_o。Ritchie(1972)提出下述关系式，用于解释因作物冠层荫蔽造成的地面蒸发速率的降低：

$$E_m = E_o \cdot e^{-0.4 \times LAI} \tag{37}$$

式中，

LAI为叶面积指数(厘米²/厘米²)。

当地面积水（即$SS_t>0$）或水分蒸发损失的速率小于地下水通过毛细管上升向地面供水的速率时，在任何条件下，实际蒸发速率E_a总是等于最大蒸发速率E_m：

$$E_a = E_o \cdot e^{-0.4 \times LIA} \quad (SS_t>0 \text{ 或 } E_m<CR) \tag{38}$$

式中，CR为毛细管中的水分上升速率(厘米/日)

在正常情况下，作物要求一定的地下水位和超过蒸发损

失的毛管上升。此时，地面几厘米的土层具有非常大的基质吸力，并形成一个薄的干土“覆盖层”。由于这一覆盖层的存在，很难准确地测定蒸发作用。因此，本模型中进行三点假设：

（1）风干土的基质含水量（SM_a）等于 $0.33\times SM_{16000}$。

（2）土壤被水分饱和时，土壤水分的蒸发速率最大。

（3）若 E_m 大于 CR，地面的实际蒸发与最大蒸发的比率，等于完全能够从根层土壤中蒸发的实际含水量与最大含水量之比。

由此可得，$E_m>CR$ 时：

$$E_a=E_m\cdot(SM_\psi-SM_a)(SM_c-SM_a) \tag{39}$$

若地面积水，即 $SS_t>0$，则 E_a 等于 E_m 值。下面举一个例子，说明为何实际蒸发速率是一个近似值。

假定一种壤土整个根层的基质吸力 ψ 为 500 厘米，地下水埋深 Z_t 为 200 厘米；土壤种植玉米，其叶面积指数为 4.0，潜在蒸发速率为 0.5 厘米/日。

根据方程(37)计算出最大蒸发速率 E_m：

$E_m=0.5\cdot e^{-0.4\times4.0}=0.10$ 厘米/日

下一步骤就是通过计算，确定在上述情况下最大蒸发速率是否大于毛管上升速率。本节的后面部分还要介绍定量确定毛管上升的理论，现在只要知道如何根据表 21—34 确定各种土壤质地类型的水分移动距离或基质吸力与毛管上升速率间的关系即可。这些表的使用很简单：已知根层的基质吸力和水分向地面移动的距离(本例中 分别为 500 厘米和 200 厘米)。从相应的表中(壤土查表 26) 根据已知的基质吸力和移动距离，即可查出 CR 值，本例中 CR＝0.06 厘米/日。

由于 E_m 稍大于 CR，因此会形成覆盖层。然而，根据

方程(37)和(39)计算的实际蒸发速率：

$$E_a = 0.10 \times (0.25 - 0.03) / (0.50 - 0.03)$$
$$= 0.047 (厘米/日)$$

练　习　32

通常，土壤学家的见解是，中等质地的土壤不易形成覆盖层；粗质砂土和细质粘土比较容易形成覆盖层。考虑下列田间状况：$\psi = 1000$ 厘米，$Z_t = 100$ 厘米，$E_o = 0.5$ 厘米/日。作物的叶面积指数为 3.0。判断在此条件下 14 种标准质地类型的土壤是否都能够形成覆盖层（提示：比较 E_m 与 CR；使用表 21—34）。

地面蓄水能力(SS_{max})

在许多情况下，农田是处于淹水状态的。水田的耕种需要短期或长期淹水就是一个明显的例子。旱地中也可能存在暂时的淹水，如下大雨时和雨后，或灌溉时和灌溉后。地面的特性及其坡度会影响地面的可能的蓄水能力(SS_{max}，厘米)(图27)。

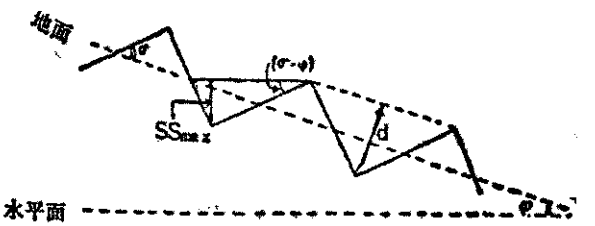


图 27　地面贮水量 (SS_{max}) 示意图。σ = 沟与地面的夹角（度），ϕ = 地面坡度(度)，d = 地面粗糙度(厘米)

地面蓄水能力可用下述数学式表示：

$$SS_{max}=0.5\cdot\frac{\sin^2(\sigma-\phi)}{\sin\sigma}\cdot\frac{ctg(\sigma+\phi)+ctg(\sigma-\phi)}{2\cdot\cos\sigma\cdot\cos\phi} \tag{40}$$

式中

SS_{max} 为地面蓄水能力(厘米)，

d 为地面粗糙度(厘米)，

σ 为犁沟与地面的夹角(度)，

ϕ 为地面坡度(度)。

在大多数情况下，沟与地面的夹角 σ 在 30°到 45°之间，地面坡度 $\phi<13.5°$ (30%)，通常还是适于农用的。地面粗糙度，对于等高耕作时为 20 厘米，轻型农机具耕作时为 6～8 厘米，不耕作时为 1～2 厘米。图 28 是根据方程 (40) 所作的图形，描述了 SS_{max} 与地面粗糙度 d、地面坡度 ϕ 的关系。图中假定沟与地面的夹角为 30°。

方程(40)对于有田埂水田并不适用。此时，地面蓄水能力是由田块大小、坡度和田埂的有效高度决定的。其他所有情况下，各时期初始的地面实际蓄水量(SS_s)均不超过 SS_{max}。

练 习 33

一块土地的坡度为 10°，采用等高耕作，沟深 d 为 20 厘米，$\sigma=30°$。根据方程(40)计算地面蓄水能力 SS_{max}，并用图 28 验证计算结果。

地面实际蓄水量(SS_s)与径流(SR)

正如前节所述，在一段时间内，地面蓄水量可能不变，也可能增大或减小。地面蓄水量是否发生变化及其变化方向取决于：土壤入渗能力 IM_{max} 和减去蒸发损失后的雨量与灌

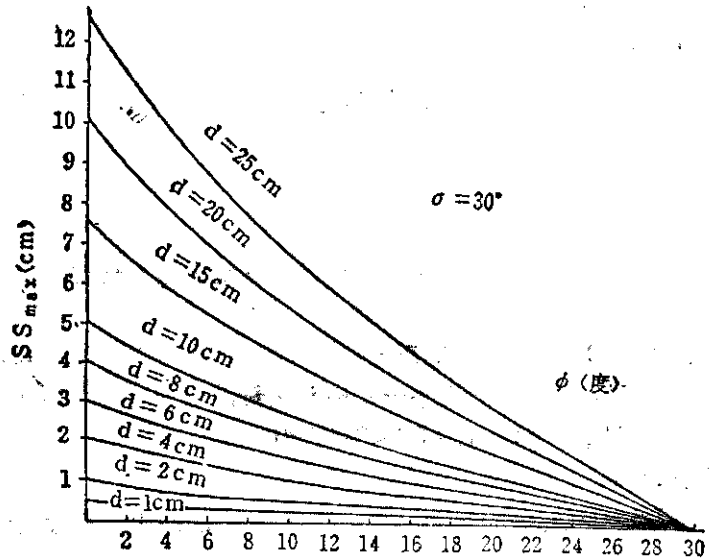


图28 SS_{max}与地面粗糙度d和地面坡度ϕ的关系曲线。海与地面的夹角(σ)假定为30°

溉量之和。

关于地面蓄水量的变化DS和地面径流SR的确定，在很简单的书中都有介绍。

首先，假定水分处于供水与土壤入渗能力相等的平衡状态：

若 $P+I_e-E_a=IM_{max}$

则，

DS＝0(地面蓄水量不变)

SR＝0(没有地面径流) (41)

若供水小于土壤入渗能力，即 $P+I_e-E_a<IM_{max}$，则地面供应的水分都入渗到土中，并且仍未达到最大入渗能力。

此时，地面蓄水量将减少（$DS>0$），地面也就不发生径流（$SR=0$）。地面蓄水量的减少决不会超过供水量（$DS\leqslant SS_t/\Delta t$），因此必须考虑下述两种可能情况：

1. 剩余的入渗能力大于实际蓄水量：

$$IM_{max}-(P+I_e-E_a)\geqslant SS_t/\Delta t$$

那么，

$DS=SS_t/\Delta t$（在Δt时间内，实际地面蓄水全部发生入渗）

$$SR=0 \qquad \text{（不发生径流）} \tag{42a}$$

2. 剩余的入渗能力小于实际蓄水量：

$$IM_{max}-(P+I_e-E_a)<SS_t/\Delta t$$

那么，

$DS=IM_{max}-(P+I_e-E_a)$（地面蓄水的减少受有效入渗能力的限制）

$$SR=0 \qquad \text{（不发生径流）} \tag{42b}$$

若地面供水大于土壤入渗能力，即$P+I_e-E_a>IM_{max}$，那么最初多余的供水积蓄在地面。此时，地面的有效蓄水能力(storage capacity available)为$SS_{max}-SS_t$。若多余的供水大于有效蓄水能力，则首先将有效蓄水能力（$SS_{max}-SS_t$）填满，然后多余的部分变成地面径流SR损失。因此，同样也存在两种可能：

1. 多余的供水超过有效蓄水能力：

$$P+I_e-E_a-IM_{max}>(SS_{max}-SS_t)/\Delta t$$

那么，

$DS=-(SS_{max}-SS_t)/\Delta t$（所有的地面有效蓄水能力都被用完）

$$SR=(P+I_e-E_a)-IM_{max}-DS \tag{43a}$$

2. 多余的供水等于或小于有效蓄水能力：

$(P+I_o-E_a)-IM_{max}\leqslant(SS_{max}-SS_t)\Delta_t$ 那么，

$DS=IM_{max}-(P+I_e-E_a)$（多余的供水全部被积蓄在地面）

$SR=0$ （不发生径流） (43b)

在方程(25)中，上部根层的水分渗速率表示为：

$IM=P+I_e--E_a+DS-SR$

前面已经证明，实际入渗速率不会超过最大值 IM_{max}。象方程(25)中其他各项一样，该值也已经确定。因此，现在可以确定实际入渗速度 IM。确定地面入渗速率一般采用下述方法：

第1步 根据方程（27）和表16确定 SM_w。根据方程(34)和表18确定最大入渗速率 IM_{max}。

第2步 根据方程(40)或图28确定地面蓄水能力 SS_{max}。

第3步 根据你的资料确定降雨速率 P。

第4步 根据方程（35）、(36)和表19，计算出有效灌水速率 I_e。

第5步 在表21～34中选择适宜的表，确定 SS_t 和毛管上升速率 CR。根据方程(37)确定 E_m。

若 $SS_t>0$ 或 $E_m\leqslant CR$，则 $E_a=E_m$

若 $E_m>CR$，则根据方程(39)计算 E_a。

第6步 计算供水和最大入渗速率之差：

$P+I_e-E_a-IM_{max}=Q$

若 $Q=0$，则进行第7步；

若 $Q<0$，则进行第8步；

若 $Q>0$，则进行第9步。

第7步 若 $Q=0$，则 $IM=P+I_e-E_a$〔合并方程(25)和

(41)〕。

$DS=0$ 且 $SR=0$。

第 8 步 若 $Q<0$，确定是否 $-Q\geqslant SS_t/\Delta t$ 或 $-Q<SS_t/\Delta t$。

若 $-Q\geqslant SS_t/\Delta t$，则 $IM=P+I_e-E_a+SS_t/\Delta t$〔合并方程(25)与(42a)〕

$DS=SS_t/\Delta t$ 且 $SR=0$。

若 $-Q<SS_t/\Delta t$，则 $IM=IM_{max}$〔合并方程(25)与(42b)〕

$DS=-Q$，$SR=0$。

第 9 步 若 $Q>0$，则计算 $(SS_{max}-SS_t)/\Delta t$

若 $Q>(SS_{max}-SS_t)/\Delta t$，则 $IM=IM_{max}$〔合并方程(25)与(43a)〕。

$DS=(SS_{max}-SS_t)/\Delta t$，且 $SR=Q-(SS_{max}-SS_t)/\Delta t$。

若 $Q\leqslant(SS_{max}-SS_t)/\Delta t$，则 $IM=IM_{max}$〔合并方程(25)和(43b)〕。

$DS=-Q$ 且 $SR=0$。

练 习 34

一块粘壤土($\psi=623$ 厘米)的玉米地，在 10 天内用雨量计测定的降雨量为 0.5 厘米/日。作物的叶面积指数为4.0。地面没有积水($SS_t=0$)。地面坡度 ϕ 为 10°，粗糙度 d 为 2 厘米，沟与地面夹角 σ 为30°，潜在蒸发速率 E。为 0.4 厘米/日。地下水深度距地面 150 厘米。没有灌水。

计算该时间内的实际入渗速率 IM。

计算该时间内的地面蓄水量的变化速度（如果有变化的话）。

如有径流，计算该时间内的径流速率。

注：仔细按照本节中介绍的九个步骤进行计算，并将计算结果留待后用。

下部根层的水分流动(CR—D)

入渗速率 IM 是指经过上部根层的净入水流。当然，入渗的水分也可能从下部根层(RD 厘米深度，图 23)进入或离开根层。

如 3.2.1 小节中已经说明的那样，土壤中的水流是受总水头 H_n 控制的。H_n 包括基质吸力 ψ 和重力差 g_n

$H_n=\psi+g_n$

定义重力水头 g_n 向下方向为负值。这意味着，在地下水位上方一已知点，若 $\psi>g_n$，即基质吸力 ψ(厘米)超过该点到地下水的垂直距离(厘米)，总水头 H_n 就为正。正水头就是基质吸力 ψ 使地下水向该点的位置发生正方向（即向上）流动。这种现象称为毛管上升（CR，厘米/日）。若 $\psi<g_n$，结果总水头为负，水分由表土向地下水（深度 Z_t）方向往下移动。这种现象称为渗漏(D，用厘米/日表示)。由于在某一时刻，水流只能向一个方向移动，因此 $D>0$ 时，则 $CR=0$；而 $CR>0$ 时，则 $D=0$。为方便起见，在水分平衡方程中，(方程 24)根层 RD 深度的入水流速率仅用一项表示，即(CR－D)项，单位用厘米/日。该项的两个分量 CR 和 D 将在下面分别进行讨论。

毛管上升速率(CR)

根据通用水流方程(32)的稳态解可计算出毛管上升速率：

对于 $Z_t\geqslant Z\geqslant RD$，则有

$$CR=k_\psi\cdot\left(\frac{d\psi}{dz}-1\right) \tag{44}$$

由于 k_ψ 在低吸力条件下〔方程(30)〕和高吸力条件下〔方程(31)〕是用不同方程描述的，因此，方程(44)的积分必须分两个区域进行。

对于低吸力范围（$\psi \leqslant \psi_{max}$），CR、$\psi$ 与水分流动距离 (Z_t-RD) 之间的关系很简单，Rijtema(1965) 曾做过详细介绍，在我们的方法中对 Rijtema 的方程稍微进行了一些修改。因为他的方程对进气值以下的 ψ 区没有单独考虑修改后的方程为：

若 $\psi \leqslant \psi_{max}$

$$CR=\frac{k_o \cdot (e^{-\alpha \cdot \psi}-e^{-\alpha \cdot (Zt-RD)})}{e^{-\alpha \cdot (Zt-RD)}-1} \tag{45}$$

对于高吸力范围，CRψ 与 (Z_t-RD) 间的关系只能通过数值积分来计算。这种方法不把整个距离 (Z_t-RD) 上的水流同时进行考虑，而是将其分成若干个小增量 $\Delta(Z_t-RD)$，用下述方程表示：

$$CR=K_{\bar{\psi}} \cdot \left(\frac{\bar{\psi}}{(\Delta(Z_t-RD)}-1\right) \tag{46}$$

式中，

$\bar{\psi}$ 为距离增加 $\Delta(Z_t-RD)$ 的平均吸力，

$K_{\bar{\psi}}=a \cdot \bar{\psi}^{-1.4}$〔见方程(31)〕

在没有计算机时，数值积分技术是相当费时的。其原因是，如果每个增量 Δ (Z_t-RD) 非常小，最终计算的 CR 值就会非常准确。这样，覆盖整个距离 (Z_t-RD) 所需的计算次数就变得非常大，从而妨碍了这一技术在我们提出的方法中的应用。利用表格表示距离 (Z_t-RD) 内的毛管上升速率与任何一种 ψ 和 (Z_t-RD) 组合的关系，就可以克服这一困难。Rijtema 已对不同土壤质地类型制作了这种表格（见表

21～34*)。

表21 粗砂土中毛管水上升垂直距离(厘米)与水分流动速率和基质势的关系

ψ(厘米)	CR(厘米/日)							
	0.5	0.4	0.3	0.2	0.15	0.1	0.06	0.02
20	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
50	43.4	44.1	45.0	46.1	46.8	47.6	48.4	49.4
100	44.4	45.4	46.7	48.5	49.8	51.6	53.9	58.3
250	44.5	45.5	46.7	48.6	49.9	51.7	54.0	59.2
500	44.5	45.5	46.8	48.6	49.9	51.8	54.1	59.5
1000	44.5	45.5	46.8	48.6	49.9	51.8	54.2	59.7
2500	44.5	45.5	46.8	48.6	49.9	51.8	54.2	59.8
5000	44.5	45.5	46.8	48.6	50.0	51.8	54.3	59.9
10000	44.5	45.5	46.8	48.6	50.0	51.9	54.3	60.0
16000	44.5	45.5	46.8	48.6	50.0	51.9	54.3	60.0

表22 黏质砂土中毛管水上升垂直距离(厘米)与水分流动速率和基质势的关系

ψ(厘米)	CR(厘米/日)							
	0.5	0.4	0.3	0.2	0.15	0.1	0.06	0.02
20	3.7	4.3	5.0	6.0	6.6	7.5	8.3	9.4
50	11.6	13.6	16.5	20.9	24.2	28.9	34.4	43.1
100	13.9	16.4	20.1	26.2	31.0	38.3	48.1	68.8
250	14.5	17.2	21.1	27.6	32.2	41.1	52.7	81.5
500	14.7	17.5	21.5	28.2	33.7	42.4	54.8	87.6
1000	14.9	17.7	21.8	28.7	34.3	43.3	56.4	92.3
2500	15.1	17.9	22.1	29.1	34.9	44.1	57.7	96.4
5000	15.2	18.0	22.3	29.4	35.2	44.6	58.5	98.7
10000	15.3	18.1	22.4	29.5	35.5	45.0	59.1	100.6
16000	15.3	18.2	22.5	29.6	35.6	45.2	59.5	101.6

* 原文中表20出现在表34之后，译文中仍沿用了这一编号。——译注

表 23　壤质细砂土中毛管水上升垂直距离(厘米)与水分流动速率和基质势的关系

ψ(厘米)	CR(厘米/日)							
	0.5	0.4	0.3	0.2	0.15	0.1	0.06	0.02
20	19.4	19.6	19.7	19.8	19.8	19.9	19.9	20.0
50	47.2	47.8	48.3	48.8	49.1	49.4	49.6	49.9
100	83.2	85.7	88.6	91.8	93.6	95.6	97.2	99.0
250	101.2	106.8	114.1	124.4	131.8	142.3	155.8	185.1
500	103.2	109.2	117.3	129.3	138.2	151.8	171.1	225.9
1000	104.6	111.1	119.8	133.0	143.1	159.2	183.2	260.5
2500	105.9	112.6	121.9	136.1	147.3	165.5	193.7	291.4
5000	106.6	113.6	123.1	138.0	150.0	169.1	199.8	309.7
10000	107.2	114.4	124.1	139.4	151.8	172.1	204.8	324.6
16000	107.6	114.7	124.7	140.2	152.8	173.7	207.4	332.5

表 24　细砂壤土中毛管水上升垂直距离(厘米)与水分流动速率和基质势的关系

ψ(厘米)	CR(厘米/日)							
	0.5	0.4	0.3	0.2	0.15	0.1	0.06	0.02
20	19.1	19.3	19.5	19.7	19.7	19.8	19.9	20.0
50	47.0	47.5	48.1	48.7	49.0	49.4	49.6	49.9
100	88.8	90.1	92.3	94.7	95.9	97.2	98.3	99.4
250	137.0	145.1	155.5	169.8	179.5	192.3	206.9	230.0
500	140.9	150.0	162.0	179.4	192.0	210.6	235.5	297.1
1000	143.3	153.1	166.0	185.3	199.4	222.4	254.7	350.6
2500	145.4	155.6	169.4	190.4	206.7	232.5	271.6	399.9
5000	146.6	157.1	171.4	193.4	210.7	238.4	281.5	429.3
10000	147.5	158.3	173.0	195.8	213.9	243.2	289.5	453.2
16000	148.0	158.9	173.9	197.1	215.6	245.8	293.7	465.9

表 25　粉砂壤土中毛管水上升垂直距离(厘米)与水分流动速率和基质势的关系

ψ(厘米)	CR(厘米/日)							
	0.5	0.4	0.3	0.2	0.15	0.1	0.06	0.02
20	18.3	18.6	18.9	19.3	19.4	19.6	19.8	19.9
50	44.2	45.3	46.3	47.5	48.1	48.7	49.2	49.7
100	81.2	84.2	87.6	91.3	93.3	95.4	97.2	99.0
250	127.7	137.2	149.2	165.7	176.8	191.3	207.3	231.3
500	134.4	145.4	160.0	181.4	197.2	220.5	252.1	326.9
1000	138.6	150.7	167.0	191.9	211.1	241.0	285.4	414.7
2500	142.3	155.3	173.0	201.0	223.2	259.1	315.2	500.3
5000	144.4	157.9	176.6	206.3	230.2	269.6	322.8	552.2
10000	146.1	160.1	179.4	210.6	236.0	278.2	347.0	594.7
16000	147.0	161.2	180.9	212.8	239.0	282.8	354.6	617.4

表 26　壤土中毛管水上升垂直距离(厘米)与水分流动速率和基质势的关系

ψ(厘米)	CR(厘米/日)							
	0.5	0.4	0.3	0.2	0.15	0.1	0.06	0.02
20	17.7	18.2	18.6	19.0	19.3	19.5	19.7	19.9
50	42.2	43.5	45.0	46.5	47.3	48.2	48.9	49.6
100	74.0	77.7	82.1	87.0	89.8	92.9	95.6	98.5
250	102.6	111.0	122.1	137.8	148.8	164.0	182.0	214.3
500	104.6	113.7	125.7	143.1	155.7	174.2	198.4	256.5
1000	105.9	115.3	127.8	146.3	160.1	180.6	209.1	287.2
2000	107.0	116.7	129.7	149.1	163.8	186.2	218.3	314.4
5000	107.7	117.5	130.7	150.7	165.9	189.4	223.7	330.5
10000	108.2	118.2	131.6	152.0	167.7	192.0	228.0	343.5
16000	108.5	118.5	132.1	152.7	168.6	193.4	230.3	350.5

表 27　黄土性壤土中毛管水上升垂直距离(厘米)与水分流动速率和基质势的关系

ψ (厘米)	CR (厘米/日)							
	0.5	0.4	0.3	0.2	0.15	0.1	0.06	0.02
20	18.9	19.1	19.3	19.5	19.7	19.8	19.9	20.0
50	43.8	44.9	46.0	47.3	47.9	48.6	49.1	49.7
100	65.4	69.0	73.3	78.9	82.4	86.8	91.1	96.6
250	71.5	76.4	83.0	92.7	100.1	11.2	126.6	165.5
500	74.2	79.8	87.4	99.3	108.8	124.0	147.3	218.3
1000	76.2	83.3	90.8	104.4	115.6	134.1	163.8	264.7
2000	78.0	84.5	93.7	108.8	121.3	142.7	178.2	307.0
5000	79.0	85.8	95.4	111.3	124.7	147.8	186.7	332.1
10000	79.8	86.8	96.8	113.4	127.5	151.9	193.5	352.5
16000	80.3	87.3	97.5	114.4	128.9	154.1	197.1	363.4

表 28　砂质粘壤土中毛管水上升垂直距离(厘米)与水分流动速率和基质势的关系

ψ (厘米)	CR (厘米日/)							
	0.5	0.4	0.3	0.2	0.15	0.1	0.06	0.02
20	19.4	19.5	19.6	19.7	19.8	19.9	19.9	20.0
50	47.3	47.8	48.3	48.9	49.1	49.4	49.7	49.9
100	85.1	87.5	90.1	93.0	94.6	96.3	97.7	99.2
250	110.0	116.3	124.4	136.0	144.3	156.0	170.9	201.7
500	113.9	121.2	130.9	145.7	157.0	174.6	200.3	272.7
1000	117.0	125.0	136.0	153.2	167.0	189.4	224.5	338.6
2500	119.6	128.2	140.3	159.6	175.6	202.3	245.8	400.5
5000	121.1	130.1	142.8	163.4	180.6	209.8	258.3	437.6
10000	122.3	131.6	144.8	166.5	184.6	215.9	268.4	467.9
16000	123.0	132.4	145.9	168.1	186.8	219.1	273.8	434.0

表 29　粉砂粘壤土中毛管水上升垂直距离(厘米)与水分流动速率和基质势的关系

ψ(厘米)	CR(厘米/日)							
	0.5	0.4	0.3	0.2	0.15	0.1	0.06	0.02
20	14.0	14.9	15.9	17.1	17.7	18.4	19.0	19.7
50	31.0	33.5	36.5	40.0	42.1	44.4	46.4	48.8
100	48.1	53.1	59.4	67.9	73.3	80.0	86.6	94.9
200	58.2	65.3	75.0	89.5	100.1	115.3	134.7	175.0
500	61.4	69.4	80.5	97.4	110.6	130.8	159.4	235.7
1000	64.7	73.5	85.9	105.6	121.3	146.7	185.2	305.6
2500	67.5	76.9	90.5	112.5	130.5	160.4	208.0	371.7
5000	69.1	79.0	93.2	116.5	135.9	168.5	221.4	411.5
10000	70.4	80.6	95.3	119.8	140.2	175.0	232.2	443.9
16000	71.1	81.5	96.5	121.5	142.6	178.5	238.0	461.1

表 30　粘壤土中毛管水上升垂直距离(厘米)与水分流动速率和基质势的关系

ψ(厘米)	CR(厘米/日)							
	0.5	0.4	0.3	0.2	0.15	0.1	0.06	0.02
20	12.1	13.1	14.3	15.8	16.7	17.7	18.5	19.5
50	25.6	28.3	31.7	36.0	38.6	41.7	44.7	48.1
100	37.6	42.4	48.8	57.7	63.8	71.8	80.3	92.0
250	43.6	49.7	58.2	71.2	80.9	95.2	113.7	153.9
500	43.9	50.1	58.7	71.8	81.8	96.4	115.8	160.2
1000	44.0	50.3	58.9	72.2	82.3	97.2	117.1	164.0
2500	44.1	50.4	59.1	72.5	82.7	97.9	118.2	167.2
5000	44.2	50.5	59.3	72.7	83.0	98.2	118.8	169.1
10000	44.3	50.6	59.4	72.9	83.2	98.5	119.4	170.7
16000	44.3	50.6	59.4	73.0	83.3	98.7	119.6	171.5

表 31　轻粘土中毛管水上升垂直距离(厘米)与水分流动速率和基质势的关系

ψ(厘米)	CR(厘米/日)							
	0.5	0.4	0.3	0.2	0.15	0.1	0.06	0.02
20	17.1	17.6	18.1	18.7	19.0	19.3	19.6	19.9
50	40.8	42.4	44.0	45.8	46.8	47.8	48.6	49.5
100	73.4	77.4	81.9	87.0	89.9	93.0	95.6	98.5
250	114.5	124.7	137.9	156.0	168.3	184.5	202.4	229.3
500	122.0	134.0	150.1	173.8	191.4	217.3	252.0	332.9
1000	127.1	140.3	158.3	186.1	207.7	241.3	290.7	432.8
2500	131.3	145.6	165.4	196.7	221.8	262.4	325.5	532.3
5000	133.8	148.7	169.6	203.0	230.1	274.9	346.1	593.1
10000	135.8	151.2	173.0	208.0	236.8	284.9	362.9	642.9
16000	136.9	152.6	174.7	210.7	240.4	290.3	371.8	669.6

表 32　粉砂粘土中毛管水上升垂直距离(厘米)与水分流动速率和基质势的关系

ψ(厘米)	CR(厘米/日)							
	0.5	0.4	0.3	0.2	0.15	0.1	0.06	0.02
20	12.3	13.3	14.5	15.9	16.8	17.2	18.6	19.5
50	22.3	24.8	28.0	32.3	35.2	38.8	42.4	47.1
100	28.0	31.7	36.7	44.4	50.0	58.1	67.9	84.8
250	33.8	38.9	46.2	58.1	67.7	83.0	105.0	158.0
500	37.1	43.1	51.7	66.3	78.5	98.8	130.2	220.6
1000	39.7	46.2	56.0	72.6	86.9	111.3	150.7	277.1
2500	41.9	49.0	59.6	78.0	94.1	122.1	168.6	329.4
5000	43.1	50.5	61.7	81.2	98.4	128.4	179.1	360.7
10000	44.2	51.8	63.4	83.8	101.8	133.5	187.6	386.1
16000	44.7	52.5	64.3	85.1	103.6	136.3	192.1	399.7

表 33　重粘土中毛管水上升垂直距离(厘米)与水分流动速率和基质势的关系

ψ(厘米)	CR(厘米/日)							
	0.5	0.4	0.3	0.2	0.15	0.1	0.06	0.02
20	4.7	5.5	6.7	8.6	10.0	12.0	14.3	17.6
50	7.9	9.5	11.7	15.5	18.5	23.1	29.0	39.8
100	9.4	11.3	14.1	19.0	23.0	29.5	38.7	60.1
250	10.4	12.6	15.8	21.6	26.5	34.6	47.0	82.2
500	11.0	13.3	16.8	23.0	28.4	37.5	51.7	95.9
1000	11.4	13.8	17.6	24.1	29.9	39.7	55.4	106.8
2500	11.8	14.3	18.2	25.1	31.1	41.5	58.5	116.1
5000	2.0	14.6	18.5	25.6	31.8	42.6	60.3	121.5
10000	12.2	14.8	18.8	26.0	32.4	43.5	61.8	125.9
16000	12.3	14.9	19.0	26.3	32.7	44.0	62.6	128.3

表 34　泥炭土中毛管水上升垂直距离(厘米)与水分流动速率和基质势的关系

ψ(厘米)	CR(厘米/日)							
	0.5	0.4	0.3	0.2	0.15	0.1	0.06	0.02
20	15.4	16.1	16.9	17.8	18.3	18.8	19.3	19.7
50	22.9	24.8	27.1	30.4	32.7	35.8	39.3	45.0
100	24.4	26.6	29.6	34.0	37.4	42.5	49.5	66.5
250	25.9	28.5	32.0	37.6	42.2	49.5	60.8	95.6
500	26.7	29.5	33.4	39.7	44.9	53.5	67.4	114.4
1000	27.3	30.3	34.4	41.2	46.9	56.6	72.5	129.5
2500	27.9	30.9	35.3	42.5	48.7	59.2	76.9	142.5
5000	28.2	31.3	35.8	43.3	49.7	60.8	79.5	150.1
10000	28.4	31.6	36.2	43.9	50.5	62.0	81.5	156.3
16000	28.5	31.8	36.3	44.3	51.0	62.7	82.6	159.6

练 习 35

一块质地为壤质土的玉米地（RD＝100 厘米）其根层的基质吸力 ψ 为 300 厘米。地下水位深度 Z_t 距地面 250 厘米。

(a) 判断是否会形成从地下水位 Z_t 处向根层 RD 深度流动的毛管上升水。

(b) 根据方程(45)(记住：$\psi \leqslant \psi_{max}$)，计算 CR。利用表 17 确定该质地土壤的 K_o 和 a。

(c) 利用表 26 确定 CR。

(d) (CR－D)为多少？

渗漏速率(D)

当基质吸力小于重力水头时，总水头为负，水分将向下移动。此时，长根的表土中的水分向底层土壤移动而损失，最终渗漏到地下水中。渗漏速率 D(厘米/日) 可用方程 (22)的原理进行计算。在本书介绍的方法中，渗漏被看成是土壤水分从下部根层(即 RD 深度)向底土的入渗。渗漏速率不太可能在 RD 深度有一个很突然的变化，因为从长根的表土中渗漏的水分会缓冲水分损失的速率。渗漏速率主要受重力的影响。

在讨论最大入渗速率 IM_{max} 时，假定过渡层的基质吸力为 10 厘米，结果该层次的水分传导率为 $k_o e^{-a \cdot 10} = A$ (厘米/日)。就渗漏来说，过渡层的作用被具有基质吸力 ψ 的根层所取代，因此渗漏速率为

$$D = K_\psi \tag{47}$$

练 习 36

一块质地为壤质土的玉米地(RD＝100 厘米)，其根层的

基质吸力为 100 厘米，地下水深度距地面 250 厘米。

（1）判断从下部根层(RD)是否会向(Z_t深度）地下水发生渗漏。

（2）计算渗漏速率 D。

（3）此时(CR－D)为多少？

很清楚，当基质吸力 ψ 受到大小相等(但为负值）的重力水头 g_n 的补偿时，既不存在毛管 ψ 上升，也不存在渗漏〔方程(29)〕。此时总水头为 0，没有驱使水分流动的作用力，因此不存在水分流动：(CR－D)＝0。

(CR－D)一般采用下述方法计算：

第 1 步　确定下部根层的总水头 H_{RD}：从基质吸力 ψ 中减去下部根层与地下水位之间的距离。

$$H_{RD}=\psi-(Z_t-RD)$$

第 2 步　若 $H_{RD}=0$，则(CR－D)＝0。

第 3 步　若 $H_{RD}<0$，则(CR－D)＝$-K_{\psi}$。若 $\psi\leqslant\psi_{max}$，则用表(17) 和方程(30)；若 $\psi>\psi_{max}$，则用方程(31) 和表(17)。

第 4 步　若 $H_{RD}>0$，则(CR－D)＝CR，从表 21～34 中查出相应的 CR 值。

练　习　37

在练习 34 中叙述了种植玉米的粘壤土的情况。假定作物的长根层深度 RD 为 75 厘米，计算练习 34 中，经过下部根层的水分流动速率(CR－D)。

注：计算结果留待后用。

根层内部土壤水分的直接损失(T)

水分除经过上部根层和下部根层移动外，根层内的水分还可以通过根系吸收而损失。根据连续性原理，从根层吸收的水分，等于作物蒸腾与植物中水分含量的增量之和。相对于作物蒸腾来说，后者是可以忽略不计的。因此，本模型中认为，根层内的水分损失等于作物蒸腾。

在最佳供水时，作物的蒸腾速率最大(最大蒸腾速率用 T_m 表示，厘米/日)。若到达根部的水分的有效性没有达其最佳值(即基质吸力 ψ 大于或小于其最佳值)，作物则主动调节水分消耗；此时的实际蒸腾速率 T 小于 T_m。

因此，必须：

(1)确定不同时期各地每种作物的最大蒸腾速率 T_m。

(2)确定表现水分协迫时的基质吸力，并设法降低其蒸腾速率。

(3)了解蒸腾减小的程度 (T/T_m) 与土壤水含量 SM_w 的关系。

最大蒸腾速率(T_m)

最佳供水时的最大蒸腾速率，是蒸腾叶片的总面积和潜在蒸腾速率 T_0 的函数。后者表示在盛行用的环境条件下由彭曼(Penman)所定义的供水良好的、密植的、矮小的、绿色的标准作物(3.1 节)的蒸腾。假定叶面截获的日照与蒸腾之间呈一定比例，则最大蒸腾速率可近似地表示为：

$$T_m=(1-e^{-0.8\times LAI})\cdot T_0 \qquad (48)$$

潜在蒸发蒸腾速率 ET_0(见 3.1 节)减去"Penman 条件下"的地面蒸发，即为潜在蒸腾速率 T_0。假定密植的标准作物的叶面积指数 LAI 为 5～6，潜在蒸腾速率可表示为：

$$T_0=ET_0-E_0\cdot e^{-0.4\times LAI} \quad (LAI=5-6)$$

或，

$$T_0 = ET_0 - 0.1 \cdot E_0 \quad (49)$$

因此，最大蒸腾速率近似为：

$$T_m = (1 - e^{-0.8 \times LAI}) \cdot (ET_0 - 0.1 \times E_0) \quad (50)$$

水分协迫的概念

若基质吸力太小或太大，植物就会遭受水分协迫。下面分别讨论这两种情况。

（1）ψ 低于最佳值

在常见的田地中，通常选择土壤含水量 SM_{100} 作为植物最佳供水时的最大含水量。基质吸力小于 100 厘米，根层会发生一定程度的缺氧。但下述质地类型的土壤中，情况并非如此：含大量空气的粗砂土和泥炭土，即使基质含水量大于 SM_{100} 也不缺氧；重粘土则在基质吸力大于 100 厘米时就表现为缺氧。最好是能够确定出表现缺氧时土壤的空气含量，譬如 10%。但在本模型中并不这种做，因为许多可供借鉴的文献中的概念和数据都是建立在 SM_{100} 这一特定土壤含水量的基础上的。缺氧会影响水分吸收。据推测，这可能是由于维持根系的活动需要能量的缘故。因此，在缺氧环境中，气孔关闭以减少蒸腾。在本模型中，当根层空气含量小于 0.05 厘米^3/厘米^3 时，就人为地假定蒸腾为 0。植物在这种环境中维持 20 多天的生长就会枯死。这一规律不适用于象水稻之类根中含有气管（“通气组织”）的作物。

（2）ψ 高于最佳值

按照贯例，基质吸力为 100 厘米时土壤的含水量（“田间持水量”）减去基质吸力为 16000 厘米时土壤的含水量（“永久萎蔫点”），即为全部可被植物吸收的有效水：

$$W_a = RD \cdot (SM_{100} - SM_{16000}) \quad (51)$$

式中，

W_a 为最大有效水含量(厘米)。

基质吸力大大低于 16000 时，植物遭受水分协迫。当基质吸力高于该系统的特定临界"基质吸力"(ψ_{cr}) 时，植物会主动调节其水分利用。其相应的临界含水量 SM_{cr} 位于 SM_{100} 与永久萎蔫点之间，并取决于植物特性、土壤特性和蒸发需要。目前，对许多作物都建立了灌溉系统。已知最大蒸腾速率 T_m 时，能被作物自由吸收的那部分水分占 W_a 的比例用 P 表示(P 在0 到1.0 之间)。贮存的土壤水分减少到〔$(1-P)\cdot W_a+RD\cdot SM_{16000}$〕厘米以下时，作物吸收的水分减少并开始关闭气孔。因此，其相应的临界土壤水含量为SM_{cr}：

$$SM_{cr}=(1-P)(SM_{100}-SM_{16000})+SM_{16000} \quad (52)$$

表 20 列出不同 T_m 值下几种最重要的大田作物的 P 表征值(Doorenbos 等，1978)。

水分协迫时蒸腾作用的降低(T/T_m)

前面已经解释过，只有在根层土壤水含量介于 SM_{100} 到 SM_{cr} 之间的最佳范围时，作物的实际蒸腾速率 T 等于最大蒸腾速率 T_m。若 $SM_\psi>SM_{100}$ 或 $SM_\psi<SM_{cr}$，则实际蒸腾速率小于最大蒸腾速率。

在低吸力范围($SM_0-0.05\geqslant SM_\psi>SM_{100}$)，蒸腾作用吸收的水分与土壤中空气含量呈线性关系。

$$T/T_m=[(SM_0-0.05)-SM_\psi]/[(SM_0-0.05)-SM_{100}] \quad (53)$$

在高吸力范围($SM_{cr}\geqslant SM_\psi>SM_{16000}$)，土壤有效水分与蒸腾作用的线性关系为：

$$T/T_m=(SM_\psi-SM_{16000})/(SM_{cr}-SM_{16000}) \quad (54)$$

归结起来，用下述一系列的方程，可以求出任何SM_ψ值

表 20 不同作物种类的土壤水分消耗比例（P）与最大蒸腾速率 T_m的函数关系

作物种类*	Tm(厘米/日)								
	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
1	0.45	0.38	0.30	0.25	0.23	0.20	0.18	0.16	0.15
2	0.60	0.50	0.43	0.35	0.30	0.28	0.25	0.23	0.20
3	0.75	0.65	0.55	0.45	0.40	0.38	0.33	0.30	0.25
4	0.85	0.75	0.65	0.55	0.50	0.48	0.43	0.38	0.35
5	0.92	0.85	0.75	0.65	0.60	0.55	0.50	0.48	0.45

* 作物种类　　作物

1	叶菜类、草莓
1—2	洋白菜、洋葱
2	三叶草、胡萝卜、早熟烟草
2—3	香蕉、辣椒
3	葡萄、豌豆、马铃薯
3—4	菜豆、向日葵、西红柿、西瓜、牧草
4	柑桔类、花生、菠萝
4—5	苜蓿、棉花、烟草、木薯、甘蔗、大部分谷粒作物
5	油橄榄、红花、高粱、大豆、甘蔗

（资料来源：Doorenbos 等，1973）

时的实际蒸腾速度 T。

若 $SM_v > SM_0 - 0.05$：

$$T = 0 \tag{55a}$$

若 $(SM_0 - 0.05) \geqslant SM_v \geqslant SM_{100}$：

$$T = [(SM_0 - 0.05) - SM_v] / [(SM_0 - 0.05) - SM_{100}] \cdot Tm \tag{55b}$$

若 $SM_{fob} > SM_v > SM_{cr}$：

$$T = T_m \tag{55c}$$

若 $SM_{cr} \geqslant SM_v \geqslant SM_{16000}$：

$$T=(SM_{\psi}-SM_{16000})/(SM_{cr}-SM_{16000})\cdot T_m \quad (55d)$$

若 $SM_{16000}>SM_{\psi}$

$$T=0 \quad (55e)$$

作物的实际蒸腾速率 T，一般按下列步骤计算：

第 1 步　确定 ET_0 和 E_0，根据方程(49) 求出潜在蒸腾速率的近似值。

第 2 步　根据方程(48)计算最大蒸腾速率 T_m。

第 3 步　根据表 16 和方程(27)，计算根层含水量 SM_{ψ}。

第 4 步　根据表 16 和表 20 以及方程(27)和(52)，计算根层临界含水量 SM_{cr}。记下 SM_{100} 和 SM_{16000} 的数值，以便解方程(52)时使用。

第 5 步　根据表 16 计算($SM_0-0.05$)。

第 6 步　从方程(55)a～e 中选择一适宜的方程计算实际蒸腾速率 T，将 SM_{ψ} 与($SM_0-0.05$)、SM_{100}、SM_{cr} 和 SM_{16000} 进行比较。

练　习　38

在练习 34 中所述的情况下，种植在粘壤土上的玉米的叶面积指数为 4.0。假定在 10 天内，潜在蒸发蒸腾速率 ET_0 平均为 0.35 厘米/日。潜在蒸发速率 E_0 在练习 35 中已经给出(0.4 厘米/日)，基质吸力为 623 厘米。根据上述 6 个步骤计算作物的实际蒸腾速率 T。

注：计算结果留待后用。

3.2.3　生长季节中各时期土壤水分平衡方程的解

已知入渗速率 IM、底土中水分流动速率(CR－D)和作物蒸腾速率 T 时，水分平衡方程(24)就很容易求解，方程求出

的结果为根层土壤水分含量的变化速率 RSM。

计算得出的土壤水分含量的变化速率可以用来计算该时期末根层的土壤水含量。即把初始时的含水量 SM_{ψ}，加上含水量变化 RSM×Δt。所得结果 $SM_{\psi}+RSM\times\Delta t$，既是该时期结束时的土壤含水量，也是下一个时期开始时的土壤含水量。为了区别各个不同时期的变化，最好采用下述方程：

$$SM_{\psi,(t+\Delta t)}=SM_{\psi,t}+RSM\cdot\Delta t \qquad (56)$$

式中，

$SM_{\psi,(t+\Delta t)}$为土壤经过 t 到(t+Δt)天时间间隔后，该时期结束时的土壤含水量，厘米^3/厘米^3。

$SM_{\psi,t}$为该时期开始时(第七天) 土壤含水量，厘米^3/厘米^3。

RSM 为该时期内土壤水分含量的变化速率，厘米^3/厘米^3·日

显然，在进行下一时期的水分平衡计算之前，土壤水分含量并不是唯一需要校正的变量。土壤水分含量变化时，则许多物理系统参数(如地下水位深度 Z_t)也随之发生变化。其他反应作物生长的变量，如所分析时期内 LAI 和 RD 的变化，也需要进行校正。还有一些其他变量则完全属于外部因素，如 P 和 I，它们在各时期的数值则只能从基本数据中取得。

在下一小节中，我们将要讨论物理系特性的变化。当了解蒸腾与干物质产量的相互关系后，在 3、4 节中还要讨论作物参数的变化。

此处说明一下，各时期间隔的时间长短(Δt，天) 对得到的计算结果的精度不是没有影响的。计算系统的状态变量变化时，我们假定它们的数值在各个分析时期内是固定不变

的。在作物生长的动态过程中，由于实际上在某时期内这些数值是不断变化的，同时系统的特点也发生了变化(2.3节)，因此，这种假定不会是一概正确的。不过，当状态变量的数值与该时期内其变化数值之比很大时，它们应用状态变量能够获得很好的结果。这意味着，在动态过程的研究中，时间间隔 Δt 的选择必须恰当。一般来说，减小时间间隔，模型的模拟精度提高。然而，存在许多限制减少时间间隔 Δt 的理由。不谈计算方面的原因，如果可用的基本资料的分辨率很低，例如仅有每月(平均)天气记录可用，则考虑比如说1天($\Delta t=1$)的时间间隔是毫无意义的。实际上，间隔长短的选择是在所需精度、所研究的动态过程、可用基本资料的分辨率及现有计算机容量之间进行的一种折衷考虑。经验表明，在许多情况下，10天的时间步长就能满足我们的要求。可是，还应该考虑到，在某些情况下，如地面供水速率快和/或地下水位浅时，理想的结果需要较短的时间间隔。

练　习　39

在练习34中已介绍了粘壤土玉米地的情况，并已计算出入渗速度IM。在练习37和38中，又分别计算出(CR－D)和作物蒸腾速度T。

(1)根据练习34、37和38的结果和水分平衡方程(24)(记住：RD为75厘米)，计算根层含水量的变化速率。

(2)根据方程(56)，计算10天末的土壤水分含量。

3.2.4　对一个时间间隔做水分平衡分析后的变量校正

1.土壤含水量

土壤含水量——因而也是基质吸力——的校正是不困难的：

$$SM_{\varphi,(t+\Delta t)}=SM_{\varphi,t}+RSM\cdot\Delta t \qquad (56)$$

2. 地下水深度

下部根层水分流动的总结果（CR-D）引起地下水位的变化（ΔZ）。准确地确定ΔZ是不容易的。对于地下水位浅，Δt小的情况，在实用上可假定底土层水分含量——等于RD深度的SM_φ——随深度线性增加，在Z_t深度则达到SM。图29中的直线A说明了这一现象。当存在毛管上升时，水分向根层移动，会使地下水位深度下降ΔZ的距离。同时，土壤水分本身在RD到$(Z_t+\Delta Z)$层之间进行重新分配（图29，直线B）。经过下部根层的水流为$(CR-D)\times\Delta t$厘米，等于直线A以下的表面积减去RD到$(Z_t+\Delta t)$层之间留下的水分，即直线B以下的表面积。

从这些表面积的数学表达式中求出ΔZ得：

$$\Delta Z=2\cdot(CR-D)\cdot\Delta t/(SM_o-SM_\varphi) \qquad (57)$$

在许多耕地中，地下水位深度是受人工排水控制的。这就是说，在重力作用下从田间排出地下

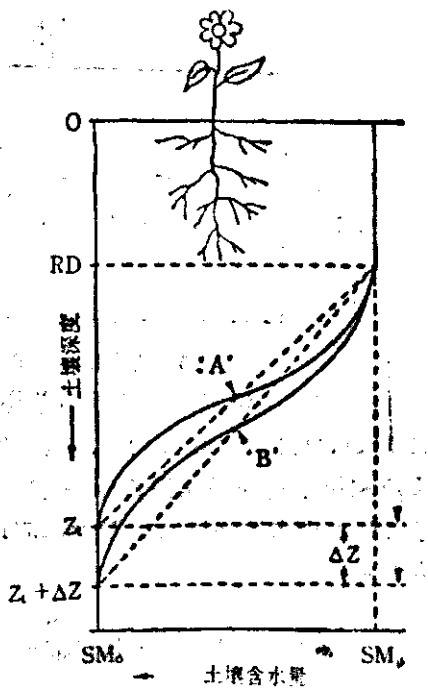


图29 不同土壤深度基质吸力示意图

水。根据水分流动的通用方程，排水速率 D_{max}(厘米/日) 等于水位梯度(厘米/日)与饱和导水率 K_o 之积。水分连续向下流动时，水位梯度等于总水头与其流动距离之比〔方程(28)〕。当田间排水时，情况较复杂。因为此时水分不仅存在垂直的流动，而且存在水平移动，即来自排水沟中间的水流和进入排水沟的放射状流动。换句话说，排水时的水位梯度是由垂直移动，水平移动和由排水沟的湿润周长决定的放射状流动。

要能够排水，就必定得有重力差。这意味着，在排水沟之间的地下水位比排水沟的水位高(即更接近地面)。这种水位差 M_t 驱使水分移动(图30)。

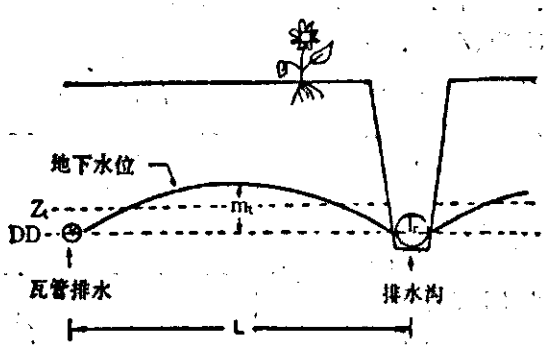


图30 排水田块的断面示意图

很清楚，一定距离上的重力差梯度是由排水面积决定的。Kirkham(1958，1961)指出，这一梯度是 m_t、排水沟间距(L_d)和排水沟的湿润周长($\pi\ \gamma_d$)的函数，并用通用水流方程求解出排水速率 D_{max}。对于深的排水系统和均质土壤，其结果为：

$$D_{max}=k_o\cdot\frac{m_t}{m_t+\ln(L_d/\pi\gamma_d)\cdot L_d/\pi} \tag{58}$$

式中，

D_{max}为排水速度(厘米/日)，

k_o为饱和导水率(厘米/日)，

M_t为排水沟中间的水头(厘米)，

L_d为排水沟间距(厘米)，

γ_d为排水沟半径(厘米)。

在人工排水系统中，地下水深度的变化ΔZ不仅取决于非饱和水流（CR－D)，而且还取决于排水沟附近地下水的移动情况(D_{max})。因此，应该把方程(57)扩展，以包括排水的损失：

$$\Delta Z=2\cdot\Delta t\cdot[D_{max}+(CR-D)]/(SM_o-SM_w) \quad (59)$$

在所考虑的时间间隔结束时，地下水位的深度为：

$$Z_{(t+\Delta t)}=Z_t+\Delta Z \quad (60)$$

式中，

$Z_{(t+\Delta t)}$为时间间隔结束时的地下水深度，厘米，

Z_t为时间间隔开始时的地下水深度，厘米。

3. 排水沟中间(midway between drains)的水头

应用人工排水时，地下水深度的变化ΔZ对水头M_t有影响。尽管排水沟之间的地下水位是稍微弯曲的，但地下水深度相当接近：

$$Z_t=DD-0.5\cdot M_t \quad (61)$$

式中，

DD为排水沟深度，厘米(图30)。

由此得出，校正地下水位后的水头为：

$$m_{(t+\Delta t)}=2\cdot[DD-Z_{(t+\Delta t)}] \quad (62)$$

式中，

$m_{(t+\Delta t)}$为间隔时间Δ_t天后，排水沟中间的水头，厘米。

4. 地面积水

若供水超过入渗能力，即$P+I_e-E_a>IM_{max}$时，间隔一段时间后地面积水增多。相反时则地面积水减少。

$$SS_{(t+\Delta t)}=SS_t-DS\cdot\Delta t \tag{63}$$

由3.2.2小节中关于DS的讨论可以得到下述四种可能发生的情况。

（1）若$P+I_e-E_a-IM_{max}>(SS_{max}-SS_t)/\Delta t_1$，则

$$SS_{(t+\Delta t)}=SS_{max} \tag{64a}$$

〔合并方程(63)和(43a)〕

（2）若$P+I_e-E_a-IM_{max}>0$且$\leqslant(SS_{max}-SS_t)/\Delta t$，则

$$SS_{(t+\Delta t)}=SS_t+(P+I_e-E_a-IM_{max})\cdot\Delta t. \tag{64b}$$

〔合并方程(63)和(43b)〕

（3）若$P+I_e-E_a-IM_{max}\leqslant-SS_t/\Delta t$，则

$$SS_{(t+\Delta t)}=0 \tag{64c}$$

〔合并方程(63)和(42a)〕

（4）若$P+I_e-E_a-IM_{max}<0$且$>-SS_t/\Delta t$，则，

$$SS_{(t+\Delta t)}=SS_t+(P+I_e-E_a-IM_{max})\cdot\Delta t \tag{64d}$$

〔合并方程(63)和(42b)〕

练　习　40

在一块具备人工排水系统的壤质土上种植木薯（RD＝50厘米），其根层的基质吸力为100厘米。排水系统的尺寸为：DD＝160厘米，L_d＝5000厘米，γ_d＝8厘米，地下水位与排水沟深度之间的距离m_t＝60厘米。时间间隔Δt为1天。

(1)根据方程(61)计算初始地下水位。

(2)根据方程(58)和表17计算排水速率D_{max}。

(3)按3.2.2小节的计算步骤计算(CR—D)。

(4)根据方程(59)，计算该时间间隔后的地下水位变化

ΔZ。

(5)根据方程（60），计算该时间间隔后的地下水位深度 $Z_{(t+\Delta t)}$。

(6)根据方程（62），计算该时间间隔后排水沟中间的水头 $M_{(t+\Delta t)}$。

3.3 水分利用与作物生产的关系

H. van Keulen和H. H. van Laar

3.3.1 蒸腾系数的概念

为了让植物同化作用所必须的 CO_2 进入体内，植物必须通过孔穴与大气发生联系。叶片外表的小孔即气孔就起着这种联系作用。图31是叶片的垂直截面示意图。它表明了气孔的位置。在图中，气孔只分布在叶背；其它种类的作物中，叶片的上面也可能存在气孔。CO_2 是通过这些气孔进行扩散交换而被吸收的。

扩散速率可用普通的欧姆定律方程表示：

$$V_{CO_2}=\frac{(CO_2)_{ext}-(CO_2)_{int}}{R_{CO_2}} \tag{65}$$

式中，

V_{CO_2} 为 CO_2 进入植物的扩散速率（公斤/米^2·秒），

$(CO_2)_{ext}$ 为外部空气中 CO_2 的浓度（公斤/米^3），

$(CO_2)_{int}$ 为气孔内 CO_2 的浓度（公斤/米^3），

R_{CO_2} 为 CO_2 的扩散阻力（秒/米）。

CO_2 的总扩散阻力包括两个部分：一部分是叶面边界层的空气阻力，另一部分是气孔阻力。在整个同化过程中还有第三种重要的阻力，即气孔与真正利用 CO_2 的叶绿体之间存

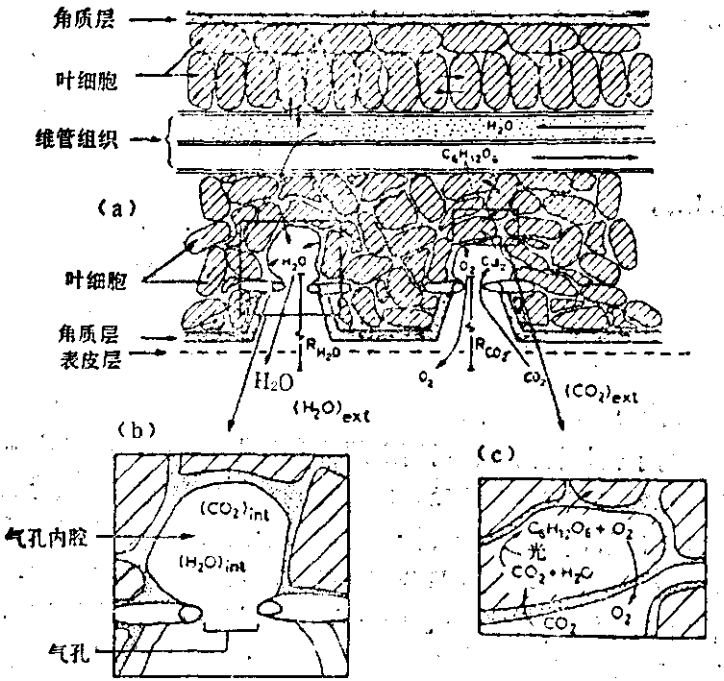


图31 (a)叶片垂直截面的示意图，
(b)放大的气孔，
(c)放大的光合作用活细胞

在的阻力(图31)。这种阻力称为羧化作用阻力(carboxylation resistance)或叶肉阻力。与前两者相比，一般第三种阻力是微小的。气孔内是湿润的(图31b)，因此，气孔内的空气处于水汽饱和状态。当气孔张开时，气孔内的空气与大气（常处于非饱和状态）相连。结果，水汽从气孔向大气扩散。其扩散速率也可以用类似于方程(65)的方程表示：

$$V_{H_2O} = \frac{(H_2O)_{int} - (H_2O)_{ext}}{R_{H_2O}} \tag{66}$$

式中，

V_{H_2O}为水汽向大气扩散的速率(公斤/米^2·秒)。

$(H_2O)_{int}$为气孔中的水汽浓度，其数值等于该叶温时的饱和水汽压(公斤/米^3)。

$(H_2O)_{ext}$为大气中的水汽浓度(公斤/米^3)。

R_{H_2O}为水汽的扩散阻力(秒/米)。

图31a表明，CO_2从大气向气孔扩散(原文误为"CO_2从气孔向大气扩散"——译注)的阻力R_{CO_2}，它与水汽沿同一路经的扩散阻力相当。由于CO_2分子比水分子大，而扩散阻力又取决于分子的大小，所以两者的数值并不相等。在相同条件下，R_{CO_2}比R_{H_2O}大1.66倍。考虑到这一点，由方程(65)和(66)可以看出，冠层的蒸腾作用(水分利用)与CO_2阻力存在一定的关系。如2.1节解释的那样，校正呼吸损失后，植物的干物质产量与CO_2同化量呈直接的比例关系。由于呼吸作用也决定干物质产量，且与CO_2的总同化量并无固定的比例关系。因此，下面引入两个不同的概念，来描述水分利用与干物质产量的关系：(1)水分蒸腾与同化作用的比率(TAR)，用每固定一公斤CO_2蒸腾多少公斤水来表示；(2)蒸腾系数(TRC)，用每生产单位重量干物质蒸腾多少公斤水分表示。蒸腾系数不仅取决于同化作用与蒸腾作用的关系，而且还取决于植物干物质的产量和组成。

早期研究农业科学的人已经注意到水分利用与干物质产量之间的关系，也已有许多试验准确地测定了两者之间的依赖关系。Briggs和Shantz(1913，1914)总结了许多最早期的工作。他们用"水分需要量(water requirement)"这一术语来表示水分利用与干物质产量之间的关系。水分需要量的定义是，生产单位重量干物质所需的水分数量(即相当于蒸腾

作用的当量系数)。他们指出，不仅不同品种间的水分需要不同，而且同一品种在不同年份或不同环境下所得的数值也不一样。后一变化的一个主要原因，可以从方程(65)与方程(66)的比较中找出。R值固定不变，即气孔的开闭和边界层厚度固定不变时，如大气与气孔内的水汽浓度差异较大，则水分损失速率较快。因此，大气相对湿度较低，叶温较高时，水分损失较多。CO_2的浓度是几乎不变的，因为大气中的CO_2浓度相当稳定。

在后来的分析中，de Wit (1958) 并不是直接用水分利用与干物产量的关系来描述环境条件的影响，而是用生长期内的平均蒸发需要(潜在蒸发蒸腾，见3.1节)来代替水分利用。根据表35中不同年份间盆栽玉米的结果可以说明这一过程。蒸腾系数的数值，在大小之间几乎可相差一倍。图32是用干物质产量对生长期内的总水分损失与平均蒸发需要两者之比进行作图。结果表明，蒸腾系数的变化确实主要是由于该生长期内蒸发需要的不同所造成的。这表明，尽管干物量与水分利用之间有密切的联系，但环境条件对它们的实际数量关系却有很大的影响。

如前所述，种植在相同环境中的品种之间也有很大的差异。如2.1节所述，这种差异主要表现为光合途径的不同。在某一气孔度时——即蒸腾速率是固定的，C_4植物的羧化酶与CO_2的亲合力较高，它比C_3植物同化CO_2的速率快。因此，具有后一光合途径的植物，蒸腾与同化的比值较大。

蒸腾系数的变化的另一种来源是冠层的气孔调节类型。在某些情况下，同化作用是以这样一种方式控制的：通过调节气孔的启闭，使气孔中CO_2浓度[$(CO_2)_{int}$]在一个大范围的同化速率内，保持稳定(Goudrioan和van Laar,1978b)。根据

表35 不同年份中在 Akron Colorado 盆栽的 North Western Dent 玉米品种的实测蒸腾系数

年份	干物量（克）	蒸腾（公斤）	蒸腾系数（公斤/公斤）
1911	160.7	58.8	365.9
1912	432.0	117.9	272.7
1913	356.3	141.1	396.0
1914	304.3	111.5	366.4
1915	112.0	28.4	253.6
1916	180.5	90.0	498.6
1917	336.8	120.5	357.8

资料来源：Briggs & Shantz, 1913; 1914; Shantz & Piemeisel, 1927

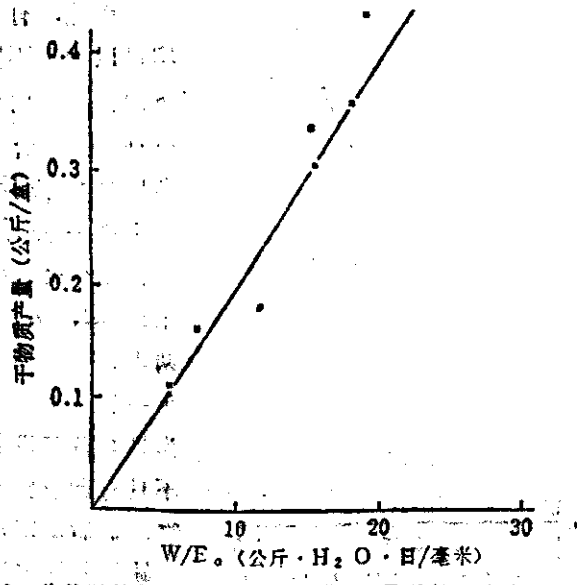


图32 盆栽种植的 Northwestern Dent 品种的玉米中干物质产量和蒸腾与自由水蒸发比率之间的关系（资料来源：Briggs 和 Shantz, 1914）

方程(65)，这意味着：随浓度梯度[$(CO_2)_{ext}-(CO_2)_{int}$]的变化，$R_{CO_2}$值也应按一定比例改变，以保持$V_{CO_2}$不变。图33表明人为控制条件下，玉米植株的$V_{CO_2}$与$1/R_{CO_2}$的关系。这一机制的结果是，譬如，在低光照强度下，即CO_2同化由有效能量决定时，植物将部分关闭气孔而进行调节，因而有效地降低了蒸腾作用。因此，与不具有这种调节机制的植物相比，具有调节机制的植物表现为蒸腾／光合比率较小，因而蒸腾系数较低。高光照强度时，CO_2的扩散速度由同化作用决定。扩散速率是由CO_2浓度梯度控制的。由于C_3植物体内的CO_2较C_4植物高，因此在高光照强度时蒸腾系数也存在差异。

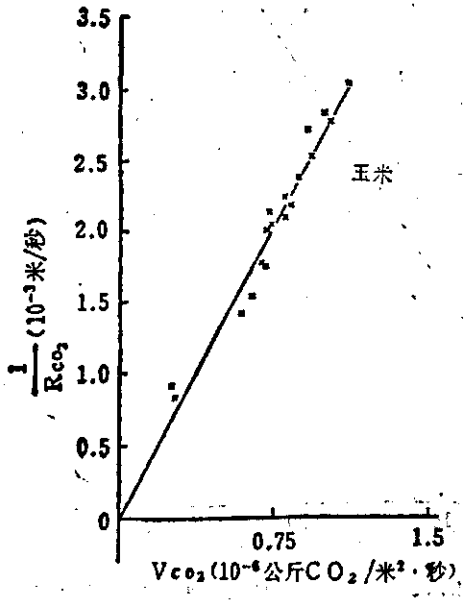


图33 玉米叶片的CO_2净同化速率(V_{CO_2})与CO_2总传导的关系

因此，有一种方案可以确定不同条件下的蒸腾／同化比率(用固定一公斤CO_2蒸腾多少公斤H_2O，或生产一公斤CH_2O蒸腾多少公斤H_2O表示)，即，对C_3和C_4两类植物分别考虑，每一类又进一步划分为具有调节机制的和不具有调节机制的作物，最后确定水汽压亏缺的差异水平。表36列举了一些数据，用详细的模拟冠层同

化作用与蒸腾作用的模型进行了计算(de Wit等,1978)。

表36 不同条件下蒸腾/同化比率(公斤水/公斤CO_2)

			蒸腾/同化比率		
相对湿度(%)			25	50	75
植物类型	C_3植物	R*	84	70	56
		NR	150	116	90
	C_4植物	R	57	45	35
		NR	120	95	72

* R表示调节气孔，NR表示无调节气孔。

3.3.2 蒸腾系数的应用

根据作物特性和气候条件，从表1和表2可以查出在任何时间与地点的组合下CO_2的每日总潜在同化量(F_{gc},单位为公斤／公顷·日)。在考虑了所关心的时段内平均水汽压的亏缺的状况后，由表36可以查出相应的蒸腾/同化比值(TAR)。把上述两者相乘，即可得到潜在蒸发速率(公斤／公顷·日)。

练 习 41

为了把以公斤／公顷·日表示的蒸腾作用转换为更常用的单位毫米／日，转换系数应为多少？

在3.1节介绍了用彭曼的对方程组合的方法计算潜在蒸发蒸腾。在作物冠层相当郁闭的情况下，土壤蒸发可以忽略，潜在蒸发蒸腾在数值上与潜在蒸腾相等。在前一节中，已经讨论过，蒸腾／同化比值取决于植物类型和气孔的行为。用彭曼方程计算潜在蒸腾的许多成功应用，都是建立在下述事实的基础上的：潜在蒸腾的数值非常接近于具有调节气孔

(这似乎在大田中是最常见的情况)时的计算值。C_3植物与C_4植物之间的蒸腾／同化比率差异，主要是由于同化速率不同的结果；而蒸腾作用，尤其是高光照强度下的蒸腾作用，则基本上是固定的。在作物不具有调节气孔的情况下，彭曼方程低估了作物的潜在蒸腾。有人通过把彭曼值与由详细的，以生理学为基础的作物生长模型的计算值相比较，求出了此条件下的校正系数。现将C_3和C_4两类作物在阴天和晴天两种天气条件下的计算结果列于表37。

表37　没有气孔调节时把彭曼蒸发蒸腾值转化为作物潜在蒸腾的校正系数

植物类型	天空状况	
	晴天	阴天
C_3	1.47	2.10
C_4	1.60	3.00

当土壤暂时缺水时，部分气孔关闭，同化和蒸腾差不多受到同样程度的影响，因此，蒸腾系数不变。根据这一特点可以判断缺水对干物质产量的影响。当确定潜在蒸腾后，根据3．2节介绍的土壤水分平衡方程，可以求出可供植物吸收的有效水含量。若有效水含量低于潜在蒸腾，则实际蒸腾达不到潜在蒸腾。因而，实际同化的$CO_2(P_{gc})$应直接根据实际蒸腾量来求得：用实际蒸腾量除以前面已经确定的蒸腾／同化比率，即$P_{gc}=T/TAR=$或$P_{gc}=F_{gc}\times T/T_m$（见3.2节）。

练习42

假定有一种具有气孔调节的C_4植物，在生长季节中可供

蒸腾的有效水为200毫米，估算某总干物质产量。该时间内的平均相对湿度为75%。如果换成没有气孔调节的C_3植物，结果又为多少？

3.3.3 养分状况的影响

一个与水分利用有关的基本问题，就是缺少养分对干物质产量与水分利用之间的关系的影响。前节所述蒸腾系数不变一点是有条件限制的，de Wit(1958)在其分析结果中认为这一结论只限于在“养分位不太低”的情况下适用；Viets(1962)的结论认为：“所有的证据都表明，如果施肥提高了产量，则可以大大提高水分利用率”。

后一结论似乎已被以色列内盖夫沙漠北部的天然草本植被的试验结果(图34)所证实：尽管施氮肥的植被生长速度比不施氮肥的快得多，但两者的水分损失基本上相等。然而，在萨赫利恩地区却得到与此相反的结果：施用氮肥提高了天然牧草的生长速度，同时蒸腾速率也比较高(Stroosnijder和Koné,1982)。

对于上述问题的一种更基本的解决方法，必须考虑CO_2同化作用和蒸腾作用的基本过程。一种最方便的做法是在控制条件下同时测定两个交换过程。图35是温室种植的玉米在最佳供氮和次最佳供氮(sub-optimun)条件下不同叶片的试验结果。用测定的净CO_2同化速率对水汽交换的总传导率作图。其中总传导率为气孔阻力与边界层阻力之和(方程(66)中的R_{H_2O})的倒数。总水(转下行)汽交换就是直接测定的蒸腾。植物供氮最佳时的净CO_2同化速率，明显高于次最佳供氮时的净CO_2同化速率，但水汽的传导率也按一定比例增加，因此，同化／蒸腾比率基本不变。这一现象与萨海利恩地区

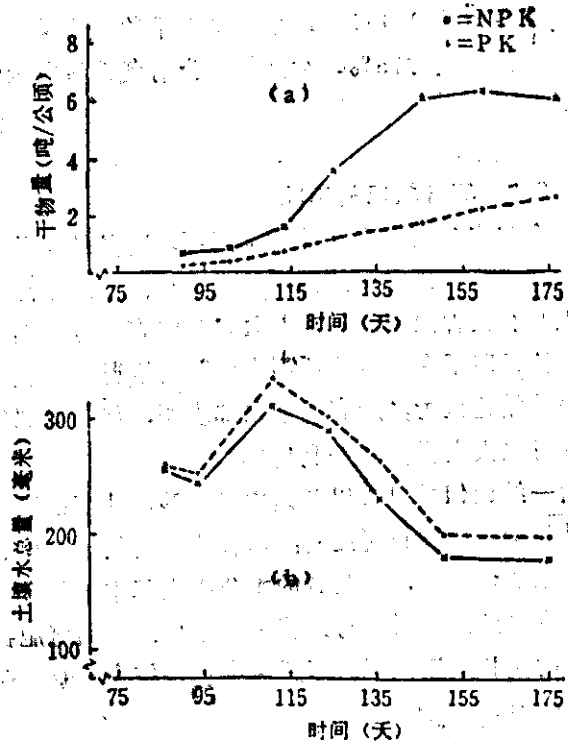


图34 施氮或不施氮肥时天然草本植被的累计干物质积累量(a)和该植被的根层土壤水总量与时间的关系(b)。

(根据以色列米格达1972～1973年的资料)

生长的植物的结果是相一致的。这也表明，内部的CO_2浓度对气孔有调控作用，即由于缺氮而降低同化作用，从而表现出部分气孔关闭。

图35中，直线的斜率代表相应的阻力下的CO_2浓度梯度，即从大气到气孔内CO_2浓度的下降值。用任意一点的P_n除相应的$1/R_{H_2O}$(后者乘以1.66，以表明H_2O分子与CO_2分子的体积差异)，可求出浓度的下降值。

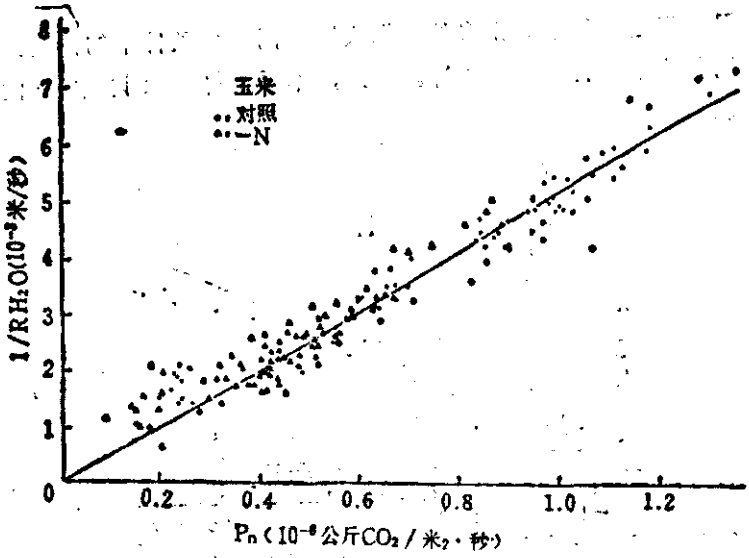


图35 最佳和次最佳供氮条件下玉米叶片的净同化速率Pn与水汽总传导率($1/R_{H_2O}$)的关系

练 习 43

(1)图33中，玉米叶片的CO_2的浓度梯度是多少？

(2)若大气中CO_2浓度为330，vppm，气孔内腔中CO_2浓度为多大？提示：20°C时，1摩尔气体的体积为24分米³。

图36是内盖夫北部天然植被中一种C_3草本植物(*phalaris minor*)的结果，它与图35中玉米的结果相似。此处尽管缺乏很有说服力的证据，但也可以看出一种趋势：植物供氮最适宜时，同化／蒸腾比率也比较适合。然而，也可能存在这样的情况：当光照强度高于测定仪器测得的光强度时——这在大田中是常见的，同化／蒸腾比率之间就表现出较明显的差

异。但是一般没有太多的证据表明不同养分条件下的蒸腾/同化比率具有很大的差异。因此，本书不打算探讨这一问题。

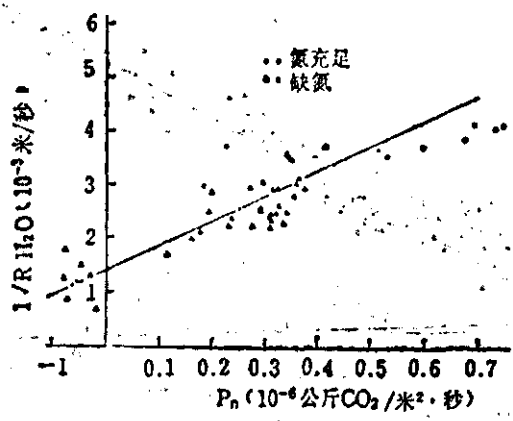


图36 最佳和次最佳供氮时*phalaris minor*叶片的水汽总传导率($1/R_{H_2O}$)与净同化速度P_n的关系

3.3.4 蒸腾系数和水分利用率

尽管不同营养条件下蒸腾与同化的关系可能并不改变，但由于降雨或灌溉也会影响整个水分利用率（以每利用单位水分的干物质产量表示）。缺氮时植物积累干物质的速率比施肥时慢得多，这会使地面缺乏覆盖的时间延长。在延长的这段时间内，地面直接蒸发会损失大量水分，尤其是地面靠间歇雨保持湿润时更是如此(3.2节)。这部分损失的水分对干物质的生产并不起作用，因此，计算蒸腾系数前应予以扣除。表38和图37所列出的苜蓿灌溉试验结果证明了这一点(Bauder和Bauer,1978)。

表38的结果表明，随灌溉水的增加，蒸腾系数减小。可

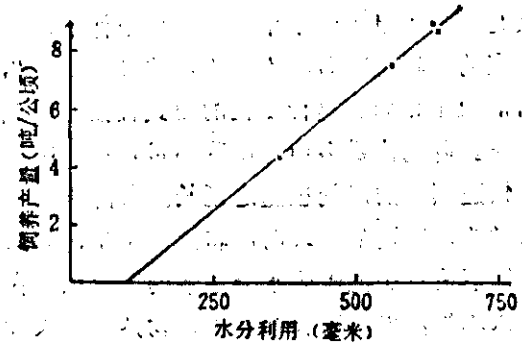


图37 苜蓿的水分利用与饲料总产量的关系

（资料来源：Bauder & Bauer，1978）

表38 苜蓿的饲料产量、水分利用和蒸腾系数

（公斤水/公斤干物质）

处 理	饲料产量（公斤/公顷）	水分利用（毫米）	水分利用效率（公斤/公斤）
W_1	4324	363	839
W_2	7536	561	744
W_3	8994	635	706
W_4	8747	643	735

资料来源：Bauder 和 Bauer，1978。

是图37表明。所有的点都在同一直线上，这说明蒸腾系数并未变化。直线与X轴的截距表示非生产性水分消耗量，即该条件下的地面直接蒸发，但在其他情况下还应包括深层排水。因此，这种图形分析是一种较基本的解释方法。

练 习 44

图37中，苜蓿的蒸腾系数为多少？

尤其是在降雨量少的干旱和半干旱条件下，降雨模式一般是不稳定的。这意味着，不同年份的降雨量虽相同，但降雨次数可能很不相同。这种变化的模式直接影响降雨的地面蒸发损失。降雨次数多但每次降雨量较小，则地面湿润时间较长，快速蒸发的时间也随之延长。若降雨量相同，降雨量大但次数少，降雨后一段时间将地面干旱，导致所谓自覆盖作用，即形成一个能阻碍水分运输的干土层。在这种情况下，深层水不被蒸发而贮存起来供植物蒸腾。表39中给出一个实测的和两个假设的降雨分布模式，说明了土壤蒸发损失的大小（van Keulen,1975）。由表可以看出，蒸发损失可高达总水分输入的60%，而萨赫利恩地区的结果甚至更高(Stroosnijder和Koné,1982)。

表39 不同降雨模式中降雨量在蒸发和蒸腾中的分配

总降雨量（毫米）	降雨次数	蒸发量（毫米）	蒸腾量（毫米）
270	19	79	191
250	10	91	159
250	20	140	110

因此，区别田间水分利用率(包括各种损失)和实际蒸腾系数(生产单位干物质的实际蒸腾量)是重要的。所以，在水分平衡的计算中，这两个过程应分别处理(3.2节)。

3.4 水分限制生产的简单模型

H. van Keulen

3.4.1 引言

在上一节已介绍了确定可供植物吸收的有效水分的土壤

水分平衡，以及水分利用与干物质生产的关系。本节将在此基础上介绍计算生长季节中水分作为限制因子的作物产量估算方法。在这一计算过程中也可以提供关于各时期缺水程度方面的信息。这些信息包括要达到潜在产量所需的灌水量和补充水分的灌水时间。

这种计算方法的基本原理与3.2节介绍的原理相同，即以选定的可以定量描述系统状态的时刻为起点进行重复计算。在此条件下，系统的状态不仅由作物变量确定，而且由描述土壤水分状况的变量确定。计算前必须掌握这方面的情况。这种计算方法最早是在半干旱环境中的小麦作物中使用。因为这些地区已有关于作物、地点和气候条件方面的详细资料(Hochman,1978)。

3.4.2 试验详情

为了研究在特定生长期内缺水对作物生长和产量的影响，在试验中种植小麦作为供试植物（这是半干旱地区实际产量和潜在产量研究计划的一部分内容）。试验在以色列内盖夫沙漠(北纬30°，东经34°)进行。该地区为均质的风积灰漠境土，质地为壤质砂土。灌溉48小时后在大田测定田间持水量为0.225厘米^3/厘米^3，实验室测定的萎蔫系数为0.09厘米^3/厘米^3，总孔隙度为0.40厘米^3/厘米^3。

练习 45

可供作物吸收利用的土壤有效水的最大值是多少〔方程(52)〕？若在干旱季节结束时，土壤含水量处于萎蔫点，灌25毫米水后，湿润深度为多少？要使150厘米的潜在长根层都达到田间持水量，需要灌多少水？

1977年10月30日播种春小麦，品种为Lachish，播种10天左右全部出苗。作物被供给充足的养分(氮150公斤/公顷，磷90公斤/公顷，钾100公斤/公顷)。出苗时测定的土壤水含量表明，由于上茬作物灌水时仍残留一些水分，土壤下层的体积含水量为0.16厘米^3/厘米^3。为了保证正常发芽，在即将播种前进行灌溉，使表土(10厘米)湿润达到田间持水量。在对照处理中，供应充足的水分，以保证最适宜的水分供应，即灌水使根层达到田间持水量。此时，重量取样的有效水含量下降到其最大值的30%以下。每隔2周通过检查原状土柱确定根系的深度。在本例的处理中，通过人工控制灌溉可使作物在分蘖盛期与开花期之间出现水分协迫。

在距试验田2公里的标准气象站记录有关气象资料，即每天的最低和最高温度，湿球温度和干球温度、风程；在试验田处记录降雨量。从离试验田9公里左右的气象站得到每天全球总辐射资料。利用这些资料可计算气温、降雨量和潜在CO_2总同化量的旬(10天)平均值(表40)。据根气象资料，应用彭曼方程(3.1节)可以求出大气的总蒸发需求。这些数据列在表40中。

3.4.3 实际计算过程

表41给出计算过程。表中按顺序排列的字母对应于表中各行。由于本例中介绍的是持续干旱条件下的半干旱区的情况(即根层不受地下水影响，不存在毛管上升)，所以水分传导率很低，根层向下层传导的水分完全可以忽略不计，因此，地下水位上方的非饱和水流〔参见3.2节中的(CR－D)〕可以忽略。

表 40　小麦试验的有关输入数据

时期(10天)编号	T_a (℃)	P (毫米)	I_o (毫米)	F_{gs} (公斤/公顷·日)	ET_o (毫米/日)
1	15.2	0	0	251	1.85
2	12.9	0.1	0	257	1.76
3	10.4	7.4	0	225	1.47
4	8.4	19.6	0	263	1.14
5	8.8	1.6	0	257	1.23
6	7.9	0.2	0	258	1.41
7	12.4	0	0	260	2.22
8	11.5	0	0	297	2.27
9	12.3	0	0	338	2.87
10	11.7	2.2	81	344	2.72
11	15.9	0.1	96	402	3.65
12	13.6	3.9	0	374	4.25
13	13.2	0	0	437	4.40
14	17.0	4.2	60	464	5.26
15	19.6	0	0	457	5.56

表 41 水分限制产量的计算过程

1		2	3	4	5	6	7	8	9	10
时	期	T_a	TSUM	DVS	PGASS	RD	ET_a	P	I_e	IM
a	0					100				
b	1	15.2	152	0.14	15	220	1.85	0.0	0.	0.0
c	2	12.9	281	0.25	30.8	340	1.76	0.1	0.	0.01
d	3	10.4	385	0.35	47.3	460	1.47	7.4	0.	0.74
e	4	8.4	469	0.43	78.9	580	1.14	19.6	0.	1.96
f	5	8.8	557	0.51	123.4	700	1.23	1.6	0.	0.16
g	6	7.9	636	0.58	170.3	820	1.41	0.2	0.	0.02
h	7	12.4	760	0.69	205.4	940	2.22	0.0	0.	0.0
i	8	11.5	875	0.80	255.4	1060	2.27	0.0	0.	0.0
j	9	12.3	998	0.91	300.8	1180	2.87	0.0	0.	0.0
k	10a	11.7	1103	1.0	282.1	1288	2.72	2.2	81.	9.24
l	10b	11.7	1115	1.02	251.0	1288	2.72	0.0	0.	0.0
m	11	15.9	1274	1.27	293.5	1288	3.65	0.1	96.	9.61
n	12	13.6	1410	1.49	235.6	1288	4.25	3.9	0.	0.39
o	13	13.2	1542	1.68	244.7	1288	4.40	0.0	0.	0.0
p	14	17.0	1712	1.94	222.7	1288	5.26	4.2	60.	6.42
q	15	19.6	1750	2.0	187.0	1288	5.56	0.0	0.	0.0

续表 41

1		11	12	13	14	15	16	17	18	19
时	期	E_m	E_a	T_m	T	dM_r	dW_r	W_r	SM_r	S_r
a	0							22.5	0.225	250
b	1	1.74	1.74	0.11	0.11	1.91	0.08	23.1	0.105	4640
c	2	1.55	0.59	0.21	0.17	1.91	1.16	34.7	0.102	4929
d	3	1.16	0.43	0.31	0.22	1.91	2.00	54.7	0.119	2997
e	4	0.80	0.36	0.34	0.34	1.91	3.17	86.4	0.149	1370
f	5	0.64	0.39	0.59	0.59	1.91	1.09	97.3	0.139	1769
g	6	0.48	0.27	0.92	0.92	1.91	0.74	104.7	0.128	2375
h	7	0.47	0.24	1.75	1.75	1.91	−0.08	103.9	0. 10	3884
i	8	0.32	0.13	1.94	1.69	1.91	0.09	104.8	0.098	5578
j	9	0.32	0.11	2.95	0.64	1.91	1.16	116.4	0.098	5578
k	10a	0.39	0.10	2.22	0.57	1.91	10.48	210.7	0.163	976
l	10b	0.30	0.20	1.99	1.99	0.0	−2.19	208.5	0.162	1024
m	11	0.40	0.27	2.67	2.67	0.0	6.67	275.2	0.214	319
n	12	0.47	0.44	2.69	2.69	0.0	−2.74	247.8	0.192	532
o	13	0.48	0.40	2.47	2.47	0.0	−2.87	219.1	0.170	831
p	14	0.58	0.42	2.51	2.51	0.0	3.49	254.0	0.197	453
q	15	0.61	0.52	2.09	2.29	0.0	−2.81	248.4	0.193	497

续表 41

1		20	21	22	23	24	25	26	27	28
时	期	K_r	W_{nr}	GASS	MRES	ASAG	DMI	FR	IWRT	WRT
a	0	0.01	222.5							50
b	1	0.0002	203.4	15.0	1.5	13.5	9.5	0.44	4.2	92
c	2	0.00015	184.3	24.9	2.9	22.0	15.4	0.33	5.1	143
d	3	0.0003	165.2	33.6	5.1	28.5	20.0	0.26	5.2	195
e	4	0.0009	146.1	78.9	7.9	71.0	49.7	0.205	10.2	297
f	5	0.0006	127.0	123.4	15.3	108.1	75.7	0.16	12.1	418
g	6	0.0004	108.9	170.3	26.7	143.6	100.5	0.12	12.1	539
h	7	0.0002	88.8	205.4	41.8	163.6	114.5	0.09	10.3	642
i	8	0.0001	69.7	222.5	59.0	163.5	114.5	0.055	6.3	705
j	9	0.0001	50.6	75.5	75.2	0.3	0.2	0.03	0.2	707
k	10a	0.0015	33.4	73.0	69.1	3.9	2.7	0.01	0.0	707
l	10b	0.001	33.4	251.0	43.6	207.4	165.9	0.0	0.0	707
m	1	0.007	33.4	293.5	45.0	248.5	198.8	0.0	0.0	707
n	12	0.003	33.4	235.6	62.7	172.9	138.3	0.0	0.0	707
o	13	0.002	33.4	244.7	74.8	169.9	135.9	0.0	0.0	707
p	14	0.004	33.4	222.7	87.0	135.7	108.6	0.0	0.0	707
q	15	0.004	33.4	187.0	96.8	90.2	72.2	0.0	0.0	707

续表 41

1		29	30	31	32	33	34	35	36	37
时	期	FL	IWLV	DWLV	WLV	FS	IWST	WST	FG	IWGR
a	0				50					
b	1	0.56	5.3	0.0	103	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
c	2	0.67	10.3	0.6	200	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
d	3	0.80	12.0	1.7	303	0.14	2.8	28	0.0	0.0
e	4	0.53	26.3	0.0	566	0.265	13.2	160	0.0	0.0
f	5	0.46	34.8	0.0	914	0.38	28.8	448	0.0	0.0
g	6	0.39	39.2	0.0	1306	0.49	49.2	940	0.0	0.0
h	7	0.30	34.4	0.0	1650	0.61	69.8	1638	0.0	0.0
i	8	0.18	20.6	6.4	1792	0.765	87.6	2514	0.0	0.0
j	9	0.08	0.0	40.3	1389	0.81	0.0	2514	0.28	0.0
k	10a	0.02	0.0	30.9	1111	0.19	0.5	2519	0.78	2.2
l	10b	0.0	0.0	22.2	1089	0.0	0.0	2519	1.0	165.9
m	11	0.0	0.0	21.8	871	0.0	0.0	2519	1.0	198.8
n	12	0.0	0.0	17.4	697	0.0	0.0	2519	1.0	138.3
o	13	0.0	0.0	13.9	556	0.0	0.0	2519	1.0	135.9
p	14	0.0	0.0	11.2	448	0.0	0.0	2519	1.0	108.6
q	15	0.0	0.0	8.9	428	0.0	0.0	2519	1.0	72.2

续表 41

时	期	38 WCR	39 LAI	40 TADW	41 TWD	42 TWDL	43 TDWD
a	0		0.1	50	100	100	
b	1	0.0	0.21	103	195	195	
c	2	0.0	0.40	206	349	343	6
d	3	0.0	0.61	354	549	526	23
e	4	0.0	1.1	721	1046	1023	23
f	5	0.0	1.8	1385	1803	1780	23
g	6	0.0	2.6	2269	2808	2785	23
h	7	0.0	3.3	3311	3953	3930	23
i	8	0.0	3.6	4393	5098	5011	87
j	9	0.0	2.8	4395	5100	4610	490
k	10a	22	2.2	4420	5127	4359	768
l	10b	188	2.2	4586	5293	4503	790
m	11	2176	1.7	6574	7281	6273	1008
n	12	3559	1.4	7957	8664	7482	1182
o	13	4918	1.1	9316	10023	8702	1321
p	14	6004	0.9	10402	11309	9676	1433
q	15	6148	0.8	10546	11253	9802	1451

a 行是表 41 的第 1 行列出计算开始时的初始条件。对于小麦，选择出苗时作为起始点。假定此时相当于幼苗从依靠种子贮存物生长转变为由同化作用提供生长所需的物质的过渡时期。出苗时，幼苗的根系深度为 100 毫米（表中 a 行第 6 列），根层总含水量为 22.5 毫米（第 17 列，W_r）。因此根层的体积的含水量（第 18 列）为：

$SM_r = 22.5/100 = 0.225$ 厘米³/厘米³

应用方程（27），计算第 19 列中根层的基质水头 S_r 为：

$$S_r = \exp\{\sqrt{[-\ln(SMr/SMo)/r]}\} \quad (67)$$

此处，exp 表示自然对数的底数 e，中括号内的数值为指数，ln 表示自然对数。

对于供试土壤，根据测定结果采用 $\gamma = 0.0189$，因此：

$$S_r = \exp\{\sqrt{[-\ln(0.225/0.40/0.0189)]}\}$$

$$= 250 \text{厘米}$$

根据 3.2 节的方程（31），由 S_r 可计算出根层的平均水分传导率 K_r：

$$k_r = a \cdot (S_r)^{-1.4} \quad (68)$$

"a"值为 22.6，因此，

$k_r = 22.6 \times 250^{-1.4} = 0.01$ 毫米/日（第 20 列）

实际长根层深度与潜在长根层深度（本例中为 150 厘米）之间的土壤含水量 W_{nr} 可以作为一个独立的状态变量来计算，因为当根系向下生长时这部分水可供植物吸收。出苗时期的根层总含水量为 222.5 毫米（第 21 列），假定是均匀分布的。根系干重 WRT 为 50 公斤/公顷（第 28 列），叶片干重 WLC 也是 50 公斤/公顷（第 32 列）。假定常数比叶面积为 20 米²/公斤，由 WLM 可以计算出叶面积指数 LAI，即：

$LAI = 50 \times 20 \times 10^{-4} = 0.1$ 米²/米²（第 39 列）

按2.3节的方法求出四个辅助状态变量：地上部总干物量TADW(第40列)，此处等于这时唯一出现的地上部器官——叶片的重量；总干物量TDW(第41列)，等于叶片与根的总重(=100公斤/公顷)；把TDW分为活植物组织干重TDWE(第42列)和死植物组织干重TDWD(第43列)。

b行此行是生长季节中第1个10天的有关情况。此时期的平均气温T_a为15.2°C（第2列），用平均气温乘以10则得此10天的总积温为：TSUM=152日·°C(第3列)，总积温常用于表示作物的物候发育阶段(见2.2节和2.3节)。对于春小麦，出芽与开花之间所需要的积温为1100日·°C (van Keulen和Seligmen, 1986)。因此，作物的发育阶段可用总积温与1100的比值来计算：

DVS=152/1100=0.14(第4列)

从表40可查出，该时期内用CH_2O表示的潜在日总同化量为251公斤/公顷·日。从表42查不完全光截获(incomplete light interception)的校正因子RA。LAI=0.1时，校正因子为0.06。计算无水分协迫时的潜在总同化量：

PGASS=251×0.06=15公斤/公顷·日(第5列)

根据试验结果假定，若根系生长的土壤足够湿润时，根的伸长速度采用12毫米/日。此时，整个潜在长根层处于湿润状态，因而此时的条件是完全适宜的。此10天结束时，扎根层的深度应为220毫米(第6列)。

从表40查出10天中最大蒸发蒸腾ET_0，并列入表中(第7列)。此时期中，ET_0的数值为1.85毫米/日。下一列(第8列)则表示系统中水分的输入。这10天内没有降雨(P，第8列)和灌溉(I_e，第9列)，因而总入渗(IM，第10列)为0。在该地区盛行的气候条件下均未发现地面径流损失，因此，

表 42 不完全辐射截获时 CO_2 总同化量的校正因子($f_n=1-e^{-0.6\cdot LAI}$)

LAI	校正因子	LAI	校正因子
0	0	2.5	0.78
0.25	0.14	3.0	0.84
0.5	0.26	3.5	0.88
1.0	0.45	4.0	0.91
1.5	0.59	5.0	0.95
2.0	0.70		

各种情况下的入渗等于降雨和灌溉之和。根据植被荫蔽作用的校正因子，从潜在蒸发蒸腾可算出地面最大蒸发：

$$E_m=ET_0\cdot(1-RA) \qquad (69)$$

因此，这是植被光截获的互补部分。于是：

$E_m=1.85\times0.94=1.74$ 毫米/日(第 11 列)

因此，由根层平均含水量可求出实际蒸发。若土壤水分含量太低，供给地面的水分不能满足蒸发需要，实际蒸发就达不到最大值。van Keulen (1975) 介绍了土壤蒸发的详细处理过程。在本研究中，近似地假定在田间持水量到蒸发完全停止出现风干土 (3.2 节) 之间，蒸发速率呈直线下降。风干土的含水量 (SM_a) 估计为萎蔫点的 1/3。在此土壤中，其数值为 0.03 厘米³/厘米³。因而

$$E_a=E_m\cdot(SM_r-SM_a)/(SM_{fc}-SM_a) \qquad (70)$$

$$=1.74\times(0.225-0.03)/(0.225-0.03)$$

$$=1.74\times1=1.74 \text{ 毫米/日}$$

从理论上来说，根据 3.3 节概述的方法，由潜在总同化和蒸腾系数可求出潜在蒸腾。在大多数田间状况下，对于密闭的冠层，根据 Penman 方程计算得出的潜在蒸发蒸腾很接

近潜在蒸腾，这显然是由于大田作物中经常见到 CO_2 调节气孔的缘故。因此，“Penman（第7列）方程”被当作计算潜在蒸腾的基础。为了计算地面不完全覆盖时的作物最大蒸腾，计算总同化时也采用同一校正因子 RA。因而：

$$T_m = ET_o \cdot RA = 1.85 \times 0.06 = 0.11 \text{ 毫米/日（第 13 列）}$$

只有土壤向根系供应充足的水分，实际蒸腾才能达到最大值。正如 3.2 节所解释的那样，每种作物都有其特定的临界土壤水含量，高于这一数值的那部分水可以供植物自由吸收。临界水含量是由土壤物理性质和大气蒸发需要决定的。它可近似地表示为：

$$SM_{cr} = (1-P) \cdot (SM_{fc} - SM_w) + SM_w \qquad (71)$$

式中，

SM_{cr} 为临界土壤水含量（厘米³/厘米³），

P 为被消耗的土壤水所占比例（表20），

SM_{fc} 为田间持水量（厘米³/厘米³），

SM_w 为萎蔫系数（厘米³/厘米³）。

潜在蒸腾为 1.85 毫米/日时，P值为 0.86。因而，

$$SM_{cr} = 0.14 \times (0.225 - 0.09) + 0.09$$
$$= 0.109 \text{厘米}^3/\text{厘米}^3$$

由于实际含水量大大超过临界值，因此实际蒸腾（T，第14列）等于最大蒸腾。

植物-土壤系统中，水分的另一种“输入”就是由于根系向下生长的结果而能被植物吸收的土壤下层中的水分。在本试验中，通过假定潜在长根层（即根系尚未生长到的那部分土层）的含水量是均匀分布的，来求出这种“输入”的近似值。根据下式可以计算出因根系生长而进入到植物-土壤系统中的那部分水分，

$$dM_r = W_{nr} \cdot R_r / D_{nr} \quad (72)$$

式中，

dM_r为因根系生长而进入植物-土壤系统的水分(毫米/日)；

W_{nr}为潜在长根层中尚未长根的土层的总含水量(毫米)；

R_r为根系生长速度(毫米/日)；

D_{nr}为潜在长根层中尚未长根的土层的厚度，因而D_{nr}等于潜在根层的深度D_{rm}减去已经长根的土层深度D_r(毫米)。

根据方程(72)计算根系生长所增加的土壤有效水：

$$dM_r = 222.5 \times 12/(1500-100)$$
$$= 1.91\text{毫米/日}$$

现在，我们已讨论了所有影响土壤水分平衡的过程，因此，可以估算它们对长根层土壤水分状况变化速度的影响：

$$dW_r = IM + dM_r - E_a - T \quad (73)$$

因而，

$$dW_r = (0+1.91-1.74-0.11)$$
$$= 0.06\text{毫米/日(第 16 列)}$$

10 天结束时，根层的总土壤水分，等于起始时的水分，再加上变化速度乘以时间间隔。

$$W_r = 22.5 + 0.06 \times 10$$
$$= 23.1\text{毫米(第17列)}$$

假定土壤水分是均匀分布的，由根层的水分可求出土壤体积含水量的平均值(第18列)。即：

$$SM_r = W_r / D_r \quad (74)$$

式中，

SM_r为根层的土壤体积含水量(厘米^3/厘米^3)，

W_r为根层的土壤水含量(毫米)，

D_r 为根系深度(毫米)。

在这 10 天中：

$SM_r = 23.1/220 = 0.105$厘米/厘米

根据方程(67)和方程(68)，计算根层的基质水头S_r和平均导水率K_r。为了全面起见，此处把这些重量都包括在内，但使用时并未采用。因为在此情况下，地下水上方的非饱和水流可以忽略不计。因此，本例中可以不考虑第 19 列和第20列。

用这 10 天的初始含水量(a行第 21 列)减去dM_r与Δt之积(第15 列)，即为该期结束时剖面中非长根层((non rooted zone)的总含水量：

$W_{nr} = 222.5 - 1.91 \times 10$

$= 203.4$毫米(第21列)

第 22 列的数据表示实际总同化 AGASS。在这 10 天内，由于不存在缺水的影响，AGASS 等于潜在总同化(第5列)，即实际蒸腾等于最大蒸腾。由作物的活干物质总量和相对维挥呼吸速率R_m，可以求出维持呼吸，即维持活细胞活动及其结构所需的能量。作物开花期以前，R_m的数值为 0.015公斤CH_2O/公斤干物质·日即：

$MRES = 0.015 \times 100$

$= 1.5$公斤/公顷·日(第23列)

实际总同化减去维持呼吸，就是用于增加干物重的有效同化物的数量：

$ASAG = 15 - 1.5 = 13.5$公斤/公顷·日(第24 列)

在考虑了与主要光合产物转化为植物结构物质有关的消耗后，植物干重的增加速率可由有效同化产物总量得到。对于平均组成的结构物质而言，这一消耗约占所消耗的碳水化

合物总量的30%左右(Penning de Vries 1975)。因而，

$$DMI = 0.7 \times ASAG = 0.7 \times 13.5$$

$$= 9.5 \text{公斤/公顷·日(第25列)}$$

同时，同化物也用于植物器官的形成(2.2节和2.3节)。不同器官占总干物量的比例主要是由作物物候阶段决定的。在本节讨论的生产水平下，干物质生产有时是受水分有效性限制的。根据功能平衡原理(functional balance principle, Brouwer, 1963)，植物遭受水分协迫时，可能会影响各类器官占干物量的比例。然而，要定量确定水分协迫对同化物分配的确切影响是困难的。因此，在本研究中不考虑这部分影响。

表43所列数据表示物候阶段与同化物分配给各类器官的关系。作物发育阶段是决定同化物分配给根系所占比例(第26列)的自变量。如2.3节所述，对于每一个10天的时间间隔来说，其相应的数值可以由初始值和终值的平均数来表示。在这10天中，

$$DVS = (0 + 0.14)/2 = 0.07$$

从表43可知，DVS为0.07时，分配到根系中的干物质所占比例为0.44(第26列)。因而，根系的增重速率(干重)为：

$$IWRT = FR \cdot DMI = 0.44 \times 9.5$$

$$= 4.2 \text{公斤/公顷·日(第27列)}$$

10天结束时，根系的总干物量等于初始干物量，(a行第28列)加上增重速率与时间间隔(步长)之积，即，

$$WRT = 50 + (4.2 \times 10)$$

$$= 92 \text{公斤/公顷(第28列)}$$

从表43查出DVS为0.07时，分配给叶片的比例为0.56

表43 不同植物器官中干物质分配系数与发育阶段的函数关系

发育阶段	f_r	f_l	f_s	f_g
0	0.50	0.50	0.0	0.0
0.1	0.42	0.58	0.0	0.0
0.2	0.33	0.67	0.0	0.0
0.3	0.26	0.60	0.14	0.0
0.4	0.20	0.52	0.28	0.0
0.5	0.15	0.43	0.42	0.0
0.6	0.10	0.34	0.56	0.0
0.7	0.07	0.23	0.70	0.0
0.8	0.04	0.12	0.84	0.0
0.9	0.02	0.06	0.42	0.55
1.0	0.0	0.0	0.0	1.0

(第29例)叶片干重的增加速率，等于叶片的同化物分配系数(即0.56)与干物质增加速率之积：

$$IWLV = FL \cdot DMI = 0.56 \times 9.5$$

$$= 5.3\text{公斤/公顷·日(第30列)}$$

此期结束时，叶片的重量等于其初始值加上增重速率与时间间隔之积：

$$WLV = 50 + 5.3 \times 10$$

$$= 103\text{公斤/公顷(第22列)}$$

春小麦生长早期，植株只有根系和叶片(van Keulen 和 Seligman，1986)，因此，茎部所占比例(F_s，第33列)为0，其增重速率(IWST，第34列)亦为0。此期结束时，茎部的总重量(WST，第35列)仍为0。作物处于营养生长期，因而没有形成籽粒(第36，37，38列)。根据比叶面积常数(20米²/公斤干物质)和叶面积，可以由叶片干重计算出这10天结束时的

叶面积指数：

$LAI = 103 \times 20 \times 10^{-4}$

$= 0.21$ 米²/米²（第39列）

最后，从本期结束时各器官的重量可求整个冠层的变化。整个地上部的干物重等于地上部各器官（即叶、茎、籽粒）重量之和：

$TADW = 103 + 0 + 0$

$= 103$公斤/公顷（第40列）

植物的总干物重，等于地上部干物重加根系的干物重：

$TDW = 103 + 92$

$= 195$公斤/公顷（第41列）

此时尚无死组织（第43列），因而活组织的总干物重（第42列）就等于整个植物的总干物重。这就是第一个10天期间的全部计算过程。

c行在这第2个10天内，各项计算原则上与上述过程相同，因此不作详细介绍。

此期的日平均气温为12.9°C（第2列），因而10天结束时的总积温为281日·°C（第3列），相应的发育阶段为：

$DVS = 281/1100$

$= 0.25$（第4列）

根据实测辐射强度（表40）和不完全光截获的校正系数，可计算出未遭受水分协迫时的总同化作用。当叶面积指数为0.21时，校正系数为0.12（表42）。所以：

$PGASS = 257 \times 0.12$

$= 30.8$公斤/公顷·日（第5列）

根系的生长未受阻碍，因此，此期结束时根系深度为340毫米（第6列）。由表40查出潜在蒸发蒸腾为1.76毫米/日（第

7列）。此期内的降雨为0.1毫米，除以Δt则使之换算成日降雨速率P＝0.01毫米/日（第8列）。没有进行灌溉（第9列），因此，入渗速率为0.01毫米/日（第10列）。考虑植被的部分荫蔽作用，根据潜在蒸发蒸腾计算最大土壤蒸发：

$E_m = ET_o(1-RA) = 1.76 \times 0.86$

$= 1.55$ 毫米/日（第11列）

受土壤水含量影响的土壤蒸发的校正因子为：

$(SM_r - SM_a)/(SM_{fc} - SM_a)$

$= (0.105 - 0.03)/(0.225 - 0.03)$

$= 0.38$

实际土壤蒸发等于$E_m \times 0.38$，即0.59毫米/日（第12列）。最大蒸腾是潜在蒸发蒸腾的互补部分。它等于：

$T_m = ET_o \cdot RA = 1.76 \times 0.12$

$= 0.21$毫米/日（第13列）

为了测定实际蒸腾，必须通过方程(71)计算临界土壤水含量。代入P＝0.86（表20）：

$SM_{cr} = (0.14 \times 0.135) + 0.09$

$= 0.109$厘米^3/厘米^3

实际土壤体积含水量为0.105厘米^3/厘米^3（b行第18列），它低于临界值。用下式计算蒸腾作用的降低：

$$T/T_m = (SM_r - SM_w)/(SM_{cr} - SM_w) \quad (75)$$

将各数值代入上述方程：

$T = 0.21 \times (0.105 - 0.09)/(0.109 - 0.09)$

$= 0.17$毫米/日（第14列）

根据方程(72)计算因根系生长而使根层水分增加的速率：

$dM_r = 203.4 \times 12/(1500 - 220)$

$= 1.91$毫米/日　（第15列）

根层含水量的变化速率按以下平衡关系计算：

$dW_r = 0.01 + 1.91 - 0.59 - 0.17$

$= 1.16$毫米/日（第16列）

10天结束时根层的土壤水总量为：

$W_r = 23.1 + (1.16 \times 10)$

$= 34.7$毫米（第17列）

10天结束时平均体积含水量，等于总水量除以根系深度：

$SM_r = 34.7/340$

$= 0.102$厘米^3/厘米^3（第18列）

剖面中非根层的含水量为：

$W_{nr} = 203.4 - dM_r \cdot \Delta t = 203.4 - 19.1$

$= 184.3$毫米（第21列）

考虑到缺水的影响，由潜在总同化量计算实际总同化量：

$GASS = PGASS \cdot T/T_m = 30.8 \times 0.17/0.21$

$= 24.9$公斤/公顷·日（第22列）

维持呼吸速率可以从活性物质的总干重与相对维持呼吸速率之积求得：

$MRES = 0.015 \times 195$

$= 2.9$公斤/公顷·日（第23列）

增加干物质产量的有效同化量，等于实际总同化量与维持呼吸之差：

$ASAG = 24.9 - 2.9 = 22.0$公斤/公顷·日（第24）列）

考虑生长呼吸时，植物干物质的增长速率为：

$DMI = 22.0 \times 0.7$

$= 15.4$公斤/公顷·日（第25列）

本时期的中期的发育阶段为：

$(0.25 - 0.14)/2 + 0.14 = 0.195$

于是，根据表43可求出增加的干物质分配给根系的比例。FR的数值为0.33(第26列)。从下式可求得根系的干物质增长速率：

$$IWRT = FR \cdot DMI = 0.33 \times 15.4$$
$$= 5.1 \text{公斤/公顷} \cdot \text{日(第27列)}$$

且，

$$WRT = 92 + 5.1 \times 10 = 143 \text{公斤/公顷(第28列)}$$

从表43查出，分配给叶片的干物质所占的比例为0.67(第29列)，因而：

$$IWLV = 0.67 \times 15.4$$
$$= 10.3 \text{公斤/公顷} \cdot \text{日(第30列)}$$

在本研究中，假定植物缺水时叶片凋萎，以减少蒸腾损失。蒸腾减少的速率，与相对蒸腾速率T/Tm成比例。在水分协迫严重时，假定最大凋萎速率为0.03公斤干物质/公斤叶片·日。

蒸腾减少时的干重降低速率可从下式计算：

$$DWLV = RDR \cdot WLV \tag{76}$$

而，

$$RDR = 0.03(1 - T/T_m) \tag{77}$$

这10天中，

$$RDR = (1 - 0.17/0.21) \times 0.03 = 0.0057/\text{日}$$

所以

$$DWLV = 0.0057 \times 103$$
$$= 0.6 \text{公斤/公顷} \cdot \text{日(第31列)}$$

此期结束时叶片的干重为：

$$WLV = 103 + (10.3 - 0.6) \times 10$$
$$= 200 \text{公斤/公顷(第32列)}$$

发育阶段为0.195时，分配给茎部和籽粒中的干物质所占比例仍为0，因此33到38列均为0。从叶片干重可以推算10天结束时的叶面积指数：

$LAI = 200 \times 20 \times 10^{-4} = 0.40$ 米^2/米^2(第39列)

地上部总干物量等于活叶片重与死叶片重之和，即：

TADW＝200＋6＝206公斤/公顷(第40列)

再加上前面计算的根系重量即为总干物量：

TDW＝206＋143＝349公斤/公顷(第41列)

活性物质的总干物量等于343公斤/公顷(第42列)，而死组织重量为6公斤/公顷（第43列)。第二个10天内的计算介绍完毕。

第三到第九个10天的有关计算方法与前面没有本质的区别，因此在此不作详细介绍。从第八个10天起，出现严重缺水；因为本试验有意不进行灌溉。在第四个10天，由于下了一场很大的雨，所以表现水分协迫的时间推迟了一些。由于缺水，第八个10天后，生长基本停止，绿色叶片迅速减少(表41)。

k行这是第十个10天的生长期(第1列)，此期平均气温为11.7°C(第2列)。此期结束时的总积温为：

TSUM＝998＋117＝1115日·°C

相应的发育阶段为：

DVS＝1115/1100＝1.02

此时花期已过，因为花期前后发育的温度关系不同。此时期应分为两个部分。前一部分为直至开花时的那段时间，其长短可由剩余积温来确定：

(1100－998)/11.7＝9天

因此，在第10a期结束时，总积温应为1103日°C，发育阶段

为1.0，即花期。没有水分协迫时，按普通方法计算总同化量；其结果为254公斤/公顷·日(第5列)。此期结束时根系在生长，根系深度为1288毫米。

这里应该注意，根据表43中的分配系数，此时期中对根系的贡献可以忽略不计。可是，若根系仍在生长，则需要消耗同化物。因此，这期间出现的缺水很可能会影响根系的分布模式而导致根系继续生长。然而，在我们的方案中没有考虑这一影响，因而表43中的数据可以不选择地使用。此期的潜在蒸发蒸腾为2.72毫米/日。这表明，随时间的推移，比较温暖、干旱的春季正在逐步逼近。

为了在花期消除水分协迫，因此，此时灌了一次81毫米的大水，使根层含水量大大高于临界含水量。由于同期内还降过一次小雨，因此总入渗为9.24毫米/日(第10列)。

计算土壤最大蒸发速率时，假定干死的叶片仍未脱落而影响光截获。因此计算荫蔽作用的影响时，采用最大叶面积指数LAI=3.6。此时期的最大土壤蒸发速率应为：

$$E_m = ET_o \cdot (1 - RA) = 2.72 \times 0.11$$

$$= 0.30\text{毫米/日(第11列)}$$

根据方程(70)，由于根层含水量低，所以实际土壤蒸发达不到最大值：

$$E_a = E_m \cdot (0.098 - 0.03)/(0.225 - 0.03)$$

$$= 0.10\text{毫米/日} \quad \text{(第12列)}$$

通常，最大蒸腾速率是根据潜在蒸腾速率来计算的，其数值为2.22毫米/日(第13列)。根据根层含水量，由最大蒸腾速率可以计算实际蒸腾速率。根据方程(71)计算的临界体积含水量为0.121厘米^3/厘米^3。由方程(75)可求得蒸腾速率的校正因子为：

$T = 2.22 \times (0.098 - 0.09)/(0.121 - 0.09)$

$= 0.57$ 毫米/日(第14列)

由于根系生长而使根层含水量增加的速率为1.72毫米/日(第15列)。从前9天的含水量增加速率的计算值可求出此期结束时根层的总土壤水，其数值为210.7毫米。由此可求出此时期结束时根层的体积含水量为0.163厘米^3/厘米^3(第17列)。校正蒸腾亏缺后，实际同化速率为73公斤/公顷·日(第22列)。根据植物活性物质的总干物量计算，维持呼吸速率为69.1公斤/公顷·日(第23列)。上述两者之差3.9公斤/公顷·日(第24列)中包括了干物质的增加速率2.7公斤/公顷·日(第25列)。这部分同化物则按表43中的分配系数，分别形成根、叶、茎和籽粒。

此期也象前一个10天期间一样，尽管未达到花期，但也有部分同化物向籽粒中转化。根据这一分配模式可以解释下述事实：在将要开花之前，大量同化物贮存在茎中，待以后形成籽粒时将其转移到籽粒中(van Keulen和Saligman, 1986)。在计算中，这部分同化物直接以籽粒重表示。此期的其他计算均按前面详细讨论的方法进行。

1行在第十个10天中，把剩下的最后一天专门列为一行。开花后，发育阶段由开花时的1上升到成熟时(事实上为灌浆结束时)的2。对于本试验中的以及其他品种的春小麦而言，此阶段所需的温度为650日·°C(van Keulen和Saligman, 1986)。

因此，开花后的发育阶段为：

$DVS = (TSUM - 1100)/650 + 1$(第4列)

由于开花时不再向根系输送同化物，因此假定根系生长停止(第26列)。第6列到第22列的计算与前面各行的计算并

无多大差异。故不再赘述。但下面几点是值得特别注意的：

（1）植物荫蔽影响土壤蒸发的校正因子仍保持为0.11（第11列），相应的最大叶面积指数为3.6米²/米²。

（2）根系停止生长后，因根系生长而"输入"的水分为0（第15列）。由潜在水分梯度所引起的剖面中根层与非根层之间的水分转移可忽略。因此，非根层贮存的土壤水保持不变（第21列）。

（3）开花时相对维持呼吸由0.015公斤/公斤·日变为0.01公斤/公斤·日。这一变化的主要原因是由于开花以后养分运送到正在发育的籽粒中，因而通常会使营养器官（vegetati vematerial）的含氮量迅速减少。此外，籽粒积累干物质所需的维持能量较少。因而，开花以后：

$$MRES=0.01\times TDWL$$

（4）基本光合产物转变为植物结构物质的转换系数，对于平均组成的营养器官为0.7，对籽粒则为0.8。同样，产生这一变化的主要原因是由于开花期以前籽粒含氮量低于营养器官的含氮量的缘故。

（5）叶片的寿命是有限的，即使在最佳生长条件下，部分早期形成的叶片也会枯死。开花后，枯死的叶片迅速增多，这主要是由于氮和其他必需生长物质向籽粒转移的缘故。在本模型中，这一过程是通过假定叶片的相对死亡速率为0.02公斤/公斤·日来加以考虑的。

练　习　46

从初始值2000公斤/公顷开始，计算开花10天后的叶片重量。首先用相对死亡速率0.02公斤/公斤·日和时间步长为一天进行计算。然后根据模型中所用的时间步长（即10

天）计算。两者的结果怎样？为什么？

从表41可知，在普通环境中，开花后仍可生长43天。计算得出的籽粒产量为6.2吨/公顷，地上部总干物重为10.5吨/公顷。

练　习　47

根据总干物量和地上部干物量，计算本例中的蒸腾系数。

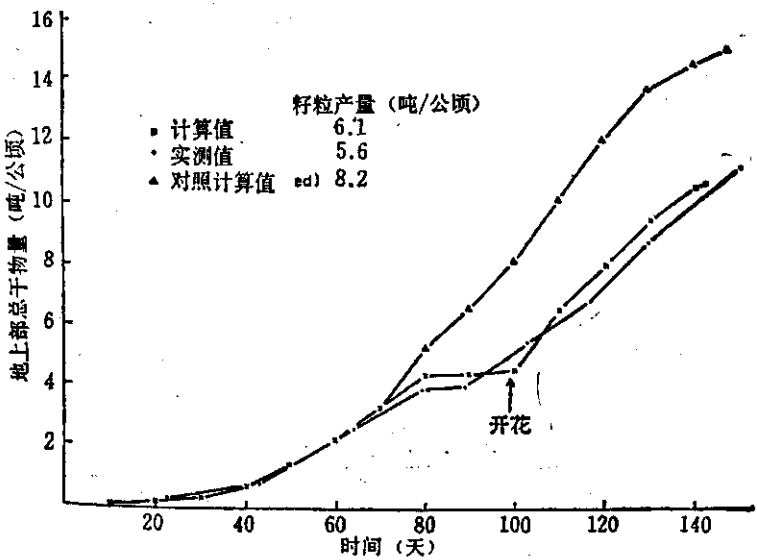


图38　中等缺水时小麦累积干物量的测定值与计算值的比较
（列出对照处理的干物量计算值以供比较）

3.4.4　与试验进行比较

图38比较了根据计算值和实测值所作的生长曲线。结果

表明，用总干物量表示两者的结果是相当一致的。可是，计算得到的籽粒产数却高于实测产量，这是没有充足的理由的。图38清楚地表明如果开花前后的测定值之间可以内插的话，那么上述两者间的差异就等于开花后累积干物量的差异。

（陈同斌译　杨守春、王涌清校）

第 四 章

根据有效养分确定作物产量

4.1 作物产量和养分需要量

H·van Keulen

4.1.1 引言

前面几章中已经说明植物合成有机质需要能量（由太阳提供），二氧化碳和水分。可是，植物组织中不仅包含碳、氢、氧，而且还包含有其他元素，如蛋白质中的N、P、S以及与有机阴离子伴生的K，在酶成分中还有多种其他微量元素。

植物必须通过根系从土壤中吸收这些元素，在多数情况下，土壤本身不能提供足够的营养以满足作物的需求。因此，作物产量水平可以根据作物所吸收的限制元素的数量测定出来。

前几章中已经从数量上讨论了能量和水分对农业生产过程的影响，这一章将讨论植物营养的影响，其不同之处是未对动态即时间变化方面加以考虑。

4.1.2 养分供应和作物效应

自上世纪中叶发现作物生长发育需要无机营养以来，在不同地区、不同作物上进行了不同元素的肥料试验。图39介

绍了这些试验的产量数据（即测定的产量，它通常是作为元素供应量的函数给出的）。本图是参考菲律宾国际水稻研究所(IRRi)进行的试验(Tanaka等,1964)绘制的，这个图清楚地指明在解释这些试验数据时所遇到的困难问题是：这些结果变异很大。

因此，应当承认，施肥所得到的产量效应必须符合两个条件：

1. 施到土壤中(对于围埂水稻是施到水里)的肥料必须被作物吸收。

2. 作物吸收后，必须利用它形成所需要的植物器官，如水稻、玉米的籽粒、木薯的块根。

上述两个过程都可能受到外部或内部条件的影响。象图39这样的表示方法，不能给出两者对最终产量效应的相对重要性。为了有助于说明肥料试验，产量的确定必须同时伴以对收获物作化学分析，以便计算植物吸收的化学元素及其在植物体中的分布。

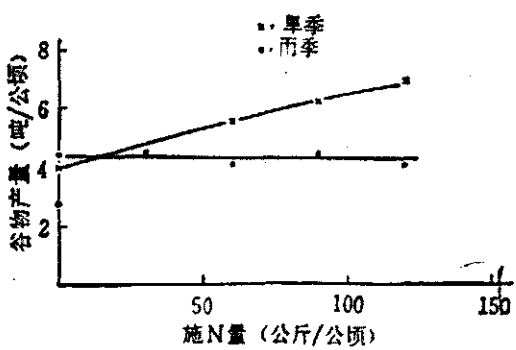


图39　在菲律宾洛斯巴诺斯国际水稻研究所，旱季和雨季种植水稻施用N素与产量的关系(Tanaka 等,1964)

当肥料试验中产量与化学组成已经被测定时，就可以按照Wit(1953)提出的试验结果图示法来说明问题。用图39同样的数据，以图40可以说明这种方法。

图40由三个图形组成：第一象限(象限a)说明了经济产量(籽粒)与植物地上部分(籽粒与秸秆)吸收的元素总量之间的关系，吸收总量是用籽粒和稻草的含N量乘收获的稻草和籽粒量计算出来的。象限b与象限a共用吸收量的轴，纵轴的向下方向表示N施用量，象限c表示产量与施N量的关系，如图39所示。这三个图不是独立的，通过消去一个变量的方法，一个图形总可以从其他两个图得到。

练　习　48

计算下列试验N的总吸收量

施N量(公斤/公顷)	产量(公斤/公顷)		N含量(%)	
	谷物	稻草	谷物	稻草
0	4400	4500	1.12	0.44
50	5450	5200	1.29	0.40
100	6200	6250	1.24	0.50
150	6350	6400	1.43	0.55

在象限a中，曲线靠下末端通过原点，即吸收值为零产量也等于零。由于吸收量系指籽粒和稻草中的总吸收量，从理论上说，可能存在只长稿杆而不形成籽粒产量的情况。在稿杆中含有一些N素，因此，在籽粒产量为零时，也有少量N被吸收。在实际应用时，这种现象可以忽略不计，同时可以把原点作为曲线的一部分加以考虑。N吸收量低时，总吸N量和籽粒产量之间存在比例关系。这个比例反映出在籽粒和稻草中存在最小含N量，在籽粒中，当N被稀释到最小含

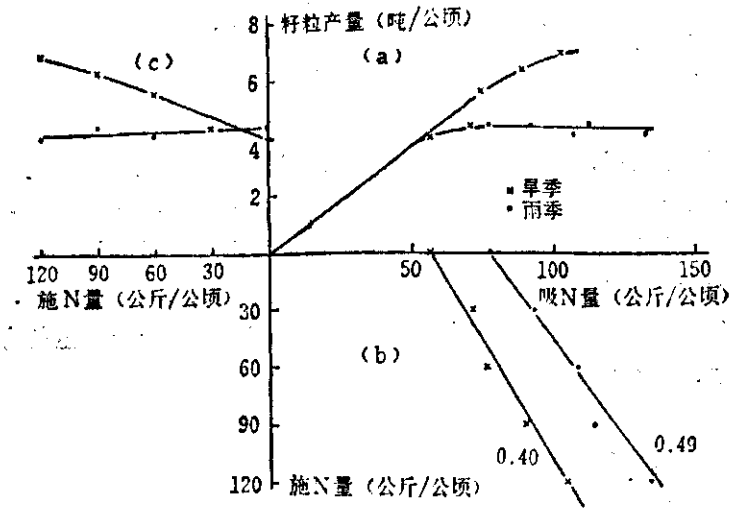


图 40　吸N量与产量的关系；施N量与吸N量的关系和施N量与谷物产量的关系；材料来自菲律宾洛斯巴诺斯国际水稻研究所围埂水稻旱季和雨季的结果(Tanaka 等，1964)。图的下半部分数字表示施肥的回收部分。

量时，干物质就不会进一步累积。处于生殖阶段的稻秆中的一部分游离N进入发育的籽粒中，保存下来的是残留的非活性氮，吸收每单位N素形成一定籽粒产量的事实也表明，籽粒产量与总干物质之间的比值(收获指数)这时不受强烈的影响。

在干旱和半干旱条件下，可能出现不同的情况。开花期以后，水分的限制由于气孔紧闭和叶片衰老加速，可能妨碍作物的同化作用，并因此干扰贮藏器官的生长发育。这些不利的影响对收获指数非常不利。另一个影响是，并非植物各个部位所有的N都能移动和转化，而且植物随残留含N量增高会枯萎。由于N素优先在贮藏器官中结合，后来又没有被稀释，因

此贮藏器官中的N素含量高(van Keulen, 1977; van Keulen 和van Heemst, 1982)。在这种情况下，N肥施用技术必须要审慎地施用肥料，以使种子成熟时的土壤水分正好用完。在半干旱地区，应该避免在作物生长早期过多施肥，因为多施肥会导致植物营养生长过旺并相应地利用很多水分，从而造成生殖阶段水分不足的危险，已对这些复杂的相互关系进行过试验和模拟(van Keulen 和 Seligman, 1986)。在收获的生物量中，低收获指数与高蛋白质含量联系在一起，大大降低了N素利用率，甚至在有限N供应情况下也是如此。因此，在这种情况下，从数量上预测N的吸收对经济产量的影响是比较困难的。

开花以后，当全N的吸收比例高时，类似的情况也可能发生。这种过程几乎不影响收获指数，但在贮藏器官中导致蛋白含量增高，同时植物营养体中的蛋白质不能再流动。在限制N素供应的条件下，这种情况很少发生，但在开花前期暂时水分短缺，而在开花后期水分供应丰富的情况下例外。在上述情况下，产量-吸收曲线必须小心加以应用。

练 习 49

计算练习48所介绍的试验处理。

收获指数与籽/秆比间的数学关系是什么？

N的吸收量增加，产量-吸收曲线偏离直线，反映出在收获物中N的含量增加。因而以每吸收单位N量的谷物产量表示的N素利用率下降，可是，按蛋白质含量计算的收获物质提高了。

最后，产量曲线达到平稳水平，这时进一步吸收N反映

不出较高的产量。达到这一点时，N 不再是植物生长发育和增产的决定因素。任何实际情况中的平稳点都是由抑制植物生长的因素所确定的。如果其他主要无机元素(如磷、钾)供应充分，同时土壤的化学性质(pH盐渍度)也是良好的，那么产量平稳点就等于按生产情况又计算的值，即在那种情况下光照或水分偶尔不足。如果采用适当排水和灌溉措施使土壤水分状况维持最佳值，产量平稳点就是按生产情况，计算的值，即生产潜力仅由光照和温度所决定。其他限制因素对平稳点的影响将在 4.1.2 节中详细论述。产量-吸收曲线将延伸到一点，在这一点植物已吸收很多的氮，可使整个生命循环中，在组织中保持最高N浓度。

产量-吸收曲线的各种分析表明如果施用的肥料只是通过其主要起作用的元素发生效应，则这种关系不受肥料类型的支配(van Keulen和van Heamst, 1982; van Keulen, 1982; van Keulen, 1977; de Wit, 1953)。

象限b中吸N与施N量的关系在全部施肥量范围内表现为直线关系，这是多数N肥试验的特征。当然当 N 肥用量很高时，可能出现这样的情况，植物一直处于N饱和状态，即N素含量总处于最大值，以致在最高施肥水平下，不能再增加吸收。可是，在多数实际情况下，象限 b 中的关系可由两个参数来描述；吸收轴的截距代表从不施肥土壤中的吸收量，而斜率代表植物地上部分吸收所施肥料的比例，这就是回收部分。

无肥区N的吸收有很大变幅，部分原因是土壤性质不同，另一原因是环境条件不同，如温度和降雨量的变化。此外，管理措施如轮作和水分管理的影响也是很重要的。

肥料的回收率可能在 0.1和0.8 之间变化；吸收效率受肥

料种类、施用方法和时间、环境条件等因素的影响。

练　习　50

在一定条件下，不施N肥处理，N的吸收为每公顷20公斤，每公顷施N量100公斤时，N的吸收为每公顷60公斤，N肥的回收率是多少？

N的回收率小于1，因为有许多过程对所施用的N进行争夺，如：植物吸收，细菌固定挥发、淋洗和反硝化作用。施肥-吸收的线性关系明显地表明：所有这些过程都是以与土壤溶液中矿化N，(NO_3^-，NH_4^+)的浓度成比例的速率进行的，因此，这些过程均可以按一阶反应加以描述。

从这个图示中可以明显看出：由于无肥区的吸收和施肥区的回收显示了很大的差异，因而象限c中的曲线在不同条件下可能变化很大。为了提出在给定条件下的改进方法，了解图40中描绘的全部三种关系是必要的。

练　习　51

以练习48所给的试验，作出三种象限的图解。

4.1.3　产量-吸收关系

初始斜率

水稻

在图41中，例举了一些水稻产量-N吸收曲线的典型实例，这些例子代表一定范围的品种、环境条件、肥料处理和管理措施。在所介绍的不同实例中，平稳状态的水平不一定是生产情况2的产量水平，因为N的用量高时，其他元素可

能供应不足，但是，关于这方面的资料比较缺乏。对于我们的目的来说那是不重要的，因为这里考虑的仅是产量-吸收曲线的初始斜率，而且，如果除氮素以外的其他元素不受限制，就可以使斜率上的点具体化。对不同曲线的检验表明，在51(图41a)和80(图41b)之间的例子中，以吸收的每公斤氮所生产的籽粒公斤数(每公斤籽粒含水0.15公斤)表示的初始斜率是不同的。这些变化反映了不同的试验中籽捍比率的差异，这种差异来源于生长条件或品种特性的不同。图41a的试验是在印度进行的，用的是高秆地方品种，秸秆产量很高，因此平均籽秆比率低，只有0.53。另一方面，在秘鲁沿海平原种植的改良矮秆品种IR8，结果秸秆比为1.3(图41b)。

练　习　52

计算图41a和41b中各种实例的收获指数。

在图41其他实例中，每公斤籽粒的最小含N量约为0.01公斤，每公斤秸秆含N量约为0.004公斤。在这些参数的基础上，可以计算出初始效率E_{in}为：

$$E_{in}=1/(0.01+s/g\times 0.004) \qquad (78)$$

其中：s是秸秆重(公斤/公顷)

g是籽粒重(公斤/公顷)

练　习　53

计算图41a和41b两个实例的理论效率。

van Keulen(1977)对水稻产量－N吸收曲线的广泛分析指出，初始效率总是在图41中两个极值范围之内。盆栽试验也得到类似的结果。

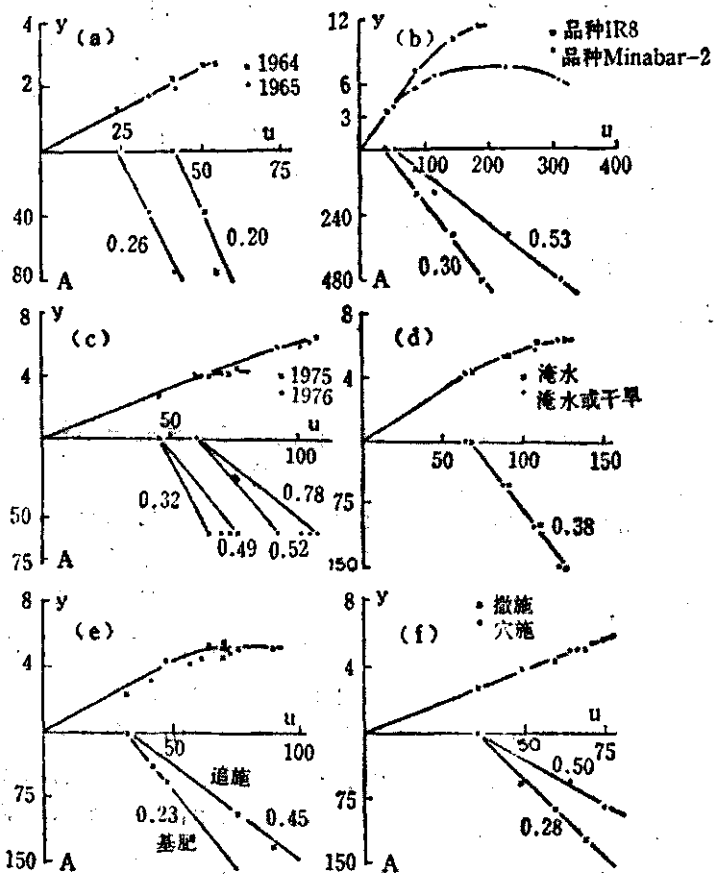


图41 总吸氮量u（公斤/公顷）与含水量为0.15公斤/公斤的籽实产量y（吨/公顷）的关系以及施氮量A（公斤/公顷）与围埂水稻吸氮量的关系。图下半部的数字是施肥量的回收比例。a.印度(Majumdar, 1973)；b.秘鲁(Sanchez等, 1973)；c.美国(Reddy和Patrick, 1978)；d.菲律宾(Khind和Ponnamperuma, 1981)；e.泰国(Koyama等, 1973)；f.印度尼西亚(Ismunadji和Sismiyati, 1976)

在图42中，介绍了对水稻磷效应的类似分析。由于在磷对水稻生产为限制因素的地区缺乏足够的详细田间数据，盆栽的某些试验结果也用上了。在不同的试验中每公斤籽粒和秸秆最小的含磷量分别为0.0011 和 0.0005 公斤。应用如N同样的方法可计算出，假如籽/秆比是同一值，初始效率为吸收每一公斤磷生产625公斤稻谷。图42 中的斜率在 410～625公斤稻谷/每公斤磷范围内变化，这种变异性主要是籽/秆比变化的结果。

练　习　54

计算图42b所介绍试验的籽/秆比，在本试验中初始效率为吸收每公斤磷可以生产 410 公斤谷物。

图43介绍了水稻产量－吸钾曲线，从图上可以看出，增加吸钾量对水稻产量明显的影响。但许多文献中详细的试验报告表明，钾的增产效应仍然比磷低，钾的初始斜率变化大于氮或磷。原因之一是，在成熟期大部分钾存在在稻秆之中，因此，籽/秆比的变异对曲线的斜率有比较明显的影响。由于生长后期叶片的枯死，也要损失一部分钾。引起变异的另一个原因可能是钾元素在植物中具有双重功能，一部分钾对某种生理功能是主要元素，另一部分钾做为正电荷伴随有机和无机阴离子在植物中起到运输作用。在后一功能中，如果有足够的钾元素，它就可以完全代替其他阳离子的作用。

然而，在成熟期稻秆中钾的最低含量约为 0.008公斤/公斤，在谷粒中钾的含量在0.0025和0.005公斤/公斤之间。籽/秆比为 1 时，这两个值结合产生每吸收 1 公斤钾生产55～80公斤籽粒的初始斜率。图43中介绍的实例全部在此范围内。

玉米

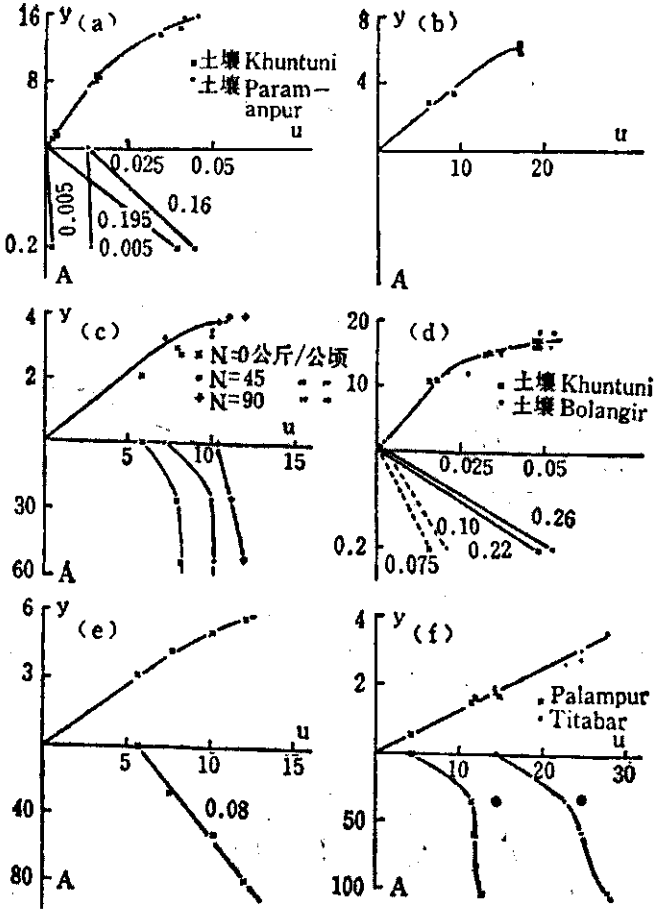


图 42　总吸磷量 u(公斤/公顷)与含水量为0.15公斤/公斤的谷物产量 y(吨/公顷)的关系，施磷量 A (公斤/公顷)与围埂水稻吸磷量的关系。图下半部的数字表示肥料的回收部分(在 a 和 d 中，y、u 和 A 均以克/盆为单位)。a. 盆栽试验，印度(Dash等，1982)；b. 马里(Traore，1974)；c. 尼日利亚(Bredero，1966)；d. 盆栽试验，印度(Sadanandan 等，1980)；e. 印度(Agarwal，1980)；f. 印度(Motsara 和 Datta，1971)

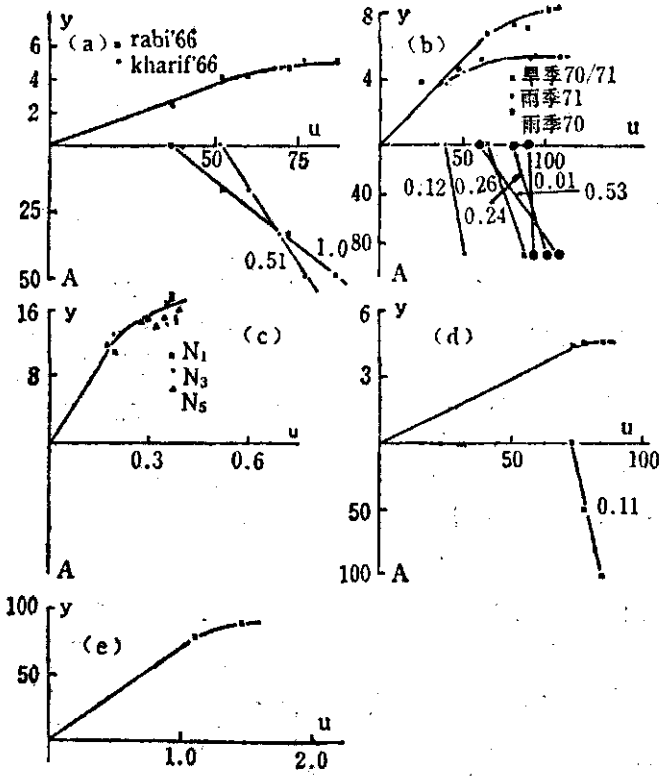


图 43　总吸钾量 u(公斤/公顷)与含水量为15%的谷粒产量 y(吨/公顷)的关系，以及施 K 量 A (公斤/公顷)与围埂水稻吸 K 量的关系。图下半部的数字表示施肥的回收部分(c 和 e 图中，u、y 和 A 单位为克/盆) a. 印度(Mahapatra和Panda, 1972)；b. 塞内加尔（Beye, 1974）；c. 盆栽试验，印度(Esakkimuthu等，1975）d. 盆栽试验，印度（Agarwal, 1980)；e. 印度(Patnaik和Gaikawad, 1969)

图44介绍的是玉米产量－氮吸收曲线。尽管玉米是C_4型品种，对N吸收比较经济（Brown，1978），但吸收每公斤N生产玉米的初始斜率在此处为55～70公斤之间，因此玉米产量－吸收曲线的初始斜率似乎与水稻没有什么不同。在有效N很低的情况下，植物秸秆中残留N的含量可以降低到0.002，它比水稻中的N要低，但是籽/秆比的正常变化掩盖了这种影响，图44的试验中，平均籽/秆比的值变动范围在0.85～1.33之间。

图45中例举了玉米对于磷的产量－吸收曲线，吸收每公斤磷生产玉米的初始效率值为420～590公斤，也与水稻的情况非常相似，这意味着对这种禾本科作物，组织中的最低含磷量也是相同的。

在文献上查到的有关玉米钾的适当试验比水稻更为有限。图46中所介绍的无论哪个试验，都再次表明其初始斜率变异性很大。其中可能有某些试验不施钾肥，土壤供钾能力很高，以致难以达到植物组织中最低水平的含钾量。

木薯

在图47，48和49中分别介绍了木薯的三种大量元素的产量-吸收曲线，在这些实例中，吸收每公斤N的初始效率可以生产34（图47a）到175公斤（图47b）干块茎，如果按照水稻和玉米的N素利用效率应用到块茎作物上，其利用率的变化似乎太大。可是，根重与地上部分茎重的比率在0.8和1.75之间变化，这种变异远大于籽/秆比的变异。其部分原因，可能由于在后期生长阶段茎上的落叶没有计算在最后的干物重中（Nijholt，1936），也可能由于进入叶片中的N素的不可逆性在分析中被忽略了，因此也必然影响到利用的N素总量。再加上木薯的生长习性不象谷类作物那样有一定生长期，即木

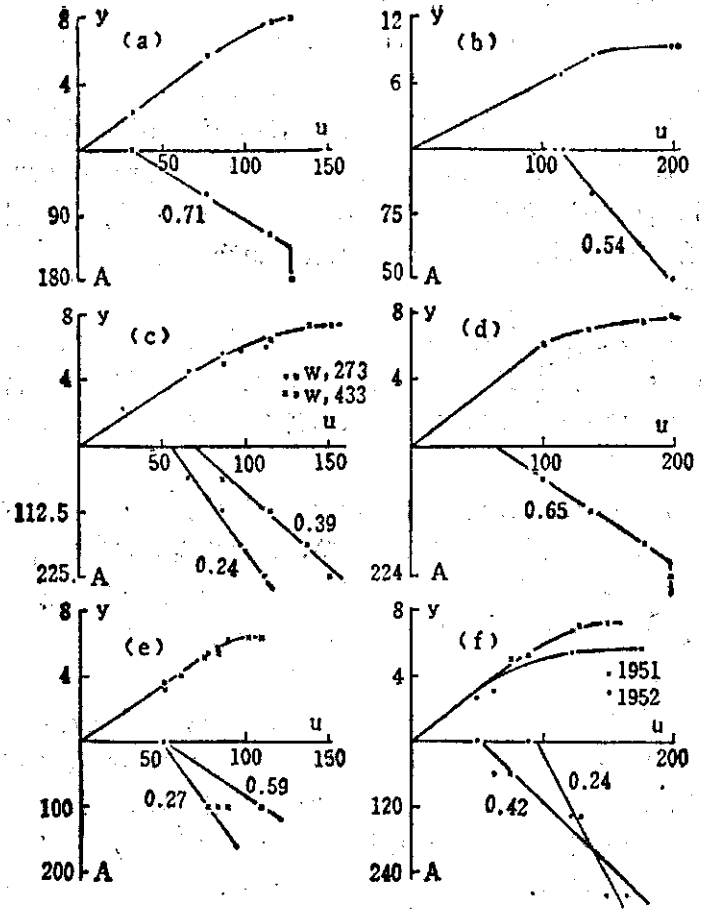


图44 玉米总吸N量u(公斤/公顷)和含水量15%时的籽粒产量y(吨/公顷)的关系以及施N量A(公斤/公顷)和吸N量的关系。图的下半部数字表示肥料的回收部分。a.尼日利亚(Balasubramanian和Singh,1982);b.美国(Olson,1980);c.美国(Jung等,1972);d.美国(Rabuffetti & Kamprath,1977);e.巴西(Grove等,1980);f.美国(Flynn等,1957)。

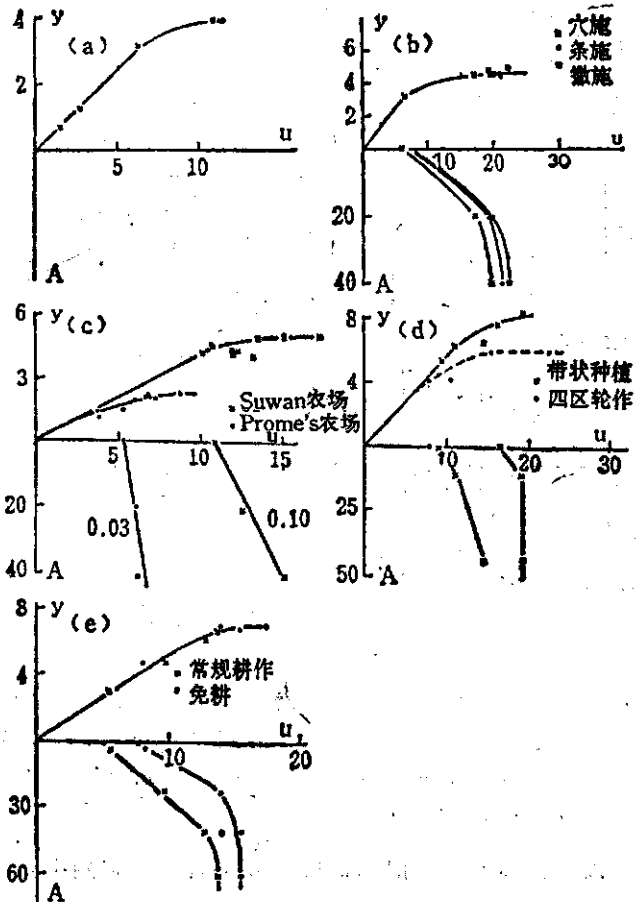


图 45　玉米总吸磷量 u（公斤/公顷）和含水量为 15% 时的籽粒产量 y（吨/公顷）的关系以及施磷量 A（公斤/公顷）与吸磷量的关系。图的下半部数字表示肥料的回收部分。a. 马里（Traore, 1974）；b. 尼日利亚（Kang 和 Yunusa, 1977）；c. 泰国（Suwanarit, 1975）；d. 美国（Krantz 等, 1949）；e. 美国（Moschier 和 Martens, 1975）

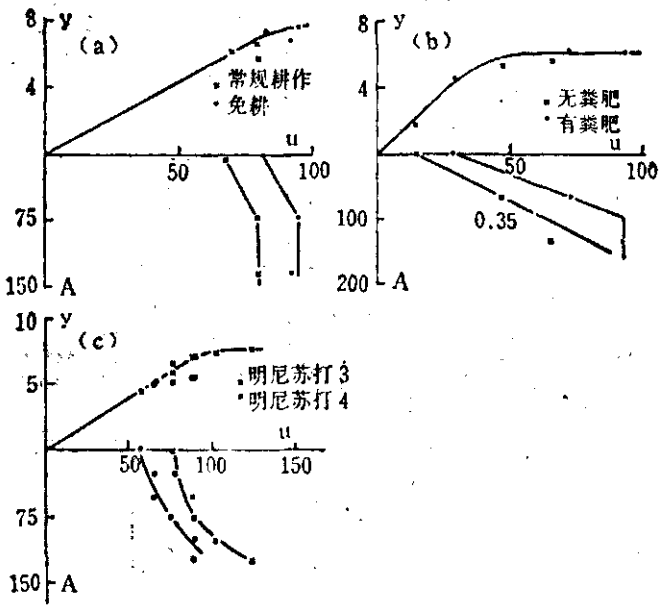


图 46　玉米吸钾总量 u（公斤/公顷）与含水量15%时籽粒产量，y（吨/公顷）的关系以及施钾量 A（公斤/公顷）和吸钾量的关系。图下半部的数字表示肥料的回收部分。a. 美国（Moschler 和 Martens，1975）；b. 法国（Loué，1963）；C. 美国（Hanway等，1962）

薯种植以后块根的收获时间可以从 6 个月延续到24个月，随生长期的增加，块根与地上部分重量的比率也相应增加（见 2.2 节）。根据大量资料来源，生长期为 12 个月的木薯块根 N 素的最低含量估计为 0.003 左右，已有的报告表明植株地上部分各部位的N 素含量有相当大的变异，这种变异也与搜集到的叶片状况有关。变化范围大约是每公斤干物质含 N 量为 0.0065～0.01 公斤，如果是第一个数值中，可能在分析化验

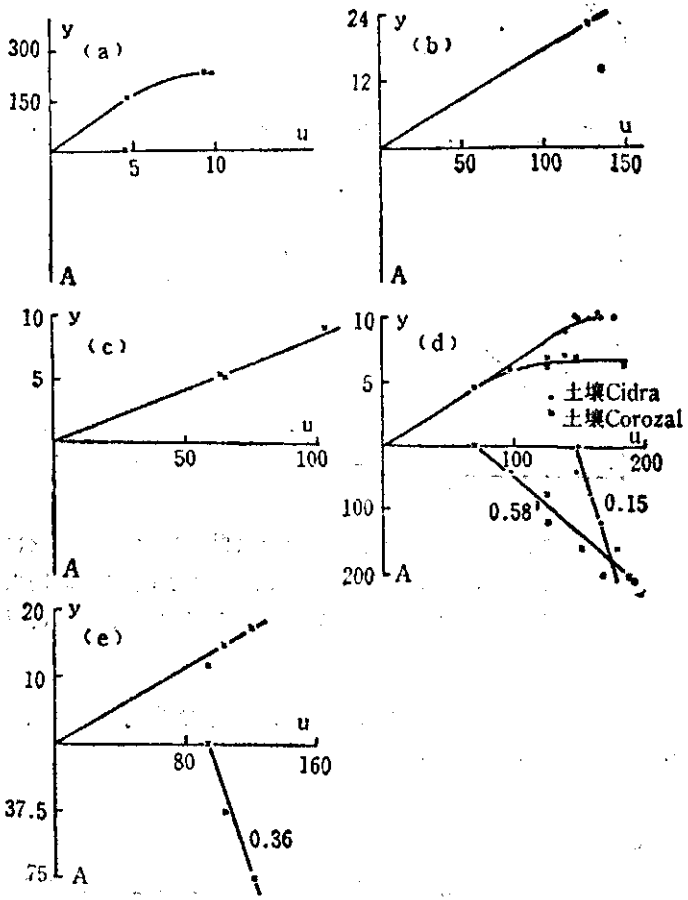


图47　木薯总吸N量u(公斤/公顷)和块根干物产量y(吨/公顷)的关系以及施N量A(公斤/公顷)和吸N量的关系。图下半部的数字表示肥料的回收部分(图a中，u，y和A均以克/盆为单位)，a.阿根廷(Orioli等，1967)；b.印度尼西亚(Nijholt,1936)；c.马来西亚(Kanapathy,1974;) d.波多黎谷(Fox等,1975)；e.泰国(Somsak,1974)

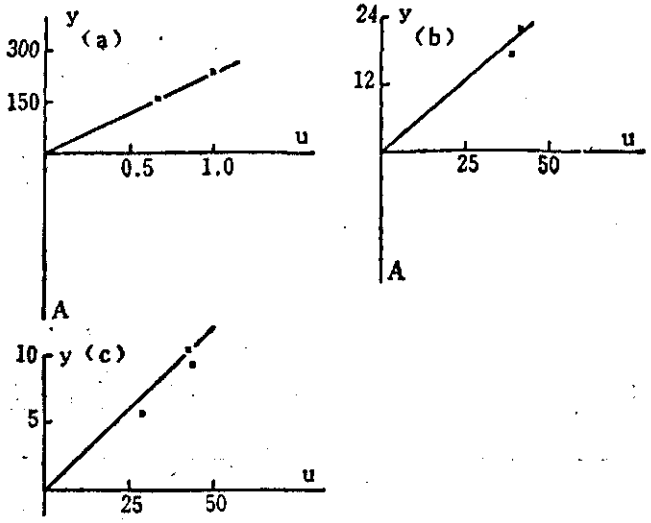


图48　木薯总吸磷量u（公斤/公顷）与块根干物产量y（吨/公顷）的关系（图a中，u，y和A以/克盆为单位）。a.阿根廷(Orioli等,1967)；b.印度尼西亚(Nijholt, 1936)；c.马来西亚(Kanapathy,1974)

时掺入了较老的叶片。综合迄今为止有关参数的极值将得到可以预期的初始效率的范围。

练　习　55

以本节所提供的数值为基础，计算木薯N素的最大和最小初始效率值。应用什么方程式？

根据吸N量与产量的关系，把它应用于作物对磷和钾的吸收。在图48中，磷利用的初始效率为吸收每公斤磷生产230～510公斤干块茎。图49表明吸收每公斤钾生产干块茎的

数值范围在 40～100 公斤之间。

总之，应当说明，定量的数据不足和木薯收获期长短不定的生长习性，对这种作物营养效应的处理是不利的。尽管如此，这里所给的指示值对不同生产条件下作物营养需要量可能是重要的近似值。

高产水平

如在本书 4.1.1 节中所提到的，产量-吸收曲线的产量水平上限可由供应不足的生长因子来确定。按照定义，曲线的这一平稳段是在所考虑因子的那一点以外，即一种特殊营养元素的吸收可以影响生长和产量。

图50所总结的某些试验数据用来说明不同生长因素对平稳水平的影响。图 50a 表明辐射水平在泰国中部平原围埂水稻的潜在生产情况中(生产情况 1)的影响。旱季作物成熟时期平均日照约 22兆焦耳/米^2，而雨季作物成熟期平均日照约为17.5 兆焦耳/米^2。

图 50b 说明水分供应对美国密苏里州玉米生长的平稳水平的影响。1951 年玉米生长季节总降雨量为 625 毫米，而1953年同样季节降雨量只有 306 毫米。该试验是肥料试验而不是灌溉试验，因此可以得出结论，平稳水平在1953年代表生产情况 2，而在 1951 年可能代表生产情况 1 或者生产情况 2。

图 50c 给出美国高粱籽粒产量，并说明施磷肥对平稳水平的影响。如果不施磷肥，平稳水平大约是 3500 公斤/公顷的籽粒产量，而施磷肥 22 公斤/公顷，平稳水平增加到大约 5500公斤/公顷。根据这一资料，无法得出后一水平是否一定代表生产情况 3？但似乎有这种可能。

图 50d 指种植在尼日利亚的围埂水稻，说明了相反的结

果。在不施N肥时施用磷肥可以增产，但增产效果很小，原因是N素很快成为限制因子。在氮素用量约100公斤/公顷时，产量水平随吸磷量的增加而增长到大约3200公斤/公顷。这对于那种情况来说似乎仍然是低产水平，但根据这个可用的资料尚难确定什么是增产的限制因素。

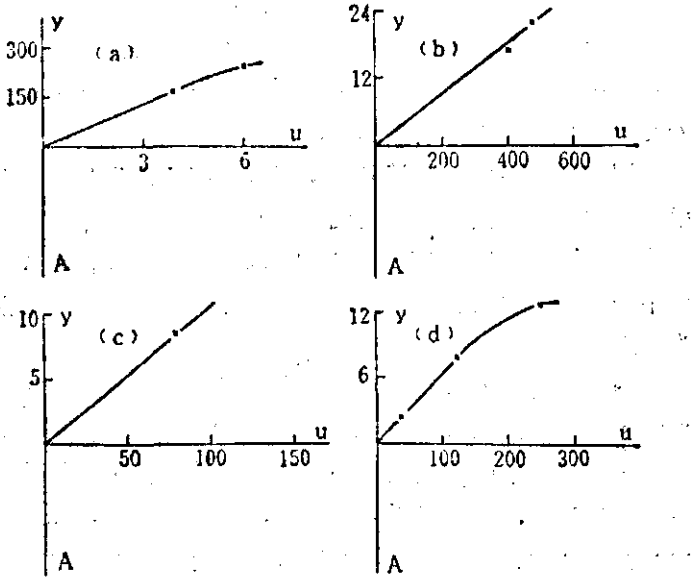


图49 木薯总吸钾量u（公斤/公顷）与根干物质产量y（吨/公顷）的关系（在图a中，u，y和A以克/盆为单位）。a.阿根廷（Orioli等，1967）；b.印度尼西亚（Nijholt，1936）；c.马来西亚（Kanapathy，1974）；d.马达加斯加（Dufournet和Goarin，1957）

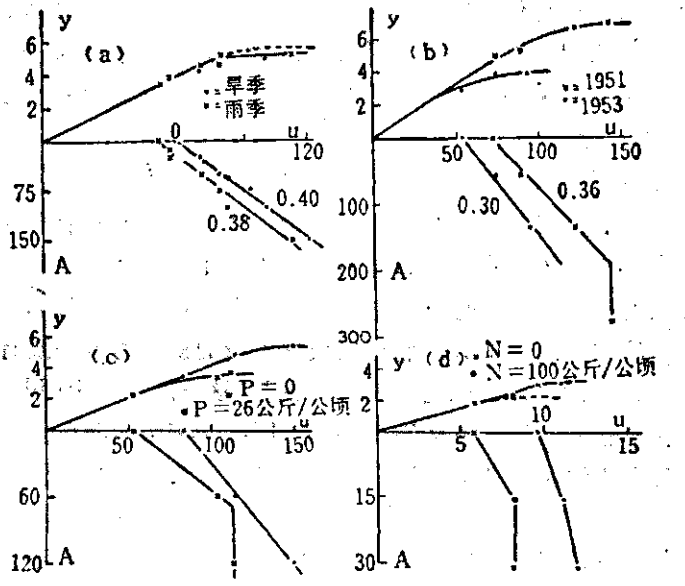


图50　养分的吸收量u（公斤/公顷）与产量y（吨/公顷）的关系以及养分施用量A（公斤/公顷）与养分吸收量之间的关系。图的下半部数字表示肥料的回收量。a.泰国水稻，y是谷物含水量为15%时的产量u和A以公斤N/公顷表示（Walcott等，1977年）；b.美国玉米，y是含水量为15%时的谷物产量，u和A以公斤N/公顷表示（Flynn等，1957）；c.美国高粱，y为含水量15%时的谷物产量，u和A以公斤N/公顷表示，（Roy和Wright，1973；1974）；d.尼日利亚水稻，y为含水量15%时的谷物产量，u和A以公斤N/公顷表示（Bredero，1965）

4.1.4　施肥量-吸收量的关系

单一元素

如果某一作物的产量潜力是根据植株吸收的特殊营养元素的数量进行估算的，那么必须作为施肥量的函数来估算吸收量。我们将对每种营养成分的这种关系分别加以讨论，区分出两个有关参数：不施肥时(零水平时)的吸收量和直线斜率(回收量)，

氮素

对于一定的作物来说，施肥量－吸收曲线与吸收轴相交的点就代表该元素的自然肥力：在生长季节不施肥，由土壤提供的有效养分就是自然肥力。在特定条件下，有效养分值是土壤特性的一部分，它可以根据土壤的矿物组成以及有机质含量和质量加以确定。图47d说明了这一点，图上Cidra土壤在不施肥的情况下供N能力相当于Corozal土壤的两倍。这两种土壤的化学分析结果(Fox 等，1975)表明，有机质含量大致相同，Cidra表土的含N量是Corozal 表土的 1.3 倍左右。因此可以设想，有机质的质量，特别是C/N比，前者更有利一些。在不施肥的情况下，对于这两者 N 的吸收量均以氧化土壤较高。这可能由于做木薯试验之前曾经施过肥，试验地的N素肥力得到了改善。

环境因素，特别是温度和降雨量在不施 N 肥的情况下也有明显的影响。温度影响微生物的活动(参见van Veen,1977)并由此而影响矿化速率，在高温情况下，一般来说，矿化率较高。另一方面，由于温度较高增加了反硝化作用或有利于氮态化合物的挥发，矿化氮的损失也较大 (Bouwmeester 和 Vlek,1981)。

降雨量对N素平衡可能有多种影响：它从大气中向土壤提供氮素，同时，通过降雨影响土壤水分平衡，从而影响矿化速率和持续期 (van Veen,1977)，以及通过反硝化作用

和淋洗影响N素损失数量。环境条件的差异可能是造成不同年份之间不施N肥区差异(有时相当大)的基础，如图41a和41c所示。在这些情况下，不可能精确地指明实际过程所造成的差异，因为试验报告没有提供足够详细的资料。

图51给出一些其他例子，大部分是关于温带试验的。第一个试验是荷兰的永久牧场早期施用氮肥之后第一个春季收割的牧草。1961年春季温暖，降雨量基本正常，而1962年春季气温低，降雨量高于正常年景的25%，1962年低温影响了微生物的活动，而且降雨量高，有利于反硝化作用和淋洗，结果不施N肥的牧草产量比前一年同季少一半。

图51b是降雨量对联邦德国冬小麦产量影响的图解，这个试验的处理之一是用一个保护物拦截冬季降雨，结果无肥区N素的吸收量增加了大约15公斤/公顷，这可能是由于防止矿化氮向根区外淋洗，同时反硝化作用也可能受到抑制的结果。

土壤的改良也提高了土壤氮素的有效性，如图51c所示，图中引证了荷兰开垦圩田种冬小麦的一个试验。在一排水良好的地块里，整个生长期地下水位低于30厘米，土壤中作物能获得的有效氮高于自然排水的地块，该地块从10月到4月地下水位低于地表不到10厘米。在后一种条件下，高的土壤含水量和与此有关的氧气含量很低，妨碍了有机质分解和有利于反硝化作用。因此，在多数情况下，土壤改良对作物产量有成倍的增产效果，因为它提高了不施N肥时土壤的供肥水平和氮素肥料利用率(第7.1节)。

管理措施对土壤中的N素吸收也有一定影响。图51d表明，在轮作中采用豆科作物可以提高不施肥土壤N的吸收量大约25公斤/公顷。谷物产量取决于豆科作物生长条件，根

瘤有效性和固氮效率以及下茬作物生长季节中分解的条件。

图 51e 说明在不施肥的条件下除草对有效N的影响。当杂草与作物争肥时，部分有效氮被杂草吸收了，因此作物损失了一部分N素。在这种情况下，作物所吸收N的差异数量大约 45 公斤/公顷。

在降雨条件下的水稻生产过程中，一种相当普遍的现象，可用图 51f 加以说明，即当降雨不足以维持水层时，田间暂时处于干旱状况。本图所描述的情况与连续淹水的情况相比，间歇干旱时土壤的有效N降低了。多数解释认为在土壤干旱期间硝化作用发生使土壤硝态氮丰富起来。在连续淹水的条件下，根区处于还原状况，引起了反硝化作用，致使N素从这个还原系统中损失。很多实例表明，不良的水分管理是引起围埂水稻的土壤－植物系统中N素大量损失的原因所在。

最后应当说明，由于存在很多影响N素有效性的因素，因此，对于具体情况来说，可靠的定量预报是很困难的。在很多情况下，主要是选择低投入时的产量数据进行分析，从中可以得到N素吸收量(4.2节)。

施肥－吸收曲线的斜率代表肥料吸收的效率或肥料利用率，即在植物中(主要为地上部分)所回收到的那部分肥料的比例。这个变量能确定有多少肥料被有效地利用，因此，对确定经济可靠的施肥量非常重要。

一般来说，在一定条件下，无肥区的吸收量与回收率之间成正相关(参见 Brockman 等，1971)，因为植物无效营养过程对从土壤中来源的 N 素和施肥来源的 N 素作用是相同的。在图41，44和47所介绍的实例中，对土壤N的吸收量较高与N素回收率高是一致的，大多数情况都是如此。

除前面已经讨论的因素之外，肥料的回收率可能受施肥

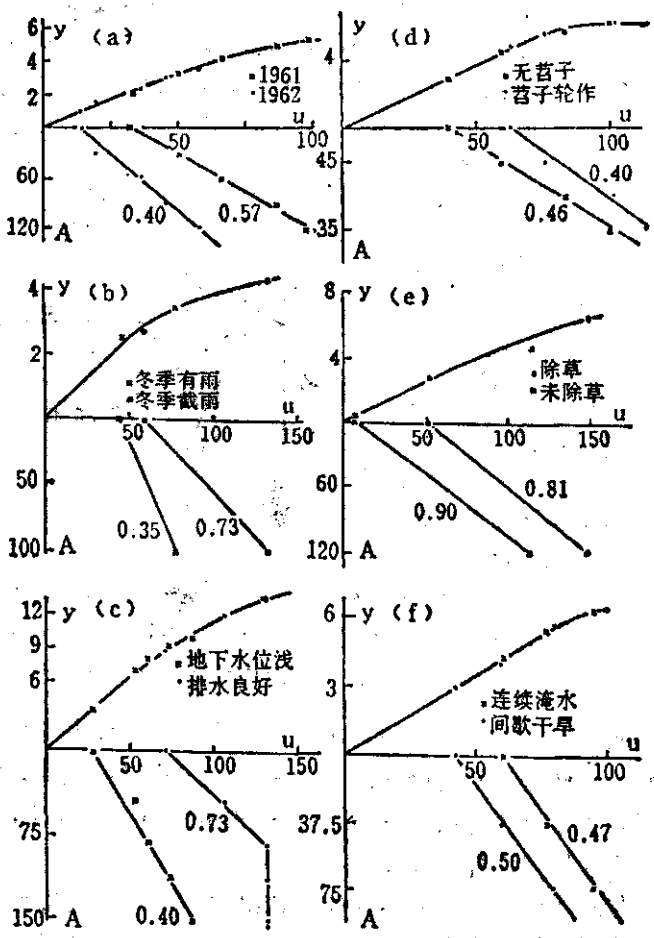


图51 N素的吸收总量u（公斤/公顷）与产量y（吨/公顷）之间的关系以及N素施用量A（公斤/公顷）与N素吸收量之间的关系。图下半部分的数字表示施肥的回收率。a.荷兰的永久性牧场，y是总干物量（Oostendrop，1964）；b.联邦德国冬小麦，y是含水量为15%时的谷物产量；c.荷兰冬小

麦，y是总干物量（Sieben，1974）；d.美国水稻，y是含水量15%的谷物产量（Williams等，1972）；e.尼日利亚玉米，y是含水量15%的谷物产量（Kang等，1977）；f.美国水稻，y是含水量15%的谷物产量（Patrick等，1967）

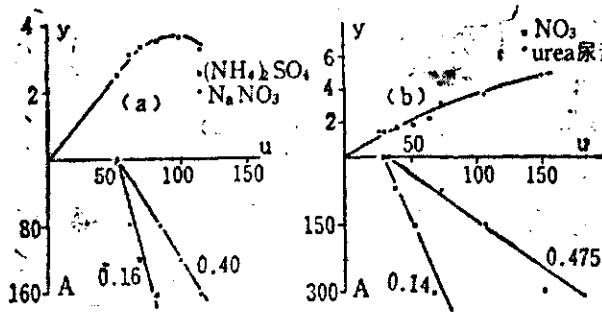


图52 N素总吸收量u（公斤/公顷）与产量y（吨/公顷）之间的关系以及N素施用量A（公斤/公顷）与氮素吸收量之间的关系。图下半部分的数字表示肥料的回收率。a.荷兰冬小麦，y是含水量为15%的谷物产量（Lehr，1959）；b.马里的天然牧场，y是总干物量（Penning de Vries等，1980）

种类的影响，如图52a对种植在荷兰改良过的圩田冬小麦的图解。硝酸盐肥料的吸收利用效率等于铵盐肥料的2.5倍。原因是由于这类圩田富含石灰（pH8.2）并为砂砾质粒土，N素易转化为氨气而挥发损失。

与此相比，图52b中描绘的情况则不同，硝酸盐肥料的回收比尿素的回收少三分之一，这个材料引自马里萨赫利恩地区重粘土上的一个试验，试验地区接收周围地区的径流，同时在生长期间有时淹水。硝酸盐回收率很低一定是因反硝化作用或淋洗所致，尿素回收率较高表明在这种条件下硝化作用进行缓慢，以致在这个系统中残留的N素以铵态形式存

在。

肥料的回收也受施用方法和施用时期的影响。施用方法的影响在图 41f 作了图解说明，材料引自印尼爪哇一个围埂水稻试验。尿素肥料直接施到土壤的还原层，该层缺氧，可防止尿素水解后形成的铵离子转化为硝酸盐(硝化作用)和随后再通过反硝化作用而使N 素损失。当尿素撒施在淹水层，在通气条件下发生硝化作用，此后由于物质流或扩散作用将形成的硝酸盐送入还原层，在那种环境中反硝化作用迅速发展，导致植物有效N素很低。

将N肥总量分期施用一般可产生较高的回收率(图 41e)，因为肥料元素在土壤中停留的平均时间较短，而使损失减少。对早施肥和晚施肥加以比较，其作用与前面相同。晚施肥的作物生长较高，作物对氮的需要量增加，因而也增加了作物的吸氮量。

不同栽培品种间回收率不同(图41b和44c)也可能与同样的现象有关。Minabar-2 号是一个传统的高秆品种，这个品种的稻秆产量比改良的矮秆品种 IR8 高很多 (籽/秆比为 0.9 对 1.5)，实际上回收率变动在 0.1 与 0.8 之间，0.5 是较适合的标准。如果回收率比0.5低很多，则有过多的氮素损失了，要达到比较高的回收率也许要求花费很多投资用于复杂的管理措施。

磷

世界上许多国家中，在自然条件下进行作物生产受到土壤有效磷的限制(例如Penning be Vries等，1980)。因此要达到潜在的产量必须施用磷肥。与氮素相比，土壤中总贮磷量的主要部分是以低溶解度的无机化合物存在，主要是铝、铁和钙的化合物。可是，在不同土壤中有机和无机形态磷的

相对比例有很大变化。

土壤中磷的自然肥力水平(不施磷)可能随土壤矿物成分和有机质含量与品质的变化而不同。图45c表明了这种变异，图上普罗米农场土壤有效磷几乎是苏万农场土壤中有效磷的二倍，那可能与pH值不同有关，因为前者土壤是微碱性的，后者是酸性。在pH值低的情况下，Al离子的浓度较高，导致施肥时的有效磷形成不溶性磷。

如同氮素那样，在不施磷肥的条件下，不同的环境条件可能产生不同的结果。部分原因与影响有机质分解的条件有关，有机质的分解可以供应部分有效磷；部分原因与土壤无机磷的循环有关，因为磷的转化受温度和土壤水分条件的影响(Beek，1979)。

图42c是氮和磷之间交互作用的有趣实例，即使磷是生产中的限制因素，但增加有效氮也可以改善土壤磷的吸收作用。这个问题在4.1.4小节中将比较详细地加以讨论。

关于磷肥施用量与吸收量之间的关系比氮肥更为复杂，这一点在图42和45中表现得很清楚。在某些情况，这种关系似乎是直线(图45c)。但是，在回收率很低的情况下，两者的关系并不重要。

这种关系的复杂性是可以预料的，因为与氮素相反，土壤固相和液相之间磷反应的动力学不是一阶反应（Beek，1979)。由于通过磷被吸收、沉淀、固定，磷酸根离子可以从土壤溶液中有效地移走，因此，土壤溶液中磷的浓度大体上为一恒定值，而且与施肥量不成比例。磷肥的回收一般很低，而且随施磷量的增加而减少，因为在土壤中残留的时间较长，有效磷被土壤固定，有机质沉淀或结合的比例就更大(图42c，45b)。在这种回收率很低的情况下，有限土体中定位集中施肥

就可能提高肥料利用率(de Wit, 1953)。

图42f是所遇到的一种特殊情况，图上的回收率先是随施肥量的增加而降低，随后在较高施肥量时回收率又增加。这种现象的一种可能解释是，随着磷酸盐加入土壤，沉淀作用也随磷酸根浓度的增加而增加。当施肥量最大时，所有可能形成不溶性磷酸盐的阳离子(Fe^{3+}, Al^{3+}, Ca^{2+})被用尽，土壤溶液中有效磷的浓度将升高，因此肥料的吸收量增加。

上面介绍的结果清楚地说明，磷肥施用量与作物吸收量之间的关系可能有很大的变化，同时预测磷肥施用效果没有当地的详细资料是很困难的。

钾

从吸收－产量曲线可以推断，植物组织中钾的含量一般较高。可是，在非集约经营的农业区域，限制产量增长的主要因素是有效氮和有效磷，而钾的短缺是不普遍的。此外，在收获时，大部分钾留在作物的残茬中，部分或全部留在田间或以后归还到田间中去。这就是很少收集有关钾的试验结果的主要原因。

土壤供钾的能力主要决定于土壤的矿物学组成，该元素的主要来源是矿物，如云母和长石。在风化作用的过程中，这些矿物释放出大量的钾，因此，含云母和长石较多的粘土，一般来说其供钾能力比砂土高。

土壤对植物的供钾反应是平衡反应，反应速率受不同形态钾相对浓度的支配：土壤溶液中的钾离子，以可交换形态吸附在带负电荷的粘土或有机质颗粒上的钾离子和粘土矿物上化学结合的钾(van Diest, 1978)。因此，改变这些相对浓度的条件可以影响钾的供应。气候起着重要作用，高温和比较潮湿的条件有利于矿物的风化作用和增加有效钾，因此，年

份间的差异可能相当大(图43a和b)。

观察表明，作物从土壤中吸收钾的能力很不相同（van Keulen和van Heemst，1982)。这可能与作物对钾的需要量不同有关，而且与生长期长短和吸收钾的有效时间有关。

有两个主要过程影响钾肥的吸收效率。在沙土中钾离子非常活动，而且容易被淋洗损失。另一方面，粘土，特别是具有高比例特殊粘土矿物类型(伊利石、蛭石)的粘土可以固定钾。在那种情况下，钾被吸附在粘土晶格的特殊位置上，使得钾不利于植物吸收。结果是，施肥水平不高时肥料的回收率很低(参见图43b)。但是，当吸收部位接近饱和时，在较高的施肥水平情况下，钾的回收率逐渐增多（van Keulen和Heemst，1982)。

在淋洗和固定过程不是很重要的场合，一般来说钾肥的回收较高，同时，与氮素的情况一样，不受施肥量支配（图43a和46b)。

在高的施肥水平情况下，（图46b）施肥－吸收量的平衡一定是由于植物在高浓度的溶液中对钾离子积极排斥的结果。在植物组织中，浓度已经达到最大值时，进一步的吸收明显地受到抑制。可是，这种情况只能出现在施肥水平很高时，因为“过渡”吸收显然是时常发生的(图43b和46b)。

4.1.5 元素间的相互作用

在4.1.2节中已经说明，一种作物对一种特定元素的效应也受其他元素供应量的影响。例如，如果磷的供应不足，则增加氮的吸收，可能得不到较高的产量(图50c)。然而，正如图50c和50d的例子所表明的那样，对一种特定元素的吸收也可能受其他元素供应的影响。图解表明，在不施氮的情况下，

施用磷肥可以提高氮素的吸收量，反之，也有同样的效果。在萨赫利恩天然牧场(Penning de Vries和van Keulen，1982)和围埂水稻的其他试验(de Wit，1957)中也已经观察到类似的反应。

对于这种现象的一种解释而言，必须考虑植物组织中两种元素的动力学。已经证明，在成熟的种子中，只要其他元素的供应不缺少，在植物不同的器官中，存在特定的最小和最大元素浓度。不仅在成熟期如此，而且在植物生命循环中的每一点都可能建立这种最小和最大元素浓度。一般来说，在一个特定的物候阶段，一种元素最大和最小浓度的比值大约为4:1。在植物衰老期这两个值下降，这一特定浓度的逐渐降低与植物的生理作用有关。在植物生长的早期阶段，主要形成叶片中的蛋白质，而在以后，更多的是为细胞壁之类支持组织的形成，并以少量氮素化合物组成大部分结构碳水化合物。植物中氮和磷的作用是紧密联系在一起的，这两种元素都存在于核酸中；氮是酶的主要成分，而磷在酶形成过程中以分子状态担负能量转移作用。因此，可以认为在植物中氮和磷的功能之间存在交互作用的关系。这个结论是由田间试验(Penning de Vries和van Keulen，1982)和控制条件下的试验(Dijkshoorn私人通讯)所得到的结果。由于N和P每种元素的最大和最小浓度之比为4:1，因此，P与N浓度之比的变化范围在理论上可能达到16倍，然而，试验的结果只发现4倍的变化。对于各种牧草和双子叶植物来说，P/N比率的最小和最大值在0.04（磷相对缺乏的情况下)和0.15（N相对缺乏的情况下)之间变化。当接近这些极限值时，元素的吸收因为相对过剩而停止，即使某种元素是丰富而有效的也不能再吸收。某种元素的相对短缺不应当与其绝对缺乏相混淆，即

P/N比率可能是最小值，而在植物组织中氮的浓度也可能是绝对极小值，因此，施用相对缺乏的元素（图50c的磷）可以增加其他元素（氮）的吸收量，从而导致生产量按比例增加。

在有效氮磷两种元素供应充足的条件下，组织中P/N比率通常接近0.1，这个比率可以认为是最佳比值。因此，植物需磷量的第一近似值可以定为需氮量的十分之一。

练　习　56

以下的观测值是在一次试验的某一时间点上获的。

地块号	元素的浓度（公斤/公斤）	
	N	P
1	0.02	0.0018
2	0.02	0.0008
3	0.02	0.003

你认为在哪块地上施用P肥将会增加N的吸收量？在哪块地上施用N肥将增加P的吸收量？解释你的答案。

4.2　养分要求和肥料需要量

P. M. Driessen

在4.1节中，我们应用三个象限的图解讨论了氮、磷、钾几种主要植物营养元素对作物产量的效应和养分供应与养分吸收之间的关系。如果把这些原则应用到实际种植中去，有四个实际问题必须回答：

1．在一定条件下，一种养分的短缺如何识别？

2．不施肥的土壤可以提供多少该种养分？

3．如果以特定的方法施肥，某种肥料养分的回收率是多

少？

4．为了实现第二类生产情况，即作物产量只由气候条件和有效水分决定，必须施用多少肥料？

从营养要求和养分供应的原则来讨论，适应于一种特殊种植条件的这些问题，只能借助搜集田间试验和化学分析的资料来回答。本节的目的是要说明如何根据最少的资料解答这些问题。从实际出发，讨论只限于有效氮和有效磷确定作物产量的情况；因K短缺而限制产量的情况并不普遍。

4.2.1 养分限制的识别

识别作物营养缺乏程度最简便的方法是对生物量成分如秸秆和种子进行化学分析，如果营养严重缺乏到表现在作物外观上，则可以鉴别特殊的营养缺乏症状如退色或植物器官坏死。正确诊断所必需的资料只能从具备有适当植物分析设备的实验室搜集，这就是这类数据难得的主要理由。土壤化学的数据通常是比较有用的，因为这些资料是从土壤调查中按常规收集的。遗憾的是，土壤分析的数据和作物产量之间在数量上通常没有显著的相关。土壤分析数据最多只能表明养分缺乏或存在不利的土壤条件，而这种情况可能防碍作物的正常生长。这个问题在5.3节将进一步详细叙述。

识别限制营养元素的一种简便的方法是以第2种生产情况的计算产量与田间作物的实际产量相对比。很显然，必须对一种具有类似性状的大田作物品种和变种，以及田间气候条件和水分状况相同的情况进行这类计算，而且，已经得到了第二种生产情况，即田间无杂草，适当控制病虫害和采用最佳收获方法的实际大田产量。此外，土壤的物理和化学性状对植物生长没有不良的影响。这样比较的结果有两种可能：

一种可能是实际产量接近计算产量，在这种情况下，作物生长不受氮素或其他矿质元素短缺的限制。

另一种可能是实际产量明显低于第二种生产情况下的计算产量。鉴定表明养分供应不足，因此，必然要对作物组成进行化学分析。

例如，假如分析植株氮的浓度明显高于4.1节中所提到的最小值，可能得出结论有效氮不是限制因素，必须检查其他养分。那么磷素不足的可能性很大。另一方面，如果分析植株的氮素含量达到最小值，可以认为氮素不足限制了作物产量。因此，考虑施用氮肥是有价值的。施用氮肥提高了作物产量，从而也将增加对其他养分的要求，比如磷、钾。如果这些另外的要求不能从土壤中得到满足，即施用氮肥的效果仍然低于预期目标，则在施用氮的同时，必须施用其他矿质养分。

在植物营养的实际研究中，营养的要求不是在识别之后而是同时确定的。肥料试验包括若干鉴别的小区，随机排列，每个试验小区种同样的品种，用类似方法施肥，但是，N，P，K肥料的组合不同。这样的试验优点是在同一种植季节，一种气候和一种水分状况条件下施用氮矿物质元素，或它们的组合，效果明显，而且便于说明。肥料试验的小区数目决定于肥料的种类、组合和施用方法，小区数量通常是比较多的。而且为了防止地力不匀或人为的错误所带来的不利影响，试验必须有若干重复，每个试验至少有一个无肥区作为“对照”。对照区的作用必须特别重视，因为它承担了对本节开始时所提出的第二个实际问题的解答任务，即不施肥时，土壤可以提供多少养分？

练　习　57

在2.3节中(讨论第1种生产情况，水、氮和矿质养分为最佳供应）举了一个实例，对苏里南首府帕拉马里博附近围埂试验地点高产水稻品种IR8的产量进行了计算。在同样地点不施肥的田块种IR8(在同一天)地上部分的平均总量为2000公斤/公顷，籽/秆比为1.0。在这个试验中，从地上部分所得到的总氮量是14公斤/公顷。

1. 识别2.3节中第一种生产情况的地上部分总生物产量和计算的稻谷产量；计算这种情况下的稻草产量。

2. 在第2种生产条件下，地上部分的生物产量是多少？(注意：围埂水稻田)

3. 在当地条件下，你认为达到高产必须施肥吗？

4. 如果需要施肥的话，氮肥是首先必须供应的元素吗？

(记住水稻籽粒和稻草中氮素最小含量大约分别为0.01和0.004公斤/公斤)

4.2.2　从不施肥土壤中吸收的养分量

因为不施肥的土壤仍然能够正常维持作物生长，所以土壤并非完全没有营养。刮风、下雨或灌水均可能带来养分，但更通常的是这些养分来源于土壤本身。通过微生物分解土壤有机质提供的氮素占主要地位，根据有机质的植物学起源和发生历史，在正常情况下有机质的含氮量在1～5%之间在有机质分解过程中，矿物养分也可以得到供应，但除磷以外供应量都相当少。矿物元素大部分来源于风化的岩石和碎片。

土壤养分供应量部分地决定于土壤特性，如有机质含量

和组成、土壤矿物组成和土壤pH值，同时土壤养分的供应量也决定于经常变化很大的外界因素的影响(4.1节)。例如土壤温度的日变化和季节性变化，此外，还受到风化条件、植被覆盖和人为活动的影响。更为复杂的是，不是所有释放的养分对植物吸收都是有效的，如养分可能被淋洗到根区以外、沉淀为溶解度很低的化合物，等等。

这种复杂性使得只从理论上考虑预报土壤养分的吸收实际上是不可能的。目前，某种作物从不施肥土壤中所吸收的某种生长限制元素的数量，可以用产量-吸收曲线的斜率除对照产量而求得。通过测定植物组织中养分的含量可以识别限制生长的营养元素，这一点已做过说明。产量-吸收曲线的斜率是在作物经济产量和残茬的比率及其最小养分含量的基础上建立的。

如果肥料试验在一个试验站连续进行若干年，“基础吸收”(即从不施肥小区吸收的养分量)逐年增加的情况并非少见。了解了这一点，就必须注意，要每年改变对照区的地点，因为每个试验地块应符合随机设计的安排要求。施用的各种养分在一年内不会完全被作物吸取，可能遗留若干养分在土壤中，同时增加了土壤对其后的试验供肥的水平。在实际耕作中，施肥的地块也会发生同样的情况：在种植过程中，自然土壤肥力得到了改善，使基础吸收达到一个新的(较高)水平。土壤肥力得到改善的程度决定于耕作措施和环境条件。这一点可用两个特殊的实例说明：在围埂水稻施用氮素的情况下，作物利用的效应通常较低，因为大部分氮素没有直接被吸收，而是通过反硝化作用和(或)淋洗而损失。在半干旱区的自然牧场存在完全不同的情况，除植物吸收外，几乎没有氮素从土壤中损失。

在土壤-植物-大气系统中，磷的活动性比氮素差，因此，系统中磷的损失一般要比氮的损失低，而且磷的贮存量也比氮素高。在生产实践中，有时磷的施用量很高，可以满足若干年作物对磷的需要。然而，不应当把这种效果估计过高，因为在第一年中大部分没有被吸收的磷肥被转化成为对植物无效的形态。

练　习　58

表44中给出取自“某些泰国水稻品种对不同N和P_2O_5组合的产量效应的总结报告”(泰国水稻部）中的若干泰国低地水稻品种的平均产量，材料来自曼谷试验站连续三季的试验结果。

识别连续三年对照区所得的产量。

你能解释连续三年对照区的产量为什么不同吗？传统泰国水稻品种的经验表明，其稻谷/草*比率在正常情况下接近0.5(高秆品种)，谷草最低N含量分别为 0.0078 和0.0036。

应用这些数字计算稻谷产量-吸 N 曲线的斜率，并应用这个斜率计算在三个连续种植年中对照区的吸N 量。

4.2.3　肥料养分的回收

在4.1节中已经指出，施肥后养分吸收的增量一般与施用养分的数量成比例，至少N和K的情况是这样。但是，在所施用的养分被土壤固定或固结的情况下，这个规则就有例外。本节不对所有可能的例外都予以论述，而只对施肥-吸收关系为线性的正常情况下养分的回收进行讨论。在4.1 节对施

* 稻谷属于没有去壳的水稻，含水量 12%；1 公斤稻谷等于 0.8 公斤去壳的稻米(5.4节)。

表 44　曼谷试验站在不同N和P组合水平下得到的泰国低地水稻品种的平均产量(公斤/公顷)

施N量(公斤/公顷)	施磷量(公斤/公顷)			
	P-0	P-37.5	P-75.0	P-150.0
A.种植时间1952～1953				
N-0	1214.4			
N-37.5		2107	2232	2493
N-75.0		2211	2394	2551
N-150.0		2389	2484	2727
B.种植时间1953～1954				
N-0	1529.4			
N-37.5		2706	3048	3164
N-75.0		3074	3220	3303
N-150.0		3159	3665	3649
C.种植时间1954～1955				
N-0	1755.6			
N-37.5		3547	3686	3649
N-75.0		4188	4166	4291
N-150.0		4682	4647	4691

肥-吸收关系的斜率也曾作过解释，即从施肥土壤中吸收某种养分的数量减去不施肥土壤所吸收的量除以所施肥料中含有该养分的量，称之为回收率，或以数学式表达：

$$R_x=(u_{f,x}-u_{o,x})/A_x \tag{79}$$

式中：R_x是x养分的回收量(公斤/公斤)

$u_{f,x}$是从施肥地块中吸收的 x 养分(公斤/公顷)

$u_{o,x}$是从对照区吸收的x养分(公斤/公顷)

A_x是施肥地块中所加入的x 养分(公斤/ 公 顷)

从理论上来说，R_x 的变幅值从 0 到 1.0；它表示某肥料的利用率。

一种元素的实际回收率取决于植物与使养分无效的植物-土壤-大气系统中的有关过程的竞争情况。以氮素为例，铵态氮的挥发，硝态氮的淋洗，反硝化作用转化为气态N，以及土壤微生物对N素的固定等过程都可以降低施用N肥的回收率。因此，针对这种情况，增加植物根系的吸收能力或减少与植物竞争养分过程的影响，或同时采用两种办法可以提高回收率。对氮来说，所吸收氮的大约十分之一为根系所消耗，因此，作物地上部分最大回收量可能是0.9公斤/公斤。在实际情况下，要达到高于0.5公斤/公斤的回收率经常是困难的，如果N的实际回收率低于0.5，那么采用改进措施则是有价值的。在这方面，指明需要采用的品种和耕作措施，对于从数量上分析一种种植情况中施肥的回收率是很重要的。

如果对某种养分的生物量组成进行分析，就可以从肥料试验中计算这种养分的回收量。前面已经解释过为什么这种完整的试验结果相当少见。试验的数目和地区分布也许足以表明，在某一地区是否存在或已经产生某种养分的明显短缺但是，能够对施肥养分的回收作可靠估计的完全试验在数量上总是太少。在生产实践中，养分的回收不仅取决于作物的性质和环境条件，而且取决于管理因素，比如所施肥的种类、施用时间和方法。例如，如果在栽培季节的早期撒施高量氮肥，那时作物需要的氮素还不多，则大部分氮素可能从根区损失，结果N的回收值很低。在这种情况下，适当的施肥方法和施肥时间可以提高N的回收量，关于这一点以后将要说明。

在缺少完整的试验资料的情况下，有限的资料必须尽可能有效地加以利用。假如已知某种养分在特定条件下很可能限制某种作物的生长，那么在没有进一步对植物组成作化学

分析的情况下也可以对养分的回收进行初步估计。这是可能的，因为可以设想作物的限制元素在植物的各部分已被稀释到最低浓度。能获得所要求资料的最简单的试验只包括对照区和施肥区，其产量组成。即经济产量和作物残茬是分别称重的。必须认识到，用这一方法计算的回收值的准确性低，其结果仅仅是指示性的。严格实施的系列试验的结果，(通常以规定的标准差作为每个处理的平均产量发展才是回收率计算的可靠基础。

练　习　59

表44所给稻谷平均产量数据是泰国曼谷试验站连续三年N-P肥料试验的结果。

从1954—1955的平均产量值可以看出，施用一定量的N肥时，P肥用量不同不会导致显著的产量差异。在这种情况下，关于作物对P的需求能够得出什么样的结论？

出现这种情况的原因是什么？(注意：请看1952～1953和1953～1954施P的产量效果。)同样的情况显然是由于土壤N供应不足，这种判断合乎逻辑吗？

计算1954～1955年下列N、P组合中N的回收率。N 37.5-P37.5；N75.0～P37.5和N150.0—P37.5　假设籽/秆比率相同，N的最低含量如练习58。

本节开始已经说明，肥料养分回收不能令人满意时，可以通过改变作物特性，改善环境或管理条件，以其中的一项或几项措施相结合加以改进。农业研究已经开发了能够回收养分和达到令人满意产量水平的作物品种，例如耐酸品种和适于碱性环境下种植的品种，但在酸碱条件下，没有改良的

品种是不能实现高产的。较好的养分回收与菲律宾国际水稻研究所开发的现代高产水稻品种(HYV'S)获得成功关系并不密切，或仅有一定程度的联系，这些品种成功的关键是籽/秆比率高，籽/秆比的等级是1.0；HYV'S属于矮秆品种。高的籽/秆比率与产量-吸收关系高初始效率有关，即吸收每公斤氮增加的谷物产量高。矮秆品种允许吸收相当量的氮而倒伏的风险较少，而传统的高秆水稻品种吸氮量多时植株生长过旺，容易倒伏。在有利的环境和管理条件下，矮秆高产品种可以获得高的养分回收，但是在不利的环境条件下，如养分不足或杂草丛生，则在水稻栽培长期自然选择过程中发展起来的传统品种，比高产品种可能表现得更好一些。

通过改善环境来增加养分的回收，这种作法长期以来一直在农业生产中实际应用着。围埂水稻田是一个很好的实例，在低湿水田上部人工建造淤泥层可以提高养分回收率。通常对环境的控制包括管理措施，在管理措施方面，湿地水稻栽培也提供了许多如何控制和提高养分回收的实践例子。良好管理的最有实践意义的说明是围埂水稻施用氮肥的模型。在许多水稻区，施用尿素作为氮素来源，在水稻移栽期将其撒施在水田里。肥料氮的平均回收率通常只有20%或更低。对这样低的回收可作如下解释：在水田上部的浅水层，氧气充足，温度适宜，尿素 N 可以迅速转化为铵离子 (NH_4^+)，再进一步转化为硝酸根离子(NO_3^-)。硝酸根离子具有高的活动性，随渗漏水或通过扩散作用向土壤下部移动。在淹水土壤中由于微生物分解土壤有机质。氧气很快被耗尽，接着，某些细菌利用硝酸根离子作氧气的给源。因此，硝态氮被转化为气态 N(N_2或 N_2O)，向大气中逸出。防止氮素损失和提高氮素回收的良好方法是将尿素直接施放在低氧层，此处尿

素 N 只能转化为 NH_4^+ 离子，与 NO_3^- 阴离子相比，前者可在某种程度上防止淋失，因为 NH_4^+ 可以通过在带负电荷的粘土和有机质颗粒的表面吸附而保存在土壤中（离子的吸附过程在 5.3 节将要作较详细的讨论）。尿素施放在粘闭的表层可使氮的回收值达 50%或更高一些。一般来说，如果在一定时期氮肥供应量小，以致于大部分施用的养分在相当短的时期内就能被根系吸收，则 N 肥的损失可以减少，而肥料 N 的回收可以增加。因此，整个生长期间少量分期施肥比所有肥料一次施用效果要好。

练　习　60

曼谷泰国水稻部技术处已经进行了围埂水稻肥料试验，从不同肥料类型、不同施用时间和施用方法研究氮素的回收（Lusananclana 等 1966），所有的试验田上，氮素用量为 60 公斤/公顷，另外，在生长季节开始时，为了消除磷或钾短缺的可能性，每块田施用磷 26 公斤/公顷，钾 50 公斤/公顷。

表45介绍了不同处理的主要资料，以及谷、稻秆产量和植株的化学分析结果。

1. 仔细审查本试验的不同处理，注意应用了四种不同氮肥，在移栽时或幼穗开始分化时施用，以及三种施用方式。

2. 计算幼穗分化初期每种处理的 P/N 比率。回答以下问题：

P/N 比率能表明有效氮是本试验的生长限制因素吗？

P/N 比是否表明 N 肥在移栽时施用（7 月 16 日）比幼穗开始分化时施用（9 月 21 日）对产量有较好的效果？

3. 计算收获期的籽/秆比率。试验中所用的水稻品种是现代的 HYV'S 还是传统的高秆品种？关于产量-N吸收曲线

的斜率是什么意思？根据一个或更多个处理所得结果计算的斜率验证你的答案。

4. 计算每一个处理和对照区的的总吸 N 量(以地上部分为基础)，然后计算 8 个处理中每个处理 N 的回收，并回答下列问题：

a.在 A 和 B 处理条件下所回收的是 N 是令人满意的吗？如果是，你能解释为什么吗(对于两个处理)？

b.比较 C 和 D 处理的回收。

在这些处理中有理由预测 N 肥损失很高吗？你能解释在处理 C 和 D 之间 N 的回收为什么不同吗？

c.比较处理 D 和 H 中 N 的回收，其中硝酸钠是在不同的生长阶段施用的。如果考虑了每个处理中植物与其他从根区移走 N 的过程之间的竞争，你能解释 N 回收方面的差异吗？

d.本节已经说明，在移栽时撒施尿素 N 的回收率通常低于 20%，考虑在处理 F 条件下所回收的 N，并解释为什么你发现了不同的回收值。

4.2.4 肥料养分的需要量

现在可以确定实现生产情况 2 所必须施用的肥料量。前面已经讨论过识别限制元素的方法。在 4.1 节中提出了有关植物各部位三种元素的最低含量。用生产情况 2 的作物残留物和经济产量的干物重乘以各自的最小养分含量可以计算出最高产量时所要求的某种元素的总吸收量。总吸收量包括自然土壤肥力或基础吸收。基础吸收是通过分析无肥区所获得的产量而建立起来的。生产情况 2 需要的吸收和基础吸收之间的差必须以肥料养分来弥补，某种情况下肥料养分的回收

表 45　泰国水稻品种在不同肥料处理下谷粒和稻草的干重、幼穗开始分化时植株中N，P的含量，以及收获期谷粒和稻草中 N,P的含量

处　　理	幼穗分化初期收获 (1966.9.21)			最　后　收　获 (1966.11.22)			
	干　重 (克)	N 公斤/公斤	P 公斤/公斤	谷　重 公斤/公顷	N 公斤/公斤	稻草重 公斤/公顷	N 公斤/公斤
A. 磷酸铵1966.7.16 行施，深 5 cm	8.51	0.0186	0.0012	3335	0.0086	12410	0.0032
B. 尿　素1966.7.16 行施，深 5 cm	8.32	0.0178	0.0013	3325	0.0089	11825	0.0032
C. 硝酸铵1966.7.16 按行表施	7.26	0.0168	0.0012	2655	0.0038	9585	0.0036
D. 硝酸钠1966.7.16 按行表施	5.31	0.0156	0.0014	2300	0.0091	5785	0.0036
E. 硫酸铵1966.9.21 地表撒施	7.17	0.0281	0.0014	3015	0.0099	8840	0.0040
F. 尿　素1966.9.21 地表撒施	5.72	0.0255	0.0013	2900	0.0094	7555	0.0039
G. 硝酸铵1966.9.21 地表撒施	5.74	0.0271	0.0015	2775	0.0088	7185	0.0038
H. 硝酸钠1966.9.21 地表撒施	5.35	0.0251	0.0014	2740	0.0091	6750	0.0035
K. 对照不施肥				1930	0.0091[a]	4085	0.0036[a]

a. 估算值

(资料来源：Lusanandana等，1966)。

是利用肥料试验建立起来的。

这些简要的重述表明，为实现生产情况 2 所需要的肥料养分数量，即肥料养分需要量(D_x)，可以从根据生产情况 2 计算的总吸收量($U_{m,x}$)减去无肥(对照)区的吸收量($U_{o,x}$)，然后除以肥料回收率(R_x)求得，其数学表达式为：

$$D_x=(U_{m,x}-U_{o,x})/R_x \qquad (80)$$

早在本节开始时就已指出，同样的养分可以由不同的肥料品种供应。例如，氮素已经提到的有尿素、铵盐肥料和硝酸盐肥料，而其他种类，无论是化学肥料还是自然肥料（如农家肥）都是有效的。表 46 列出了某些普通的化学肥料及其纯养分含量。从这个表中可以推断，每公顷施用 100/0.21公斤硫酸铵和施用 100/0.45 公斤尿素均可以满足 100 公斤/公顷 N 素需要量，两种氮源 N 素的回收率是相同的。两种氮肥的这一差异部分地说明尿素作为一种 N源便于普及，特别是在运输成本高的时候更如此。

练　习　61

练习57 中，在苏里南首府帕拉马里博附近以 HYV 品种作试验。假设在那个试验中有效氮是任何产量水平的生长决定因素；而且假设施用尿素作肥料，N 的回收率为 0.55，不施肥区的干籽粒产量是 1000 公斤/公顷。

计算实现生产情况2的理论产量需要吸收的总 N 量。成熟期谷粒重和地上部分总干物重列举在 2.3.2 节中。

计算不施肥时的产量-吸 N 量关系的斜率和吸 N 量。

计算作物的需 N 量，并确定每公顷土地需要25 公斤一袋的尿素多少袋(应用表 46 的数据)。

到目前为止，养分需要量的概念都是用氮素作为限制元素来说明的，并以生产情况 2 作为产量目标。但农民很可能对生产情况 2 的最高产量不感兴趣，例如，当所有农产品销路不好时。那么他可能以较低产量为目标，并根据情况改变肥料的使用。

作物生长也可能不受氮素供应的限制，而受其他养分供应的限制。试验表明，在很多情况下磷的供应是限制因素。这时，磷的需要量可以用方程80计算，即用达到生产目标所需的吸磷量减去无肥区吸磷量，再用磷的回收率除所得的数量即为磷的需要量。这一计算方法对任何养分都是相同的，但在土壤-植物-大气系统中不同养分的特性是不同的。磷与氮不同，磷一般不会从这个系统中大量损失。总的来看，土壤中磷的化学性质比氮更复杂，并经常表现为非直线的施用-吸收曲线。施用量较高时，如 4.1 节和图 45 的图解，曲线达到平稳状态并不罕见。应当认识到，在具有非线性施用-吸收关系的情况中，养分回收并非与现在的施肥量无关！磷回收的主要问题与许多磷化合物的低溶解度有关。磷溶解度低也许是由于土壤溶液中的副反应，例如，可溶性肥料中的磷形成不溶性的钙、铁或铝的磷酸盐沉淀，但也有的磷肥本身就很难溶解，如磷矿石。因此，从磷矿石中回收的磷通常低于 0.05 (Penning de Vries 和 van Kenlen, 1982)，但磷矿石的优点是只施用一次之后，其效果可以持续若干年。显然，要达到生产情况 2 的产量，以这样低回收率的磷矿石作肥料是不适当的。在肥料工业中，以硫酸处理磷矿石，生产出过磷酸钙，这种肥料比磷矿石含磷量高，而且能很快溶解。因此，过磷酸钙的磷回收率较磷矿石高。在某些土壤中回收率可达到 0.3，但在对磷固定很强的土壤中，过磷酸钙的回收率仍然

很低，磷在土壤中的固结作用是复杂的，同时，预报的难度也较大。表47根据可以达到的磷回收率大致列举了几组普通土壤，如果种一年生作物，适当供应水分和氮素，上述土壤磷的回收率是可以达到的。

表46 普通商品氮肥和磷肥及其养分含量

氮　肥	氮的含量(公斤/公斤)
硫酸铵	0.21
尿　素	0.45
硝酸铵	0.33
硝酸钠	0.16
硝酸钙	0.155
硝酸铵钙	0.205
磷　肥a)	**含磷量(公斤/公斤)**
过磷酸钙	0.08
三元过磷酸钙(T.SP)	0.20
磷矿石b)	0.16

资料来源：De Geus，1973；ILRI，1972；Iacob 和 V. Uexkull，1958。

a) 磷的含量通常用 P_2O_5 表示；1公斤 P_2O_5 相当于0.44公斤 P。

b) 磷矿石的含磷量变化很大；所给出的含磷量参考圣诞马磷矿石(C.I.R.P.)

在水分供应不很充足的生产条件下，因为水分的影响，降低了植物的生长量，磷的回收可能低一些。

由于土壤有效磷的不确定状态，通常最好对磷的需要量做稍高一点儿的估计。这样做特别是因为过量的磷不会带来危害，而且没有被吸收的磷很快就可以增加土壤磷的贮量及被下茬作物利用。但这种做法不适于磷固定作用很强的土壤，因为在这种土壤中磷肥的有效性随着时间的推移会显著减少。

表47 过磷酸钙施用于谷类作物的P回收率，土壤是按照P回收率减少的顺序排列的

等级	回收率（公斤/公斤）	土壤类型
Ⅰ	0.30～0.15	—石英砂土
		—有机土或泥炭土
		—幼年、中性、粗砾和中等质地的冲积土
Ⅱ	0.15～0.08	—弱酸性到中性的中年冲积粘土
		—具有深厚黑色有机质表层的弱酸性至中性土壤
		—弱酸或中酸结构良好的粘土
		—搅动的重粘土
		—中性到微碱性的钙质土
Ⅲ	0.08～0.02	—长期积水的淤泥土，低洼地
		—富含铁、铝的老年酸性红壤或黄壤
		—富铁的强酸性淋溶灰化土
		—富铝，含有黄铁矿的海相沉积强酸性土壤
		—富含水铝石英的幼年棕色或黑色火山土

练 习 62

在练习61中，苏里南帕拉马里博附近 HYV 水稻品种计算 N 素需要量是以假定有效 N 决定作物生长为条件的。在这个练习中，假设有效磷在任何产量水平时都是限制因素。

计算生产情况 2 下的 P 吸收总量，成熟期谷粒重和地上部分干重在2.3.2节中已列出。籽粒和稻草干物中最低P含量分别为 0.0011 公斤/公斤和 0.0005 公斤/公斤。

如果不施肥，计算产量-吸 P 量关系的斜率和 P 的吸收量。假设对照区干谷粒产量为 1000 公斤/公顷。

计算达到生产情况 2 必须施用的磷矿石的数量和作物的需 P 量，假设磷矿石 P 的回收率为0.02公斤/公斤（参考表46）。

计算达到生产情况 2 必须施用多少三元过磷酸钙，假设

三元过磷酸钙 P 的回收率为 0.15 公斤/公斤（参考表 46）。

假定水稻生产供过于求，同时水稻的生产目标比根据生产情况 2 计算的产量低 0.8 倍，试问必须施用三元过磷酸钙多少？解释为什么这个数量少于达到生产情况 2 所计算产量需 P 量的 0.8 倍？

到现在为止，我们一直假定只有一种养分供应不足，已经讨论了磷供应充足时氮的需要量或氮供应最佳条件下磷的需要量。创造这样的条件当然是可能的，例如在限制氮素供应条件下于播种开始时施用磷肥。磷肥用量高时可能几乎没有什么风险，但已知磷供应不足，施用高量 N 肥不能说没有风险。过多的氮素损失可能是不理想的结果，因此，如果已知植物磷的含量受到限制，而磷肥的供应又得不到满足，则建立氮肥的需要量是必要的。4.1 节已经指明，相对养分短缺是以植物组织中元素含量的比率为依据的。就氮、磷来说，P/N 比率的变动在最大值 0.15 和最小值 0.04 之间。这些知识可以得到应用。例如，假定有效磷受到限制，籽/秆比率为 1 的不施肥谷类作物总 P 量的极小值为：

$$\frac{1\times0.0011+1\times0.0005}{2}=0.008\text{公斤/公斤}$$

谷类作物的总 N 量不能高于 0.0008/0.04＝0.02 公斤/公斤，实际上 N 的含量也不太可能比 0.02 低很多，因为吸 N 量不受有效氮的影响，而完全是有效磷的作用。不施任何N肥的情况下，增施磷肥可能导致更多的氮素被吸收（参考4.1节的图 50）。

假设在特殊情况下，不施肥作物的干籽粒产量和干秸秆产量为 1000 公斤/公顷，并假设生产情况 2 所计算的谷粒产

量等于 5000 公斤/公顷，而产草量也是 5000 公斤/公顷。以三元过磷酸钙作肥料并假定回收率为0.1 公斤/公斤，根据这个数据和方程80可以建立磷肥需要量D_p：

$$D_p=[(5000\times0.0011+5000\times0.0005)-(1000\times0.0011+1000\times0.0005)]/0.1$$

因此，D_p 等于 64 公斤/公顷，相当于施用三元过磷酸钙 320 公斤/公顷。

可以遵循同样的推理，确定相应的施 N 量以保证生产情况 2 的高产水平的最佳供 N 量。但是以最小 N 含量为基础，从无肥区估计 N 的吸收量是不实际的，因为对照材料的真实 N 含量已经被估计出来了。以硫酸铵作为被选择的 N 肥，在矿质元素不足的条件下确定的 N 的回收为 0.5 公斤/公斤。因此，N 肥的最大需要量等于：

$$D_N=\frac{(5000\times0.01+5000\times0.004)-(2000\times0.02)}{0.5}$$

$$=60\text{ 公斤/公顷}$$

施用硫酸铵286公斤/公顷可以满足这一要求。与根据假定的无肥区最小 N 量计算出的结果相比，它表明计算的肥料用量减少不低于114公斤/公顷。

应当认识到，如此计算的 N 需要量足可以保证生产情况 2 计算产量的 N 素供应，但也有可能估计过高。不施肥地块的吸 N 总量(现在估计为 2000×0.02=40 公斤 N/公顷)受 P 供应不足的限制，同时，在 P 供应充足的情况下吸 N 总量可能更高些。换句话说，假如三元过磷酸钙按计算用量施用的话，土壤自然肥力可能贡献的 N 多于 40 公斤/公顷。

这种适当的或估计过高的实际结果在正常情况下是会出

现的。一般来说，贮藏的有效 N 似乎很快就能被消耗，同时，只要控制施用 N 肥一年或二年，就可形成 P 供应充足和 N 受到限制的条件。在磷固定作用不强的正常土壤中，一旦建立了适当的磷供应水平，少量施用磷肥就可以充分地满足磷的需要。如果对土壤的矿物学组成和土壤化学条件进行有效的分析，也只能对某种土壤固定磷的程度、维持施用磷肥量的多少以及保证供磷充足的时间可以维持多久等问题作出判断(只是定性的方法)，对此，5.3节将作出某种阐述。在实践上，维持施肥在很大程度是多年肥料试验所得到的经验，这些经验由农业推广部门传播到农业团体或农场。

以上考虑了在不施肥的情况下，有效磷限制作物生长的问题(达到对照产量的有效 N 供应可能是充足的，但在生产情况 2 时则不能保证 N 供应是充足的)。同样的推理，由于 N 素短缺，限制了对照区的产量，而在生产情况 2 时，P 是否充足尚难肯定，对于这一点无需争议。

练 习 63

在练习60中，考虑了在泰国曼谷试验站用传统水稻品种进行的一个试验，在那个试验中，施用了不同品种不同用量的 N 肥，同时采用了不同施肥期和施肥技术。为了保证 N 肥的施用效果，不因为 P 的不足而受到影响，所有田块在移栽时施用了过磷酸钙。P 用量为 26 公斤/公顷，现在可以判断施 P 的值(参考练习 60 和表45、47)：

1. 计算对照区的吸 N 总量，同时以谷和草的总干物量除以吸收总量确定对照条件下所生产的干物质的总含 N量。假设大田产品的含水量为 0.12 公斤/公斤。

2. 对照产量是否受 N 供应不足的限制？如果是收获期

对照区干物最大可能含 P 量接近于近似的 P/N 比率乘总 N 含量的积。

3. 对照区吸 P 总量现在能够估计出来。

4. 处理 A(表45)作物生产的生物量最高，即3335 公斤谷粒＋12410 公斤稻草。假设平均水含量为 0.12 公斤/公斤，计算 P 的总吸收量，这个吸收量是实现处理 A 干物量的最小需要量(干谷和干草最低含 P 量分别为 0.0011 和 0.0005 公斤/公斤)。

5. 曼谷试验站的土壤属于 Rangsit 土系，这种土壤在泛滥条件下具有的特性，与表 47 中磷回收等级 II 上半部土壤的相同，计算处理A 条件下所得产量的需P 量，假设过磷酸钙中 P 的回收为0.15 公斤/公斤。

6. 每公顷施 26 公斤包衣磷肥符合实际吗？

(杨守春译　王涌清校)

第 五 章

基本数据的收集和处理

5.1 引 言

P.M.Driessen

本书前面几章已经讨论了在影响植物生长的土地质量方面存在数量差异的三种生产情况。在每种生产情况中，用若干函数关系对土地质量的影响或与植物生长有关的土地质量(即截获的阳辐射水分有效性、养分状况)进行了描述。在某一生产情况下起作用的所有函数关系，都包括在用于该生产情况的作物产量模型中。模型不能预报作物产量，认识这一点是很重要的。计算出的产量估值完全是由模型的用户所确定的，他可以用一组基本数据来确定作物特性和生产条件；模型只不过使用户选择的数据得到明显的结果。

由此可见，所得到的产量估值的质量和可靠性不可能优于有效基本数据的质量，因此，基本数据必须尽可能准确和全面。现有模型所用的基本数据可以归并为四类：

1. 基本气象数据，
2. 基本植物数据，
3. 基本土壤和土地数据，
4. 基本管理数据，

在表 48，49 和 50 中，按这几种数据类型给出为计算生产情况 1，2 和 3 条件下的产量所需的最少的基本数据。

在一大类数据中，不一定所有的性质都相同，可进一步分为三种不同类型的数据。第一种类型是涉及某一地点或土地利用的特性的数据，这种数据在作物种植周期中不会变化，是“常量”。土壤物理特性，如总孔隙度和饱和导水率，植物的特性，如发育的临界温度或单叶 CO_2的最大同化速率都属于这类数据。随时间变化的数据属于第二种类型，但它们的变化不依赖作物生产过程。然而，这种变量确实影响系统的行为，因此，称之为“强迫变量”。降雨量，温度和辐射

表 48　模拟生产情况 1 的作物生产所需要的基本数据，必须已知品种、地点和作物的农事安排

符　号	说　明	来　源
气象数据		
H_g	晴天总辐射(焦耳/米^2·日)	表 2
H_a	测定的总辐射(焦耳/米^2·日)	气象台站
T_a	测定的气温(°C)	气象台站
植物数据		
K_e	可见光的消光系统	正常情况 Ke=0.8
SLA	比叶面积(米^2/公斤)	表51
F_{cl}	晴天总同化速率(公斤CO_2/公顷·日)	表 1
F_{ov}	阴天总同化速率(公斤CO_2/公顷·日)	表 1
E_g	转化效率(公斤干物质/公斤CH_2O)	表 4
R_m	相对维持呼吸速率(公斤CH_2O/公斤干物质·日)	表 4
TU_{pre}	开花前的积温(日°C)	本书和索引卡文献
TU_{post}	开花后的积温(日°C)	本书和索引卡文献
T_o	临界源度(°C)	表 7 和农学文献
WLVJ	第一间距开始的叶干重(公斤/公顷)	本书和农学文献
WI	第一间距开始的总干物重(公斤/公顷)	本书和农学文献

表 49　模拟生产情况 2 的作物生产所需要的附加基本数据

符　号	说　明	来　源
气象数据		
P	雨量计测定的降雨率(厘米/日)	气象台站
E_o	潜在蒸发速率(厘米/日)	气象台站
ET_o	潜在蒸发蒸腾速率(厘米/日)	气象台站，本书2.1节
植物数据		
P	土壤水分消耗系数	表20
RDI	第一时间间距开始时的扎根系深度(厘米)	本书和农学文献
土壤和土地数据		
ϕ	土地的坡度(°)	等高线地图
$Z_t(i)$	第一时间间距开始时的地下水埋深(厘米)	本书和地图或调查
$SS_t(i)$	第一时间间距开始时的表土贮水量(厘米)	本书和田间调查
SM_o	总孔隙(厘米³/厘米³)	表 16 和土壤报告
γ	特定质地的几何学系数(厘米²)	表 16 和土壤报告
S_o	标准吸附率(厘米/日$^{\frac{1}{2}}$)	表 18 和土壤报告
A	输水层的渗透率(厘米/日)	表 18 和土壤报告
K_o	饱和导水率(厘米/日)	表 17 和土壤报告
s	特定质地常数(厘米$^{2.4}$/日)	表 17 和土壤报告
α	特定质地常数(1/厘米)	表 17 和土壤报告
ψ_{max}	特定质地吸力极限(厘米)	表 17 和土壤报告
$\psi_a(i)$	第一时间间距开始时的基质吸力	本书和田间调查
管理数据		
I	渠首水流量	用户确定/灌水部门
E_d	农田利用效率系数	表19
Ef	农田渠道效率系统	表19
E_i	输水渠效应系数	表19
d	地表粗糙度(厘米)	用户确定本书
σ	沟土/沟角(°)	正常情况：$\sigma=30$
DD	排水深度(厘米)	灌溉部门
L_d	排水沟间距(厘米)	灌溉部门
r_d	排水半径(厘米)	灌溉部门

是"强迫变量"的实例，第三种类型的数据也是变量，但这种变量由内生方法改变数值，即作为计算的结果。变量的数值必须在计算开始时由用户设定初值，此后，计算出的数值在一定间距时间内保持不变，因此，它们可以反映系统任何瞬间的状态，这就是它们被称为"状态变量"的原因，状态变量的实例有土壤水分含量和叶片群体的重量。计算出的一定间距时间内的变化速率可用来更新计算结束时的变量值。在计算下一个时间间距内的系统行为时，这个被更新的值就作为输入数据使用。

表 50　估算养分需要量所必需的一组最少的基本数据(生产情况3)

符　号	说　明	来　源
植物数据		
N_Y	商品产品的最低含N量(公斤/公斤)	本书为农学文献
$N_{(P-Y)}$	作物残渣中最低含N量(公斤/公斤)	本书和农学文献
N_A	植物组织中实际含N量(公斤/公斤)	化学分析
管理数据		
Y_C	肥料试验的对照区产量(公斤/公顷)	农学文献
Y_{AX}	以 X 养分A公斤/公顷施肥的试验区产量	农学文献
A_X	肥料中X 养分的施用量(公斤/公顷)	农学文献

练　习　64

仔细检查表 48 和 49 列举的输入数据，并指出每项是常量、强迫变量还是状态变量。

解释为什么不能将表50列举的输入数据(生产情况 3)归类为常量、强迫变量和状态变量？在试图回答这个问题之前，请再读一次4.1节的引言。

前面已经说明，模型结果的质量不可能比输入数据的质量更好。如果缺少全面、精确和足够详细的基本数据，即使采用最高级的模拟运算也是没有用的。完善的基本数据集是很少的，在多数实际情况下，数据集是不完整的，或含有部分未知特征。数据的空缺必须用近似数据或缺席值来填补。在若干实例中，为了实践的需要，可以应用与真实情况相差不远的标准值。在前几章中已经举出了一些实例（例如C_3作物的Fg等于40公斤/公顷·小时；所有与质地有关的土壤参数）。指明不能应用标准数据的地方，近似数据必须由模型使用者估算。在某些实例中，这种估算可以采用内插法或外插法（例如气象站之间的地区的气象数据）。在其他情况下，请有当地经验的专家帮助是必要的，他能通过对生产环境的定性或半定量描述加以整理分析，从而作出可靠的估算。土壤调查报告是这类描述的实例，从中可推断出半定量的信息。

迄今为止所介绍的模型，主要是对植物生产中发生的各个过程和特殊环境条件对这些过程的影响的数学描述。非常清楚，植物生产是一件复杂的事情，而且深入分析各种因素和所包含的过程已超出了本书的范围。因此，本书仅以植物生产量最重要的方面为重点，描述若干必要的简明数学关系（一般性简化不是本文介绍方法的全部特点；对植物生产的某些方面仍然知道得很少，必须以最简单的方式用模型加以描述）。这些必要的简化是导致被观察的与被模拟的植物生产间经常吻合不好的另一个原因。然而，在将来有好的方法论提出时这种结构上的不完善很可能会少一些。

形成的产量数字也有可能来源于观测的数据，这就不能归因于基本数据或模型本身不精确了。产量可能受到在模拟程序中没有考虑到的因素的影响，例如可能出现的极端温度、

风暴、特殊的土壤失调或特殊病害等少数情况。由于这些原因，应该慎重地将提出的产量计算结果仅仅应用于有关该作物实际种植的地区。即便如此，也不应当把计算结果视为作物产量的精确预报，而只能看作是在一定条件下土地生产能力的的有益的定量近似值。

以下各节中，将对一些重要气象、土壤和植物数据的有效性、测定和相关性进行讨论。此外，对于影响植物生产或阻碍生产能力的主要环境失调将予以重视。

5.2 气象数据

H. van Keulen 和 H. D. J. van Heemst

为了估算一个地区的生产能力，主要的天气条件是很重要的，前几章已对此阐述得很清楚了。本节对有关变量以公式的方法进行处理。关于所涉及过程的详细论述，读者可以参考有关这一问题的教科书(参见Grace，1983；Monteith，1973)。

气象数据由气象站收集，通常由一个国家的气象局管理。气象局不承担或不主要承担将这些数据应用于农业气象学领域的工作。与地方气象站保持良好的联系可以加强合作，特别是当农业气象学家或农学家能够清楚地说明他的需要时更是如此。

由气象站记录的气象数据决不应只取其表面值，而应当用一般的直觉加以判断，如有可能，用户应核对收集数据的方法和仪器。

5.2.1 辐射

太阳能是地球上所有生命能量的主要来源。它被植物的叶绿素截获并在同化作用过程中被转化为化学能(2.1节)。对潜在同化作用和潜在蒸发蒸腾作用的计算来说，合理地精确估算太阳辐射是必不可少的。地球表面接收的总辐射可用日射总量表测量，它可以提供全球每日辐射总量的精确数据。遗憾的是，这类数据相当少，而且使用时通常必须有日照持续时间的记录。为了换算这些数据，可以应用Angströms方程(3.1节)。正如在那里解释的，所采用的系数都是针对特定地点的，所以如果测定的辐射和日照持续期的数据都是有效的(即使在一个有限的时间内)，这些数据对推导出特定的方程可能也是有价值的。

如果也不能得到日照持续期的数据，可由观察者一天几次估测的云量度得到日照持续的初步近似值。应当认识到特别是对变化很大的情况，这样的估算可能是很不精确的，但对于我们介绍的方法所要达到目的来说，这样的估算值已可能是有用的。通过按照时间加权可使平均云量等于2.1节所确定的阴天的比例，并且可以直接应用表1和表2的资料。

5.2.2 气温

一般来说，每天最高和最低气温是在百叶箱高度上记录的。对于所介绍的方法来说，两者的算术平均数可作为植物感受到的平均温度的合理估算。这是由于以下事实：模型中的多数温度依赖关系在相关范围内基本上呈直线关系。但是，如果最高和最低温度在直接范围以外，更精确的因变量值可从每小时的平均值中获得。如果不能得到每小时的温度值，

可以根据de Wit 等(1978)提出的方法估算最高和最低温度。De wit 方法是在每日温度按正弦曲线变化的假设下，从测定的最低和最高温度中计算每日温度状况的。

5.2.3 大气湿度

测量大气湿度应用了许多不同类型的仪器，但这些仪器不是不好就是容易出错。空气中的实际含水量是由绝对湿度 W_w，即每单位空气体积中的水汽质量或由比湿，即每单位质量的湿空气中的水分质量给出的。

在农业气象中，空气湿度既可用露点(T_d)、大气水汽压(e_a)，相对湿度(h_r)表示，也可用湿球温度(T_w)表示。本书不打算详细讨论测量的方法，只介绍不同变量之间的关系。

温度为 T_a 和水汽压为 e_a 时的一空气体积的露点就是 e_a 为饱和水汽压时的温度。e_a 和 T_d 之间的关系可以近似表达为：

$$e_a = 6.11 \times e^{[17.4 \times T_d/(T_d+239)]} \tag{81}$$

T_d 用 °C 表示，e_a 用毫巴表示。

水汽压 e_a(毫巴)通常可以直接测量，也可应用理想气体定律从绝对湿度中推导出来，理想气体律的公式为：

$$e_a = T_k/0.217 \times W_w \tag{82}$$

式中：

T_k 是绝对温度(K)，等于 $T_a + 273$，

W_w 是以公斤/米^3 表示的绝对湿度。

空气相对湿度是空气实际水汽压与空气温度时的饱和水汽压(e_s)之比。后者用毫巴表示，可近似表达为：

$$e_s = 6.11 \times e^{[17.4 \times Ta/(Ta+239)]} \tag{83}$$

湿球温度 (T_w) 是指暴露在大气条件下但避开辐射的湿

球表面的温度。由于水分蒸发的结果，湿球温度比气温低(3.1节)，而这种温度差就是空气湿度的量度：

$$e_a = e_w - \gamma(T_a - T_w) \tag{84}$$

式中：

e_w 是在湿球温度时的饱和水汽压（毫巴），

$e_w = 6.11 \times e^{[17.4 \times Tw/(Tw+239)]}$

γ 是湿度计算常数(毫巴/°C)(=0.66)

5.2.4 风速

风速用综合风速表记录，每天读数一次以便得到每日的总风程。作为一条查阅规则，可以假定白天的风速是夜晚的二倍(de Wit等，1978)。

如果风速不是在Penman方程(3.1节)所要求的200厘米的标准高度上测量的，可以假设一条对数风速廓线，来计算200厘米高度处的风速。如果风速在高H处测定，则方程为：

$$U_{200} = U_H \cdot \ln(200/Z_o)/\ln(H/Z_o) \tag{85}$$

Z_o为表面的粗糙度长度，由于大部分气象观察是在矮的绿色草地上进行的，Z_o可能接近2厘米。这样，方程可以简化为：

$$U_{200} = 4.61U_H/\ln(H/2) \tag{86}$$

5.2.5 降雨量

记录降雨量的雨量计也许是最广泛应用的气象仪器，因此，降雨量的数据一般多于其他任何变量的数据。测量的精确度很大程度上取决于所用的雨量计类型、安放位置和盛行风。不小于15%的变差是正常的。一般来说可以得到日降雨

量的数值，对于本文介绍的方法来说，它是足够详细的。可是，应当认识到，对地表径流的恰当估算要求更详细的数据，因为降雨强度是一个决定性的因素。要获得这样的数据，必须有自计雨量计，这种仪器业务上使用的不很多。如果径流有很重要的作用，则必须直接测定水分平衡的组成部分，并作为一个强迫变量引入模型中。

5.2.6 潜在蒸发蒸腾

如前几章已经讨论过的，应用Penman方程或Penman-Monteith方程可以得到潜在蒸发蒸腾的合理而精确的估算。然而，应用那些方程时，要求能得到总全球辐射和风速等数据，而这些数据并不是总能得到的。在某些情况下，从所谓蒸发皿(一种盛水的容器)中测定的每日水损失量可以得到数据。这类蒸发皿有不同类型，而且在世界各地使用。最早的一种叫BPI凹形皿，皿底低于土壤，边缘接近地表面；采用这种蒸发皿可以得到较好的结果。不知何故，这类蒸发皿多数被取消了，而被一种安放在高于土壤表面一定高度的A级皿所取代。因为可能从皿壁发生热的交换，同时鉴于有来自边缘的影响(因为水的表面一般比边缘低一个不定的距离)，因此，这类蒸发皿所反映的情况同延伸水层的情况是有差异的。另一缺点是由于有这样一个水体存在，特别是在没有良好保护的情况下，可能引起人和动物的注意，以致不是所有水面的变化都是由于大气过程引起的。可是，尽管有这些缺点，如果只有蒸发皿数据可用，可将这些数据乘以系数0.7后作为蒸发需要的初步近似值加以应用。

5.3 土壤数据

P. M. Driessen

5.3.1 土壤物理数据

土壤物理数据可以从两个主要来源获得：田间观察和实验室分析。这两类数据可以互相补充。田间数据是在土壤调查中收集的，并在土壤调查报告中介绍。土壤调查报告包括有代表性的观察点和土壤剖面的描述。土壤剖面的描述对一种土壤中每个土层或层次作了详细说明，包括土层厚度、颜色、质地、结构、孔隙度、斑点和外部侵入物等内容。表51和52介绍了塞拉里昂两个剖面描述的例子。

土壤剖面描述是观察(和测定)土壤特性的田间记录，这种剖面描述提供的信息是最好的半定量的而很有价值的资料，因为它指明了土壤的重要物理和化学条件。例如，土壤质地的评价（田间质地）可以提供大量的土壤物理参数(见表16，17和18)，土壤颜色的评价可以提供土壤有机质、氧化物等含量和分布的资料。对这些特征的解释不是很容易的，最好委托一位有丰富地方经验和技术熟练的土壤学家去做。

土壤剖面的描述在正常情况下需由剖面各层次土样分析结果作补充。这样的分析数据总是定量的，并具有重现性，但是数据的解释不总是很容易的。困难之一是分析前样本要打乱，有时要变动，例如样本要风干，过筛，而且实验室测定颗粒分布大小之前还要脱钙（这就是为什么田间土壤质地评价有时与实验室分析的质地级别不同的原因）。

在所有的情况下土壤数据都是以有限的土样测定为基础的，因为土壤是很不均匀的，所以即使是精确测定的定量数

据也只能给一个完整土体的性质提供某种指示。将土壤数据转换为土地特性时，因为一块土地通常包括一种以上的土壤类型，这就增加了额外的困难。土壤中这种地域性的变化说明了在土壤(图)单元中需对各种土壤加以综合。制图单元的标准及其变幅和所提供的土壤资料的重要性是与图的比例尺相适应的，而比例尺受单位面积观测次数所制的。换言之，有详细土壤图和不详细的(半详细和勘察)土壤图，能够从土壤调查报告中摘录的材料取决于观察密度和土壤图单元的综合水平。

表51　塞拉利昂马苏巴剖面P9的描述

描述者：R. Miedema 和 A. A. Thomas，1968. 3. 20.

地点	塞拉利昂地形图比例尺1:50000，43页，坐标HE 27_8～87_2。
地貌	山谷溪流附近的低地。
地形	坡度0～3%。
植被	农田种有木薯，康提树和野草以及许多野生油棕榈。
排水	排水适度。
母质	含砾搬运冲积物和崩积物。
层次代号：A_p 土层深度：0～19厘米 实验室编号：S29810	深灰棕(10YR3/2)；沙质粘壤土；细到中等块状结构；很硬；大到中孔隙很多；不明显的细斑点；很多粗的，中等和细根系；很多大的和中等蚂蚁洞，层次清楚；边界平滑。
层次代号：B_1 土层深度：19～57厘米 实验室编号：S29811	灰棕色(10YR6/3)；沙质粘壤土；微细到中等块状结构；很紧实；许多大到中孔隙；不明显的细斑点；有微红-黄到深棕(7.5YR5.5/8)铁斑；粗根系一般多，很多中等和细根系；没有外膜。结核少于10%；粗砾，多孔；红色的硬底层几乎不含石英砂；很多大的和中等的蚂蚁洞；平滑边界逐渐过渡到下层。
层次代号：B_2 土层深度：57～170厘米 实验室编号：S29812	深灰棕色(10YR6.5/3)；沙质粘壤土；很细的棱角状结构；坚实；很多大的和中等孔隙；很多明显的细和中等的黄红色(5YR5/8)和红-黄色(7.5YR6/8)铁

斑；一般明显的细和中等的木炭斑点；很少粗根，中等根一般，细根很多；砾石少于10%，一种石英石；具有黑色膜状物普遍蚯蚓孔。

土壤物理和土壤化学数据

分类："网纹状"湿氧化不饱和泥炭土

层次代号		A_p	B_1	B_2
各层深度(厘米)		0～19	19～57	57～170
土样颗粒分级	＞2毫米(克/克)	0.0009	0.018	0.020
颗粒大小分布	＜2毫米(%)			
总砂粒	2.0～0.05毫米	64.0	59.6	60.4
总粉粒	0.05～0.002毫米	12.6	13.6	13.9
总粘粒	＜0.002毫米	23.4	26.8	25.7
容重(克/厘米³)		1.1	1.3	1.2
水分：SM_{333}	(厘米³/厘米³)	0.16	0.15	0.10
SM_{15000}	(厘米³/厘米³)	0.10	0.10	0.10
有机碳(克/克)		0.0125	0.006	0.005
全P(ppm)		n.d.[b]	n.d.	n.d.
全CaO(%)		0.133	0.078	0.078
全Fe_2O_3(%)		2.67	3.13	3.18
全K_2O(%)		1.361	1.277	1.200
有效K(公斤/公顷)		67	73	121
用Bray 1号测定的P(公斤/公顷)		9.0	3.4	3.4
代换性阳离子	(毫克当量/100克)	5.71	3.79	3.14
代换性Ca离子	(毫克当量/100克)	0.47	0.16	0.21
代换性Mg离子	(毫克当量/100克)	0.37	0.16	0.16
代换性K离子	(毫克当量/100克)	0.03	0.02	0.01
代换性Na离子	(毫克当量/100克)	0.08	0.08	0.08
代换性Al离子	(毫克当量/100克)	0.99	1.09	1.05
盐基饱和度(%)		16.6	11.1	14.6
pH(水浸提)		4.7	4.6	4.8

资料来源：Odell等，1974。

a. 砖红壤砾石。

b. 没有测定。

表52 塞拉利昂马诺瓦 Kpuabu 1号剖面的描述。描述者同表 51

地点	Kpuabu 可可试验站，距凯内马-乔鲁公路试验站办公室约 450 英尺 (137 米)，试验站公路的右边约 150 英尺(46 米)。
地貌	分割的砖红壤平顶缓丘。
地形	上部凸顶 5%的坡度。
植被	许多原始次生乔木林下的可可种植园；草覆盖良好。
排水	排水适度。
母质	在一层厚的充满砾石的当地运积物层之上覆盖有薄层无砾石的物质。
层次代号：A_1 土层深度：0～25厘米 实验室编号：S23558	深黑棕色(10YR 3/2)；沙质粘壤土；适当中等和细的稍带棱角的结构；多孔隙；松散稍粘稍有塑性；一般为细根，很少中根和几乎没有粗根；过渡到下层边界平滑、清晰。
层次代号：A_3 土层深度：25～53厘米 实验室编号：S23557	黑棕色(10YR3/3)；充满砾石的砂质粘土；70%的具有黄色包膜的结构，粗和中等的、致密的、红黄色的坚硬底盘层a；发育很弱的细稍带棱角的无界面结构；松散，粘，稍有塑性；少细根和很少中等根系；平滑边界逐渐过渡到下层。
层次代号：B_{21} 土层深度：53～89厘米 实验室编号：—	黑黄棕到黄棕色 (10YR4/4-5/6)；充满砾石的砂质粘土；60%的黄色包膜和无包膜的、圆形、细的、致密的、红色和黑色的坚硬底盘a；发育很弱的细稍带棱角的无界面块状团聚体；松散，粘和稍有塑性；很少细根和中等根；平滑边界逐渐过渡到下层。
层次代号：$B_{22}t$ 土层深度：89～178厘米 实验室编号：S28556	深棕色 (7.5YR5/8)；充满砾石的粘土；75%黄色胶膜、结核、粗砾、致密、红色和黄色的坚硬底盘a；无界面发育很弱的细稍带棱角的块状团聚体；多孔；松散，粘，稍具塑性；很少细根和中根。
评价	这种土壤砾石很多而且干旱不适于种可可，1959年种植的可可生长瘦弱发育不良，移栽苗成活率很低。管理很好，但过分遮荫。

土壤物理和土壤化学数据

分类：氧化腐殖质老成土(或典型暗色正常氧化土)

层次代号：	A_1	A_3	$B_{22}t$
各层深度(厘米)	0～25	25～53	89～178

样本颗粒分级	＞2毫米（克/克）	0	0.70	0.75
颗粒大小分布	≤2毫米（%）			
总砂粒	2～0.05毫米	57.4	49.2	38.9
总粉砂	0.05～0.002毫米	11.8	12.4	13.3
总粘粒	<0.002毫米	30.8	38.4	47.3
容重（克/厘米³）		1.2c	1.4	1.5
水分：SM_{333}（厘米³/厘米³）		0.19	0.17	0.22
SM_{15000}（厘米³/厘米³）		0.13	0.13	0.18
有机碳（克/克）		0.027	0.09	0.007
全P（ppm）		390	370	n.db
全CaO（%）		0.076	0.074	0.069
全Fe_2O_3（%）		8.10	8.99	11.19
全K_2O（%）		0.169	0.180	0.215
有效K（公斤/公顷）		10.0	3.4	1.1
用Brag I 测定的P（公斤/公顷）		5.6	2.2	0
用Brag II 测定的P（公斤/公顷）		9.0	4.5	2.2
代换性阳离子（毫克当量/100克）		11.79	9.29	6.00
代换性Ca（毫克当量/100克）		0.01	0.07	0
代换性Mg（毫克当量/100克）		0.10	0.08	0.08
代换性K（毫克当量/100克）		0.10	0.07	0
代换性Na（毫克当量/100克）		0.01	0.05	0.04
代换性Al（毫克当量/100克）		3.06	2.50	0.67
盐基饱和度（%）		2.1	2.9	3.0
水浸提的pH		4.3	4.5	4.8

资料来源：Odell等，1974。

a. 砖红壤砾石。

b. 没有测定

c. 估算。

以下是在土壤科学上得到了广泛应用的综合分类级别：

土纲 (Soil Orders)

亚纲 (Soil Suborders)

土类 (Great Soil Groups)

亚类 (Soil Subgroups)

土族 (Soil Families)

土系 (Soil Series)

土型 (Soil Types)

在上述分类等级中，土纲的土壤特性最少，土型的土壤特性最多。最低级标准最详细，土型是在土系以内划分的，以质地为基础，有单一的特征(美国农业部，1975)。最详细的土壤调查只确定土系，不再划分土型，因为一个土系通常已经有相似的质地。单独描述土系的详细土壤图和报告是土壤物理和土壤化学性质的有价值的资料来源。不详细的土壤报告只能提供没有特点的资料，据此对作物产量进行定量分析用处不大。

即使可靠的定量数据是有效的，也不能不加区别地到处应用。模拟一种作物生产环境所要求的许多土壤物理资料与土壤基质的几何学有关，并与土壤质地成相关关系。已对具有正常矿物组成的荷兰标准土壤建立了各种数量相关关系。在热带可能存在一种不同的关系，这可能影响土壤质地和土壤物理特性之间的关系。基质几何学本身也可能不同于在荷兰所研究的典型情况。这种情况出现在紧实土壤、很松散的土壤、有机质含量很高的土壤或砾石很多的土壤之中。干扰表格中列出的母质质地和土壤物理参数间关系(表 17，18 和 19) 的最重要因素将在下面讨论，当这种偏差发生时，测定的各种关系和变量必须用作成表的标准值代替。

基质几何学与土壤物理性质之间的关系

——排列密度的影响

正常土壤是三相体系，它由固体(矿物和土壤有机质)、

液体（土壤水分）和气体（土壤空气）三种成分组成：

$$V_t = V_s + V_l + V_g \quad (87)$$

式中：

V_t是样本的体积（厘米^3），

V_s是固体土壤物质的体积（厘米^3），

V_l是土壤水分的体积（厘米^3），

V_g是土壤空气的体积（厘米^3）。

没有被土壤固体占用的一部分体积是总孔隙，SM_o（厘米^3/厘米^3），它可用下式表示：

$$SM_o = (V_t - V_s)/V_t \quad (88)$$

总孔隙SM_o的实际值很大程度上由土壤容重（BD用g/cm^{3}表示）所决定，容重基本上是干土壤单位体积的重量：

$$BD = W_t/V_t \quad (89)$$

式中W_t是干土样重（克）

标准土壤的容重值变动于0.9～1.5克/厘米^{3}之间，固体成分（V_s）的重量几乎和W_t相同，因为与相似的固体土壤物质相比，单位土壤空气的重量可以忽略不计。一单位体积固体的重量称作土壤比密度（SD，用g/cm^{3}表示）；它可表示如下：

$$SD = W_t/V_s \quad (90)$$

合并方程（88），（89）和（90）得到：

$$SM_o = 1 - BD/SD \quad (91)$$

组成土壤物质（即矿物和有机质）总的比密度在某种程度上取决于土壤固相的矿物质组成，但它更受土壤有机质含量的影响。在正常情况下，土壤矿物近似的比密度为2.60克/厘米^3；有机质比密度变幅在1.30和1.50克/厘米^{3}之间，其典型值为1.43克/厘米^3。因此，有机质加土壤物质的混合比密度可以近似地表示为：

$$SD = 1/[(1-O_m)/2.6 + O_m/1.43]$$

$$SD = 3.72/(1.43 + 1.17 \times O_m) = 1/(0.38 + 0.31 \times O_m)$$

式中O_m是土壤有机质的重量(克/克) (92)

在有些土壤调查报告中，土壤有机质含量是以基质的含碳量表示的（C_m，以克/克表示）。由于大部分土壤有机质组成中含碳量近似为0.55克/克，所以总的比密度也可以表示为：

$$SD = 3.72/(1.43 + 2.13 \times C_m) = 1/(0.38 + 0.57 \times C_m) \quad (93)$$

压缩土壤物质不影响土壤密度(SD)，但可使土壤容重(BD)增加。因此，压缩土壤降低了土壤孔隙度(SM_o)(方程91)。总孔隙度的值来源于一定质地的等级内土壤的典型值，它与典型的土壤水分特性有关(k_ψ-ψ和SM_ψ-ψ的关系)，同时这种特性直接影响植物生长状况，因为有效水分对植物是相当重要的。

练　习　65

重新计算表51土壤剖面P9中三个层次的总孔隙度(SM_o)的值。

将表16(3.2节)中所列出的砂质粘壤土的SM_o值和计算出的SM_o值进行比较。

——有机质含量高的土壤

方程92表明，土壤有机质的存在可以降低土壤的总比密度，但对容重降低更多，因为有机质胶结每个颗粒形成松散有结构的团聚体。所以，土壤有机质累积的总结果一般可以增加总孔隙度。土壤有机质的数量是由植物残体的供应量

和土壤微生物对植物残体分解的量所决定的。在稳定管理下长期耕作的农业土壤中，及在自然植被覆盖下的土壤中，土壤有机质的供应和分解之间可以达到平衡。有机质含量高的地方，往往是通过阻止或预防土壤微生物活性的因素来降低有机质的分解，如低温、低土壤pH、延长积水时期、形成有毒物质或形成抗微生物分解力高的化合物等都可以降低有机质的分解。一般来说，如果在三分之一以上有根活动的表土中有机碳含量超过0.04克/克时，则表上所列的土壤物理参数不能应用。

练　习　66

解释为什么土壤剖面P9上部19厘米的土层比该剖面两个亚表土层有较低的容量(BD)和较高的孔隙度(SM_o)。

高位沼泽泥炭的容重通常在0.05和0.15克/厘米^{3}之间，变化，这类泥炭的矿物质含量低，据说在0.01和0.05克/克之间，计算这种泥炭的V_m值。

——以膨胀和收缩的粘土矿物为主的土壤

某些类型的粘土矿物，如通称为“蒙脱石”的粘土，干时体积收缩，形成很深的裂缝。湿润以后，粘土重新膨胀，使孔隙破坏。在这方面，富集“蒙脱石的变性土”，也称“黑棉土”是众所周知的。黑棉土表土层干燥后，在深而宽的裂隙作用下产生的致密（容重约1.55克/厘米^3）多角状结构上部，形成一层薄的坚硬粘粒团聚体的表层。在潮湿期间粘土膨胀使耕作时表土光滑并在某一深度产生剪切现象。很清楚，这些特性影响$SM_{\varphi-\psi}$和$k_{\varphi-\psi}$的关系，因此，变性土水分状况的数字描述实际上是不可能的。

——粘土部分中铁铝氧化物含量高的土壤

在湿润热带地区，许多发生学上古老的红色和黄色土壤的粘粒部分(<0.002毫米)，以铝氧化物和铁氧化物为主。这类土壤归为氧化土类，或在其名称之前冠以前缀"OX"。剖面P 9中在分类上称为网纹状湿氧化不饱和泥炭土的土壤就是这样一种富含铁铝氧化物土壤(表51)的实例(表51)。氧化物将有每个粘粒胶结在一起成为稳定的沙粒大小的团聚体，它的内部有细孔隙。在低的吸力范围内，这些细孔隙仍然充满水分，且不影响SM_{ψ}-ψ的关系，与沙粒的情况相似，在高的吸力范围内，土壤的粗孔隙全是空的。一个具有固体颗粒的砂子实际上完全失去了水分，因为在粗砂粒之间很少细孔隙。但是胶结的氧化土壤在胶结的团聚体内部有细孔隙。这就可以解释为什么在高吸力范围内氧化土壤的SM_{ψ}-ψ的关系与壤土相似。高铁铝氧化物的土壤具有典型的化合物SM_{ψ}-ψ关系；在氧化土壤水平衡的计算中，只能用测定值间的线性内插法来近似求得所要求的SM_{ψ}-ψ组合。

练　习　67

计算沙质粘壤土的SM_{333}和SM_{16000}(应用方程27和表16；3.2节)。比较剖面P9(表51)的计算值与测定值。

用练习65所计算的SM_{o}和$\gamma=0.35$/厘米^2(近似中粗砂的值)计算剖面P9的SM_{333}。将这一计算结果与测定的SM_{333}值(表51)进行比较。

用练习65所计算的SM_{o}和$\gamma=0.017$/厘米^2(砂壤土的近似值)计算剖面P9的SM_{16000}。将这一结果与测定的SM_{16000}值作比较(表51)。

——淀散性土壤

最上部土层的结构稳定性很差，在过分湿润的时候可以导致某些土壤分散为单粒，而在干燥时形成一个坚硬的结壳表层，这种现象称为土壤“淀散性”；淀散土壤与孔隙闭塞有关，同时降低了渗透性能和表土贮水能力。有机质和钙质含量很低的细砂土的淀散性特别突出。淀散土壤若不加耕作就可使土壤团聚体的破坏和有机质的分解更趋于恶化。

——多砾石的土壤

实验室和田间测定土壤质地不考虑直径超过2毫米的任何组成成分的存在。但在某些土壤中，这类组成占有相当大一部分基质。砾石的存在减少了生长根系的土壤体积，同时减少了土壤供应作物的水分含量。通常砾石含量可以在田间估计并以每一个土层中砾石所占土壤体积的比例表示。表52介绍的剖面Kpuabu 1的土壤描述就是一例。在某些情况下，砾石含量是在实验室测定的。例如在土壤中砾石含量低，同时在田间不能用任何精确测量方法估算的情况下，砾石可用筛从土壤中分开并称重。这样，砾石含量常常用重量比表示(克/克)；表52所介绍的剖面P 9就是一个例子。重量比很容易换算为体积比(厘米^3/厘米^3)，即重量比乘以容重/密度(参见方程91)。显然，如根系分布的表土层含有砾石，土壤有效水的数量最终是受影响的。一种含有砾土“X”厘米^3/厘米^{3}的土壤只含$(1-X)\cdot W_a$厘米的有效水分。因此，砾质土比类似的非砾质土壤更易出现水分短缺。这个论点在描述塞拉利昂马诺瓦土系砾质土剖面Kpuabu1时，已经作了说明(表52)。

练　习　68

用方程93和91计算表52分析的剖面Kpuabu I各土壤

层次的SD和SM。

计算应用于低吸力条件下的每个分析层次的γ近似值，所用方程为：

$SM_{333}=SM_o\cdot e^{\gamma\times(\ln 333)^2}$，或$\gamma=0.03\cdot\ln(SM_o/SM_{333})$

用低吸力γ和所建立的SM_o值，计算每层的SM_{100}。应用方程27。

计算每层所含的最终有效水分量（$=SM_{100}-SM_{16000}$）。

将水分含量的分数转换为厘米（以土层深度（厘米）乘每个分数），校正每个层次砾石的含量。

计算178厘米以上的土壤最终有效水分的数量。（假设砾石校正前，B_{21}土层有2.8厘米的有效水，同时砾石含量为0.6厘米^3/厘米^3）。如果土壤不含砾石，计算对作物有效的水分量。

土壤形态的指示物

详细考察一个土壤剖面可以得到有关土壤的扎根能力、均匀性和水分状况方面有价值的资料。虽然要求有丰富经验才能对土壤剖面形态作充分的解释，但是有些土壤剖面特性相当直观地反映了重要的土壤物理条件。本节将对有些能为全年最大和最小地下水埋深、扎根深度和生物土壤均匀化强度等提供形态方面的线索作简短的讨论。

——铁锈斑与水位的变化

多数土壤含铁，铁来自岩石风化或从外部注入。根据土壤的通气状况，铁离子以三价（Fe^{3+}）或二价（Fe^{2+}）形态出现。通气良好的土层含有三价铁的氧化物（铁锈），只要保持氧化的条件，三价铁的氧化物是稳定和不溶解的。但是，在土壤处于长期水饱和条件下，三价铁离子能转化为二价铁离子，它很容易随流水移动。这种二价铁离子在接近空气的地方能

转化为不溶性三价铁。因此，在这些地点发生铁氧化物的积累，同时表现为红色、棕色或黄色的锈斑。这些斑点的多少、大小、颜色、形状和反差表明了过去地下水位的升降。为了识别土壤的形态特性，需要以下几条规则：

1. 长期处于地下水以下的底土层，完全没有锈斑而且母质的颜色通常是灰色。

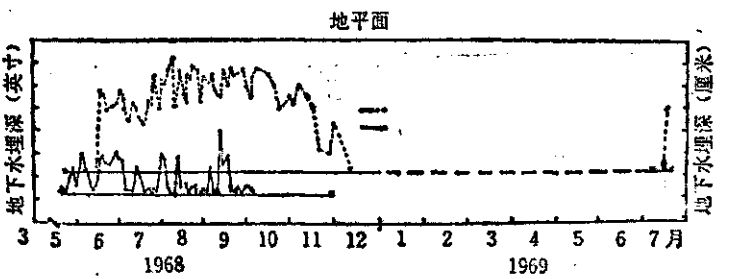
2. 水分不饱和的表土层，母质为淡红色或棕色，证明有三价铁氧化物的分布(有机质的累积可以形成黑棕色，但没有铁重新分配的迹象)。

3. 明显的铁斑表明过去地下水位升降的区域(在土壤观察时地下水位低于几米，已在土壤剖面描述中有记载)。

练　习　69

检查土壤剖面 P9 和Kpuabu I对于深度和红色斑点多少的描述，这两个剖面中哪一个地下水位较深？

图53介绍的是1968年下半年剖面P9的地下水位。在那个时期记载的地下水位深度有例外吗？



DT67表示深于67英寸（171厘米）

图53　1968年下半年位于 Masuba P9的水位变化

(资料来源：Van Vuure和Miedema，1973)

未搅动心土和根迹的深度

在这里提出的作物生产模型中表土的均一性是一个重要的假设。这种条件可能是均匀的成土母质深度风化的结果，或是在稳定环境中来自延展的冲积物。但更常见的是，土壤的均一性是土壤动物和植物根系对表土进行生物混合的结果，均匀过程的深度和强度可以从土壤描述中加以推断。

经过生物活动强烈均一化的土壤缺乏明显的层次界限，同时整个根区有比较均一的土壤质地。由于小生物体活动的结果，同时被蚯蚓、蚂蚁等穿孔，因此一个均匀的表土有很多大孔和中孔。植物根系对土壤的生物混和也作了贡献，根系死亡，分解后在土壤中留下了孔隙。黑色的表土物质通常沿着根孔淋洗到较深的土层。在湿润条件下，根孔起了空气导管的作用，将大气中的氧带到了通气性差的底土。可溶性的二价铁转化为三价铁的氧化物，沿着根壁能产生淡红色铁锈，这就是可见"根系痕迹"。土壤中根系痕迹分布的多少和大小反映了过去根系活动的强度。在没有生物孔隙和根系痕迹的土壤叫"未搅动的土壤"。如果未搅动心土的上部边界深于土表以下一米，同时表土的均匀性明显，则不能认为作物根系活动将遇到任何机械障碍。土壤均一性的绝对标准很难确定，因为土壤的均一性不仅取决于混合强度，而且取决于属于地质材料的土壤母质的均一性和层次情况。

练　习　70

检查剖面P9和Kpuabu 1对根系多少和深度的描述，同时注意蚂蚁和蚯蚓活动的证据。在这两种土壤扎根会受到阻碍吗？

两种土壤中哪一种土壤的生物土壤均一性更强？

5.3.2 土壤化学数据

土壤样本的化学分析是研究土壤及土壤对农业应用的适用性的常规方法。化学分析对确定近似的土壤肥力状况是特别需要的。为此下列问题必须详细讨论：

——什么是土壤中植物养分的总量？

——这些养分对植物吸收有效程度如何？

——土壤暂时贮藏养分为以后释放到土壤溶液和为作物所吸收的容量如何？

——有妨碍作物生产的土壤化学状况吗？

土壤化学数据是很有限的值。与被测植物的生产性能相结合，它们才有意义，但不能认为土壤化学数据与作物产量之间存在可靠的和一般适用的相关性。每年不同的外部条件(如天气)模糊了这种相关性，使得最多也只能对土壤化学状况进行一般安全范围的鉴别。超出这一范围，植物会遭受养分缺乏或土壤养分过量，而过量的土壤养分对植物有毒。

在这一节中，将讨论代表重要土地单元的主要土壤剖面按常规所要收集的那些化学数据。为了证明土壤化学对许多情况下植物生产的限制性，将对作为养分失调指标的土壤化学数据的重要意义进行说明。

全量养分

全量养分的测定有助于查明结构养分的不足(例如矿物质贫乏的土壤或已开垦利用的养分耗尽的土壤)，但不能提供有关作物实际可从土壤中吸收的养分之确切数量的信息。全量养分通常是在土样用强试剂(如硝酸或高氯酸)消化以后进行测定的。现代分析技术，如X射线分光镜，允许不破坏土样进行全量养分的测定，考虑到全量养分数据对于农业实践

的有限意义，将不对这个题目作进一步的论述。

练　习　71

计算塞拉利昂土壤剖面Kpuabu 1 53厘米以上的全磷量(P用公斤/公顷表示)。这个剖面的土壤化学数据和容重值参见表52。

重复计算全钾量(K，以公斤/公顷表示)。

注：1公斤K_2O等于0.83公斤K。

有效养分的含量

土壤中的养分只有一小部分能在作物生长周期中被吸收利用，其余部分损失，或被固定在矿物或稳定的有机物和有机一矿质化合物中，这些养分只有在风化或有机结构经生物分解(矿化作用)之后才变成对植物根系有效。土壤肥力专家长期以来试图寻找模拟根系作用的浸提剂。这类试剂应当从土壤中将有效养分转移出来，而将无效部分留下来。他们的探索取得了一定的成功。很多"温和"(即弱酸或弱碱)的试剂已经被鉴别出来，在特定条件下，这些试剂从土壤浸提的养分与那种土壤上所种作物中相同养分总量之间有较好的相关性。能在所有情况下反映任何作物的有效养分的浸提剂是不存在的，因为一种作物对各种养分的要求及同其他消耗者对养分的竞争部分地取决于外部因素。实际选择某种浸提剂是以地方经验为基础的。经常应用的浸提剂列于表53。这个表中没有给出估算土壤有效氮的浸提剂。

4.1和4.2节曾提到植物-土壤-大气系统中有无机氮，如肥料N，还有结合在土壤有机质和土壤微生物中的有机氮。氮素通过淋洗、反硝化作用或挥发作用主要以无机

形态而损失。有机氮主要对不施肥土壤的氮素状况起作用；通过有机质分解期间的矿化作用，有机氮能转化成植物可吸收利用的有效氮。分解过程中从有机质中矿化出来的氮量是土壤微生物进行新陈代谢所利用的碳量的函数(Bouldin等，1980)。由于这个原因，在有些土壤调查报告中除有机质或有机碳的含量以外，还要提出土壤有机质的C/N比率。C/N比率低于15表明土壤有机质分解可以产生相当数量的矿质氮；C/N比大于30表明不施肥土壤的供N水平很低。

表53 测定土壤有效磷或有效钾常用的浸提剂

浸提的元素	浸提剂的名称	浸提剂的化学组成
P	Bray No.1	0.03N NH_4F+0.025NHd
P	Bray No.2	0.03N NH_4F+0.01NHd
P	Truog	0.002N H_2SO_4(pH>4.8)
P	Olsen	0.05N $NaHCO_3$(pH8.5)
P	改良的Olsen	0.5N $NaHCO_3$+0.5NNH_4F(pH8.5)
K	—	23%$NaNO_3$
K	—	1N NH_4-acetate

(资料来源：Dabin,1980；Odell等，1974)

在许多传统的农业制度中，存在氮素投入与支出平衡的情况，即投入的氮等于作物收获带走、反硝化作用和淋失等所损失的氮。在这种情况下，由自然土壤提供的氮的数量可以用4.1和4.2节所介绍的方法作出可靠估算。但是，当这种平衡被打破时（例如管理制度改变），就会产生不稳定状态，在该状态下，土壤有机氮含量朝着新的平衡水平而变化。其中包括土壤有机质分解和再合成的速率的变化，这两种过程非常复杂，决定于土壤有机质的数量和组成，同时也决定于环境条件，比如土壤水分含量、土壤pH和土壤温度，因此，对土壤有机质供N能力一般还没有一个可靠的估算方

法，只能根据对土壤样品的测试。

土壤有效磷来源于岩石风化物，可溶性磷化物，也来源于土壤有机成分，但后者与土壤氮相比不起主要作用。发育程度很高的热带土壤大部分风化矿物已经损失，因此，土壤中含磷量很低。然而幼年土壤缺磷也很普遍，因为可溶性磷被土壤固相固定沉淀为不溶性磷酸盐，或暂时为土壤微生物所固定。Dabin(1980)引证Roche等(1978)的研究结果指出，从20个国家140种土壤得到的磷的固定容量与粘土和细粉粒含量($\gamma=0.51$)、有机质($\gamma=0.7$)、全量铝($\gamma=0.63$)、代换性铝($\gamma=0.86$)、全铁量的相关性均达到0.1%显著水平。由于有那么多变量(还有更多的!)，因此，可以预期可浸提的磷和作物吸收磷之间的相关性对不同的土壤和浸提剂是不同的。换言之，不同的浸提剂可以得到不同的结果，根据地区性建立起来的相关性不能转让到其他地区。在许多国家，测定有效磷喜欢采用Olsen法的浸提剂；塞拉利昂的土壤肥力专家(表51和52)采用Bray No.1和(或)Bray No.2。表54说明了没有经过地方试验的有效磷的数据有一定局限性。该表介绍了泰国一些重要土系水稻吸磷量和这些土壤中采用不同浸提剂所获得的有效P的结果(Puh和Khunathai, 1971)。

由于需要判断有效磷与其他基本元素含量的关系增加了解释这些数据的困难，因为作物对土壤中特定养分的效应在很大程度上取决于总养分供应的平衡或不平衡（4.1节）。Dabin(1980)认为，可浸提的土壤P的临界值是由土壤全氮含量所决定的。对于改进的OlsenP法来说，他给予下列经验规则：对于磷的固结作用平均值低的土壤(即表47中大约为I级和II级的上半部的土壤)来说，磷的临界水平估计为全N量的0.025倍，土壤中磷的固定容量为中等到强的土壤(表47中II

级的下半部)，临界值水平还可能进一步增加。

表54 水稻吸磷量和用4种方法测定的有效磷(ppm)

土系符号	对照区植株含P量 mg p/盆	Bray No.1	Bray No.2	Truog	Olsen
Bn(1)	59	6.6	9.0	2.7	7.3
Bn(2)	40	1.2	6.0	0.9	8.0
Db	65	3.0	6.9	5.4	4.6
Sb(1)	176	6.1	12.8	6.9	9.9
Cn	143	2.3	8.8	3.6	13.1
Ok(1)	4	2.8	7.8	2.2	3.3
Sm	88	0.6	9.0	3.3	5.8
Np(1)	119	3.8	16.0	5.4	12.2
Hd	56	2.3	7.2	5.1	5.5
Re(1)	33	4.2	8.5	2.2	6.2
Bn(3)	222	4.4	21.8	9.1	8.4
Rs	52	7.1	26.0	5.8	2.9
Ok(2)	68	10.7	29.5	9.1	6.6
Sb(2)	49	3.3	8.4	2.9	3.2
Re(2)	135	9.2	11.9	2.9	3.6
Ub	47	8.2	8.8	1.0	1.6
Lp	63	5.3	7.3	2.9	2.3
Np(2)	135	7.5	13.8	3.5	3.2
Pb	93	15.7	53.2	11.3	9.6
Bk	—	4.7	5.9	2.9	2.5

资料来源：Puh 和 Khunathai，1971.

粘粒中水化铁、铝氧化物含量很高的幼年火山土中的磷的固定作用很强，同时在铁铝氧化物含量很高的老年红色和黄色热带土壤中磷的固结作用也非常普遍。正如在5.3.1节阐述的那样，塞拉利昂剖面Masuba P 9和Kpuabu 1(表51和52)就是这类土壤的实例，这类土壤的形成是在缺乏通过从别处汇集来的矿物质进行更替的情况下岩石进一步风化的结果。

钾也发生固定作用，但钾的固定过程与磷不同，钾的固定是钾离子与某些粘土矿物的晶格相结合。许多作物吸钾量与吸氮量相类似，特别是块根和块茎作物以及许多蔬菜和果树更是如此。土壤钾来源于风化的粘土矿物(黑云母、水化云母、伊利石)，同时有相当数量的缓放钾来源于钾长石和云母的分解产物，洪水和灌水是钾的其他来源。许多风化的热带土壤，如石英砂土和从地质学上古老母岩上发育的红色或黄色残积土壤是结构上含钾不足的土壤。粘土矿物对钾的固定作用具有高的选择性，这对农业实践可能是很重要的。Mitra等人(1958)在印度以纯粘土进行研究发现，粘土矿物斑脱土和伊利石固定的K为4毫克/克，在热带土壤中最普通的粘土矿物高岭石固定的K只有0.13毫克/克。在酸性土壤中钾的固定能力比中性或碱性土壤低，这一实事说明了在热带土壤中钾的固定与温带地区的某些土壤相比较不占优势。Kemmler (1980) 提供的数据表明，用1N醋酸铵作浸提剂所提取的有效钾水平较低，每100克土壤少于6毫克。

在古老的淋洗作用强的热带土壤中，少量元素如钙和镁以及微量元素如铜、锌和锰往供供应短缺。钙的缺乏与土壤酸度有关(pH<5)；施用石灰(Ca)或磨细的镁质石灰石(Ca, Mg)可以改善这种状况。硫的缺乏也有发生，但已发表的资料表明，硫的缺乏与土壤或气候因素没有关系，这对预报可能缺硫的地区将是有用的(Blair等，1980)。

练 习 72

比较剖面Kpuabu 1(练习71和表52)53厘米以上土层的全磷量和用Bray No.1作浸提剂的有效磷含量，你能解释这种差异吗？

假设在一种类似 Kpuabu 1 的土壤上生产3000公斤稻谷，需要多少磷肥？解释你的回答(产量-吸收曲线的斜率是每公斤N生产50～70公斤籽粒，在平衡时组织中的P/N比值约0.1)。

在Kpuabu 1 土壤上需要施K肥吗？解释你的回答。

土壤中离子的吸附作用

植物从土壤溶液中吸收养分，土壤溶液实际上是一种低浓度的离子混合液。如果离子被作物吸收而得不到补充，这种溶液中的离子将很快耗尽。幸好，多数土壤有维持阳离子贮存的能力，因为在固体土壤颗粒（矿物质颗粒，特别是粘粒和有机质）的表面带负电荷能吸附阳离子。在这些阳离子中最重要的是Ca，My，K，Na和H离子。如果土壤溶液中某种离子的浓度与土壤交换性复合体上离子吸附量之间的平衡被打破，例如植物根系吸收养分，这些离子就进入土壤溶液，然后就建立起一个新的平衡。反之也适用：增加土壤溶液中某种离子的浓度，则导致那种离子在交换性复合体上的吸附作用。这意味着对土壤增加的阳离子(例如通过施肥)如果不立刻被植物吸收，则不一定损失，因为通过交换性复合体与土壤溶液之间的交换过程，部分阳离子的有效期变得较长。土壤吸附阳离子的能力主要取决于固体土壤颗粒的表面性质，值得注意的是它们的比表面(即每单位土重的总表面积)和单位表面积上的电荷。质地细密的土壤(粘土）具有高的比表面，因此，比质地较粗的土壤具有较高的阳离子交换能力(C·E·C，用毫克当量/100克土表示)。因为粘土矿物的表面电荷不同，土壤固相的矿物学组成也有影响。表55介绍了比表面的典型值和某些普通固相组成的代换量，结果表明，土

壤有机质具有较高的阳离子交换能力，因此，在土壤剖面中，有机质含量高的表土层阳离子交换总量通常比下层土壤高。

在土壤酸度，即土壤溶液中氢离子浓度的测定中，阳离子交换性复合体起了重要作用。通常在田间条件下，交换性复合体的一部分可以被 H^+ 占据，甚至在土壤溶液中那种元素的浓度相当低时也是如此，因为这些离子优先被吸附。这种优先吸附一方面与粘土矿物中 Al 和 Mg 离子被 H 离子代换有关，另一方面则与土壤有机质的表面性质有关。这些过程的结果使土壤显示出一定程度的缓冲范围，即增加相当大量的 H 离子而土壤溶液的 H^+ 浓度仅仅有少量增加。因此，pH（定义为$\log H^+$浓度）值下降很少。但是，如果土壤具有低的 pH 值，同时在土壤溶液中 H 离子的浓度高，为了提高土壤的PH值可能需要相当数量的竞争阳离子，例如钙。改变 pH0.1 单位所需要的以公斤表示的 CaO 的量称为"施石灰系数"。

表55　某些固相组成的阳离子代换量和比表面积

	表面积（米²/克）	阳离子代换量毫克当量/100克
粘土矿物：		
高岭石	10～20	1～10
蒙脱石	600～800	80～120
蛭石	600～800	120～150
云母	70～120	20～40
绿泥石	70～150	20～40
水铝石英	70～300	10～150
土壤有机质	800～900	100～300

（资料来源：Bohn等，1979）

为表示有关土壤吸附离子组成的特征，吸附性 Ca^{2+}，Mg^{2+}，K^+和 Na^+的和以毫克当量/100克土表示，它占土壤代换总量的比例被称为土壤的盐基饱和度。热带多数耕作土壤

的盐基饱和度很低，小于0.4，交换性复合体的其余部分包括H^+，Al^{3+}，Fe^{2+}等。

练 习 73

计算Kpuabu 1表土层中土壤矿质部分的近似阳离子代换量(表52)。假设土壤有机质阳离子代换量为100毫克当量/100克土；有机质的含量为0.01公斤/公斤，相应的有机碳含量为0.0055公斤/公斤。

在Kpuabu 1表土中，有机质的存在对供应作物养分是重要的吗？说明你的回答。

元素的毒性

如果土壤中元素累积的数量达到了对植物有害的程度，元素就发生毒害。但是，如果土壤溶液由一种或少数几种元素占优势时，即使在元素的绝对浓度很低的情况下，毒害的影响也能发生，因为供应根系的离子明显地失去了平衡。

在干旱和半干旱地区的表层土壤中，盐分累积量可能很高，在这些地区明显的蒸发过量与占优势的土壤溶液和离子的向上运动有关。当土壤水分蒸发时，可溶盐分在土壤上层或根系表层中累积起来，并妨碍根系的活动，土壤已经变成盐土。土壤盐渍化的程度可以用测定水饱和泥浆的电阻而得到。电阻的倒数值就是电导率(EC_e，单位为S厘米，S代表西门子)。电导率的值超过16×10^{-3}S厘米时，相当于土壤近似含盐量0.01公斤/公斤作物的正常生长受到抑制。当电导率更低时($\geqslant4\times10^{-3}$S/厘米)盐害已很明显。累积的盐分可以通过浇水冲洗土壤加以改良。如果盐分积累的阳离子主要是钠("盐碱土")，根区中盐分危害的影响更为突出。在干旱或

半干旱地区以外的盐分积累通常限于低洼的滨海地区，这类盐土属于盐分渗漏或定期受到咸水或微咸水浸渍所形成的。

在湿润热带地区的酸性土壤（pH<5）中，土壤溶液中的盐分含量很低，元素的毒害作用很普遍。土壤酸度与土壤溶液中氢离子含量高有关，土壤酸度直接妨碍了作物的生长。但是通常更重要的危害是因为土壤酸度导致土壤中有毒性的铝或锰的形成。铝离子的累积特别有害，在铝离子含量低的情况下，作物产量已经受到影响，当铝离子的含量高于交换性复合体容量的三分之二时，作物产量急剧下降。在旱地上铝的毒害是最主要的；除沿海地区的某些酸性土壤（酸性硫酸盐土壤）以外，在水田种水稻很少发生铝的毒害。众所周知，水田的水稻对过量的有机酸或硫化氢有缓冲作用，但是这种危害是比较少见的。对水田的水稻更为普遍的危害是亚铁离子的毒害。在间歇湿润的土壤中铁离子累积的机制在5.3.1节中已作了概要的说明，当淹水水稻暴露在土壤pH低于6.5和可溶性铁的含量超过300ppm时（Moormann和an Breemen，1978），就会发生铁离子毒害。在养分含量低的土壤中，特别是P和K含量低，铁离子的含量低于30ppm也可能产生毒害。表56的总结了最常见的化学土壤失调的标准。

土壤化学分析中常见的错误概念

虽然土壤化学分析经过了长期实践，但仍有若干不完善的地方，这使得分析结果的说明变得复杂化。这里将提到的那些缺点是本节讨论的属于常规收集土壤数据的缺点。

——土壤化学数据的传统表示方法是以重量为基础表示的，如百分数、ppm 或毫克当量/100克土，这些数据没有给出扎根土壤体积中养分数量（公斤/公斤）的资料。因此，指出元素浓度的容重值（矿质土壤的容重变化在0.85和1.55

表56　若干重要的限制土壤化学条件的认别标准

贫瘠母质或阳离子被淋洗	用 IN 醋酸铵浸提，pH7.0 时，代换性阳离子<7毫克当量/100 克土。
缺N，	主要作物表现缺N的广泛农学特征，没有定量的土壤定义。
与固定作用有关的缺P	表土粘粒部分以水铝石英占优势(X射线无定形)，或粘粒部分铁和铝的氧化物>20%，同期上部土壤中的粘粒>30%，或 pH<7.3，或土壤中加盐酸有起泡反应(有游离碳酸钙存在)。
缺K	在上部 50 厘米土层，K<0.6 毫克/100 克土。
缺其他养分	土壤测试值低于主要作物的标准值。
Al 的毒害	在上部 50 厘米土层中，阳离子代换量的 Al 饱和度>67%或 pH<5.0。
Mn的毒害	在上部50厘米土层中，酸可提取的Mn<100ppm。
盐渍度	上部 50 厘米土层中，电导率 ECe> 4 ×10^{-3}mS/厘米。
碱化度	上部 50 厘米土层中，代换容量的钠饱和度>15%。
酸性硫酸盐土壤条件	对干土测定的 pH 值<3.5。

资料来源：Buol等，1974；Sanchez和Cochrane，1980。

克/厘米^{3}之间)是非常重要的。遗憾的是这种情况很少。一个极端的例子可以表明这种省略的可能含意。一般认为泥炭土含N量高，其含N量在 0.01 和 0.02 公斤/公斤之间，可是，容重为 0.20 克/厘米^3，含N量为 0.02 公斤/公斤的泥炭土上部 10 厘米土层的总N量为 4000 公斤/公顷，而含N量仅为 0.005公斤/公斤、但容重为 1.5 克/厘米^{3}的矿质土壤表层的总N量则为 7500 公斤/公顷。尽管表面上看含N量高，但在泥炭土上N素缺乏是十分普遍的。根据这个理由，分析结果的提出应当以单位体积的重量为基础(Driessen，1978)。

——如果用来指明元素不足或有毒的标准元素水平（表56）是有用的，一种土壤的石砾情况必须详细说明。在常规土壤分析中很少见到这样的说明。

——阳离子代换量在传统上是通过测定醋酸铵的中性溶

液中（缓冲溶液到 pH7.0）等份土上吸收的铵离子进行测定的，但是，有机质和某些粘土矿物（值得注意的是高岭石、绿泥石和水铝石英，见表55)的表面电荷在很大程度上由pH所决定。由于在正常情况下田间 pH 低于7，实际上热带土壤的交换量常常比化学分析的数据低。只有按田间 pH 所测定的阳离子代换量的数据才能与土壤的交换量和盐基饱和度作有意义的比较。

练 习 74

剖面Kpuabu 1（表52）表土25厘米以下砾石含量多于0.7公斤/公斤。这种情况说明土壤的养分状况如何？

剖面 P9(表51）砾石含量小于0.02公斤/公斤，与剖面Kpuabu 1比较这种土壤实际的阳离子交换量如何？

5.4 植 物 数 据

H. van Keulen

前几章已经说明，植物生长和作物生产能力的数量评价，能够以土壤和植物的基本性状知识为基础，在不同的生产情况下进行。这一节将对某些需要的植物数据加以总结，包括得到数据的方法和为初步估算提供指示值。

5.4.1 光合能力

如2.1节所述，冠层 CO_2 总同化量 F_{gc}，可以从叶面积指数计算，在高光强度下，扩散有限的单叶最大总同化量 F_g 亦可以测量或估算。后者的特性可以在高光强度下，根据试验测量已知表面积的单叶吸收的 CO_2 加以确定。这个试验做起来

非常方便，在密闭室中装入叶片，使已知流量的空气通过叶片。在密闭室进口和出口处的CO_2浓度可以测定，因此可以计算吸收的CO_2量。由于同化和呼吸过程同时进行，测定值代表的是净同化速率，即同化和呼吸之间的差。因此，正如Goudriaan和 van Laar（1978a）所做过的那样，为了得到F_g，测定值必然因黑暗呼吸值而增大（5.4.2节），假定黑暗呼吸作用以光呼吸的同样速率进行。在控制条件下这样的试验可以正常进行，缺点是从达到光饱和的人工光源得到足够高的光强度通常是困难的，对C_4类植物来说尤其是这样。虽然F_g值因叶片的年龄、叶片N的含量和叶片在冠层中的位置（特别是叶片与太阳位置）等特征而异，但对C_3型植物来说，最大CO_2同化的特征值的变化幅度为15～50公斤/公顷·小时，C_4类植物的变幅为30～90公斤/公顷·小时。假如对一个品种的F_g值不知道，按一般的推测C_3型品种为40公斤/公顷·小时，C_4类品种为70公斤/公顷·小时。

Downton(1975)以及 Raghavendra 和 Das(1978)已经发表了C_4类品种的目录。一个品种具有C_3类还是C_4类的光合途径可以从解剖学的特征上推导出来。在C_4类植物中叶肉细胞围绕绿色组织的维管束鞘呈放射状排列，而C_3类植物叶肉细胞呈薄片状。这些差异在显微镜下是清楚可见的。

另一种方法是基于以下事实，CO_2的补偿点即净CO_2同化作用变为零时外部空气中CO_2的浓度值，对于C_4品种来说大约为10ppmv，对于C_3品种为120ppmv。一个未知品种生长在有C_4品种存在的气闭环境中时，如果它碰巧属于C_3组品种，那么将比C_4品种提前很久停止活动。如果是C_4品种，它将维持近似相等长的时间。在密闭系统中，光合过程将导致CO_2浓度逐渐降低。当下降到120ppmv以下时，C_3品种

的呼吸作用超过同化作用，而 C_4 品种以正的速率继续进行同化作用，直到 CO_2 补偿点达到大约 10ppmv为止。

5.4.2 呼吸损失

呼吸作用的测定原则上与测定同化作用相同，即在没有能量来源的条件下(黑暗呼吸作用)测定 CO_2 的交换速率。当将处在有光条件下一定时间的植物转移到暗处，测定其 CO_2 的交换速率时，一般情况是：最初 CO_2 演变的速率很高，但随时间的延长而逐渐下降，最后大体上达到一个稳定值。在分析这些数据时，通常假设稳定值代表维持呼吸作用，而在开始时增加的部分是因为同化产物转化成结构植物物质，即生长呼吸作用而产生的。

呼吸作用损失的大小，主要取决于植物结构物质的化学组成(2.1节)。当物质的蛋白质(氮)含量较高时，维持呼吸作用和生长呼吸作用都较高。

维持呼吸作用的数值可以从物质的蛋白质和灰分含量加以计算，假定 20°C 时，为维持呼吸作用，蛋白质需要 CH_2O 约 0.035 公斤/公斤·日，需要矿物质约 0.07公斤/公斤·日。在这两种成分中的每一种组成占未收获作物总重约1/10的情况下，维持呼吸的需要量将是 0.0105 公斤 CH_2O/公斤干重·日。

练 习 75

计算维持呼吸作用的碳水化合物需要量（公斤/公顷·日），假设作物干重 10 000 公斤/公顷，N 含量 0.025 公斤/公斤，灰分含量 0.01 公斤/公斤（注意蛋白质含 N量为 0.16 公斤/公斤）。

但是在多数情况下，不可能进行这样详细的分析，因为得不到足够的数据。而且，在这里所介绍的分级方法中，当必须计算呼吸损失时(2.3和3.4节)，物质的N含量是不知道的。在那种情况下，可以应用近似值，如表3所说明的。

生长呼吸作用的影响可以用2.1节中已经说明过的转化效率来表示。因此，如果转化效率是0.7，生长呼吸作用所消耗的量就是主要光合作物产物重量的0.3。于是再次表明，蛋白质比较高(也包括脂肪)，将导致生长呼吸损失量也高。

练　习　76

一种作物经过维持呼吸作用以后，余下碳水化合物400公斤/公顷·日，计算这种作物干物质增长速率(公斤/公顷·日)。如果：

a.木薯的块茎是充实的（成分：蛋白质0.075公斤/公斤；淀粉0.925公斤/公斤），

b.玉米籽粒是饱满的（成分：蛋白质0.125公斤/公斤；淀粉0.875公斤/公斤），

c.大豆籽实是饱满的（成分：蛋白质0.4公斤/公斤；淀粉0.4公斤/公斤，类脂化合物0.2公斤/公斤），

在上述情况下，由于生长呼吸的消耗，碳水化合物的损失是多少？

如果在特殊情况下没有精确的数据可以利用，表3列举的转化效率可以应用于不同的作物种类。Sinclair和de Wit (1975)、Penning Vries (1983)等提出了不同作物贮藏器官的化学组成。

5.4.3 物候学

物候学的发育在确定生产潜力中是必须考虑的最重要的作物特征之一（2.2节）。我们曾说明过，描述物候学发育有不同的方法，可以把它作为温度和昼长的函数来描述。但是，在多数情况下，能产生好结果的最简单的方法叫热量单位法。在该方法中假设每个物候期的发育速率可以作为温度的线性函数来描述。这个期间的发育速率则被定义为那个期间持续期的倒数，因此：

$$R_v = 1/N_d = b_t(T_a - T_o) \tag{94}$$

式中：

R_v 为发育速率(1/日)，

N_d 为物候期的长短(天)，

b_t 为常数(1/日·°C)，

T_a 为日平均气温(°C)，

T_o 为表观临界温度或基础温度(°C)，低于这个温度，物候发育停止。

练　习　77

计算以下实例的小麦发育速率。N_{hm} 表示从抽穗到成熟的天数。

地　点	T_a	N_{hm}
哈　罗	21.1	31
渥太华	20.6	29
诺曼丁	15.0	54
斯威夫特卡伦特	19.1	41
拉科摩	14.7	59

比弗洛奇	13.9	54
弗米利恩堡	15.3	48
辛普森堡	16.4	38

以温度为横轴发育速率为纵轴，将结果绘制成图，画一条拟合直线并估算 T_0 和 b_t 的值。在平均气温为 12.5°C 的条件下，这个小麦品种从抽穗到成熟将需要多少天？

热量单位概念的应用产生了这样的见解：在某一个物候期，基础温度以上的常温总数必须累积起来。该时期可以处于任何两个从生产观点来看是重要的物候事件之间。为了模拟的目的，通常要区分两个时期，一个是在贮藏器官开始生产这一时刻之前，另一个则在该时刻之后。对谷类作物来说，这一时刻就是开花期，对块根和块茎作物而言，则是开始膨大的时刻。两个时期的尺度大小都指定为 0 ～ 1 。在多种情况下，把出苗期作为贮藏器官开始生产前这一阶段的起点是适当的，因为发芽的温度关系可能十分不同。

在实践上，温度和发育速率之间的关系可以通过试验观察出苗和贮藏器官生长开始的日期以及测定那一期间的温度来确定。如果只利用一年的数据，那么可以用表7(2.2节)上给出的基础温度来构成线性关系。为了比较精确地描述，通常需要在不同的温度下至少进行两个试验才能获得基础温度。这种试验在控制条件下，即在气候室或温室里是容易进行的。贮藏器官生长开始以后的时期，试验的测定可能比较困难，因为成熟的时间通常不易清楚地识别。对不同作物规定有不同标准(例如对于玉米，是在籽粒基部有一黑层形成)，根据这些标准就可估计成熟点，而且可以应用同一方法。通常在贮藏器官开始生长前和以后两个时期的发育速率与温度

关系的斜率是不同的。

练　习　78

计算两个春小麦栽培种出苗到开花期的发育速率。T_a是用°C表示的平均气温；N_{ac}是这个时期的持续天数。

栽培种	Timgalen	栽培种	Orca
T_a	N_{ac}	T_a	N_{ac}
12.5	93	11.6	95
14.1	72	13.2	78
17.0	61	17.0	69

计算开花到成熟期的发育速率。

栽培种	Timgalen	栽培种	Orca
T_a	N_{am}	T_a	N_{am}
19.5	49	17.6	43
20.5	48	17.6	40
22.1	41	16.9	39

把练习77的计算数据，分两个不同时期，标绘在两张图中。画出拟合曲线。关于两条线的斜率你看出了什么？

为了模拟的需要，在一个品种内，至少要对每一组栽培品种(短期与长期)建立温度与发育速率间的关系。

5.4.4　干物质的分配

不同植物器官之间所形成的干物质的分配极大地影响总的干物质产量和经济产量。如果在作物发育的早期阶段所形成的干物质大部分投入到根系中，则叶面积发育相当慢，因此，在长时间的对光能的拦截不完全，总产量将保持很低水

率。同样，如果在贮藏器官生长阶段植物的其他器官仍然要求大量的有效同化产物，或者由于主要元素转移到发育的贮藏器官中(如在缺氮时可能发生的情况)而引起绿色面积迅速下降，则经济产量可能受到影响。

由于对控制干物质分配的基本过程知道得很少，所以只能凭经验处理这个问题。分析分配模式最简单的方法只能是描述各植物器官中干物质的增长同植物总干物重的增长间关系，亦即同年龄的关系。但是，如 2.2 节所指出的，植物器官的开始和发育受植物物候学发育的控制，物候学发育是环境条件的函数，如温度与日照的长度，而不是年龄的函数。因此植物分配模型与作物的物候阶段有关。这个开始点严格限制着对确定分配模型适合的试验数据的有效性，因为那些不仅报告足够详细的作物数据，而且对环境条件加以说明的报告，其数目很少。

如果所有这些数据都是有效的，就可以进行分析，得到的资料可用于外推和预报。用 Erdman(1972) 报道的围埂水稻试验可以说明这个问题。试验的基础数据已列在表 57 中，这些数据可以用来计算表 58 中所给的推导数据。对于每个收获日期，植物发育阶段是由从移栽到开花的积温与所要求的温度和(这个品种为 1950 日 °C) 之比所确定的。对于相邻两次收获之间的时期来说，分配系数是可以计算的，两个收获日期之间发育阶段的中间值列在表 58 中。根据相邻两次收获重量之间的差异，可以计算出，每个时期不同植物器官的干重的增长量，从这些部分值所得到的总干物重的增长量和根据这些数字可以计算每个时期对每个器官的分配比例。

每项观测值的精度不高，甚至在有相当重复次数的情况下，干物产量的变化也很大，因此，每个器官干物质增长量

表 57 圃埂水稻田间试验干物质分配的基础数据

时间（移栽后的天数）	T_a (°C)	各器官的干重（克/株）			
		根	叶片	茎、叶鞘到穗	总量
11	26.0	0.15	0.26	0.24	0.65
18	26.3	0.26	0.94	0.84	2.07
25	26.3	0.34	2.19	2.23	4.76
32	26.3	0.81	3.98	4.48	9.27
39	26.3	1.93	6.06	9.37	17.36
46	26.2	2.81	7.32	12.76	23.39
53	26.2	2.99	9.76	21.46	34.21
60	26.2	3.17	10.77	26.83	40.77
67	26.2	3.36	11.85	21.48	36.69
74	26.3	3.37	9.11	21.94	34.42
81	26.3				
88	26.3				

的数据是不太精确的。一般来说，必须时几次试验的观测结果综合分析，才能得到有用的关系。图 54 用目测拟合曲线概括了表 58 的数据，说明数据的变异性。可是，现在还需要依靠这类分析。

开花以后，只有籽粒的干重增加，其他器官不是保持常量就是降低重量，此时氮素化合物以及碳水化合物等物质均向发育的籽粒转移。

如 3.4 节说明的那样，通过对开花前部分同化产物分配到籽粒的假设，已在计算中考虑了这一转移过程。

用模型计算的籽粒重是以干重为基础的。为了与田间数据进行比较，必须考虑风干的籽粒含水量。正常籽粒产量的含水量为 12～14%，因此，计算干物质必须乘以一个系数 1.13。对于与谷类作物不同的其他作物的特殊含水量必须予以考虑。这表明，对于试验工作中报告的数据作出明确定义

表 58　关于圈埂水稻田间试验的干物质分配的推导数据

时期（移栽后的天数）	R_d	增加的干物重					
		叶片		茎		根	
		克/株	比例	克/株	比例	克/株	比例
0—11	0.075	0.26	0.40	0.24	0.37	0.15	0.23
11—18	0.195	0.68	0.48	0.60	0.42	0.14	0.10
18—25	0.29	1.25	0.46	1.39	0.52	0.05	0.02
25—32	0.385	1.79	0.40	2.25	0.50	0.47	0.10
32—39	0.475	2.08	0.26	4.89	0.60	1.12	0.14
39—46	0.57	1.76	0.29	3.39	0.56	0.88	0.15
46—53	0.665	1.94	0.18	8.70	0.80	0.18	0.02
53—60	0.76	0.99	0.15	5.37	0.82	0.18	0.03
60—67	0.855	1.08	n.a.**	negative	n.a.	0.13	
67—74*	0.955	negative	n.a.	negative	n.a.	0.01	

* 74天开花。

** 不适用。

也是必要的。

对于水稻来说情况更复杂些：多数情况下，产量用含水量为14%的稻谷表示。稻谷由糙米和谷壳组成。糙米是由大的胚乳和胚所组成，但仍由几层很薄的不同植物组织所包围，在碾米过程中糙米的外部组织可以去掉。碾米或磨米去掉外皮层后

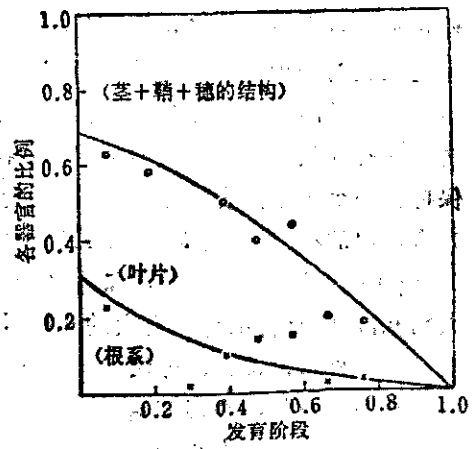


图 54　田埂水稻不同器官间总干物重增长的分配模型与发育阶段的关系

可以得到白米。在模型中计算的结果是糙米，由白米换算为糙米，一般用换算系数 1.25，从糙米换算为稻谷的换算系数为 1.2。

如果生长条件不适宜，即当水分和养分出现亏缺时，植物的分配模式将发生变化。在这两种情况下，最常见的效应是增加根系生长量，因为植物根系负担水分和养分的供应。这种现象通常称为功能平衡（Brouwer，1963）。在本文介绍的方法范围内，加之数据基础又很窄，要定量讨论这种现象是困难的

5.4.5 气孔的作用

植物的气孔能改变对内部或外部条件的效应，因此，植物可以对环境发生反应。这种反应之一是在水分紧缺条件下，气孔可以关闭，气孔关闭有效地减少了水分蒸腾。然而，即使在水分供应最佳的条件下，气孔的扩张也可能不同。控制气孔孔眼的一种机制是光效应，即在有光时气孔张开，在黑暗时气孔关闭，这种变化范围是相当窄的。但是，在某些植物中气孔的张开和关闭是有规律的，在气孔腔中 CO_2 的浓度保持在一个很窄的变幅范围内。这种变幅可能是一个恒定值，光合作用的 C_4 类植物大约为 120ppmv，C_3 类植物大约为 210ppmv。使 C_3 品种的内部和外部 CO_2 浓度间的比率保持在大约 0.7，C_4品种的保持在大约 0.4，用这种方法来调节内部浓度是一种可供选择的办法（Goudriaan 和 van Laar，1978 b）。在当前条件，在田间这两种机制之间几乎没有什么不同，因为在外部值为 340ppmv 时，两种情况的内部值大致也是相同的。

对水分利用效率（3.2 节）的影响是这类气孔控制的主要

作用。固定 CO_2 量与水分损失量的比率，对于以 CO_2 促使气孔调节的植物，其值是没有这种机制的植物的两倍。因此知道某种作物的调节类型是非常重要的。遗憾的是预报作物调节类型很困难，因为不仅不同的品种间存在差异，而且相同的品种根据外部或内部条件也有明显的不同反应方式。通过试验确定调节机制的唯一办法是在一定的外部 CO_2 浓度范围内测定同时发生的 CO_2 同化作用和蒸腾作用。用这些数据可以作出如图 55 介绍的结构类型图。提高外部空气中 CO_2 的浓度可以导致调节植物的气孔关闭。因此，蒸腾降低而同化作用不变。在没有调节气孔的植物中，同化作用增加，蒸腾作用几乎不受影响，因为气孔仍然张开。大多数普通的调节类型似乎是在外部和内部浓度之间维持一个不变的比率。引起 CO_2 失去调节多半与整个植物生命循环中维持最佳水分供应有关。在没有有关气孔行为的可用资料的情况下，设定常数比率是最现实的。

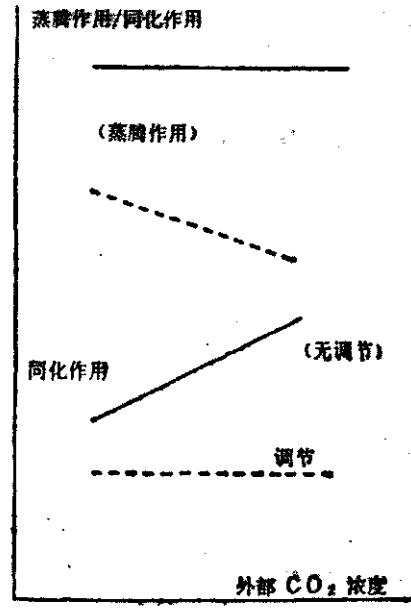


图 55　对于有和没有 CO_2 引起气孔调节的植物，其蒸腾作用与作为外部 CO_2 浓度函数的同化作用的图示

5.4.6 养分需要量

在4.1节已经对玉米和水稻作了说明，即在产量由一种特定养分元素的有效性决定的条件下，该元素的含量在作物的某一发育阶段中达到该品种的最小值。这种方法中提出的养分总需要量的确定，要求在成熟时养分含量最低。对于特定的作物来说，可以用盆栽试验测定这类数据，因为这些值不依赖于生长条件。最初的近似值可以从作物种群的参数文献上搜集得到，因每个作物种群的决定因素是形成物质的化学组成。模型结构中所应用的数据已总结在表59中。

5.4.7 若干附加的数据

对于生产情况1或2（2.3节和3.4节）计算的开始来说，地上部分干重和根系干重的数据是必需的。这些数据可以通过试验测定。但是，更为常用的方法是观察种籽内所含基质转换为植物结构物质的情况。许多品种试验已经证明，大约有一半能量为呼吸所消耗，剩余部分则均等地分配到嫩茎和根中(Penning de Vries等，1979)。因此，在出苗时，根和嫩芽的干重可以估计为完全出苗的种子重量的四分之一左右。

对拦截辐照起重要作用的叶面积的发育，一方面取决于投入到叶片中的干物量，另一方面取决于每单位叶面积生产的干物量。在2.3节和2.4节中，这个参数是作为比叶面积介绍的。它直接根据叶面积和叶片干重的同时测定而推断出来，可以采用比叶面积仪，它对叶面积做电子扫描。一种广泛应用的方法是不用高级仪器而只测定叶片宽度和长度，根据叶片形状，在叶片长与宽的乘积和实际叶面积之间

表59 几种作物种群经济产量和秸秆中大量元素的最小含量(公斤/公斤)

作物种群	经济产量			作物残茬部分		
	N	P	K	N	P	K
谷类作物	0.01	0.0011	0.003	0.004	0.0005	0.008
油料作物	0.0155	0.0045	0.0055	0.0034	0.0007	0.008
块根作物	0.008	0.0013	0.012	0.012	0.0011	0.0033
块茎作物	0.0045	0.0005	0.005	0.015	0.0019	0.005

表60 主要作物的比叶面积（平方米/公斤）

作物	比叶面积(S.L.A.)	作物	比叶面积(S.L.A.)
大麦	25	绿豆	30
木薯	22	芥菜类	23
鹰嘴豆	13	洋葱	25
辣椒	27	油菜籽	23
棉花	20	水稻	25
豇豆	25	芝麻	23
草豆	13	高粱	20
花生	28	大豆	26
黄麻	31	甘蔗	10
长果种黄麻	28	甘薯	22
红麻	25	烟草	16
小扁豆	33	小麦	20
玉米	18		

建立相关关系。对于比叶面积的试验数据不适用的情况，可以参考表60所总结的各种作物比叶面积的代表值。

一般的结论是：对于本文介绍的方法中所采用的计算类型和计算精度而言，有效的植物数据可以获得好的质量。这意味着在未进行深入的植物生理研究时也可以做出这些估算。

（杨守春译　王涌清校）

第 六 章

耕 作 制 度

6.1 作物农时、宜耕性及劳动需要量

H.D.J. van Heemst

6.1.1 引言

在前几章中已分析了作物与太阳辐射、温度、昼长、水和养分有效性以及作物特性的关系。分析表明，气候和土壤条件决定作物的生长和产量。至此，还没有把人的因素考虑进去，可是，由于人在植物和动物将太阳能转变为食物能过程中的中间作用，从而使农业有别于自然状况。这些人类活动包括土壤耕作、作物栽培和收获以及管理和饲养牲畜。因此，除迄今已讨论过的生长因素外，人类活动在农业生产过程中是不可缺少的因素。这一节将着重讨论人类的农业生产活动方面。这些方面有：

——人类活动的效率，

——人类活动的要求，

——所需要的人类活动类型，

——供人类活动选择的各种可能性。

在这一章中，强调的仅是粮食生产的农业技术各方面的专题。由于人类活动的效率取决于诸如人口的规模、人口统

计的组成、收入水平、每年能从事农业活动的天数和每天能工作的小时数之类等因素，所以这里就不论述了。这一节将要讨论的是人类活动的其他方面。

6.1.2 作物农时

人类农业生产活动在特殊时刻的要求取决于作物生长季节、作物类型及其发育阶段。作物生长季节的时间，在多数情况下是由温度或者有效水分决定的。在高纬度地区，因为温度低，冬天不能种植作物。在干旱季节明显的地带，没有灌溉条件也不能种植作物。即使温度和土壤水分条件能允许某些作物生长，但这些条件对所有的作物或作物种来说不可能都是适宜的。某些作物种比另一些作物需要较高的温度，一些作物对暂时缺水的反应比另一些作物敏感，不同作物或不同种需要不同的昼长。因而，虽然现有的昼长和温度适合作物种中某一个栽培种，但并不是所有的栽培种在有效生长季节中都能成熟。因此，在多数情况下，只有有限的作物和作物种对特定的环境是适合的。

人类活动的需要进一步取决于整地所要求的时间，这与土壤物理条件紧密相关，在 6.1.3 小节中将要进行讨论。播种和种植前，作物生长的一个绝对必要条件是必须准备适宜的苗床。一旦播种或种植作物后，一定作物种的生育期长短完全是可以预报的，因为一定地方的温度在特定季节是相对恒定的（2.2 节）。因此，如果作物生长开始时期没有因为异常气候条件拖延太长的话，那么该作物的平均发育速率和生长期，每年差不多是相同的。

作物生长期间，农民必须完成各种田间操作以创造或保持作物生长的最适宜条件。其中包括通过间苗来减少不必要

的植物竞争、最佳的营养和水分供应(施肥、排水、灌溉)以及植物保护(控制病虫害)等。作物成熟时及时收获，产品有些在农场加工，有些贮存或销售，这些活动多数必须在各自限定的时间内进行。因此可以建立作物的活动农时，以指示各种活动最适宜的时间和需要的操作类型，象水稻、玉米和木薯这类作物的活动农时将在6.1.5小节中详细说明。

6.1.3 宜耕性

宜耕性表示在一定环境中完成某一活动的可能性。一种状况是否宜耕取决于劳动效率、农场设备和所需物质、作物状况、气候条件和土壤状况以及田间作业的类型和性质。在这一小节中，重点集中在土壤状况和宜耕性两者之间的关系方面。一般来说，如果一台拖拉机或任何其他所需要的农机具在土壤上运行并很好地完成它的作用，而对土壤不造成暂时或永久性破坏，那么这种土壤可看作是适于耕作的土壤。最普遍的破坏形式是土壤紧实度，主要表现为土块容积的减少，也可以用土壤容重和孔隙度的变化来表示(3.2节)。很多土壤物理性质，如导水性和土壤水分特性均受容重的影响。如果容重太大，土壤中空气不足，植物根的发育可能受到阻碍，必将导致作物减产。土壤紧实度可用机械施加的压力和操作时的土壤水分含量来测定。机械施加的压力是农机具重量和机具与土壤接触面积的函数。在某一瞬间土壤的含水量取决于根区的水分平衡(3.2节)。

适合人工田间作业的上层土壤极限含水量为10厘米的土壤水吸力，即接近饱和的含水量。适于畜力作业的为100厘米的土壤水吸力，即接近田间持水量。适于动力作业的为500厘米的土壤吸水力。上述限制不适用于围埂水稻的栽培，因

为潮湿土地的整地需要特殊设备，其整地的主要目的是为作物造成一个紧实的下层，以便将渗漏降至最小限度。在旱季末，特别在粘重土壤上，由于土壤水分含量低，整地工作受到阻碍。在那种情况下，宜耕性受到限制，特别当必须完全用人工或用畜力牵引进行耕作时更是如此，因为土壤相当坚硬，耕作需要很大的动力。在目前介绍的方法中，如果长期干旱后，在实际作业前的最后20天内，降雨至少为75毫米，这时的土壤才被认为是宜耕土壤。

6.1.4 劳动需要量

有关不同农业作业所花费时间的资料，一般较易得到。而机械化作业比用人工劳动或畜力牵引更准确。最好是根据在标准条件下，一个技术熟练、身体健康的劳动者(农工)，在正常地方工作，用标准的设备、发挥最大的效率执行一项规定好的活动所需要的时间来确定劳动需要量。这一时间需要量除实际作业外，还包括：

a. 为保障顺利工作而进行的活动所需要的时间，如排除播种机的机械装置堵塞所需要的时间；

b. 修理机器小故障所需要的时间；

c. 安装农具、从农场建筑物到田地的路途中和进行必要的维修保养所需的时间。

农业生产过程中要求的整套活动可根据主要作业所需的时间进行分类，包括：

a. 预备活动，例如整地和植物材料的准备；

b. 移栽或播种；

c. 作物管理，例如施肥、灌溉、间苗、打顶、控制杂草和病虫害；

d. 收获；

e. 在农场加工。

多数作业可以不同方式进行，主要根据所使用的能源来区分：

a. 完全用体力劳动；

b. 利用畜力；

c. 利用矿物能源的轻型或重型机械设备。

任何作业所需要的时间均以每公顷人-小时数表示或在另一些情况下以每单位产品重量的人-小时数表示。分析时，这种规定可能造成一定的困难。有些作业因体力不同可能影响作业的时间，所以计算儿童、妇女和老人的工时数不能没有区别，而必须进行加权，以转换为标准人-小时数。然而在另外一些情况下，重要的不是体力强度，而是熟练的技术。Farringtons(1975)的数据指出，如果使用的加权系数只考虑年龄和性别，不考虑活动的类别，将导致对劳动时间估计过低，而不区别实际用的工时数，又会使估计过高。由于对加权系数的数值没有普遍一致的意见，并假定需要较强体力的那些活动主要由男劳力来完成，所以人们喜欢不加区别地应用未经性别和年龄修正的实际工时数。

因为人工生产产品的时间需要量随产品的数量不同而不同，因此这些活动所需要的劳动时间应以单位产品重量的人-小时数来表示。当使用机械或畜力时，劳动需要量一般不由产品数量决定，因此，这些活动的时间以单位面积的人-小时数来表示。

有关用人工或畜力进行作业的劳动需要量数据不易取得。这类资料多数来自社会经济调查和情况研究，关于各种农业活动所花费的时间只是其中的一个方面。在很多研究

中，对工作条件的叙述不够全面，从农业技术观点出发规定的农事活动是有毛病的，并且收集的数据也很不确切。各种农业活动所需劳动的估计(表 61～68) 是以 van Heemst 等(1981)的文献综述为基础的，这些数据的主要部分来自上面指出的各类研究。因此，这些数据表现出较大的变化。如果实际的劳动需要量对一定地区可以通用，那么这些数据用于本节介绍的主要平均数是可取的。

表 61　整地的劳动需要量估算(小时/公顷)

活动	手工操作	畜力	动力机械	
			轻	重
耕地，每次作业		28	17	6
培土，每次作业	85	9	9	7
耙地，每次作业		24	10	3
搅泥，每次作业		29	13	7
平地，每次作业		34	4	3
筑埂、施灰泥	20			
用锄翻土	300			
锄地，20～25cm	500			

表 62　植物材料预处理的劳动需要量估算(小时/公顷)

活动	人工	动力机械
水稻，苗床准备工作	80	
甘薯切块	75	
木薯切块	25	7
花生去壳	55	1

表 63 播种或移栽的劳动需要量估算(小时/公顷)

活动	手工	畜力	动力机械
水稻移栽	280		40
水稻播种	95	15	10
玉米	80	15	10
高粱	80	15	10
谷子	80	15	10
棉花	55	15	10
花生	85	15	10
大豆	85	15	10
绿豆	85	15	10
木薯	70		5
甘薯	70		6
马铃薯	75		
山药	75		
甘蔗	230		5
洋麻	50		
黄麻	50		
烟草移栽	240		

表 64 撒施化肥的劳动需要量估算(小时/公顷)

活动	人工	畜力	动力机械
施肥	3	2	1

表 65 控制杂草劳动需要量估算(小时/公顷)

活动	人工	畜力	动力机械
第一次除草	145		
第二次除草	120		
第三次除草	65		
第四次除草	20		
除草机		7	2～16
喷雾	25	2	1～4
间苗	60		
摘顶尖	40		
断吸根(desuckering)	40		

表 66　保护作物防止鸟吃种子的劳动需要量估算值(小时/公顷)

作物	人工
水稻	126
玉米	55
高粱	320
谷子	320
花生(防猴吃)	20

表 67　收获活动的劳动需要量估算

活动	人工(小时/吨)	畜力(小时/公顷)	动力机械(小时/公顷)
除运输以外的所有收获活动			
水稻	95	40	13
小麦			
收割	12	5～8	
捆绑	8～12		
捆绑器		9～16	8～16
制捆绳	3～6		
联合收割机			2～10
玉米	110		5
高粱	210		
谷子	210		
棉花	620		10
花生	195	35	22
大豆	100		
绿豆(三次采摘)	550		
木薯	12	100	30
甘薯	25		100
马铃薯	5	7	18～68
甘蔗	13		
洋麻	90		
黄麻	90		
烟草	800		

从田间运输到农场			
水稻	42	30	
小麦		28～30	
玉米	42	30	
木薯	16		
甘蔗	8		
秸秆处理			
棉花	40		2

表68　农场加工劳动需要量估算

活动	人工（小时/吨）	畜力（小时/公顷）	动力机械（小时/公顷）
脱粒：			
水稻	70	190	10
小麦	80		11～25
玉米	42		
高粱	75		
谷子	75		
大豆	200		
绿豆	80		
簸谷：			
水稻	1～5		
挑选：			
花生	185		
剥：			
花生	165		
分级打包：			
棉花	570		
烟草	1000		
拍制：			
洋麻	80		

黄麻	80
清洗干燥：	
洋麻	350
黄麻	350
熟化，风干，加工，	
烟草	500(太阳晒)
烟草	800(烘烤)

6.1.5 人类活动的选择

一般来说，一个农民在耕种季节栽种1种以上的作物，是为了保险或满足生活上的需要。在那样的情况下，农民必须在同一时间完成不同的活动，例如一种作物需要整地时，另一种作物则需要控制杂草。如果在同一时间从事两种工作，可能感到劳力不足，他们必须在两种工作中选择一种：或者放弃一种作物的管理，其结果是根本得不到产量，或者由于杂草竞争，使另一种作物的产量很低。尤其是农民完全靠人工或畜力进行田间作业时，就面临这种时间限制问题，他们经常被迫减少栽种作物的管理，因而引起减产。但在机械化装备的农业系统中，农民也面临一个时间限制问题。为了获得最大的效益，所有的农业操作必须在极短的时间内进行，工作条件，如天气、土壤状况，或得不到劳力和工具，可能使必要的农活推迟，往往造成减产。

为了避免各种农业活动互相干扰，农民应在适应特定环境的各种作物中作出选择，以获得可以在时间过程中满足他的劳动效率的作物搭配。为了作到这一点，必须确定每种作物的活动农时，并计算一年内每个时期所需的劳力。然后选

择出一年中劳力需求尽可能均衡的作物栽培方式。决不能使所需劳力的峰值达到使某些农事活动无法进行的程度。这一过程将在6.2节作详细论述。

6.1.6 泰国东北部移栽水稻、玉米和木薯的作物活动农时和劳动需要量

选择泰国东北部接近乌隆地区（北纬17°23′，东经102°48′）作为一个例子，表69列出了该地的月平均降雨量和潜在蒸发蒸腾。

在4月的某一时间，超出了20天内降雨75毫米的临界值，因此，旱地作物的整地工作可以在4月末或5月初开始。由于该地区土壤相当沙，木薯的整地可以早一点开始，以便移栽木薯的工作能抢在雨季之前进行。对于围埂的水稻来说，整地工作只有在田里有水时才能进行。因此，只有降雨量超过潜在蒸发蒸腾的时候，即接近5月末，整地工作才能开始。

水稻、玉米和木薯的整地工作，包括用畜力和当地的木犁耕地，接着耙地一次。这些作业完成后，就可以为玉米和木薯准备苗床。围埂水稻的整地包括搅烂泥块、平地和田埂的修筑或维护。

玉米是播种的。木薯靠插条繁殖，平行栽种，行距1～1.5米，株距0.8～1.5米，具体大小由栽种本人和当地传统习惯而定。对于围埂水稻来说，秧苗在苗床上培养，待生长至5～10周龄时，即可移栽到大田。大约0.1公顷苗床土地的秧苗可供1公顷水稻田栽植。在播种或栽培时施基肥，移栽6个星期后接着追肥。

杂草和作物植株在基本生长因子，如能量、营养和土壤

表69　泰国东北部乌隆地区（北纬17°23′，东经102°48′）的月平均降雨量（毫米）和潜在蒸发蒸腾量（毫米）

月份	降雨量	潜在蒸发蒸腾量
1	8	105
2	21	120
3	41	162
4	75	172
5	219	156
6	252	139
7	224	142
8	293	133
9	293	129
10	85	135
11	8	112
12	2	98

水分方面互相竞争，不利于作物生长，造成减产。在密闭的作物冠层形成之前的早期生长阶段，杂草竞争最为有害。这时，基本养分不可逆地为杂草所吸收，而作物还不能拦截足够的阳光去阻止杂草生长。这种临界期，木薯要持续到栽种后大约3个月，玉米和水稻几乎要到发育速率为0.4的发展阶段（详见6.3节）。水稻开花前持续的时间大约为85天，这一地区使用的玉米品种的持续期为75天。因此，水稻作物必须在移栽后头34天保持无杂草；玉米出苗后则要保持头30天无杂草。对水稻可施用有害生物杀伤剂以保护作物不受病虫危害。籽粒灌浆后期，水稻和玉米必须防止鸟害，赶鸟一般是孩子们的活。

最后是作物成熟时的收获。旱地作物生长季节的结束是在雨季结束后的9月末或10月初。对于生长在含水量大的粘重土壤上的围埂水稻来说，其生长季节可延期到下一个月。

假如所有的整地工作都用畜力，其他作业用劳力，那么可建立三种有关作物的活动农时。对于围埂水稻来说，整地活动只能在农田充满水之后的5月末开始。此时降雨量超过潜在蒸发量，农田有水积存。苗床准备工作在6月上旬开始。为了在播种之前整好苗床，土壤需经两次耕地、耙地、搅烂泥块和平地。秧苗生长期间，必须保证供水，如果必要的话可向床面漫水。苗床设置后，就可以开始稻田的整地工作，第一次耕地在6月下旬开始，接着在7月上旬进行第二次耕地和耙地。7月中旬进行搅烂泥块、整平和筑埂。7月下旬秧苗达到约5～6周龄，即可开始移栽。移栽时撒施肥料，并在8月上旬完成各种作业。在9月中旬水稻的最大分蘖期追肥。在10月上旬抽穗时，喷撒杀虫剂，10月下旬和11月上旬必须防止鸟害。从11月中旬以后开始收获。表70介绍的是所有上述活动及其劳动需要量，所需的劳动时间取自表61～68中。

与苗床有关的活动，包括所有必要的作业，已作出全面估计。收获工作可再分为收割、从田地运输到场院及脱粒。收获活动所需劳动以单位重量表示，因而如果知道产量，可计算出每公顷所需要的时间。表70说明是假设籽粒产量为2500公斤/公顷的情况。

练　习　79

为栽培在乌隆的玉米和木薯建立作物活动农时。整地活动用畜力进行，除特殊情况外所有其他活动都是人工劳动。

两种作物的整地要求耕两次和耙一次。只在播种和栽种时施肥。

玉米的整地工作在5月中旬开始，播种后一个月人工除

表70 泰国东北部移栽水稻的活动农时

日期	活动	劳力(小时/公顷) 田地	苗床
6月1～10日	开始苗床整地		
6月10～20日	苗床		
6月20～30日	苗床；大田第一次耕地	28	
7月1～10日	苗床；大田第二次耕地和耙地	52	80
7月10～20日	苗床；大田搅烂泥块，整平、筑埂、施灰泥	83	
7月20～31日	移栽	280	
8月1～10日	施肥	3	
8月10～20日	控制杂草	145	
8月20～31日			
9月1～10日	追肥	3	
9月10～30日			
10月1～10日	施杀虫剂	25	
10月10～20日			
10月20～31日	防鸟害	63	
11月1～10日	防鸟害	63	
11月10～20日	收割(镰刀)	238*	
	运输	105*	
	脱粒	175*	

* 估产2500公斤/公顷、整地用畜力，其他作业用手工劳动，孩子们防鸟害。

草一次。假定整个生育期为110天，籽粒产量为3000公斤/公顷。

木薯的整地工作在4月上旬开始，栽种后20天用机械除草一次，20天后人工除草一次，人工除草后30天培土一次。11月上旬开始收获木薯，估计鲜根产量15吨/公顷。

练　习　80

根据表 70 和练习 79 的资料，计算所栽种的三种作物中的每种作物每公顷所需的劳动总时数。

6.2　低投入农业

H. Schouten

6.2.1　引言

直到这篇专著的本节为止，还仅仅介绍了那样的生产情况，即在这种生产状况中，作物生长是由有限的可能处于次佳水平的因子决定的。分级模型描述了在限定条件下，各种可能产量水平的定量估算方法。在土地和劳动为主要投入的农业体系中，生产条件是很少有明确含义的。在这种低投入的体系中，由于缺乏经验，按类似的方法估计产量实际上是不可能的，因此通常必须采用另外的处理方法。

低投入农业体系的主要特征是强调一个农户利用本身的劳力，可能加上畜力的补充，来进行满足基本需要的生产，特别是粮食的生产。对一个维持生计的家庭来说，农业土地的产量必须足够高。因此，在很多低投入的农业体系中，可以搞清楚家庭大小、畜力数量、土壤肥力、产量与耕种面积的关系。本节将讨论其中的某些关系。

6.2.2　基本需要

在大多数低投入的农业体系中，一个家庭主要种植满足其基本需要的作物。目前在小社团的结构内，很难生产或积累满足如粮食、衣服、住所、供暖和社会活动所要求的所有

基本必需品。因此，维持生计的农业一般系指在粮食、燃料和住房方面自给自足，如果有可能的话，可以出售一部分收获物以购买衣物，支付教育、健康和其他一些必需品的费用。因为重点是维持生计的粮食，家庭不仅要在一般的环境条件下尽可能达到高产的目的，而且要能维持足够高的生产水平以保证粮食的需要，并要承受得起粮食降到最低程度的风险。在那种情况下，首要的问题是家庭需要多少粮食，第二个问题是如何才能生产这么多的粮食。

需要多少粮食取决于家庭的规模，家庭成员的年龄、性别和体重，以及从事哪些活动(图56)。虽然矿物质、维生素和蛋白质是必不可少的，但它们仅是组成食物总需要量的较小部分。我们假定，如果所需要的能量得到满足，那么矿物质、维生素、蛋白质和其他营养素就不会出现短缺，因此，大多数食物标准就可以能量要求为依据。为了考虑年龄和性别的差异，能量需要量通常以焦耳每千克体重表示。一个有

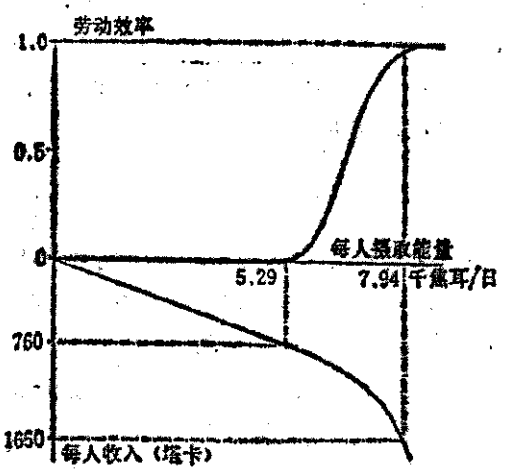


图56 收入、摄取能量和劳动效率之间的关系。根据孟加拉国家庭调查的结果估算；采用 Stolwijk 的资料(1983)

3个成年人和3个小孩的一般家庭，平均能量需要量为8.4兆焦耳/日，每年平均能量需要量为18.5×10^9焦耳。含水量0.1公斤/公斤的每公斤稻谷的能量为15.5兆焦耳。如果以它为主要食物，这一六口之家每年需要消费约1200公斤稻谷。如果允许做饭损失10%，舂米损失20%，收获和贮存损失15%，那么必须生产稻谷1950公斤。如果假定必须再超额生产30%才能满足其他基本需要和填补粮食欠收，那么每个家庭每年的总生产量将为2500公斤稻谷。这是否充足，还要看销售条件和考虑的是什么样的基本需要。

在低投入的体系中，每年生产2500公斤稻谷的指标可在不同面积的土地上实现。在肥沃的火山灰土或从每年灌水携带淤泥富含养分的冲积土上，少于1公顷的土地就可获得这么多产量。可是在多数土壤上产量相当低，因此，农民必须在多于1公顷的土地上种植才能获得这么多产量，同时还要考虑留出下年播种的种子量每公顷约60公斤。这只是2500公斤/公顷生产水平的2.4%，但已经是250公斤/公顷生产水平的24%。因此，必须在相当大面积的低产田面积上种植才能达到这个生产指标。图57给出对于2500公斤稻谷的生产指标下单产和总产之间的关系。

练　习　81

由于小麦的分蘖潜力比水稻小，因此，小麦播种量需要约150公斤/公顷。假设每个家庭每年的产量指标是2500公斤，请建立与图57相似的小麦产量关系图。

如果木薯是主要粮食，请确定至少能维持家庭生活最低需要的产量(每公斤新鲜木薯根的能量为60兆焦耳，不能食用部分为0.2公斤)。

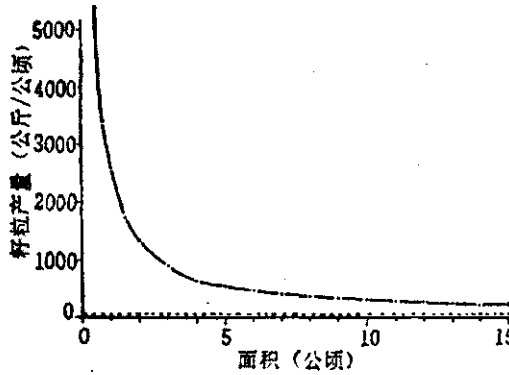


图57　从不同面积的作物地上获得2500公斤稻谷这一生产指标所要求的籽粒产量。虚线表示必须保证的播种量（60公斤/公顷）

但是，一个实行低投入农业的家庭，即使有足够的土地可耕种，也不能无限制地扩大耕地面积，因为最大耕种面积取决于劳动需要高峰时的劳力可能供给量。维持家庭生活所要求的产量水平是由可耕地的面积和总的生产指标两方面决定的。某些低投入农业体系中的实际产量值，不同于本书后面将要考虑的某些农业系统的最低产量。

6.2.3　农业体系中的产量平衡

如图58中对1880—1960年的黑麦产量所表明的那样，在一定环境的作物生产体系中，年复一年地采用同样的耕作措施，最后将达到一种平衡状态。图中的数据是从德国每年降雨量为500毫米的洪积、壤质沙土上得到的。虽然每年波动较大，但拟合曲线所表现的趋势是明显的。这种曲线可由一随时间呈指数递减的函数来描绘。但是，这样的描述方法不能解释平衡的动态特征。如果耕作措施变化了，将发生什么情况？多长时间才能达到新的平衡状态？相应的产量又将

如何？详细解释平衡的动力学性质，特别是对于低投入农业，实际上是不可能的，因为涉及的因素太多了。

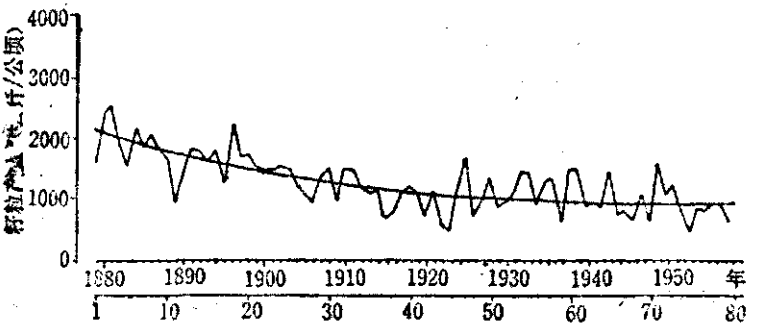


图 58　不施肥土地的黑麦产量(引自 Müller 和 Reiher，1966)

练　习　82

图 58 的连续递减曲线，可用指数函数（练习10）形式表示：$Yt=(Y_o-Ye)e^{-kt}+Y_e$

式中各个符号的意义是什么？

利用图 58 的数据粗略估算 Y_o，Y_e 和 K 值。

不过，简单的和一般的概念可帮助理解该体系的动力学特征。这些概念的最早一种是由 Wulffen(1823)提出来的。虽然他的理论已有 150 多年之久，但仍然有参考价值。当时，很少有人知道关于植物生长中包括的化学和物理过程。因此，作者认为作物产量是土壤'Reichtum'（意指：肥沃度、肥力）的函数，而土壤肥力是用与作物产量相同的单位来表示的。每公顷 20000 公斤黑麦的肥力是指在充足的营养条件下，经过一定时间，在一公顷的土地上能生产 20000 公斤黑麦。一种作物不可能在一季中吸取所有的肥分，因此，'Tätigkeit'（意

指：活性、有效系数）定义为全部肥力在一个种植循环周期中转移到作物产量上所占的比例。假设初始肥力 R_n为 10000 公斤稻谷，活性 T_c 为 0.1，产量 Y_n 指第一年可能生产了稻谷 1000公斤，则第二年的肥力 R_{n+1}为 9000 公斤稻谷，可以这样表示：

$$Yn = R_n \cdot T_c \tag{95}$$

$$R_{n+1} = R_n - R_n \cdot T_c \tag{96}$$

这些方程式在图 59 中作了图解说明。斜线 E 代表 R_n 等于 R_{n+1} 的那些点。线 T 有一个（$1-T_c$）的斜率，所以对于线上任何一点两线之间的垂直距离代表一定年份的产量。R_n 每年按（$1-T_c$）的函数关系减少，最后以指数方式衰减到零。

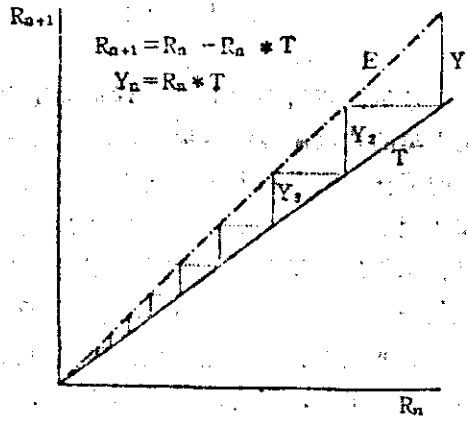


图59 在肥力不足的情况下，连续几年的"土壤肥力"(R_x)、活性(T)和产量(Y_x)之间的关系

可是在实践中，由于风化、氮素固定、施肥等原因R_n同时又在增加。结果是R_n和产量将会聚到某一非零平衡值。施肥的目的是为了增加R_n。活性 T_c 可通过各种不同栽培措施加以控制。这些栽培措施包括改善土壤通气状况、降低酸度和控制杂草、病虫害等。

在缺少化肥的情况下，von Wulffen用喂养能产生厩肥的牛的黑麦数量来表示所施用的厩肥量，并用厩肥系数（Ga-

tfung)来表征其效率。当来自田间的收获物通过人的利用和喂养牛后，得到的肥料全部归还到原来的田地时，假如不增加其他肥力，产量既不增加也不减少，这时的肥料系数等于1。除此之外，在某种情况下，肥料系数将高于1（如豆科作物），当出现损失时肥料系数低于1，一般的规律是后一种情况。当扩大到肥沃的土壤时，方程95和96变为：

$$Y_n=(R_n+I_r)\cdot T_c \tag{97}$$

$$R_{n+1}=(R_n+I_r)\cdot(1-T_c) \tag{98}$$

$$I_r=G_a\cdot G_e \tag{99}$$

这里，新引进的I_r代表增加的肥力，G_e代表厩肥或如风化之类的其他肥源的谷物当量，G_a为厩肥系数。如图60中表明的那样，产量和R_n两者接近平衡的值均大于零。两条线E′和T′是将图59原来的E和T两条线移位I_r距离而得到的。现在每年的产量等于E′和T′两线之间的垂直距离，并且每年R_n的净变化也等于E′和T′线之间的垂直距离。在低范围内，这一净变化为正值，在高范围内则为负值。在其他条件完全相同的情况下，肥力向平衡点移动，von Wulffen称之为‘连续点’（'Beharrungspunkt'），在这一点产量等于每年增加的肥力Ir。这时，产量将由施厩肥量和活性T_c及经过耕作措施后的G_a来控制。在19世纪，为了借助帐簿上记载的产量和施肥量对这一理论定量化，曾作过很多尝试。但结果都是令人失望的，其原因部分是由于不同年份的产量波动太大，如图58对黑麦所做的图解那样。

练　习　83

当活性为0.09，肥力以每年相当于每公顷1200公斤黑麦的数量增长时，在平衡点的肥力是多少？

平衡时的年产量是多少？

当活性增加到 0.16时，连续几年的产量是多少？

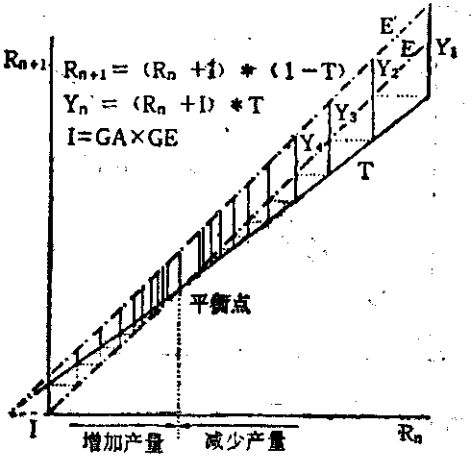


图60 连续多年的肥力(R_x)、活性(T')与对应于每年增加的肥力(I)的产量(Y_x)之间的关系

6.2.4 轮垦

虽然用数量表示轮作制是困难的，但在前一小节中介绍的理论，对理解农业制度有所帮助。本节涉及轮垦的一个例子。轮垦在广义上被定义为这样一个体系，即在一定面积的土地上和限定的时间内生产粮食，之后暂时放弃这块土地不种，并在另一块土地上耕种(Greenland,1974)。如果人口密度不限制可耕地的利用，为获得稳定的粮食供应，轮垦措施是可取的。在轮垦情况下，多年休闲期间积累的肥力被几年的作物产量耗尽。一旦产量下降到一定程度不值得再去耕种时，就要放弃这块土地。然后，它在半自然植被状况下，通过风化和氮素固定，再开始积累养分。

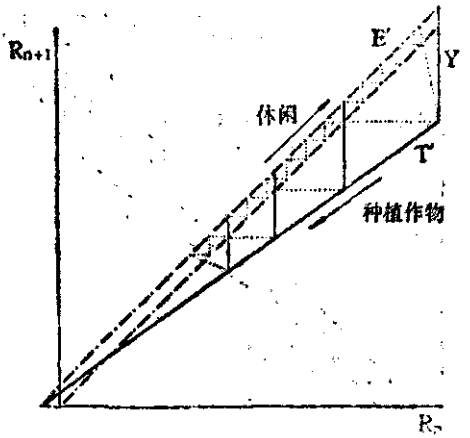


图61　根据 von Wulffens 的理论得出的在轮垦情况下，连续几年的肥力(R_x)、活性(T')和产量(Y)之间的关系

这个作用过程已在图61中以图解方式作了描述。所遵循的原理也在前一小节中进行了概述。虽然肥力每年提高较少，但在几年的恢复期间，肥力总是沿着线 E'逐年增加的。在清茬和种植后，假设所积累的肥力以 0.1的活性被利用，结果肥力沿着线T 迅速降低。大约经过四次收获后，产量就低到不值得进一步再耕种的程度。然后将土地弃置不用，循环再从头开始。图62表示的是肥力及与肥力有关的产量随时间变化的过程。在这个例子中，建立了一个具有17年周期的锯齿状图型。

如果由于增产粮食的需要，恢复期被缩短，则根据图上的曲线很容易说明将会发生什么情况。这时，开始耕作时的初始肥力将会较低，结果是产量很少或者可能没有多少收成。产量可能太低，以致证明任何耕作的努力均全然无效。原则

上，通过较好的耕作措施，提高活性，来改变肥力差的状况是可行的。然而，这是以自给农还没有提出好的耕作制度为前提的；一般来说这种假设是错误的。况且，每年的吸收增加了，会导致肥力下降更快，所以这种想法的目的也是很成问题的。

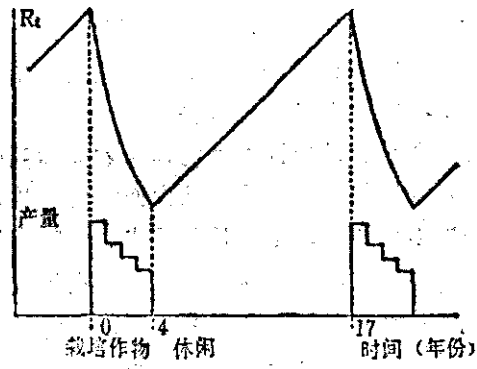


图62　在轮垦情况下，肥力降低和恢复及与其有关的作物产量随时间变化的过程

练　习　84

已知由于风化，最初产量每年增加120公斤/公顷，对以下情况计算每年的肥力水平及相应的产量。

活性	年	休闲期收获次数	活性	年	休闲期收获次数
0.08	15	4	0.08	15	3
0.16	15	4	0.16	15	3
0.08	10	4	0.08	10	3
0.16	10	4	0.16	10	3

3年或4年耕作期间的平均产量是多少？10或15年整个循环期间平均产量是多少？在什么情况下，15年恢复/3年耕作的时间表比所有其他情况优越吗？

周期长的轮垦是一种好的农业制度。可是，随着人/地比例增加，恢复时期就会缩短，以致产量最终将下降到靠每年投入的养分来支配的程度。产量经常如此之低，以致农业生产都难于维持。在这种条件下，必须采用其他措施来保持良好的肥力水平，使土地可以永久种植。

一种可能性是通过把饲养动物作为农业体系的一部分，来开发不适宜种植作物的土地。从大面积的放牧地里可收集到粪肥，并集中到作物地里。长此下去，作物产量将与所收集肥料的数量和质量成比例地增长。因为在该农业体系中氮素损失比矿物元素的损失要大得多，所以矿物元素可以在循环中保留，而可耕地的氮素却有不足的趋势。由于降雨和氮素固定，每年提供给草地的氮素大约为10公斤/公顷。即使采用适当放牧与适当处理厩肥的办法，实际上也只能为作物提供不足四分之一的氮素。例如，可以假设有80%的氮素为牧草的可食用部分吸收，80%的草被放牧吃掉，在田地里的排泄物中有20%的氮素损失，另外20%贮存在厩肥中，作物回收的只有50%或者更少。因此至少必须有4～5公顷的牧草地才能积累足够的厩肥，使耕地上的作物得到10公斤/公顷的氮素。以这种方式使氮素提高一倍，才能使籽粒产量达到1500公斤/公顷的水平(4.1节)。

6.2.5 水稻单作

19世纪中期，下缅甸的伊洛瓦底江三角洲几乎是不通畅

的。当时，这一地区没有几户农民耕种土地，而且经全家努力才能生产出自家的全部口粮(主要是水稻)。缅甸的贸易主要以水稻与欧洲交换纺织品和其他西方日用品，但输出的数量是有限的。1859年苏伊士运河通航了，缩短了通往欧洲的路程，这为种植水稻出口提供了极为有利的条件，使得很多农民在这里定居下来，开垦土地种植水稻。这里的土地很适合种水稻，因为有十分可靠的季风季节，雨量大而分布均匀，很少有因缺水而粮食歉收的危险。一年有6个月的降雨量超过潜在土壤水分蒸腾损失总量(图63)，所以，大约有3个月可用于整地和移栽，这是劳动强度最大的活计。使用小公牛、水牛干这些活儿需要约400小时/公顷(表70)，具体取决于搅烂泥块和平地的劳动强度。假如一个6口人的家庭，每家每天有3个有效劳力出勤，每月每人有25个8小时的工作日，每月就有600个有效工时。象这样一个家庭每月可耕种600～400工时或1.5公顷土地。如果根据下缅甸的实际情况，移栽期可扩大到3个月，一家就可能耕种4.5公顷土地。

根据Andrus(1948)的资料，这里有一个下缅甸基本上不雇用帮手的家庭的耕种规模。一个6口人的家庭每年需要消耗大约2000公斤稻谷(6.2.2小节)。根据Andrus的资料，一家要售出稻谷的一半左右来支付除粮食以外的其他需要。因此，稻谷的产量必须接近1000公斤/公顷。看来，在伊洛瓦底江三角洲的很多地方，不用额外投入(化肥)，就可以维持这样的生产水平。因为这个地方的大部分产品是出售的，没有一个纯属自给体系的例子。然而，这些资料还是很好地说明了农业制度是如何一方面受劳力的限制，另一方面又为土壤肥力所约束的。

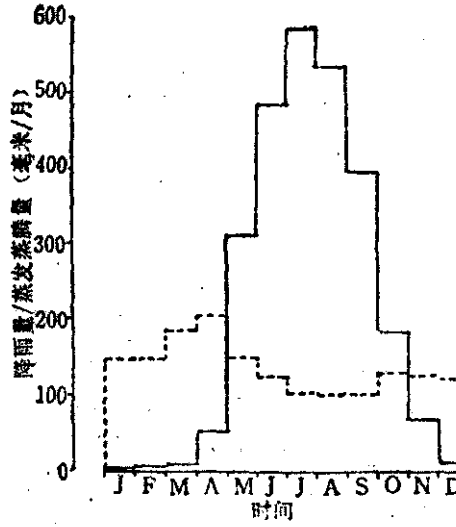


图 63　缅甸仰光的平均月降雨量和潜在蒸发蒸腾量(虚线)

在远东，由于雨季较短，且可靠性差，结果使移栽水稻的时间缩短，因此能经营的土地就少。泰国东北部可作为一例，在这一地区，只有 5 个月的降雨量超过潜在蒸发蒸腾量(图 64)，移栽时间只限于一个月。这意味着，有关移栽的一些活动(每公顷需要 400 工时)必须在一个月内完成。假如有一个 6 口人的家庭，每月能提供 600 工时的劳动量，那么最多能种 1.5 公顷水稻。对于一个 6 口之家来说，维持生计需要 2500 公斤稻谷(6.2.2 节)，这就是说，产量必须超过 1670 公斤/公顷。这与泰国东北部的实际产量 1350 公斤相比是很高的。这表明在低投入的农业条件下，农民们单靠种植水稻不能自给自足。另一方面，一年中其他时间里有较多的空闲劳力可以用来从事其他的生产活动。

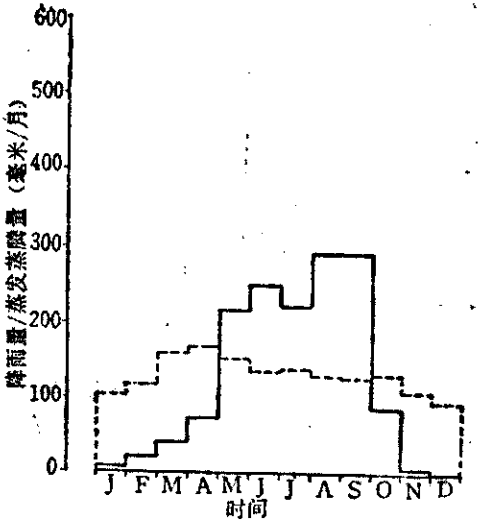


图 64　泰国东北部乌隆地区的平均月降雨量和潜在蒸发蒸腾量(虚线)

6.2.6　泰国东北部一个混作实例

前一小节说明，在泰国东北部单种水稻不能维持生活需要。在那种情况下，仅有的可能性是利用除水稻之外的有限资源，引进其他生产活动。因为低投入农业中利用的仅有的资源是土地和劳力，所以把重点放在使不同作物的资源需要量得到很好的利用上。如图 65 对泰国东北部水稻所表明的，一定地区一种作物的劳动需要情况可用一个劳力需要概图使之具体化。这个图表明，水稻栽培的面积主要受平地、搅烂泥块和移栽的劳力需要量的限制，而这些活动必须在一个月内完成。只有在同一时间内不需与之争夺劳力的其他作物才能种植。

正如图 66 所示，洋麻就是这样一种互补作物。两种作物

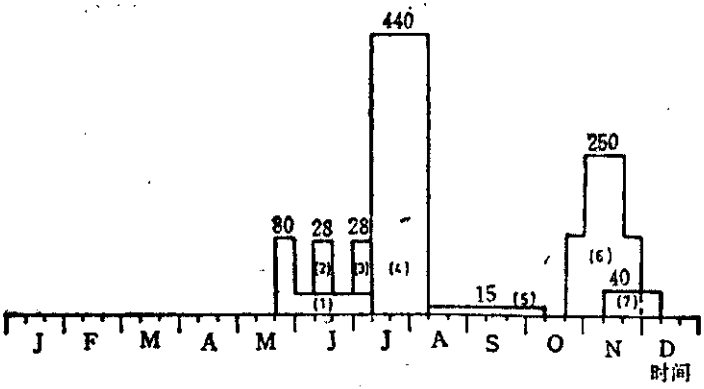


图 65　泰国东北部利用畜力种植水稻的劳力需要图：劳力需要量以每公顷的工时数表示。(1)苗床整地和保养；(2)第一次耕地；(3)第二次耕地；(4)移栽及其有关作业；(5)作物管理；(6)看鸟；(7)收获。

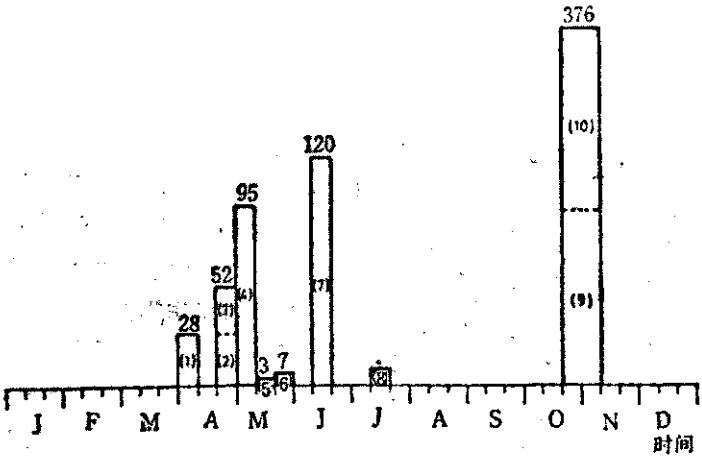


图 66　泰国东北部用畜力种植洋麻的劳力需要图；劳力需要量以每公顷的工时数表示。(1) 清茬；(2) 第一次耕地；(3) 第二次耕地；(4)耙地；(5)播种；(6)施肥；(7)收割；(1500 公斤/公顷)；(8)打捆；(9)浸泡；(10)处理沤好的洋麻

劳力需要图对比表明，任何时间都不存在同时需要劳力的情况。但是，洋麻生产严格地受沤制和有关活动要求的重体力劳动的限制，每公顷800公斤洋麻产量的沤制和打包，要求20天内完成225个工时数。因为一个6口之家在20天内能提供大约400个工时，所以最多能栽种1.8公顷洋麻。由于1公斤洋麻的价格大约等于1.5～2.5公斤稻谷的价格，所以以这种方式经营等于生产了3000公斤稻谷。这样就足以填补实际水稻产量与需要产量之间的差额。

引进其他作物可以最佳地利用劳力。根据对劳力的要

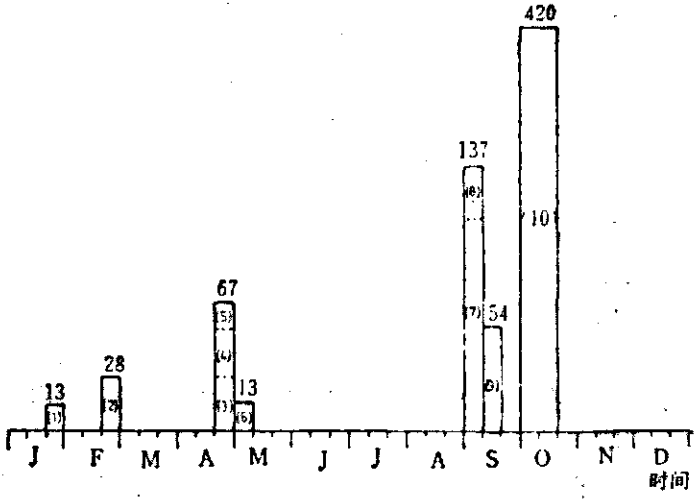


图67 泰国东北部栽培木薯的劳力需要简图，其中，用畜力进行整地、耕作和培土；所有其他活动用人工，劳动需要量以每公顷的工时数表示。(1) 第一次耕地；(2) 第二次耕地；(3) 耙地；(4) 移栽；(5)施肥；(6)中耕；(7)除草；(8)培土；(9)打尖、挖薯(12吨/公顷)；(10)运输。

求，下一个最适宜的作物是木薯。木薯只是在培土时（图67）与水稻移栽在时间上重合，但是，培土需要的劳力很少。木薯在生长循环结束时，为适应商品化生产，要求集中收获，这样运输需要相当多的劳力。如果种植的木薯是为个人消费，可在较长时间内分批收获，因此可以减少劳力需要量。一个6口人的家庭，单靠木薯生活，每年需要新鲜薯块约4700公斤，在多数情况下这个产量从1公顷土地上就可获得。从劳力需要情况来看，一家可以种植1.3公顷稻谷，1.1公顷木薯，1.8公顷洋麻。洋麻可以全部出售，稻谷和木薯除满足一家的口粮和生活需要外，可根据价格有选择地部分出售。

6.3 杂草和病虫害

F. H. Rijsdijk

6.3.1 引言

影响作物产量的各种因子，主要可划分为三组：产量决定因子，例如辐射；产量限制因子，例如水和植物营养的有效性；产量下降因子，例如杂草、病虫害。产量决定因子和产量限制因子在前面几章已经论述过了，这一节的重点将放在产量下降因子的分析上。

杂草、病虫害引起的产量下降在农业实践中是很普遍的。实际产量的减少因作物、土壤、气候、泛滥的杂草和病虫害、作物轮作、管理水平和其他很多因子的不同而异。杂草、病虫害的影响可用预先的产量估算结果乘以一个系数（1减去平均损失的比例）予以计算。这个结果仅是杂草、病虫害影响很粗略的估算，没有对不同产量水平、气候条件等加

以区分。从实验中得来的产量损失估算变化较大，如图 68 表示的是移栽淹水水稻在没有控制杂草的条件下的相对产量与其出现的频数之间的关系(van Heemst, 1979)。预期平均数 m_e 及其标准差 q_e 分别为 0.51 和 0.23。预期平均数是作物的一种属性，而高的 q_e 值表示杂草种、杂草密度的变化和作物本身的变化。由病虫害引起的损失的变化是按同样的数量级估算的。因此，用这类资料来校正作物产量的估算，得出的结果仅近似实际，并不令人满意，今后还应发展一种估算产量损失的较完善的方法。本节将提出一种使用简单说明模型以较详细的方式来估算杂草、病虫害影响的方法。在这样一些模型的基础上，就有可能研究杂草、病虫害的影响与产量水平的关系。

6.3.2 杂草模型

杂草危害作物主要是由于杂草(不需要的植物)和作物之间对光照、水和营养的竞争引起的。但是，在高投入农业体系的很多作物中，控制杂草的程度似乎与竞争危险关系不大。在那些情况下，其他方面的考虑更为重要，例如收获期间的不利影响、收获产品质量的损失，以及在作物轮作规划中将杂草抑制到低于竞争危险的必要性。这里将论述的仅是有关竞争的各个方面。

理论的某些方面

假设杂草的生理学特性和作物类似，那么杂草和作物混合生长的生长速率可描述为：

$$G_c=(L_c/U_c+L_w)\cdot G_t \text{ 和 } G_w=(L_w/(L_c+L_w)\cdot G_{H(100)}$$

$$\text{或 } G_c/G_w=L_c/L_w$$

式中：

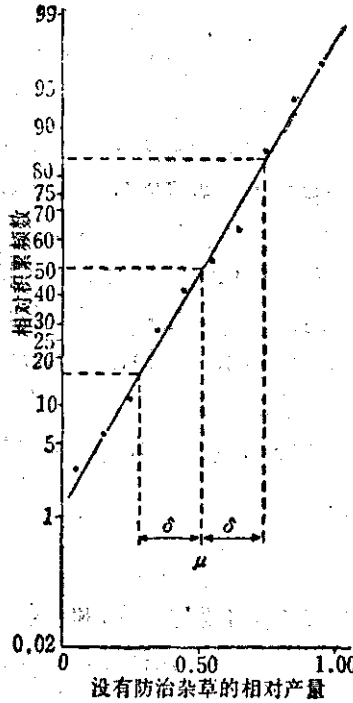


图68 在标准概率纸上绘制的没有控制杂草的移栽淹水水稻相对产量的相对累积频数图

G 为生长速率(公斤/公顷·日)

L 为叶面积指数；下标 C，W，t 分别指作物、杂草和总量。

如果作物和杂草两者生长的速率仅取决于总的叶面积指数，那么 L_c 与 L_w 的比值在整个生长周期内保持不变。假如生理学特性也完全相同，那么最后的总干物产量就应与该比值成正比地在作物与杂草之间分配。这意味着杂草对作物的危害可能直接来源于开始竞争时即出苗时的杂草与作物叶面积指数的比率。由于幼苗的生长遵循指数模型(练习 10)，所以可以描述为：

$$Y_t = Y_o \cdot e^{rt} = N_s \cdot W_o \cdot e^{rt} \qquad (101)$$

式中：

Y_o 是时间为 0 即出苗时的总干物产量(公斤/公顷)，

Y_t 是时间为 t 时的总干物质产量(公斤/公顷)，

N_s 为苗数，

W_o 为单株幼苗的平均重(公斤)，

r 为相对生长速率($日^{-1}$)。

因此，作物和杂草的相对开始生长的部位，是由竞争初期的

苗数及其重量确定的。即使在粗略假设生长特性完全相同的情况下，也可从这些论述中得出某些一般性结论。栽种和移栽的作物由于其叶子发育方面的相对优势，杂草竞争的影响要小于播种作物。由于苗重与种子重高度相关，所以，小粒种子作物，象糖用甜菜，比大粒种子作物受杂草的影响大。发芽快的品种比发芽慢的品种有利。

作物和杂草

显然，在多数情况下，作物和杂草的特性完全相同的设想是不能成立的。作物和杂草之间的主要差异是它们的最大高度和达到这个高度所需要的时间。当品种的高度不同时，即使叶面积指数几乎相同，但由于遮光的原因，高植株品种比植株较矮的品种具有优势。Spitters 和 Aerts(1983) 曾对高度不同产生的效应作过定量研究。

图69介绍的例子中杂草达到的高度为 H_w，作物高度为 H_c。假设一个品种的叶子是随高度均匀分布的，当作物或杂草达到其高度的一半 H_h 时，其生长速率与叶面积指数和辐射强度成正比。H_h 时的辐射强度是 H_h 以上的叶面积的一个函数（2.1节）。辐射的消光量可描写成：

$$I = I_0 \cdot e^{-k_e \cdot L} \qquad (102)$$

式中 k_e 为消光系数，L 为测量点以上的总叶面积指数。

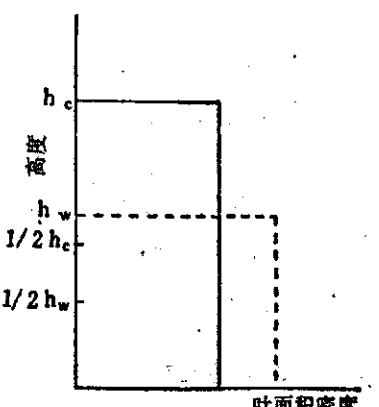


图69 不同高度的两种混种作物的叶面积密度分布的图示。h_c和 h_w 分别代表作物和杂草的高度

杂草一半高度H_{hw}以上的叶面积指数是：

$$L(H_{hw})=L_w/2+((H_c-H_w/2)/H_w)\cdot L_c \qquad (103)$$

如果H_w是H_c的两倍多，由于高度H_{hw}处没有作物的影响，所以式中最后一次可以忽略不计。在作物高度一半H_{hc}之上的叶面积指数是：

$$L(H_{hc})=L_c/2+((H_w-H_c/2)/H_w)\cdot L_w \qquad (104)$$

现在可将生长速率描写为：

$$G_c/G_w=L_c/L_w\cdot e^{(-k_e\cdot(L(H_{hc})-L(H_{hw})))} \qquad (105)$$

$$G_c+G_w=G_t \qquad (106)$$

练　习　85

当$H_w=1.2\ H_c=0.8\ L_w=L_c=1.5$，及$H_w=0.8\ H_c=1.2$两种情况下$k_e=0.65$时，利用方程105和106计算杂草和作物生长速率之比。

作物和杂草的生长速率之间的比值也因它们的高度不同而异。为了根据作物和杂草之间的总干物量的差异，来计算竞争过程的结果，描述高度的增加与时间的关系是重要的。用表71的方程可用来计算作物和杂草随时间而增加的生长量。为了简便起见，假设生长条件是不变的。计算结果列于表72a和b中。

6.3.3　除草

几乎在所有的农业体系中，用人工或除草剂除草是普遍采用的措施。由于我们主要关心的是发展中国家的作物生产，将对人工除草作详细论述。种植或条播新作物之前，土地清除杂草是苗床整地的组成部分。种植作物后的一段时间，农

表71 计算作物和杂草群体之间的竞争所需要的基本数据和方程

基本数据		
每日潜在的 CO_2 同化总量	P_{gs}	=300公斤CH_2O/公顷·日
发育阶段	DVS	=见表72
比叶面积	Cf	=20米²/公斤
干物质产量的转化效率	Eg	=0.7
相对维持呼吸作用速率	R_m	=0.015/日
对每一时间间隔按计算顺序使用的方程		
同化作用的降低系数	RA	$=f(L_t)$
叶片死亡的相对速率	d_s	=0./日
DVS>1时	d_s	=0.02/日
叶生长的干物质比例	FL	=f(DVS)
潜在总同化速率	PGASS	$=P_{gs}$·RA公斤/公顷·日
维持呼吸作用	MRES	$=TDW\cdot R_m$公斤/公顷·日
用于干物质增加的同化产物	ASAG	=PGASS—MRES公斤/公顷·日
干物质增加速率	DMI	=ASAG·Eg 公斤/公顷·日
$1/2H_c$ 以上的叶面积指数	$L(H_{hc})$	$=L_c/2+((H_w-H_c/2)/Hw)\cdot L_w$其中$H_w>H_c/2$
$1/2H_w$以上的叶面积指数	$L(H_{hw})$	$=L_w/2+((H_c-H_w/2)/H_c)-L_c$ 其中$H_c>H_w/2$
作物干物质增长速率	Gc	$=DMI\cdot Lc\cdot e^{-0.65\cdot L(H_{hc})}/(Lc\cdot e^{-0.65\cdot L(H_{hc})}+L_w\cdot e^{-0.65\cdot L(Hhc)})$公斤/公顷·日
杂草干物质增长速率	Gw	=DMI—Gc 公斤/公顷·日
作物高度	Hc	$=Hc+h_{ic}\cdot\Delta t$如果$Hc<h_{mc}$
作物叶片枯死率	$DWLV_c$	$=q\cdot WLV_c$ 公斤/公顷·日
作物叶片重	WLV_c	$=WLVc+(FL\cdot Gc-DWLVc)\times\Delta t$ 公斤/公顷
作物其他器官重	WGO_c	$=WGOc+Gc(1-FL)\times\Delta t$ 公斤/公顷
作物叶面积指数	Lc	$=WLV_c\cdot C_f\cdot 10^{-4}$
作物总干物重	TDW_w	$=WGO_c+WLVc$公斤/公顷
杂草高度	Hw	$=Hw+hl_w\cdot\Delta t$

续表

		如果Hw<hmw
杂草叶片枯死率	DWLVw	=q·WLVw 公斤/公顷·日
杂草叶片重	WLVw	=WLVw+(FL·Gw−DWLVw)×Δt 公斤/公顷
杂草其他器官重	WGOw	=WGOw+Gw(1−FL)×Δt 公斤/公顷
杂草叶面积指数	Lw	=WLVw·Cf·10⁻⁴
杂草总干物重	TDWw	=WGOw+WLVw公斤/公顷
总面积指数	Lt	=Lw+Lc

民们就要判断是否需要除草。因为作物和杂草争夺阳光，只有当叶面积指数大于1.5时才变得明显起来，所以当总叶面积指数L_t超过1.5，并且L_t中杂草的比率高于0.2，才建议进行除草。除草将除掉十分之九的杂草生物量，在此同时杂草的平均高度将降低到十分之一，表73a和73b表明运用除草措施后的竞争结果，如小麦类作物竞争能力相当高，而甜菜类作物竞争能力低得多。

练　习　86

用表73及小区试验的结果，计算连续除草对作物干物质产量的影响。

解释为什么在杂草生长期间，完全无草作物的干物量高于除几次杂草后作物的干物量。

各种作物和杂草对次最佳生长条件的反映是不同的。经过选择和培育，由群体组成的作物植株具有相同的适合人类需要的性质。杂草是人们不需要的植物，并且一个群体包括很多能填补未被作物利用的空隙(小生境)的种。对作物来说

表 72m. 小麦类作物的竞争

	作物	杂草	
初始高度	0.05	0.05	米
增加的高度	0.01	0.01	米/日
最大高度	1.0	0.80	米
最初叶片重量	50.0	50.0	公斤/公顷
最初其他器官重量	50.0	50.0	公斤/公顷

TIME	DVS	RA	FL	PGASS	MRES	ASAG	DMI	LHHC	LHHW	GC	GW	HC	DW
10	0.10	0.18	0.38	54.0	3.0	51.0	35.7	0.12	0.12	17.8	17.8	0.15	0
20	0.20	0.37	0.40	110.5	8.4	102.1	71.5	0.29	0.29	35.7	35.7	0.25	0
30	0.30	0.64	0.43	192.2	19.1	173.1	121.2	0.65	0.65	60.6	60.6	0.35	0
40	0.40	0.87	0.46	260.7	37.3	223.4	156.4	1.29	1.29	78.2	78.2	0.45	0
50	0.50	0.98	0.48	292.7	60.7	232.0	162.4	2.19	2.19	81.2	81.2	0.55	0
60	0.60	1.00	0.48	300.0	85.1	214.9	150.5	3.17	3.17	75.2	75.2	0.65	0
70	0.70	1.00	0.42	300.0	107.6	192.4	134.7	4.06	4.06	67.3	67.3	0.75	0
80	0.80	1.00	0.32	300.0	127.8	172.2	120.5	4.77	4.77	60.3	60.3	0.85	0
90	0.90	1.00	0.21	300.0	145.9	154.1	107.9	5.08	5.40	59.5	48.4	0.95	0
100	1.00	1.00	0.10	300.0	162.1	137.9	96.5	5.01	5.96	63.0	33.5	1.00	0
110	1.20	1.00	0.00	300.0	176.6	123.4	86.4	4.95	6.22	60.5	25.9	1.00	45.7
120	1.50	1.00	0.00	300.0	176.0	124.0	86.8	3.96	4.97	57.7	29.1	1.00	36.6
130	1.80	1.00	0.00	300.0	178.2	121.8	85.3	3.17	3.98	54.1	31.2	1.00	29.2
140	2.00	1.00	0.00	300.0	182.3	117.7	82.4	2.53	3.18	50.2	32.2	1.00	23.4

（续表）

TIME	WLVC	WGOC	LC	TDWC	HW	DWLVW	WLVW	WGOW	LW	TDWW	LT
10											
20	117	161	0.29	278	0.15	0	117	161	0.29	278	0.58
30	260	376	0.65	636	0.25	0	260	376	0.65	636	1.30
40	518	724	1.29	1242	0.35	0	518	724	1.29	1242	2.59
50	878	1146	2.19	2024	0.45	0	878	1146	2.19	2024	4.39
60	1267	1568	3.17	2835	0.55	0	1267	1568	3.17	2835	6.34
70	1625	1963	4.06	3588	0.65	0	1625	1963	4.06	3588	8.12
80	1907	2354	4.77	4261	0.75	0	1907	2354	4.77	4261	9.54
90	2097	2767	5.24	4864	0.80	0	2097	2767	5.24	4864	10.49
100	2222	3236	5.56	5458	0.80	0	2199	3149	5.50	5348	11.05
110	2285	3803	5.71	6088	0.80	0	2232	3451	5.58	5683	11.29
120	1828	4408	4.57	6236	0.80	44.6	1786	3710	4.46	5496	9.03
130	1462	4985	3.66	6447	0.80	35.7	1429	4001	3.57	5430	7.23
140	1170	5526	2.92	6696	0.80	28.6	1143	4313	2.86	5456	5.78
	936	6029	2.34	6965	0.80	22.9	914	4635	2.29	5549	4.63

表 72b. 糖用甜菜类作物的竞争

	作物	杂草	
初始高度	0.01	0.05	米
增加的高度	0.005	0.01	米/日
最大高度	0.3	0.8	米
最初叶片重量	5.0	50.0	公斤/公顷
最初其他器官重量	5.0	50.0	公斤/公顷

TIME	WLVC	WGOC	LC	TDWC	HW	DWLVW	WLVW	WGOW	LW	TDWW	LT	DVS
10	11	16	0.03	27	0.15	0	118	161	0.29	279	0.32	0.10
20	26	38	0.07	64	0.25	0	278	402	0.69	680	0.76	0.20
30	53	75	0.13	128	0.35	0	614	857	1.54	1471	1.67	0.30
40	91	119	0.23	210	0.45	0	1208	1554	3.02	2762	3.25	0.40
50	122	153	0.31	275	0.55	0	1957	2365	4.89	4322	5.20	0.50
60	141	173	0.35	314	0.65	0	2707	3194	6.77	5901	7.12	0.60
70	149	185	0.37	334	0.75	0	3306	4022	8.27	7328	8.64	0.70
80	153	192	0.38	345	0.80	0	3714	4902	9.28	8613	9.66	0.80
90	154	197	0.38	351	0.80	0	3953	5813	9.88	9766	10.27	0.90
100	155	201	0.39	356	0.80	0	4056	6743	10.14	10799	10.53	1.00
110	124	205	0.31	329	0.80	81.1	3246	7667	8.11	10913	8.42	1.20
120	99	211	0.25	310	0.80	64.9	2596	8581	6.49	11177	6.74	1.50
130	79	220	0.20	299	0.80	51.9	2077	9467	5.19	11544	5.39	1.80
140	63	230	0.16	293	0.80	41.5	1661	10313	4.15	11974	4.31	2.00

（续表）

TIME	RA	FL	PGASS	MRES	ASAG	DMI	LHHC	LHHW	GC	GW	HC	DW
10	0.10	0.38	29.7	1.7	28.0	19.6	0.12	0.06	1.7	17.9	0.06	0
20	0.22	0.40	67.1	4.6	62.5	43.8	0.25	0.15	3.7	40.1	0.11	0
30	0.44	0.43	133.4	11.2	122.2	85.5	0.57	0.35	6.4	79.1	0.16	0
40	0.73	0.46	220.2	24.0	196.2	137.3	1.25	0.77	8.21	29.1	0.21	0
50	0.92	0.48	276.7	44.6	232.1	162.5	2.43	1.51	6.5	156.0	0.26	0
60	1.00	0.48	300.0	69.0	231.0	161.7	3.89	2.45	3.9	157.9	0.30	0
70	1.00	0.42	300.0	93.2	206.8	144.7	5.38	3.38	2.0	142.7	0.30	0
80	1.00	0.32	300.0	114.9	185.1	129.5	6.80	4.13	1.0	128.5	0.30	0
90	1.00	0.21	300.0	134.4	165.6	115.9	7.73	4.64	0.6	115.3	0.30	0
100	1.00	0.10	300.0	151.8	148.2	103.8	8.22	4.94	0.5	103.3	0.30	0
110	1.00	0.00	300.0	167.3	132.7	92.9	8.43	5.07	0.4	92.5	0.30	3.1
120	1.00	0.00	300.0	168.6	131.4	92.0	6.75	4.06	0.6	91.4	0.30	2.5
130	1.00	0.00	300.0	172.3	127.7	89.4	5.40	3.25	0.8	88.6	0.30	2.0
140	1.00	0.00	300.0	177.6	122.4	85.7	4.32	2.60	1.1	84.6	0.30	1.6

是次最佳的生长条件，如水分的过多或短缺、营养缺乏、温度过低或过高，但却有利于那些比作物本身更适应那些条件的杂草群体中的种。所以，作为一条规律，凡是防碍作物正常发育的任何条件，不仅直接影响作物产量，而且由于杂草的影响也都会增加作物的损失。例如栽种水稻时为了抵制杂草的影响，可以进行淹水种植，由于作物不怕淹水，而杂草则不抗涝，因而可以抑制杂草的生长。但是当淹水消退后，结果会使杂草激增。

这里介绍的竞争模型仅说明了竞争的原理。如果能将足够的有关杂草生长特性的精确数据包括进来，那么这些模型与更为复杂的作物生长模型结合起来，就可以提供较多的定量资料。对这种竞争原理的解释性评价可以用 van Heemst (1985)总结的数据进行检验。表74提供的来自有关文献的事实，谈到了与整个作物生长期有关的特定时间内，不控制杂草的很多作物的相应产量，如果作物保持无杂草，即可减少损失 5%以上。

练　习　87

通过本节所提供的资料，试解释表 74 中各种作物在不控制杂草情况下的作物损失与必需的无杂草周期这两者间差异。

6.3.4　病虫害

病虫害对作物产量的影响在各种作物和不同产量水平中变化很大，不同种类病虫害的数量如此之大，以致一般的防治措施对病虫害几乎都不可能有效果。但是，在一个地方或地区内，与采用的农业措施有关的病虫害的数量有一定的限

表 73b. 一种'糖用甜菜类'作物的除草

	作物	杂草	
初始高度	0.01	0.05	米
增长高度	0.005	0.01	米/日
最大高度	0.3	0.8	米
叶片的初始重量	5.0	50.0	公斤/公顷
其他器官的初始重量	5.0	50.0	公斤/公顷

TIME	DVS	RA	FL	PGASS	MRES	ASAG	DMI	LHHC	LHHW	GC	GW	HC
10	0.10	0.10	0.38	29.7	1.7	28.0	19.6	0.12	0.06	1.7	17.9	0.06
20	0.20	0.22	0.40	67.1	4.6	62.5	43.8	0.25	0.15	3.7	40.1	0.11
30	0.30	0.44	0.43	133.4	11.2	122.2	85.5	0.57	0.35	6.4	79.1	0.16
40	0.40	0.20	0.46	60.7	4.1	56.6	39.6	0.07	0.20	19.3	20.3	0.21
50	0.50	0.44	0.48	131.1	10.1	121.0	84.7	0.26	0.44	42.9	41.8	0.26
60	0.60	0.53	0.48	159.6	12.4	147.2	103.1	0.44	0.88	95.7	7.4	0.30
70	0.70	0.82	0.42	246.6	27.9	218.7	153.1	1.00	1.68	144.9	8.2	0.30
80	0.80	0.95	0.32	284.8	50.8	234.0	163.8	1.85	2.35	155.4	8.4	0.30
90	0.90	1.00	0.21	300.0	75.4	224.6	157.2	2.55	2.35	145.8	11.4	0.30
100	1.00	1.00	0.10	300.0	99.0	201.0	140.7	3.01	1.82	122.1	18.6	0.30
110	1.20	1.00	0.00	300.0	120.1	179.9	125.9	3.22	0.96	95.0	30.9	0.30
120	1.50	1.00	0.00	300.0	131.5	168.5	118.0	2.59	0.17	86.8	31.2	0.30
130	1.80	0.96	0.00	288.1	143.2	144.9	101.4	2.08	0.14	80.2	21.2	0.30
140	2.00	0.92	0.00	276.1	153.6	122.5	85.7	1.67	0.11	71.1	14.6	0.30

（续表）

TIME	DWLVC	WLVC	WGOC	LC	TDWC	HW	DWLVW	WLVW	WGOW	LW	TDWW	LT
10	0	12	15	0.03	27	0.15	0	118	161	0.29	279	0.32
20	0	26	38	0.07	64	0.25	0	278	402	0.69	680	0.76
30	0	54	74	0.13	128	0.04	0	61	86	0.15	147	0.29
40	0	142	179	0.36	321	0.14	0	155	195	0.39	350	0.74
50	0	348	402	0.87	750	0.02	0	36	41	0.09	77	0.96
60	0	803	905	2.01	1708	0.12	0	70	80	0.18	150	2.18
70	0	1412	1745	3.53	3157	0.22	0	105	127	0.26	232	3.79
80	0	1901	2810	4.75	4711	0.32	0	131	185	0.33	316	5.08
90	0	2207	3962	5.52	6169	0.42	0	155	275	0.39	430	5.91
100	0	2330	5060	5.82	7390	0.52	0	174	443	0.43	617	6.26
110	46.6	1864	6011	4.66	7875	0.62	3.5	139	751	0.35	890	5.01
120	37.3	1491	6879	3.73	8370	0.72	2.8	111	1063	0.28	1174	4.01
130	29.8	1193	7681	2.98	8874	0.80	2.2	89	1275	0.22	1364	3.20
140	23.9	954	8392	2.39	9346	0.80	1.8	71	1422	0.18	1493	2.56

表74 多种农作物的与作物总生长期相比较的临界期限度以及与完全控制杂草的产量相比较的没有控制杂草的产量的估算值[a]

作物	相对临界期限度的估算值	没有控制杂草的相对产量的估算值
小麦	0.19	0.75
豌豆	0.21	0.70
马铃薯	0.22	0.68
高粱	0.26	0.61
白菜	0.27	0.59
玉米	0.27	0.59
大豆	0.27	0.58
甘薯	0.29	0.54
移栽水稻	0.30	0.52
甘蔗	0.33	0.47
亚麻	0.35	0.42
落花生	0.36	0.41
蚕豆	0.36	0.41
红萝卜	0.36	0.40
烟草	0.39	0.34
秋葵	0.41	0.31
甜菜	0.43	0.26
旱稻	0.44	0.25
山药	0.47	0.19
木薯	0.47	0.18
棉花	0.49	0.14
大蒜	0.50	0.12
绿豆	0.56	0.00
胡萝卜	0.56	0.00
洋葱	0.56	0.00

a. 作物所特有的其它农业操作，包括培土（马铃薯、甘蔗）、间苗（棉花、糖用甜菜）、移栽（烟草、水稻），虽然这些处理对杂草竞争有影响，但仍以没有控制杂草来确定产量。

制。由于目的不是详细叙述所有病虫害对作物可能产生的影响，因此，可以根据它们对作物的作用方式和作物对每种病

虫害的敏感程度对诱发体进行分类。采取这种方法可以简单地估价与环境条件和农业措施有关的潜在的及作物实际的损失情况。

可以根据群体发育情况和它们与作物生产力互相影响的方式对病虫害进行分类。首先可以将病虫害区分为"一次性影响"和"多次性影响"两种类型。一次性影响(单周期)病虫害的特征是在作物生长期间只有一次侵染循环。对于这组诱发体来说，预期的危害程度主要取决于它们开始对作物侵袭的程度，例如在作物发育很有限的期间内，病虫害损害的种子和秧苗。谷类作物的黑粉病和腥黑穗病以及某些只发生一代的害虫就属于这一组。多次性影响(多周期)的病虫害的特征是在生长季节出现几代的侵染循环。危害的程度不仅取决于开始侵染的程度，而且取决于诱发体对影响作物产量的生活周期重复发生的能力。由于这类病虫害的发展只少部分地取决于作物特性和作物发展过程，所以其影响可能因作物产量水平不同而有相当大的差异。属于这一组的主要病虫害有谷类作物的蚜虫、叶枯萎病、叶斑病、锈病和霉病。

病虫害的另一个分类标准是与寄主相互作用的方式。某些病虫害侵染绿色组织或整个植株，除密集的冠层外不侵袭余下的植物部位或植株。这些例子有谷类作物的叶甲虫和各种侵害整个幼苗的土壤害虫。很多其他的病虫害不但侵袭寄生组织，而且还影响没有寄生的植株部位的生理，如影响植物的光合作用和使叶片老化，例如由谷类蚜虫和很多叶子疾病引起的叶片老化。通过考虑作物生理学和同时发生的诱发体的群体生长，可以详细估价这类传染的后果。Rabbinge和Rijsdijk (1982)已举出了有关这种方法的例子。本节将重点评价不同产量水平下多次侵染的病虫害对作物产生的影响。

6.3.5 多周期性群体生长的动态

原则上，多周期性有机体的群体生长遵循一种指数模式，群体的生长速率是根据以下微分公式计算的：

$$\frac{dP}{dt}=\gamma\cdot P \qquad (107)$$

积分后，群体的时间过程可写成：

$$P_t=P_o\cdot e^{\gamma t} \qquad (108)$$

其中：

P_0是最初的群体量，

t是时间(日)，

γ是相对生长速率(日$^{-1}$)。

由于群体不能无限制地发展，因此，必须规定群体数量的最大限度或容载能力。群体的生长速率不仅在达到最大量P_m的瞬间受这一最大限度的影响，而且在此之前很久就受到这种影响。假设群体的生长速率与还没有被侵染的寄主部分成比例，那么就可以考虑这一点。这种抑制机制可以通过在真菌的情况下不发生有效的双倍侵染和昆虫群体的内部特殊抑制机制来加以解释。那么，群体的生长速率应为：

$$\frac{dY}{dt}=\gamma\cdot P\cdot(1-P/P_m) \qquad (109)$$

方程(109)积分后，就得出时间t的群体大小：

$$P_t=\frac{P_m}{1+K\cdot e^{-\gamma t}} \quad ; \quad K=\frac{P_m-P_o}{P_o} \qquad (110)$$

这样的群体生长模型称作逻辑模型。逻辑生长模型只能近似地描述昆虫和病原菌的群体生长，这是因为在实际情况下，诸如真菌的潜伏期和昆虫群体的幼虫和蛹阶段的非生殖

期推迟出现所致。这些推迟的情况在方程式中没有明确表示出来。如果引进这些延缓期就会导出性质更为复杂的数学模型。这类模型必须有有关作物、环境及病虫害方面的详细资料。不过，逻辑模型可以用来评价病虫害对生产力的影响。为了这一目的，群体的相对生长速率γ在整个生长循环中不应作为一个常数来规定，而应作为能反映作物生理和过去环境条件的作物特征(如作物发育阶段)以及寄主抵抗力的一个函数。考虑到参数值改变的影响，应当以足够小的时间间距来进行群体动态的计算。作为作物发育的函数的参数γ和P_m的值可从更加复杂的模型中取得，或从与作物特性相结合的连续记载昆虫或病害发生水平的实验中取得。

练　习　88

应用表75列出的病害读数和作物特性，计算作物发育期的γ值。计算病害读数时的群体生长速率。

病原群体发育及其对作物产量的后果的计算与作物产量本身的计算相结合，可以对小麦锈病进行说明。使用3·4节生产情况2的计算程序时，可在参数方面加以简化，以避免过多的计算。表76概括了整个计算程序。锈病的流行是通过真菌侵入叶组织而发生的。以每公顷受侵染活叶片的公斤数表示侵染水平。

在这一模型中，受侵染叶组织的数量是作为一个独立的状态变量Y_i进行计算的，这个变量的变化速率为：

$$\frac{dY_i}{dt}=\gamma\cdot Y_i\cdot(1-Y_i/Y_m)-Y_d \qquad (111)$$

其中：

Y_m是活叶组织的总重量(公斤/公顷)，

γ是作为作物发育阶段的函数的真菌群体相对生长速率(见表77)(日$^{-1}$)，

Y_d是病叶组织枯死率(公斤/公顷·日)。

表75 小麦黄锈病流行的病害读数和作物发育阶段

时间	DVS	严重程度(P_i/P_m)
40	0.1	0.00001
70	0.3	0.0002
90	0.5	0.005
110	0.8	0.08
125	1.0	0.2
135	1.3	0.5

叶片的枯死是由于衰老或病害造成的在冠层内一般分布不均匀，病叶枯死率与叶片总枯死率并不成比例。病害发展流行需要时间，只有在一定的潜伏期之后，籽实体才能引起新的侵染出现，所以冠层下部的老叶比新叶有更多的侵染机会。由于老叶首先枯死，因而可以假设，病叶是以一个高于健康叶的相对枯死率(即因子F_d)而枯死的。如果所有叶组织的总相对枯死率(3.4节)等于q_t，则病叶相对枯死率q_i的计算为：

$$q_t \cdot y_m = q_i \cdot Y_i + q_i/F_d \cdot (Y_m - Y_i) \qquad (112)$$

重新整理后得到：

$$q_i = F_d \cdot q_t \cdot Y_m/((F_d - 1) \cdot Y_i + Y_m) \qquad (113)$$

侵染叶片的枯死率等于：

$$Y_d = F_d \cdot q_t \cdot Y_m/((F_d - 1) \cdot Y_i + Y_m) \cdot Y_i \qquad (114)$$

未受侵染的叶组织的枯死可能是由于水分缺乏或开始衰老引起的。不过，病害也可以引起无侵染叶片的死亡，如被包围在受侵染叶子的范围内的健康叶组织。当侵染比较轻微

表76 作物病害结合模型的参数和方程

潜在每日总CO_2同化作用	P_{gs}=300公斤 CH_2O/公顷
作物发育阶段	DVS=f(TIME)
比叶面积	SLA=25米^2/公斤
潜在蒸发蒸腾	ETO=f(TIME)
水分供应总量	IM=f(TIME)
土壤水消耗系数	P=f(Tm)，见表20
风干土壤含水量	SM_a=0.03
田间最大持水量时的土壤含水量	SM_{fc}=0.225
萎蔫点时的土壤含水量	SM_w=0.09
潜在的扎根深度	D_{rm}=1500毫米
根生长速率	R_r=100毫米/10日
干物质产量的换算系数	E_g=0.7
疾病衰退的相对速率	Q_d=0.025
相对维持呼吸作用速率	R_m=0.015/日
病死叶与健康叶的比率	F_d=3
每一时间间距按计算顺序使用的方程	
1.同化作用的降低系数	RA_A=f(L)，见表11
2.病害严重程度的比例系数	F_s=f(PROPD)
3.叶子衰老的相对速率	DS=0.0；当DVS>1DS=0.02/
4.叶子生长的干物质比例	FL=f(DVS)，见表12
5.根生长的干物质比例	FR=f(DVS)，见表12
6.茎生长的干物质比例	FS=f(DVS)，见表12
7.籽粒生长的干物质比例	FG=f(DVS)，见表12
8.潜在总同化作用	PGASS=Pgs·RA·Δt公斤/公顷
9.土壤表面的最大蒸发量	E_m=ETO·(1−RA)毫米/10日
10.最大蒸腾量	T_m=ETO·RA毫米/10日
11.实际蒸发量	E_a=E_m·(SM_r−SM_a)/SMf_c−SM_a毫米/10日
12.临界土壤水分含量	SM_{cr}=(1−P)·(SMf_c−SM_w)+SM_w
13.实际蒸腾量	T=T_m；当SM_{cr}>SM_r T=T_m·(SM_r−SM_w)/(SM_{cr}−SM_w)
14.扎根深度	RD=RD+R_r，当RD<D_{rm}

15. 通过根生长加到根区的水分	$dM_r = W_{nr} \cdot R_r / (D_{rm} \quad RD)$ 毫米/10日
16. 土壤扎根部位水分的变化	$DM_r = IM + dM_r \quad E_a - T$ 毫米/10日
17. 根区土壤水分	$M_r = W_r + D_{wr} \cdot \Delta t$ 毫米
18. 根区土壤水分含量	$SM_r = W_r / RD$
19. 非根区水分含量	$W_{nr} = W_{nr} \quad dM_r \cdot \Delta t$ 毫米
20. 实际总同化作用	$GASS = PGASS \cdot T/T_m$ 公斤/公顷
21. 维持呼吸作用	$MRES = TDW \cdot R_m \cdot \Delta t$ 公斤/公顷
22. 同化作用增加的干物质	$ASAG = GASS - MRES$ 公斤/公顷
23. 叶片枯死的总相对速率	$Q = (D_w \cdot (1 - T/T_m) + D_s) \cdot Fs$；当 $Q < Q_d \cdot PROPDQ_m$ $= Q_d \cdot PROPD$
24. 干物质增长量	$DMI = ASAG \cdot E_g \cdot (1 \quad PROPD \cdot (1 \quad RA))$ 公斤/公顷
25. 作物叶片的枯死量	$DWLV = WLV \cdot Q \cdot \Delta t$ 公斤/公顷
26. 作物叶重	$WLV = WLV + FL \cdot DMI - DWLV$ 公斤/公顷
27. 作物叶面积指数	$L = WLV \cdot SLA \cdot 0.0001$；当 $DVS > L \geq 0.5$
28. 根重	$WRT = WRT + DMI \cdot FR$ 公斤/公顷
29. 茎重	$WST = WST + DMI \cdot FS$ 公斤/公顷
30. 籽粒重	$WGR = WGR + DMI \cdot FG$ 公斤/公顷
31. 总干重	$TDW = WLV + WGR + WST + WRT$ 公斤/公顷
32. 死叶总干重	$TDWD = TDWD + DWLV$ 公斤/公顷
33. 病叶枯死率	$Y_d = F_d \cdot Q \cdot WLV \cdot Y \cdot \Delta t / ((F_d \quad 1) \cdot Y + WLV)$
34. 病菌的相对增长速率	$r = f(DVS)$，见表77
35. 病叶重	$Y = WLV / (1 + (WLV - Y)/Y \cdot EXP(-r \cdot \Delta t))$ 当 $Y < WIV$
36. 染病严重程度	$PROPD = Y/WLV$

表77 小麦病害早期和晚期发展的参数值

时间	DVS	早期 γ(锈病)	晚期 γ(叶斑病)	Y_l/Y_m	F_{ds}
0	0.01	0.11	0.04	0.0	1.0
	0.1			0.1	1.0
	0.2			0.2	1.5
	0.3			0.3	2.0
	0.4			0.5	2.0
	0.5		0.09	1.0	1.0
	0.6				
	0.7				
	0.8				
	0.9				
100	1.0	0.13	0.15		
	1.2	0.05			
	1.5	0.0			
140	2.0	0.0	0.15		

时，可以假设叶片的相对枯死率与侵染的水平成正比。侵染增加时，在病叶包围中的仍然健康的叶组织也开始枯死。病害的严重程度与健康叶子之间的关系是寄主-病原体组合的特性。谷类锈病影响的初步估算结果列于表77中。现将 q_t 定义为：

$$q_t = (b_w \cdot (1 - T/T_m) + d_s) \cdot F_{ds} \qquad (115)$$

$$F_{ds} = f(Y_l/Y_m)$$

其中 d_w 和 d_s 分别为由于缺水和开始衰老而引起的最大相对枯死率。F_{ds} 为病害严重程度的比例系数。

最后，应将病原体本身老化的影响也考虑在内。病害由于老化，以病原体-寄主组合所特有的大体恒定的相对速率消失。对于谷物的锈病来说，其值在每天 0.05 和 0.01 之间。假设此值比 q_t 小，那么以前的定义中应考虑所有枯死的受侵

染叶组织。如果这个 q_d 值较高，就可以代替 q_t。

病害传播对作物产量的影响可按下述方法使之具体化。假设受侵染的叶组织也参与同化和呼吸作用。虽然健康叶片的维持呼吸作用可以继续，然而，同化产物对作物生长无效，而是用来供给真菌的生长和维持生活。病害引起的产量下降与病叶组织的数量成正比。正如以前讨论的那样，病害在冠层内部不是均匀分布的。这意味着在叶面积指数为 4 或更高的作物中，病害的影响是相当小的，因为在冠层顶部的健康叶片拦截了大部分的辐射，而底部的受侵染叶片同化作用很小。这一结果可用数量来表示。

首先对冠层内的病害分布进行讨论。为此目的，将作物冠层分为上、下两半，每一半具有 0.5 的 LAI。当病叶的比例接近于零时，所有的病害将集中在冠层的下半部，而上半部没有病害。当冠层内的所有叶片都被侵染，例如病叶比例等于1时，病害就均匀地分布于整个冠层。

在冠层下半部病害的比例为：

$$d_l = 1/(1+P_d) \tag{116}$$

在冠层上半部病害的比例为：

$$d_u = P_d/(1+P_d) \tag{117}$$

其中：

$$P_d = Y_l/Y_m$$

病害对作物干物质产量的影响取决于病叶拦截的辐射，如前所述，病害是不均匀地分布于整个冠层的，冠层上半部拦截的辐射比例为：

$$1-e^{-k_e \cdot LAI/2} \tag{118}$$

冠层下半部拦截辐射的比例为：

$$e^{-k_e \cdot LAI/2} - e^{-k_e \cdot LAI} \tag{119}$$

冠层上下两半部拦截总辐射的比例分别为：

$$P_u=\frac{1-e^{-k_e\cdot LAI/2}}{1-e^{-k_e\cdot LAI}} \tag{120}$$

$$P_l=\frac{e^{-k_e\cdot LAI/2}-e^{-k_e\cdot LAI}}{1-e^{-k_e\cdot LAI}} \tag{121}$$

因冠层上半部拦截辐射而增加的干物质量，经过对病害影响进行校正后现在可确定为：

$$DMI_u=ASAG\cdot E_g\cdot P_u(1-d_u\cdot 2\cdot P_d) \tag{122}$$

因冠层下半部分拦截辐射而增加的干物质为：

$$DMI_l=ASAG\cdot E_g\cdot P_l\cdot(1-d_l\cdot 2\cdot P_d) \tag{123}$$

所以

$$DMI=DMI_u+DMI_l \tag{124}$$

练　习　89

绘制一张病害对干物质产量影响的图，其中 Y_i/Y_m 值等于 0.1，0.3，0.5，0.7 和 0.9，LAI值为 1，3，5 和7。假设 K_e 值为 0.65。

由于与 3.4 节的原模型比较，这种病害只影响叶片，有时影响叶鞘，因此，须对该模型做进一步调整。不过，即使叶子全枯死了，也不影响对同化起作用的顶尖和茎。因此，开花后，叶面积指数(LAI)的最小值仍能维持在 0.5。在这些假设的基础上，就有可能计算作物产量和病害传播的结果。表 76 列出了 FORTRAN 程序中概括的计算步骤，计算结果列于表78。

这个例子中论述的病害主要是在开花前的叶子生长期间发展的。开花后，病害的发展迅速减慢下来，并在开花和成

熟中间完全停止。其他病害与叶斑病在叶形成期间发展缓慢，但随温度增加，它们继续发展，直到作物成熟。“晚期”病害的影响可用表 77 给出的真菌相对生长速率 γ 予以计算。表 79介绍了这两种病害类型的病害在最适宜的和次适宜的水分供应条件下对作物产量的影响，该表还列出了最后的籽粒产量。“早期”病害的影响之所以比较严重，主要是因为它能影响最大叶面积指数，这种影响将贯穿到整个开花后时期，而晚期病害只是加速叶片完全形成后的叶子死亡。

6.3.6 养分状况与病虫害的相互影响

当各种养分限制作物生长时，病虫害对作物产量的影响与最适宜生长情况下的影响可能是不同的。例如，N 的供应是限制因子时，产量的估算与有效 N 量相适应。但是，这没有考虑作物中 N 的动态。如果向作物供应的 N 受到限制时，N 在营养器官到籽粒中发生重新分配。这个过程能加速叶片的衰老和增加叶片的枯死，这部分地说明了在 N 素供应有限的条件下产量较低的原因，由于叶面积指数迅速减少，从而使同化作用大大降低。叶片是各种叶子病害和很多害虫赖以生存的基质，因此，它们间的相互影响是可以预见的。有限 N 素供应的影响可用相对叶片枯死率表示，而叶片枯死率能控制叶面积的持续期，即叶面积指数的累计值。表 79 概括了根据表 76 的计算程序计算所获得的结果，这些结果包括在两种病害模式和有效水分受到限制的情况下，以最大叶片枯死率 d_m 表示的非最佳 N 素供应的影响。

因此，由病虫害引起的损失比例也取决于其他生长限制因子的影响。这说明了为什么生产潜力高的作物遭受某些病虫害侵染的机会可能比生产能力低的作物多，特别是当病

表 78　利用表76的程序计算早期病害对作物生长的影响

	无病害				有病害					
TIME	WLV	LAI	WGR	TDW	WLV	LAI	WGR	TDW	Y_i	P_d
0	50	0.100	0	100	50	0.100	0	100	0.200	0.004
10	133	0.266	0	243	133	0.266	0	243	0.423	0.003
20	221	0.443	0	384	221	0.443	0	384	0.771	0.003
30	283	0.566	0	506	282	0.566	0	505	1.345	0.005
40	619	1.238	0	1155	617	1.235	0	1152	2.872	0.005
50	1099	2.198	0	2283	1095	2.190	0	2275	6.179	0.006
60	1436	2.872	0	3382	1430	2.861	0	3368	12.748	0.009
70	1830	3.662	0	5098	1823	3.646	0	5074	28.406	0.016
80	2033	4.067	0	6786	2024	4.048	0	6749	63.629	0.031
90	2127	4.255	781	8349	2116	4.233	771	8292	142.501	0.067
100	1701	3.404	2528	9671	1693	3.387	2465	9563	239.926	0.142
110	1361	2.723	4006	10808	128	2.568	3820	10508	207.340	0.161
120	1089	2.178	5194	11724	948	1.897	4854	11207	84.400	0.089
130	871	1.743	6084	12396	758	1.517	5607	11770	41.412	0.055
140	697	1.394	6680	12818	606	1.214	6104	12116	19.011	0.301

虫害主要在叶子完全形成之后发生时就更加如此。

表79 在湿润和干旱条件下，以及最适宜和次适宜氮素条件下，早期病害和晚期病害及无病害的作物籽粒产量的计算值

N供应	病害	干	湿
	早期	3435	6105
最适宜	晚期	3521	6123
	无病害	4026	6680
	早期	2204	4345
次适宜	晚期	2221	4600
	无病害	2375	4700

6.3.7 气候的影响

可以利用病虫害的相对生长速率与作物发育阶段之间的关系间接地论述气候条件对病虫害发展的影响。由于作物和病虫害对不同的气候条件不总是以同样的方式起反应的，因此这种关系只是针对特定气候条件的。由于用试验方法为每种气候类型建立作物发育阶段与诱发作用物相对生长速率之间的关系是重要的，因而分开估价不同气候条件对群体生长的影响是适宜的。这可以利用适合于各种气候条件的病虫害群体生长的更为基本的模型来实现（Rijsdijk 和 Zadoks，1979）。

6.3.8 其他影响群体生长的因素

有关对病虫害群体生长的其他影响，如冠层的氮素状态对群体生长速率的直接影响，这节就不论述了。有证据表明，至少有一些重要的依靠活组织生存的病虫害，在氮素供应最优的作物上比在N素供应次优的作物上发展得快（Rabbinge等，1981，Rijsdijk，1980；Darwinkel，1980a，1980b）。

相反，真菌子实体却能利用死叶组织而生存。但是，有关这些影响的资料应运用更复杂的模型加以评价。通过重新确定参数值，可用较简单的方法得到这类研究的结果。

6.3.9 杂草和病虫害的防治

在许多情况下防治杂草和病虫害是有效的。防治措施可分为预防措施和直接防治措施，预防措施包括种植抗性品种、利用作物轮作制，在其中的休闲和淹水时，通过减少群体生长，至少可以部分地控制诱发作用物的发展。直接防治措施主要是除草、施用除草剂和使用防治病虫害的农药。在某些情况下，可以应用尖端的生物防治技术。这些防治措施主要依靠有效的劳力资源、资金和管理。资金用来买进喷撒器械和喷撒的产品；管理系指农民尽可能有效地利用资源的能力。自给性农业与西方的高投入农业之间在防除杂草所需要的劳力方面明显不同。一种作物用人工除草所需的劳力，比用先进的喷撒器械喷除草剂所需劳力要多 50～150 倍。这种要求重劳力的情况限制了可能管理的作物面积。在农业实践中，防除杂草的热情似乎胜过防治病虫害。理由之一是控制病虫害所需的费用高，因此种植基本无草的作物是最值得的。另一个理由是人工除草实际上不需要资本。在最原始的农业体系中，甚至用手或用简单的工具就能除草，而防治病虫害需要相当贵的化学药品，并至少需要一些简单的喷洒设备。

使用化学药剂时，存在的问题是在多数情况下施用化学药剂不能完全控制诱发体。不能完全控制的原因可能是化学药剂对特定杂草和病虫害的防治效果受到限制、施用时间不当和气候条件不利等等。农民判断在最适当的时间施用恰当的化学药剂的能力取决于管理技术。在这方面，当地技术人

员、推广的有效服务和农民教育水平是很重要的。甚至在集约化管理的情况下，由于药剂只能部分地控制诱发作用物，因此防治措施也很少是完全有效的。

很显然，杂草和病虫害的预期损失不可能是估算防治措施在经济上是否吸引人的唯一标准。需要考虑与管理水平有关的防治效果方面的差异。实质问题不是由于某些杂草、病虫害引起损失的的数量，而是通过防治措施能够得到的增产量。甚至在管理水平很高的情况下，由于只能部分地控制诱发作用物，因此防治措施也很少完全有效。图70介绍了将不同管理水平加以考虑来回答这个问题的方法。该图表示在荷兰一次施用混合广谱杀真菌剂预防成熟病害对冬小麦产量的影响的频数分布。诱发作用物可能包括5种病害。不问病害症状如何一律在初花期施用杀真菌剂混合物（Rijsdijk, 1979）。以每公顷籽粒的公斤数表示的处理平均成本略高于效果的平均值，效果的中值一致偏低。显然，按平均值计算处理的成本高于收益，所以按常规施用是没有利的。对图70进行仔细的观察和分析后发现，不同年份之间和不同地块之间的发病率有很大的不同。如果利用发病率作为施用杀真菌剂的标准，则很可能在很多地块还没有进行处理的时候，为了避免在施用杀真菌剂前病害蔓延危害作物，另一些地块已在发病早期就施用了。这对提高处理成本效果有重要意义。以日期或作物的生育阶段作为固定的处理时间，以固定的混合化学试剂进行常规处理，则不要求农民有很多的管理技术。唯一的条件是，标准施用法必须付出长期的劳动。处理的平均预期收益应当明显高于处理的平均预期成本。如果管理水平较高，通过对作物进行仔细检查，对特定的杂草和病虫害施用适宜的化学药剂就可以提高化学防治的效果。

练　习　80

解释为什么在先进管理情况下，即使各年产量平均增加值低于处理的平均成本，化学药剂处理也可以得到收益。

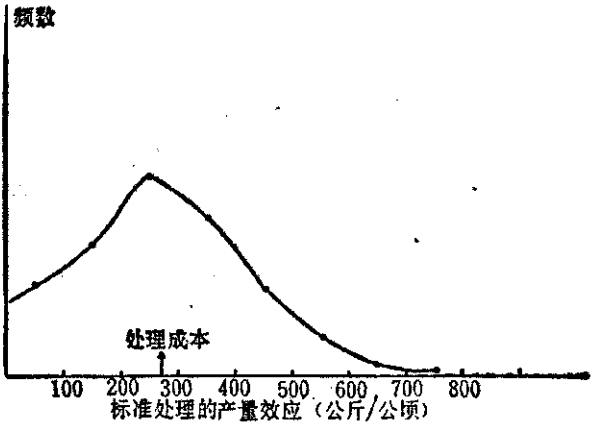


图 70　用杀虫剂作标准处理的产量效应的频数分布

在考虑生产情况对杂草、病虫害造成的损失的影响和减少这些损失的前景时，可将防治的前提概括为如下几种情况。

生产情况 1：

仅由辐射和温度决定的生产。

化学防治杂草和病虫害。由于有先进的管理，施用杀虫剂效率高。

生产情况 2：

水的供应有时受到限制。

化学防治杂草和病虫害。由于产量的'自然'变异，施用杀虫剂效率低。管理方式是先进的。

生产情况 3：

水和养分有时受到限制。

化学和人工防治杂草。病虫害防治水平低。管理水平相当低。

生产情况 4：

低投入农业。

进行一些人工除草，不防治病虫害。

但是，只有通过确定所涉及的全部参数，并采用最佳技术为每种生产情况最终找出各种投入因子的最有利的组合，才能得出各种具体情况的较为具体的结论。

（孙昭荣译　王涌清校）

第七章

土地改良

7.1 改良

J. Wolf

7.1.1 引言

农业土地的生产能力在很大程度上受土壤水分状况的控制。如果在整个作物生产循环期间，土壤含水量能保持在最适宜的范围内，生产的潜力便能发挥出来。土壤改良被看做是为延长作物生长的最佳土壤水分状况时间所需的全部作业。

改良措施主要包括挖土和运土，这些活动需要大量的劳力和机械，但是这些活动只需进行一次，或间隔很长时间进行一次。这与很多其他农业生产作业不同，其他作业在每次作物栽培中多数要重复进行（6.1 节）。在本节中，只考虑由农民及其家庭在农场进行的改良措施。象水坝、水渠等较大的建筑工程一般由政府来建造，这里不予考虑。象盐性土壤或酸性很强的土壤的改良措施这里也不考虑。

可以将改良区分为四种水平：

改良水平 I：自然状况；农业利用仅限于大范围放牧、采集食物和收集木炭；水分状况完全受气候条件支配；在这里

不讨论这个水平。

改良水平 II：进行了简单的清理；清除森林或烧掉植被，进行有休闲期或无休闲期的比较永久性的耕作，建设护田的防洪堤、围埂，以便能依靠降水栽培水稻；水分状况完全受气候条件支配；土壤含水量处在很低到很高的范围。

改良水平III：控制过多的水分；完成清理工作；整平土地或修成梯田；建立护田防洪堤，开沟排水；土壤含水量处在很低到最适宜的范围。

改良水平IV：完全控制水分；土地相当平整或修成梯田；完成了控制水分的基础结构；灌溉有充足的有效水源；自始至终保持最适宜的土壤含水量。

在以下几小节中，首先讨论改良的主要效果。然后通过讨论电子计算机模拟泰国北部壤质细砂土的某些结果，进一步说明改善水分状况的后果。最后考虑把土地从一个改良水平转变到下一个改良水平所需要的劳力投入。

7.1.2 改良的效果

改良有各种不同的实际效果。首先，改良使作物能够生长或者改善其生长条件，从而达到高产。其次，增加了可以生长的作物品种的数量，对播种时间可以进行自由选择。另外，改良可以减少施肥量。本小节将详细地讨论这些实际效果。

正如 3.2 节所讨论的那样，当土壤含水量超出最适宜的范围时，作物总的同化速率降低，现将土壤含水量对同化速率的影响概括列于表80。

除了气候条件出现异常外，土壤含水量的范围一般是：改良水平II 时从很低到很高，改良水平Ⅲ时从很低到最适宜，

改良水平IV则自始至终处于最适宜的范围。正如 3.4 节对生产情况 2 所讨论的那样，产量水平将随土壤水分处于次佳状况的时期长短和程度成比例地减少。

在 6.1 节已经说明，土地宜耕性的决定因素之一是它的含水量。根据使用的耕作器械和土壤类型，存在一个土壤水分吸力的低限，在这一低限时耕种土地不会有太多的损害。最初，把大田操作区分为三个技术水平：（1）人工劳动；（2）利用畜力牵引的器械；（3）轻、重型机械设备。假设三种水平下的土壤水分吸力的临界极限分别为10，100和500厘米。改良水平也决定着土壤中土壤水吸力的范围。对于改良水平III和IV，其值一般不低于 100 厘米，所以以技术水平 1 和

表 80　土壤含水量对总同化速率的影响

水分含量(SM)*				总同化速率的下降系数
很　低	$SM < SM_w$			0
低	$SM_w \leq SM$	$<$	SM_{cr}	$(SM-SM_w)/(SM_{cr}-SM_w)$
最适宜	$SM_{cr} \leq SM$	$<$	SM_{100}	1
高	$SM_{100} \leq SM$	$\leq$	$(SM_s-0.05)$	$((SM_s-0.05)-SM)/((SM_s-0.05)-SM_{100})$**
很高	$SM > (SM_s-0.05)$			0**

* SM_w, SM_{cr}, SM_{100}和$SM_s-0.05$分别为凋萎点、最适宜生长的临界值、100厘米土壤吸力和土壤空气含量为0.05厘米³/厘米³时的土壤含水量。对于不同土壤，上述那些含水量是不同的。

** 对于水稻来说，下降系数等于 1。

2 进行作业总是可能的。当处于自然排水情况下的改良水平II时，土壤水分吸力很低，甚至用人力也不能对土地进行耕作，当然，围埂水稻耕作例外。

作物开始生长时，土壤必须充分潮湿才能发芽，粘土的耕作作业也必须在充分潮湿的情况下才能进行。假如将早熟

作物的播种期推迟到土壤水分吸力低于300厘米，或最后20天内累积降雨量超过7.5厘米的时候，可以充分减少由于缺水引起的减产风险。在这种方式中，处于改良水平II和III情况之下的土壤，生长季节的开始时间完全由降雨模式来确定。在这种情况下，由于生长季节太短，除特殊生育期短的作物外，一般作物不能很好地生长和成熟。处在改良水平IV的情况下，由于灌溉的可能性，可使农民不受降雨量的约束。

在改良水平II的情况下，可能出现浅层地下水位。10厘米根深度范围内的地下水位将降低根的活动能力，最后由于根区内缺氧对根产生损害。如表81所表明的那样，由于各种作物扎根深度不同，因此，可能出现的最低地下水深度限制了可以生长的作物种的数目。

在降雨不稳定的气候条件下，处于改良水平II和III的土地，必须选择临界含水量低的深根作物(3·2节，表20)，因为干旱时期对这些作物的影响不大。

练 习 91

哪些作物不受低于地表1米的平均地下水深度的影响？

哪些作物最适合于在降雨不规则的气候(缺少灌溉条件)条件下栽培？

改良对植物营养有效性的影响在4.1节已作过论述。施肥和产量之间的关系可归纳为两种：吸收与产量之间的关系和施肥量与吸收之间的关系。如图71所表明的那样，两种关系均受改良的影响。

某一特定元素的吸收-产量曲线可由曲线的初始斜率和养分最佳供应时可能达到的最高产量来表征，初始斜率主要

是作物的属性，只间接受环境条件的影响，例如在改良水平II或III时，如果籽粒灌浆期间水分供应不太适宜，则可能降低籽粒/秸秆的比率。

表81 主要作物的扎根深度

作物种	根深(厘米)	作物种	根深(厘米)
甘蔗	160	木薯	100
高粱	150	豇豆	95
棉花	135	鹰嘴豆	95
玉米	135	Khesbari	95
大麦	125	辣椒	90
黑芥	125	水稻	80
黄麻	125	花生	75
小扁豆属	125	洋麻	75
油菜籽	125	绿豆	75
芝麻	125	烟草	75
小麦	125	马铃薯	50
甘薯	120	洋葱	40

练习 82

当籽秆比降低时，你认为产量与吸收的比率是增加还是降低。解释你的回答。绘制一条籽秆比下降时的吸收-产量曲线。

如果已知籽粒灌浆期间的平均次适宜土壤含水量，那么与籽粒灌浆期间水分供应最适宜的结果相比较，可以估算出最高产量和产量与吸收量之间的比率吗？你该怎样作？解释你的回答。

改良的主要目的之一是改善作物的水分供应，因为水分条件直接影响产量的提高。养分需要量随产量的增加呈直线

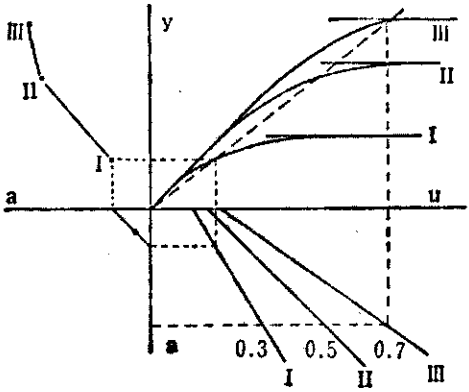


图71 各种改良水平(I、II、III)对肥料吸收(u)和产量(y)，施肥量(a)和吸收量，以及施肥和产量之间关系的影响

的增加。满足养分的需要所要求的肥料量取决于肥料的回收率和从不施肥土壤中吸收的养分量。一般来说，改良对这两种情况可以产生有利的影响，因为水分控制得好，可以促进根系的活动，有助于增加土壤有机质的矿化，减少由于淋溶以及渍水所引起的反硝化作用的损失。虽然不能作出定量的判断，但可以断定，由于改良，需肥量的增加在比例上要小于产量的增加。这类例子可在 4.1 节中找到。

本节通过将改良水平 II的作物生长情况与更高级别的改良水平的作物生长情况作对比，来论述改良措施的效果。当然这些效果多数是肯定的，不然的话，大量的劳力投入就不合算了。不过，当考虑到清理原有的植被（改良水平 I），以使土地可以耕种时，要注意到可能产生的不利效果。

按表85中推荐的土地利用方式，在坡度大于 8～15%的斜坡上(取决于土壤侵蚀性、坡长、降雨强度等)应种植多年生作物，以保持一个永久的覆盖层，例如种植木本作物、牧草或森林。否则，土壤侵蚀可使表土迅速流失，造成土壤肥力下降和结构破坏。侵蚀严重者可形成沟谷。在微碱水中沉积的冲积土壤经改良后，在沿海地区也可能出现相反的效果。

这类土壤干燥和通气后通常变得很酸，只有当地下水位能够维持在浅层时(改良水平IV)，才能在这些土壤上进行耕种，主要是栽培水稻。

部分热带雨林生长在十分贫瘠的土壤上。将原有的植被清理后，在炎热、湿润的热带气候条件下，这种土壤的有机质分解很快，使得经过长期建立起来的土壤肥力迅速损失(6.2节)，并使土壤的保水和保肥能力大大下降。清理后的短时间内，土壤的生产能力可能降低到不再值得耕作的生产水平。此外，因为土壤保水和保肥能力低，在高强度的热带降雨情况下，使养分迅速淋失，因此，在这些退化的土壤上施肥效果不佳。恢复土壤肥力和土壤结构的最好方式是采用长期的10到50年的灌木休闲。要在这些贫瘠的热带土壤上进行永久性耕作似乎是不可能的。

7.1.3 一个模拟实例

在本节中，改良水平II、III和IV间的主要区别是利用计算生产情况1和2(第9章)的产量水平的模拟模型所获得的结果来描述的。模拟是在泰国北部微起伏稍高的低洼地区进行的，土壤质地为壤质细砂土。土壤的物理性质列于表82。

这一地区的气候为明显的季风型，湿润季节从4月初开始到11月结束。这些模拟是在1974年进行的，当年4月到11月的降雨量为1440毫米，潜在土壤水分蒸发蒸腾量为950毫米。早晚两季种花生。

开始降雨的时间是如此分明，使所有三个改良水平的早季作物的出苗都出现在当年的第14个10天。在灌溉条件下，可使出苗期提前，但这样就不能进行比较。晚季作物的

表82　用于模拟作业的壤质砂土的物理性质

物理性质	模拟值
饱和导水率(k_s)	26.5厘米/日
总孔隙度(SM_s)	0.439厘米^3/厘米^3
特定质地几何系数(r)	0.0312/厘米^2
田间持水量(吸力)	ψ=200厘米(pF=2.3)
田间持水量(水分含量)	SM=0.183厘米^3/厘米^3

出苗是在11月份，即当年的第31个10天。选择生长期100天的品种，晚季作物的生长就要延期到下年的2月初，正好进入旱季。旱季作物必须在雨季中期收获。

假设在旱季作物之前的旱季期间让土地休闲，并保持无杂草，这样，由于蒸发作用上部土壤完全干燥后，土壤剖面中的水分不会因为蒸发蒸腾或排水而损失。由于土壤上部有覆盖层，土壤的含水量在雨季开始时大约等于田间持水量。

在改良水平II的情况下，由于不能控制过量的水分，早、晚两季作物出苗后，很容易出现当作物根区的空气含量连续20天以上低于0.05厘米^3/厘米^{3}时，作物就会减产的这种情况。对晚季作物来说，晚播种可以避免这种情况，但是，由于土壤上部干燥，种子萌芽可能会出现问题。另外，从土壤表面直接蒸发会失水太多。总之，在这种改良水平低的情况下，不适宜于种植花生。这种土地可种植适合于或能经受住渍水土壤条件的作物，如围埂水稻。

在改良水平III的情况下，种植旱晚两季花生，表83列出了以10天为时间间隔的各个时期的水分平衡值、土壤含水量和某些生长特性，一起列出的还有技术水平、降雨量和潜在蒸发量。表84则概括地列出了整个季节累积的各期水分平衡值以及改良水平III和IV的荚果产量。

表 83a 旱季作物花生模拟的各期水分平衡和某些模拟的生长特性。在当年第14个10天期间出苗

10天期	10	11	12	13	14	16	17	18	19	20	21	22	23
雨量(每10天期间毫米数)	0	0	20	160	48	54	66	12	6	14	136	72	38
覆盖层[a]	m	m	m										
潜在蒸发量(地表水)，(每10天期间毫米数)	60	62	60	56	54	50	48	48	48	48	50	46	44
实际蒸发蒸腾量(每10天期间毫米数)	0	0	22	22	20	36	40	40	40	40	42	30	22
排水(每10天期间毫米数)	0	0	0	120	30	20	30	0	0	10	40	120	0
pF	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.5	3.0	3.4	2.3	2.3	2.3
土壤含水量(厘米³/厘米³)	0.183	0.183	0.183	0.183	0.183	0.183	0.183	0.156	0.099	0.065	0.183	0.183	0.183
叶片鲜重(公斤/公顷)					≤100	1300	2000	2500	2700	1600	700	200	≤100
荚果重(公斤/公顷)								200	500	1000	1600	2100	2300
技术水平	3	3	3	2	2	2	2	2	3	3	2	2	3

a m表示有覆盖层

表 83b 晚季作物花生模拟的各期水分平衡和某些模拟的生长特性。在第31个10天期间出苗

10天期	27	28	29	30	31	33	34	35	36	1	2	3	4
雨量(每10天期间毫米数)	66	30	8	50	116	0	0	16	0	0	0	0	0
覆盖层													
潜在蒸发量(地表水)，(每10天期间毫米数)	42	40	40	42	36	32	30	28	32	30	32	38	38
实际蒸发蒸腾量(每10天期间毫米数)	16	16	16	16	14	16	22	22	26	22	12	4	4
排水(每10天期间毫米数)	50	10	0	30	100	0	0	0	0	0	0	0	0
pF	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.4	2.7	2.8	3.1	3.5	3.8	3.9	3.9
土壤含水量(厘米³/厘米³)	0.183	0.183	0.183	0.183	0.183	0.169	0.131	0.120	0.090	0.058	0.040	0.035	0.035
叶片鲜重(公斤/公顷)					≤100	800	1400	1900	2200	1500	600	≤100	≤100
荚果量(公斤/公顷)								200	500	900	1100	1100	1100
技术水平	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3

在改良水平 III 中，由于排水，在早季作物生长期间，除第 18 和 20 个 10 天期之间相对少雨外，土壤含水量基本保持在田间持水量的水平，即 0.183 厘米³/厘米³。在改良水平 IV，这期间给水为 90 毫米。结果使实际土壤蒸发蒸腾损失量稍微增加，但这对产量几乎没有影响。假如花生在养分最适宜的条件下生长，在两种改良水平下模拟的产量就是生产情况 1 的产量。

雨季末，在第 30 和 31 个 10 天期间，田间排出了大量水分，使改良水平 III 的作物不致因渍水而减产。降雨停止得十分突然，以致在生长季节的第 3 个10天就已经开始出现缺水的情况。到成熟时，土壤水分实际上已经消耗殆尽，并且由于生长期的大部分时间内缺水，荚果的模拟产量只有1100公斤/公顷。在改良水平 IV 中，从第 33 个 10 天就开始灌溉，并继续到下一年的第 2 个 10 天。总的供水量为 100 毫米，使产量增加一倍多。这毫不意外，因为灌溉大大地改善了晚季作物生长的水分状况。

仅在苗床整地和早季作物播种期间及晚季作物收获期间，土壤干旱，达到了需要使用与技术水平 3 有关的重型机具的程度。早季作物收获和为晚季作物播种而进行的苗床整地可以在雨季内进行，但是，这时只能使用技术水平 2 的轻型机具。因此，在这一地区的这种土壤上，完全实现机械化农业是不可能的。

练 习 93

改良水平 III 条件下的晚季作物的花生产量，与灌溉花生的产量相比严重减产(表 84)。利用表 20 和方程式 53，计算壤质细砂土(SM_2=0.439 厘米³/厘米³，γ=0.0312)，在

最大蒸腾速率为 2.5 毫米/日时的临界土壤含水量。

采用根深为 75 厘米，最大蒸腾速率为 2.5 毫米/日的数据，估算从第 35 个 10 天(雨季末)开始的同化作用不受限制的天数。

表84 全生长期的主要数据

	改良水平 III		改良水平 IV	
	早季作物	晚季作物	早季作物	晚季作物
雨量(毫米)	838	304	838	304
灌溉(毫米)	-	-	130	100
实际蒸发				
蒸腾(毫米)	378	220	404	252
排水(毫米)	460	190	560	190
增加的土壤水分(毫米)	0	-106	+4	-33
荚果产量(公斤/公顷)	2300	1100	2300	2400

练 习 94

与灌溉花生的同化速率相比，计算在改良水平 II 中第 36、第 2 和第 4 个 10 天期间总同化速率的降低量(见表80)。

练 习 95

除土壤水消耗因子 p 和根深外，利用同样数据重复练习 94，计算高粱、小麦和洋葱总同化速率的降低量。在这一期间哪种作物表现最好？

7.1.4 改良所需的劳力投入量

自然地理状况、坡度和土壤类型是决定改良所需劳动投入的类型和数量的主要因素。例如，在水平的低地上几乎不需要控制侵蚀；在高地上防洪是不必要的；斜坡的陡峭程度

表85 泰国的地理分类

土地单元	特　　点	Nr	h_r、h_b	Nt	坡度(%)	自然排水	建议的土地利用
U_1	低地，平坦	0	0.5	3	0～3	适　度	围埂水稻
U_2	抬高的低地，平坦到微起伏	3	0.5	4	0～8	适　度	围埂水稻，大田作物
U_3	高地，平坦到微起伏	3	0.5	4	0～8	好	旱稻，大田作物，木本作物
U_4	高地，微起伏到起伏	6	0.8	7	8～15	好	大田作物，木本作物，放牧
U_5	高地，起伏到陡峭	9	1.0	10	15～30	好到过度	木本作物，放牧，森林
U_6	低地，渍水	3	0.5	4	0～8	各种各样	浮水水稻，沼泽，雨森林
U_7	高地，陡峭	9	1.0	0	>30	过　度	森林，荒地

N_r：控制100×100米小区侵蚀要求的土埂数。

h_r：控制侵蚀要求的土埂高(米)。

N_t：100×100米小区要求的梯田数。

h_b：埂高，等于土埂高(米)。

决定修筑土埂和建造梯田的动土量，并且移动粘土比砂土更困难。在一项规划方案中，将泰国从平坦的低地到陡峭的高地区分为7个土地单元。表85从坡度、自然排水程度和建议的土地利用几方面描述了这些土地单元。前一小节的例子系指土地单元U_2地形为平地到起伏的抬高低地，坡度在0～8％之间，自然排水中等，土壤为壤质细砂土。

为了恰当估价改良的可能性，必须合理估算从一个改良水平提高到下一个改良水平需要的劳动量，因为用手工劳动进行改良需要的劳动量很大。由于对于大部分土壤来说，只能在生长季节进行改良工作，这时其他的农活也需要大量的劳力，因而劳力资源通常十分有限。这就是多数情况下使用重型运土机械的原因。

为了将1公顷土地单元U_2从多少还是自然状态的改良水平I提高到改良水平II，必须经过砍伐和焚烧清除植被。在这一活动中，不移动大树、树桩和白蚁土堆。完成这一活动每公顷需用人工大约300个工时，如果使用重型机械，劳动需要量可以减少到每公顷大约7个工时。也可用这种机械建造防洪墙，以防止水位抬高。用人工做这件工作每公顷需要100个工时，但用重型机械可减少到大约8个工时。由于土地微起伏，必须用等高土埂来控制侵蚀。在这种土地单元上，每100米长的田块平均有3条土埂就够了。假如每公顷有宽和高均为0.5米，长为300米的土埂，则所需的运土量为37.5米^3/公顷。如果用人工来完成这一工作，对于壤质细砂土，每公顷大约需要20个工时。

前一小节介绍的计算表明，作物可能由于渍水而减产，因此，农民很可能选择围埂的方法种水稻。在这种情况下，土埂必须建造成为大小相同的畦田。为了增加地表贮水容

量，土埂数必须多于控制侵蚀所需的数目。以平均约 6 米的距离设置土埂，每公顷需要的土埂长约为1600米。每公顷建造这些土埂的劳动需要量为 100 个工时。

假如要提供主要的人行道，可在田地里开出简单的土路。在这种改良水平下，每公顷有 50 米长，1 米宽的小路就足够了。修建这样的道路需要移动土方 10 米^3/公顷，需劳动量 5 个工时。在每公顷土地上，修道路和建造土埂总的劳动需要量大约为 100 个工时，与栽培 1 公顷的水稻需要1000个工时比较，这仍然是很小的数字。假如土地经过清理，并保证不再受涝，那么，就可以腾出时间来做这一工作。

为了使土地从改良水平 II 上升到水平 III，必须清除树桩、白蚁丘和大树，人工完成这些工作每公顷需要 600 个工时，但是，用适当的机械操作每公顷只需要约20个工时。如果在改良水平 III 时，除围埂水稻外，还扩种其他作物，那么土壤必须进行适当的排水。假如将土地修成梯田，沿斜坡每 100 米修 4 块梯田，在平均 4 %的坡度下，需要动土方 1250 米^3/公顷，移动距离平均接近17米。挖土、装土和运土平均生产率为每辆手推车每个工时 1.0米^3，因此用人工完成上述工作每公顷需要 1250 个工时。如果使用推土机，每公顷只需要 14 个工时(表 86)。另外每公顷土地必须修建 500 米长的排水沟，即沿斜坡修一条 100 米长的排水沟，沿梯田埂修 4 条 100 米长的排水沟。这需要动土方 500 米^3，如果用人工来完成需 400 个工时，用索斗铲则只需 20 个工时。在改良水平 III，为了能使用畜力牵引和机械工具，必须以 4 米宽的大路代替小土路，这需动土方 30 米^3/公顷，用人工每公顷需要 15 个工时，如果用推土机则不到 1 个工时。

因此，将 1 公顷土地从改良水平 II 上升到改良水平 III，

表86 挖土和运土的劳动生产率

		移动距离(米)									单位
		0	10	20	30	40	50	60	70	100	
推土机	粘土	100	85	71	55	46	40	34	31	23	米³/小时
推土机	砂土	140	120	100	78	65	56	48	43	32	米³/小时
人工，挖土+装土	粘土	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	米³/小时
人工，挖土+装土	砂土	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	米³/小时
人工，手推车运输	粘土	4	4	2.8	2.1	1.8	1.5	1.4	1.3		米³/小时
人工，手推车运输	砂土	4	4	2.8	2.1	1.8	1.5	1.4	1.3		米³/小时
总人工*	粘土	1.08	1.08	1.19	1.31	1.39	1.50	1.54	1.60		小时/米³
总人工*	砂土	0.68	0.68	0.79	0.91	0.99	1.10	1.14	1.20		小时/米³
总人工*	粘土	0.93	0.93	0.84	0.76	0.72	0.67	0.65	0.63		米³/小时
总人工*	砂土	1.47	1.47	1.27	1.10	1.01	0.91	0.88	0.83		米³/小时

* 计算方法，例如人工、粘土、移动距离30米，

$\frac{1}{\text{表}2}+\frac{1}{2.1}=1.31$小时/米³，所以挖土和运输的平均生产率为$1/1.31=0.76$米³/小时。

表87　在土地单元U_1上，小区为100×100米[a]，改良活动相应的运土量（米³/公顷）及所需的人工和机械劳力量（小时/公顷）

改良水平II					
围水墙[3]	土埂[4a]	清理[5] A	建路[6] A	挖制侵蚀[7]	
运土量：	200	200[8]	10	38[8]	
劳力需要量：					
人工[1]	135	135	225～430	7	25
机械[2]	8[10]	2	5～8	7	0.4
改良水平III					
清理[11] B	建路[12] B	排水沟[13]	平地	建梯田[14]	
运土量：	40	500	1250		
劳力需要量：					
人工[1]	400～800	27	500	1440	
机械[2]	10～30	0.4	20[10]	16	
改良水平IV					
灌溉渠[15]					
运土量：	500				
劳力需要量：					
人工	500				
机械	20[10]				

a　只是围埂种水稻，不控制侵蚀。

b　在这种土地单元上，主要的土壤质地是粘土。

1)假设人工建墙的劳动生产率，对于粘土是1.5米³/小时，砂土是3米³/小时，挖沟为1.0米³/小时（粘土），1.5米³/小时（砂土）。

2)假设机械的劳动生产率，对于粘土为100米³/小时，砂土为140米³/小时，用索斗铲建墙和挖沟为25米³/小时。

3)仅低洼地需要，长为200米，每米防涝墙需运土方1米³。

4)所需土埂数的计算：2×(坡度×地块长)/(埂高)(表85)

5)刀耕火种，大障碍物仍保留在田地里。

6)整平和开挖土路，宽1米，深0.2米。

7)除围埂水稻外的作物不需土埂。

8)修建土埂的动土量：$0.5\times(h_b)^2\times$地宽×需要的土埂数。

9)控制侵蚀的动土量：$0.5\times(b_f)^3\times$地宽×需要的畦埂数。

10)索斗铲。

11)移动所有的障碍物。

12)整平和修建土路，深0.2米，长50米/公顷，宽4米。

13)假设排水沟总长$100(N_t+1)$，每米沟需要挖土1米^3(表85)。

14)计算挖土深度：(坡度×地块长)/$2N_t$(表85)。

计算挖土宽度：(地块长)/$2N_t$(表85)。

修梯田的运土量：0.5×挖深×挖宽×地块宽×N_t。

修梯田挖土和运土的劳动生产率在表86中给出。计算移动距离：2/3×地块长/N_t。

15)假设灌溉渠长$100(N_t+1)$，每米渠需挖土方1米^3(表85)。

表88 在不同的土地单元上[a]，从原有的水平转化到高一级的改良水平，总的人工和机械劳动需要量(小时/公顷)

土地单元	改良水平			
	Ⅰ到Ⅱ	Ⅰ到Ⅱ(带土埂)	Ⅱ到Ⅲ[b]	Ⅲ到Ⅳ[b]
U_1人工	370～570	420～620	1600～2000	400
U_1机械	13～16	14～17	36～56	16
U_2人工	390～600	500～710	2370～2770	500
U_2机械	13～16	15～18	46～66	20
U_3人工	240～450	300～500	1680～2080	330
U_3机械	5～8	6～9	42～62	20
U_4人工	290～500	530～730	2390～2790	530
U_4机械	6～9	11～14	60～80	32
U_5人工	380～580	960～1170	3020～3420	730
U_5机械	8～11	21～24	76～96	44
U_6人工	390～600	500～710	—	—
U_6机械	13～16	15～18	—	—
U_7人工	380～580	—	—	—
U_7机械	8～11	—	—	—

— 无关的。

a 假设在低洼地(土地单元U_1、U_2、U_6)主要的土壤质地是粘土，在高地(土地单元U_3、U_4、U_5、U_7)主要质地是砂土。

b 假设机械挖掘用索斗铲完成。

如果用人工进行改良大约需要2400个工时。因为大部分的工作只能在生长季节进行，所以，很难期望在这段时间内可用人工来完成改良工作。因此，除非使用机械，农民没有选择的余地，只能在改良水平II的条件下围埂种水稻。

将处于改良水平III的梯田提高到改良水平IV，只要每公顷增加500米长的灌溉渠就够了，修灌溉渠的工作量和修排水沟的工作量相同。这与整个灌溉基础设施的成本相比是微不足道的。

本节概括地描述了全部改良活动，在土地单元U_2上进行改良时，相应的运土以及人工和机械操作的劳动需要量列于表87。由于粘土是这个土地单元（低洼地）的主要土壤质地，所以列于表87的劳动需要量仅指粘土而言。表88概括列出的是从原来的状况(改良水平I，II，III)转换到高一级改良水平的人工和机械的总劳动需要量。

练　习　96

为在土地单元U_4(砂土)上达到改良水平II，III和IV，计算各种改良活动的土方量和劳力需要量(人工和机械)。所需资料简要地列于表87和表88中。

（孙昭荣译　王涌清校）

第 八 章

农业信息的应用

8.1 世界粮食研究中心社会-经济模型中的农业信息应用

D. C. Faber

8.1.1 引言

虽然世界为全人类生产足够的粮食，而且据估计农业产量至少还能增加二十倍(Buringh 和 van Heemst，1979；见第1章)，但仍有四亿多人未达到最低营养水平，并且他们中的许多人仍在饥饿中。为了找到饥饿和贫困的根源必须对全球的农业技术和社会经济进行分析。特别是在确定资源、购买力及生产就业分布的结构时，发现这些因素会引起可利用粮食分布的不平衡性 (Linneman 等，1979)。为了改进粮食状况，应该努力缩小富裕国家与贫困国家之间以及同一国家不同收入类别之间的收入差别。用政策来影响粮食的这种分布时应从国际级开始，同时也应考虑国家之间的相互有关的政策(见第1章)。分析全球性政策的结果表明，政策只是提出了一般的解决问题的方向，而不能用定量关系来确定各种措施的作用。因此调查饥饿问题的本质和起因的出发点应该是研制和建立包括各个国家的一组模型，这些模型通过国际市场相互影响，且由国际协议把它们联系在一起。

根据农业技术因素与经济过程的关系和国家政策及国家

间的联合状况来确定粮食市场的特性时，关键在于多学科的综合研究。而这些研究应从详尽地描述和分析那些确定农业生产的实际和潜在产量的物理（自然）环境和限制作用（如本专著中所述），以及研究农业地区的社会经济结构及其与其他经济的相互关系开始。这种通用的经济模型将不能用于预报或产生预报（Meadows 等，1972），而只是用来分析将来可能的变化。尽管如此，这些关系及其相互作用的定量模型仍有助于理解造成饥饿的原因，从而能一个接一个地产生和形成有效的政策和建议。使国家一级的模型能应用于中、长期计划并包括影响国家粮食市场的各种因素是特别重要的。国际级的该模型系统应能为协调国际政策提供明确可靠的建议。在讨论物理（自然）因子和社会经济结构的重要联系之前，我们先概述完整模型的一般结构。

8.1.2 研究的特点和结构：一种模拟方法

在选择所用的方法时，所从事的研究任务是起决定性作用的。首先，必须说明世界市场是多种经济相互影响的复杂系统。第二，在国家一级，需要有描述农业和粮食区域适当内容的全面的经济模型。第三，为找出决定农业生产水平的各种物理（自然）因子和能控制效益的社会经济因子之间的复杂关系的方程，需进行深入的研究。

与上述任务相一致的，模型结构以下述 3 部分为其主要特征：

——描述国家模型间相互作用的通用结构，

——农业供给模型，

——自然的作物和家畜的生长模型。

通用结构

国际系统，或联合系统，是由许多通过世界市场联系在一起的国家模型组成的。该系统包含所有的国家，其中一些国家有确定的模型，另一些国家则结合到“世界其他”组的模型中去。这样，该系统可用来描述世界贸易。模型的联合要求一组严格的条件，并且要和以后的方程以及每个模型的发展相一致。每个国家的模型必须分为四级来分析：

——国际市场级，

——国家管理和国家市场级，

——对全体农业及非农业商品的生产者和/或消费者进行分类，

——地区级的农业信息。

这种方法所独有的特点是，它试图模拟和分析每个级以及所有级间的相互关系(图72)。

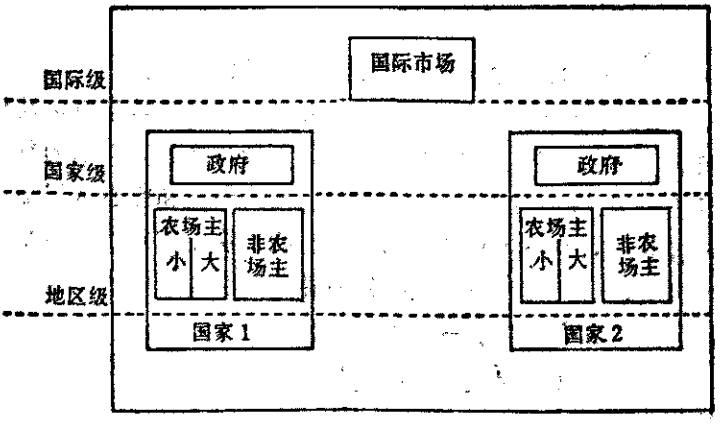


图72 国际联合系统；经济模型中的各级行为者

国家模型

在国家模型里，政府、农业人口和非农业人口的社会经济集团是主要的行为者，即政府和每个社会经济集团都是决

策制定者，并能在模型中独立起作用及相互影响。因此，国家模型必须真实地描述行为者的行为和他们对变化不定的环境状况的反应，以及行为者间的相互关系。国家模型的主要特点是：每个行为者（包括政府在内）通过投入他们的资金（资源结构），并在约束条件下管理这些资金的使用来发挥其作用。这样，政府必须应用它的工具——税收、关税、定额，公共投资——去影响其他行为者的行为来完成预定的目标，例如：增长，稳定、分配。其他行为者的生产和消费状况受其所处物理（自然）环境和经济环境的控制。

农业供给模型

在国家级模型里，农业生产模型描述和与确定农业产出有关的农民的行为。最大的收入和/或满足生存的需要是期望的目标和行为，在模型里把它们行为动力。作物生长模型的输出（指定作物的商品产量和作物残茬这两者的生产）以及为在特定类型的土地上实现这一产量所需的农业和非农业投入被转换为一个线性规划问题的输入文件。线性规划*（LP）是一种能用于农业区域（sector）的可得到最大收益的最优化技术（区域的范围要比地区（reqion）和农场规模大），这一最优化技术受到许多自然和社会经济因素的制约。LP所需的部分信息列在表89中（这些信息和本小节其他示例材料是以正在研制的适合于孟加拉国的社会经济模型中得到的），线性规划模型的输出包含生产水平，生产模式和所需投入，而生产模式由有关的价格、资源结构、农业技术的可能性及社会经济环境来决定。

农事活动——指农民所能承担的可行的事业，例如在印

* 例如可参看 R.R.Benneke 和 R.Winter(1973) 发表的关于线性规划技术的通俗说明。

度的雨季种长茎水稻是一种活动，而在冬季种另一种冬稻又是一种活动——可分为不同的类型。在传统农业中有两种密切相关的主要的农事活动即作物和畜牧生产，还可以加上农产品加工和家务活动（贸易、非农业生产、出租和租用生产资料等）。在农业区域内，不同（农业生态）地区、农场大小和采用的技术水平之间是存在差别的。如上所述，应对每个地区，每种农场规模和每种技术水平确定一组农事活动。这

表 89　在给定土壤类型上的三种不同管理方式下某一特定作物所需的农业投入和非农业投入以及作物生长模型的输出示例

1310(农事活动代号)			
地区/当地长茎水稻	/移栽		/开始，21/177(天)
	C7IWL2	C7IIWL2	C7IIIWL2
18　　3	1306	1307	1308
YLDPADDY1378	−1931.00000	−2006.00000	−5236.00000
PADSTRAW1374	−4754.00000	−4936.00000	−12678.00000
FERTEQVS1322	0.00000	16.00000	192.00000
FRTCPT011323	0.00000	1.00000	1.00000
FRTCPT021324	0.00000	0.00000	1.00000
FRTCPT031325	0.00000	0.00000	1.00000
WEEDCT011328	1.00000	1.00000	1.00000
WEEDCT031330	1.00000	1.00000	1.00000
DRAINCAP1369	0.00000	0.00000	0.00000
IRRCAPDS1371	0.00000	0.00000	0.00000
LODGPREV1372	0.00000	0.00000	1.00000
PDCTRCAP1346	0.00000	0.00000	1.00000
PRRCCT151361	1.00000	1.00000	1.00000
PRRCCT161362	1.00000	1.00000	1.00000
SGSDCAP1306	1.00000	1.00000	1.00000
HCARCT171431	1.00000	1.00000	1.00000
HCWRCT171493	1931.00000	2006.00000	5236.00000
HCSRCT171555	4754.00000	4936.00000	12678.00000

表89(续表)

1336 地区/棉花	播种/当地 $C_{16}IOL_2$ 1476	变种/开始: $C_{16}IIOL_2$ 1477	26/233(天) $C_{16}IIIOL_2$ 1478
COTTSEED1394	−770.00000	−1015.00000	−3213.00000
COTSTALK1395	−3217.00000	−4241.00000	−13419.00000
YLDCOTTN1393	−415.00000	−547.00000	−1730.00000
FERTEQVS1322	0.00000	108.00000	451.00000
FRTCPT011323	0.00000	1.00000	1.00000
FRTCPT021324	0.00000	1.00000	1.00000
FRTCPT031325	0.00000	0.00000	1.00000
WEEDCT011328	1.00000	1.00000	1.00000
WEEDCT031330	1.00000	1.00000	1.00000
WEEDCT051332	1.00000	1.00000	1.00000
DRAINCAP1369	1.00000	1.00000	1.00000
PDCTRCAP1346	0.00000	1.00000	1.00000
CTSDCAP1315	1.00000	1.00000	1.00000
THINCT021337	1.00000	1.00000	1.00000
THINCT041339	1.00000	1.00000	1.00000
HCACOT221460	1.00000	1.00000	1.00000
HCWCOT221522	415.00000	547.00000	1730.00000
HCSCOT221584	3217.00000	4241.00000	13419.00000

样，随着农业生产精耕细作的增加，农业供给模型中农事活动的数目将按指数速率增加。例如，在两种不同的农业生态地区(西北和锡尔赫特)种植两种水稻（澳大利亚高产品种和印度长茎稻撒播水稻）的农事活动，在小业主经营和大业主经营的农场中，在两种生产管理水平(无肥和每公顷施100公斤肥)下采用人工和畜力牵引技术，这时，模型里将有32个独立的农事活动(2^n, $n=5$)。然而，用常规方法通常可得到许多组合，如在自然的作物生长模型的讨论中所指出的那样。

自然的作物生长模型

在自然的作物生长模型中，环境特征（如土壤类型和气候等）可作为分步计算作物可能达到的产出的出发点（本专著的前几章已做过说明）。这一点与选择土地开发和生产技术条件的信息相结合，就能提供模型所需要的实际的和潜在的农业生产活动的基本信息。自然的作物生长模型给国家级模型提供各种输入数据，其特点已在本书的1～4章通过分级结构进行了说明。对于影响作物产品和产量的所有物理（自然）因子按重要性分级。作物生长、作物吸收养分与农民施用养分之间的关系，已在野外调查和管理那部分描述过，在这个供需模型里联系其他必需的农场投入，对其进行了说明。

由自然的作物生长模型和野外调查及管理类别所得到的对应的各种信息列在表89中。表中，第一组水稻农事活动（1310）的标题表示地区（RI）、作物和品种（一种选育的长茎水稻地方品种）和移栽作物的日期（第21天开始10天为一个周期）及生长期（177天）代码列例如C7IWL 2，表示作物种类（C 7），活动水平（I）（也就是最低生产水平），有限的供水（W）和土地单元号（L_2）。第三列C 7 IIIWL_2表示生产活动水平III，即最高的生产水平，在这种情况下产量仅受辐射和温度的限制。而第二组农事活动（1336）是最佳供水条件下对棉花得到的同样信息，最佳水分条件，在列标题中用○表示，例如C16 IOL2。三列数据分别给出特定条件下能够获得的信息，“—”号表示以每公顷为单位的产量，正号表示为达到这样的产量，每公顷所需要的投入大部分投入假定为1，它表示对于这种特殊投入，自然资源例如劳力的工时、某类设备，需要从名为OPERAT的另一数据文件中调出各种不同的技术水平的有关数据，详见6.1节的说明。

在这种特殊情况下，如果所提供的投入分别是：FER－TEQVS 0.0000 16.0000 192.000 在给定的条件下，长茎水稻每公顷的产量分别将是1931，2006和5236公斤，而水稻秸秆分别是每公顷4754，4936和12678公斤。这意味着在活动水平I不用施肥料，在活动水平II和III必须分别施16.0和192.0公斤的纯N。又如行WEEDCFOI 1.0 1.0 1.0表示这三种活动水平下都要求除草，这里系数(1.0)是转换系数，要求在1公顷长茎水稻上应有适当的除草技术。

畜牧模型

农业系统的开发，例如：南亚和东南亚的农业系统的开发，经历了相当长的环境平衡时期。在目前的状况下，这些地区受到许多不稳定因素的影响，例如：高人口增长率和经济衰退，农业供给能力低等，环境平衡正受到危及。为了纠正这种情况、推荐更好的管理方案，必须对可耕的地区的耕作状况和畜牧业的关系，及社会经济环境之间的相互关系进行分析。如果可能，应进行定量分析，对问题的分析和发挥这种农业系统的潜在能力都极为重要。

因此，畜牧模型也和可耕作农业区域密切相关，这是由于家畜给作物种植提供耕作动力和肥料，而家畜又消耗作物的产品、残茬和废物。此外，应按面积和产量来考虑牧区、森林和荒地(图73)。畜牧模拟模型本身能够说明在确定饲料的吸收量和把饲料转化成动物的生长、产品和后代时的每一个因素的作用。该模型把每种动物作为一个系统来描述，该系统把能量转化为畜力，增加的动物重量、畜牧产品(奶、羊毛、肉)、后代或热量损失。这些函数关系为了深入了解动物或牲口群的生长特征和产量提供了条件，并使我们能定量计算达到特

定生产长率所需的精饲料和粗饲料。

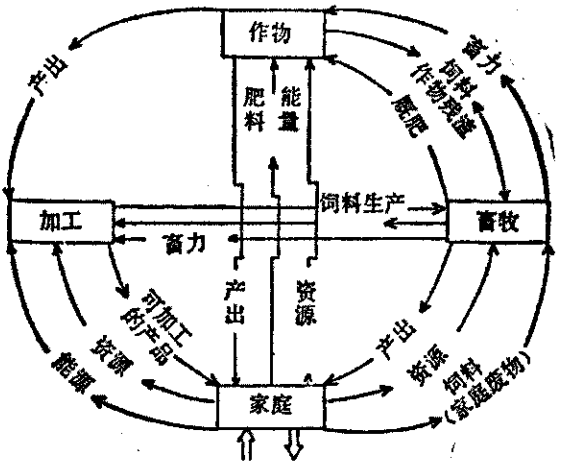


图 73　在农业区域中各部分相互作用的关系图

线性规划的供给模型所用的数据类型包括不同类别、不同年龄的家畜在维持、增长等状况下所需的饲料。例如，表 90 所表示的名为 COWYMNGA 的管理小牛的农事活动中，一只小牛，无论公的或母的，在维持和增长期内定量供给的饲料，按名为COWYOUNG的牛犊成长的饲料数量来供给，也就是一头新生小牛，在一年里将增重为55公斤的饲料量。供饲料的天数 FEEDDAYS 表示动物需要定量供给饲料的天数，而 DMINTAKE，CPINTAKE 和 MEINTAKE 分别表示每天需要的干物质(公斤/日)、能消化的蛋白质(克/日)和产生代谢的能量(MJ/日)吸收。最后，MANUREPR 表示每天产生的肥料，用干物质(公斤/日)来表示，MINANURE表示每天产生的肥料中氮含量，用(克/日)来表示。

其它的农事活动，如COWGMSGM，COWGMNGM等分别

表90 孟加拉国发展畜牧业的农事活动

410

孟加拉国家畜的饲料需要量

9	5	COWYMNGA	COWGMSGM	COWGMNGM	COWGMFGM	COWGMSGF
		450	451	452	453	454
COWYOUNG	430	1.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
COWGROWG	431	−1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000
COWADULT	432	0.00000	−1.00000	−1.00000	−1.00000	−1.00000
FEEDDAYS	500	365.00000	1870.00000	611.00000	266.00000	1661.00000
DMINTAKE	433	0.51000	3.61000	3.98000	4.74000	3.16000
GPINTAKE	434	27.60000	110.80000	151.20000	382.10000	98.10000
MEINTAKE	435	3.90000	22.63000	27.36000	40.79000	20.14000
MANUREPR	436	−0.26000	−1.99000	−1.99000	−1.90000	−1.74000
NIMANURE	437	−0.00290	−0.02190	−0.02190	−0.02090	−0.01910

确定各种正在生长的动物(年龄超过一岁)，以不同增长速度达到成熟重量时的产出和所需要的投入。COWGMSGM表示雄性动物生长慢(达到成熟重量需要1870天)的情况，而CO－WGMNGM表示雄性动物正常生长时的状况。最后两项农事活动是关于雌性动物的。它们也确定各种饲料和副产品以及废物的能量及蛋白质含量。然后，把这些数据和家畜对饲料的利用率联系在一起。在这种方式下，模型最后将会确定所需要的精饲料和粗饲料的总量，与家畜存栅数之间的平衡关系。

把作物生长模型和畜牧业模型结合而成一个综合性的分析系统，该系统按农场主的行为关系来管理，这种系统具有能建立模型的独有特性。用于田间试验时这种综合性的建模方法是有用的，特别是能定量描述各种作物生长和家畜生产中所用的不同方法，并保证能对易变的不同耕作制度进行分析。在给定的环境条件和社会经济条件下，不同耕作制度的作物生产和畜牧生产的综合研究为定量的土地资源评价提供了基础，这种评价远超出别处使用的纯农业和纯技术的评价。

8.1.3 农用能源

世界粮食中心试图用农业模型化的研究计划来描述典型的农业和粮食区域的各种相互依赖的因素所组成的复杂系统。今天，农业中的各种相关关系已逐渐被认识，重要的关系是粮食和能量之间的关系。该中心当前的研究强调，传统的能源例如厩肥、细枝、树叶和柴以及农村经济中其他可选择的能源仍起重要作用。毫无疑问，粮食与能源之间的关系对选择耕作制度和应用农业技术均极为重要，

有三种不同作用的能量：

——作为农业投入的能量，

——作为农业产出的能量，

——作为家用燃料的能量。

农业模型化系统的综合性允许把可分解的许多新技术联合在一起。例如，用模型能寻找农业中产出、收益和收益分配对能量价格的影响，或寻找提供粮食与增加农业能量的技术的关系。因此，该模型能了解"绿色"能量产出的能力，正如能量包含在木材、生物沼气和酒精里那样，也可了解当缺乏有关能量时对土地和畜牧的生产率的影响。

8.1.4 社会经济因素

把资源分配到各种不同生产活动的过程中，若要达到收益最大，社会经济因素将起重要作用。这些因素渗透到整个农业和农村的发展过程中。当估计和分析不同产出的可能性时，土地使用期和所有制模式、农场大小、家庭大小、家庭内劳力分配、习惯性的和宗教的因素、依靠农场和离开农场的雇用机会、移民和市场及信贷机关等所有社会经济因素均必须考虑。于是选择这些社会经济因素，在相当大的范围内能控制和约束实际的农业生产过程。为了给政府提供足够的知识和信息，以便为制订某些政策做出决策，根据不同情况进行这种经济分析是必要的。因此定量模型和有关方法的精确应用能做好两件事：增加对计划的了解；在现有知识基础上对决策进行合理的改进。

8.1.5 地区计划

计划具有多种形式，并为许多目的和目标服务。这是因

为国家领导人相信，如果由自由市场和私人企业的力量去做，政府的目标只有一部分能实现。因为政府要实行一个地区内或多个地区的均衡增长，故可以制定地区性计划，并根据一个特定地区具有的实际能力或社会经济发展潜力，或由于资助较少而比其他地区的发展大大落后等具体情况来制定地区性的发展计划。建立计划模型后，可通过已经过改进的现有技术或该地区尚未使用过的现有技术，或从试验站得到全新的技术，来分析有把握的发展机会，估计引进新技术后的影响，如地区的收益和雇用人员的状况。

发展计划必须要符合现实情况，而且要制订出能领导不同发展道路的各种行动过程。为了使计划成功，并使决策有效，所提供的信息必须与政策制订者的计划密切相关，还必须与政策制订者所应用的文件有关。例如，如果政府想增加粮食生产，又不能命令农民去增加农业生产（至少在市场中经济），就可通过操纵有关农业商品的价格，或者降低肥料或其他投入的价格，或在土壤改良或各种基础工作上进行投资来刺激农业生产。该模型可显示出，这些措施在达到政府目标时会有较大的作用。在其他情况下，如果政府用提高直接税来增加政府的税收，这时应该知道这种措施是否对贫困地区比对经济收益较高的地区会产生更不利的影响，换言之，在正确方向下是否会引起不对称的收益分布？这种措施是否影响农业贸易条款？总之，计划模型必须要适应决策者所要解决的各种问题。

8.1.6 国际贸易和援助

正如C.T.de Wit 在本专著的绪言中所述的那样，粮食问题不仅是一个地区或一个国家的问题，而且是与国际政治

和经济多种因素有关的问题，因为粮食短缺和饥饿不会限制在国境之内，可通过粮食援助的形式来超越国界，这样也可实现国家之间和多个国家组成的集团内具有较为相等的收益分配，[3]也可用资金流动来超越国界*。

本文给出的模型实践的重要特点之一是，所有国家的这种模型能连到一个国际联合系统中。该系统的输出能自动对贸易政策进行分析和评价。特别是它能分析国际贸易（和商品）合同的效果，及其对发展中国家的贸易和收支平衡状况的影响，更重要的是影响发展中国家内部的收益分配。

在国家级模型下，分析人员就能分析国际贸易措施的效果及发展中国家所付出的代价。因而每一个国家的模型及其政策文件应一起提供，而政策文件全由每个特定政府作主，在这种情况下国家经济模型系统具有下列优点；能分析一个国家或国家集团的经济政策对另一些国家的影响，并且也可以进行相反的分析。这样，由于负的收支平衡使资金流入发展中国家，这会增加开发资源。然后再用该模型来分析不同层次结构和资金流动对地区分配所产生的影响。在联合系统（包括它的所有卫星模型）建成的时候，系统的计算结果，可预报哪些国家会继续存在粮食不足和有多少人口仍处在饥饿及有多少人口处于营养不良中。联合模型系统优于数目较多的零散的模型方法，其优点是对任何政策的效果，包括国际协议和个别国家制订的政策均可进行分析。

---

* 一个不同的观点是粮食援助和资金交换使长期缺少粮食的国家成为等价货币的对立面，即会导致劳力的国际性迁移，直至最后实现最佳的国际劳力分配。换言之，把人口保留在援助国内，可看作偿还发展援助债务的某种方式。

8.1.7 小 结

目前的国家级模型可用来分析粮食情况，并有助于制订战胜饥饿的政策。因为国家级模型是在地方研究人员和政府研究所密切协作下建立的，因此该模型适合于移植到地方研究所。本书中所提出的方法就是可移植模型方法的一例。世界粮食中心的目标之一是，要建立完全适用于国家级政府机构的各种模型，应用所讲过的模型方法对政府提出的政策进行分析。在模型帮助下政策分析将给政府决策者提供集中力量增加粮食生产和增加收入及提高最低收入阶层的购买力等多种选择。对于任一发展中国家，这方面的信息都是极其重要的。对于国外投资者，这些信息也能给予指导作用，一旦把他们的资源更多地用于发展乡村时，特别是用来解决最低收入阶层的基本需要时，这些信息尤为重要。

（刘菊生译　胡文林校）

第 九 章

作物生产的计算机模型

9.1 作物生产的FORTRAN模型

J. Wolf, F. H. Rijsdijk和H. van Keulen

9.1.1 引言

在这本专著的前几章里描述了用台式计算机计算各种生产状况下作物产量的方法。然而，当这种方法应用在较为实际的生产状况时，由于各种各样的土壤类型、气候条件和作物品种，用台式计算机计算时所需时间是相当长的。在这种情况下能完成快速重复计算的微型计算机是不可缺少的。这一节提供一个用 FORTRAN66 语言编写的程序，该程序在大多数微机上均可应用，可完成对各种特定地区的基础数据集的计算。

本节所用术语与由 de Wit和Goudriaan(1972)及Penning de Vries 和 van Laar (1982) 所著的模拟专题丛书前几册中的术语一致。作物生产的模拟模型的程序清单详见9.1.4节。因为在这个模型里所用的缩写词与前几章里所用的缩写词并不总是一样，故在 9.1.5 小节提供了一个按字母顺序排列的缩写表。

该模型用动态方法计算作物生长和作物产出，它适用于

潜在的作物生产情况（生产情况1）和水分限制生产的情况（生产情况2），以及第三种生产情况的生产，也就是不施肥土壤．其生产状况取决于由自然资源所提供的养分。养分供应在模型里作为外生变量，可从肥料试验得到（5.3节）。另外，根据外加试验得到的肥料回收系数、计算出的可销售产品产量及作物残茬，按特有的最小养分浓度可计算出潜在的和水分限制情况下的施肥量。最后，还要根据生长状况、病虫害的影响来确定生产水平。

在9.1.2小节里，将简要叙述所给出的函数关系和模型中所用的数据。它们和前几章里的处理几乎相同，所以无需详加描述。在参考文献中有对方程或其有关细节的描述，查阅它们一定会得到更多的信息。在9.1.3小节里，给出读者使用模拟模型时如何进行修改数据文件的概况。

9.1.2 模拟模型的描述

在程序第一列里以字母C开始的行都是FORTRAN程序的注解行，在程序执行过程中它们是被忽略的。

按行说明

RANDOM程序

1～20行　这段程序用来把装有土壤特性、毛管上升和气候数据的顺序文件（表92～94），转换为随机存取文件，这时可按记录号读取所需数据。在作物生长模拟中这个程序是不用的。例如，当应用气候方面新的数据时，必须先用新数据修改顺序文件CLIMEAN·DAT。再通过运行RANDOM程序，把CLIMEAN·DAT转换为一个随机存取文件。然后才进行作物生长的计算。

RANDOMP程序

1～9行　这个程序是用来把装有作物特征数据的顺序文件(表95)转换成随机存取文件，这时可按记录号读取所需数据。它实际上和RANDOM程序的作用相同，但仅用于植物数据的转换。

WOFAUTN程序

4～32行　编译时插入名为WOFOST·CMN的基本数据公用块。

33～35行　各基础变量的维数说明。在目前的例子中数据库被限制到六种土地单元，但增加其个数是没有任何问题的。

36～43行　对这六种土地单元的每一种，说明相应的气候数据集、土壤质地类型、地面粗糙度，土地的倾角，地下水位的最小和最大深度和特殊土壤质地类型的相对面积。孟加拉国土地单元的名称列在表91中。

45～46行　对24种作物或栽培品种的转换因子进行说明，可用它们把计算出来的经济作物的干物质产量转换为商品的数量。

47行　说明每一种作物或栽培品种收获时的损失占经济作物部分的比例。

48～50行　作物被分成两类，按它们对病虫害的不同敏感度〔IDISR＝1(敏感性差)或2(敏感)〕来划分。关于产量(见132～147行)和由于病虫害带来的减产的关系按类1和类2分别在TAB 1和TAB 2数据集中说明。

51行　说明作物各部分的特性，构成可销售产品的有：1(叶)，2(茎)或3(贮藏器官)。

54～59行　打开有关特定作物生长的计算结果、土壤和作物特性、毛管上升和气候的数据输入文件，并打开将把模拟

表91 土壤质地类型，作物品种，土地单元

1.＝粗砂土	1.＝春小麦
2.＝壤质砂土	2.＝IR 8 高产水稻
3.＝细砂土	3.＝水稻BR 3 冬稻/澳大利亚
4.＝细砂壤土	4.＝水稻BR 7 澳大利亚
5.＝粉砂壤土	5.＝水稻BR 9 冬稻
6.＝壤土	6.＝水稻BR 4 t. 长茎水稻
7.＝黄土性壤土	7.＝水稻Nizersail t. 长茎水稻
8.＝砂质粘壤土	8.＝黄麻(C.capsilarius)
9.＝粉砂粘壤土	9.＝黄麻(C.olitorius)
10.＝粘壤土	10.＝花生
11.＝轻粘土	11.＝木薯
12.＝粉砂粘土	12.＝玉米
13.＝重粘土	13.＝扁豆
14.＝泥炭	14.＝鹰嘴豆
	15.＝烟草
	16.＝棉花
	17.＝甘蔗
	18.＝辣椒
	19.＝油菜籽
	20.＝大麦
	21.＝甘薯
	22.＝洋葱
	23.＝芝麻
	24.＝土豆
1.＝N. E. Barind地区	
2.＝N. Tista泛滥平原	
3.＝Gangus潮汐泛滥平原	
4.＝吉大港丘陵地区	
5.＝达卡东南	
6.＝锡尔赫特盆地	

结果写入其中的输出文件。输入文件的内容列在表92～96中，对它们的说明详见子程序PLANTR, CRDAT, CLIMIN,

SOILR。

61～69行　读有关完成计算所需的土地单元、作物品种和作物生长开始日期的说明。根据儒略历计算日期，即一标准年为365天。对一种给定的土地单元，找到对应的气候数据集，地表粗糙度、土地倾角和最小、最大地下水深度。

70～74行　对给定的一种土地单元，除非给定的土壤质地类型的相对面积等于零，要对五种土壤质地类型进行计算。如果IOPT比零大，将略去没有水分平衡的作物生长模拟。

76～84行　调用子程序，下面要进一步说明。

86～91行　说明控制输出的变量IPS，把说明天数的变量置为开始日期，并给出基本的N、P吸收系数和所施N和P肥的回收系数。

94～100行　调用子程序，这一点以后说明。首先计算没达到水分平衡的作物产量(IWB＝0；潜在生产情况)然后计算水分平衡情形下(IWB＝1)的作物产量。

102～113行　对作物生长模拟模型的输出进行说明。分别给出潜在生产(1～3)、水分限制生产(4～6)、养分限制生产(7～9)和水分加养分限制生产(10～12)四种情况下计算得到的叶、茎和贮藏器官的产量。

114～120行　对计算出的叶、茎和贮藏器官的产量（用干物质表示)。做收获损失的校正，乘上系数1.15以得到风干物质。根据可销售产品(叶、茎或贮藏器官，也就是IHP＝1，2或3)，将收获的产品转换成农业统计中常用的表示方法，因此，谷类应以风干物质来表示，糙米转换为稻谷；黄麻用纤维表示；花生、芝麻、小扁豆、油菜籽和鹰嘴豆用风干的籽粒表示；木薯用干物质表示；烟草和甘蔗分别用风干的叶和茎表示；洋葱、甘薯和土豆用新鲜的块茎表示；棉

花用棉籽加皮棉表示，而辣椒用干物质表示。这24种作物或栽培品种按顺序在表91中。

122～131行　对可销售的植物器官，按潜在生产和水分限制生产两种状况计算每单位施肥量所增加的产量。

132～147行　对于生产状况4，考虑杂草、病虫害对产量的影响。在无控制措施时水分限制生产和水分加养分限制生产的情况，可用减产因子来计算产量。这个减产因子的数值是相对产量的函数，相对产量是由产量与潜在产量相比较而得。该函数关系表明，产量水平较高时可假定有较大的减产。敏感程度不同的两组作物品种可分开考虑(48～50行)。

149～160行　把下列内容写入一特定作物的生长模拟输出文件中去：相应的土地单元，质地类型及其相对面积，作物品种，作物生长的开始日期，潜在生产和水分限制生产的总蒸腾和在作物生长周期内总的地表径流。还要进一步写入潜在生产、水分限制生产、养分限制和水分加养分限制生产及有无杂草、病虫害的影响状况下，每施单位氮肥或磷肥（仅豆类)增加的产量和叶、茎及贮藏器官的产出。

养分限制一般指氮，但对于固氮作物，例如豆科作物，养分限制指磷。在完成安排好的所有计算后关闭文件，并停止计算。

数据块

164～192行　在编译时，插入名为WOFOST·CMN的公用块。

194～200行　给出用来计算作物生长和水分平衡的各变量的具有初值或缺席值的数据块。土壤缺席值主要针对质地类型7，也就是黄壤土。对其他的质地类型，可从输入文件读出数据，并用它们替换缺席值。

202～207行　给出C_4和C_3作物品种的气温和总二氧化碳同化速率减少因子间的关系。C_3品种再细分成温带和热带品种。按生长周期为120天确定作物的养分基本吸收。对于具有更短或更长生长周期的作物，应以这一关系为基础校正其基本吸收。

函数AFGEN

209～232行　这一函数允许对一表中给定的自变量X的数值进行线性内插。这表由15个自变量数值(奇数，也就是TABLE(1)，(3)…)和15个对应的因变量数值(偶数也就是TABLE(2)，(4)…)组成，把自变量X的值与奇数值比较。当TABLE(I)的值第一次超过X的值时，该函数的斜率按最接近X的自变量的值来计算。这一斜率等于两个相邻偶数之差除以相应的两个相邻的奇数之差。对于给定的X值，从这个表中进行内插所得到的值称为AFGEN。例如，TABLE(5)是大于X的第一个值。那么，

SLOPE=(TABLE(4)－TABLE(6))/(TABLE(3)－TABLE(5))

AFGEN=TABLE(6)＋SLOPE·(X－TABLE(5))

如果自变量X大于或等于TABLE最大的自变量值或小于或等于TABLE值最小的自变量时，TABLE因变量的最大值或最小值可选。

子程序SOILR

236～264行　在编译时，插入名为WOFOST·CMN的公用块。

266～271行　从逻辑单元号为7的输入文件的记录1开始读出土壤质地类型1，从记录2读出质地类型2，等等。总计包含14个土壤质地类型(表91)的数据，列在表92中。

对每种质地类型提供的数据是：饱和导水率、吸力极限（方程31）、传导层的传导率、经验常数1和2（方程30、31）、几何因子（方程27）、土地的倾角、地面粗糙度、块/沟角、初始的地下水深度、标准吸附和总孔隙度。目前的方案中倾角与质地类型相关。然而，这种情况不总是必然的。假定最大的根深度等于150厘米。

272～275行　如果土壤质地类型的数据不能读出时，则显示这几行里定义的一个信息。

子程序PLANTR

279～307行　编译时，插入名为WOFOST·CMN的公用块。

310～328行　从逻辑单元号为8的输入文件的记录1开始读出作物1的数据，从记录25读作物2，从记录49读作物3，等等。共包括24种作物或栽培品种（表91）的数据列在表95和96中。对于每一作物，提供下面的数据：

——作物名称。

——作物类型（1＝C_4作物；2＝C_3作物，适合于温带；3＝C_3作物，适合于（亚）热带；4＝豆科作物）；有无空气导管（1或0）；温度每增加10°C维持呼吸速率的增加值；总辐射消光系数；把同化产物转化为叶、贮藏器官、根和茎的结构干物质时各自的效率；叶子的生存寿命；叶子的相对维持呼吸速率。

——贮藏器官、根和茎各自的相对维持呼吸速率，根的伸长速率，由于水分胁迫引起的叶子的相对死亡率；由于根和茎的老化引起各自的相对死亡率，比荚面积；比茎面积；在贮藏器官里最小的氮浓度。

——依赖或不依赖昼长的发育速率；初始的根深；最初

表 92　順序文件 SOIL DATA · DAT

1120.		80.		119.23		0.08		.224		.1000		1.5	10.	30.	200.
	50.16		.395		30.		.25		3.		.1				
26.5		200.		17.80		16.4		.0398		.0330		1.5	10.	30.	200.
	19.20		.439		30.		.25		3.		.1				
50.0		175.		30.33		10.9		.050		.0288		1.5	10.	30.	200.
	21.44		.364		30.		.25		3.		.1				
12.0		300.		9.36		26.5		.0248		.0207		1.5	10.	30.	200.
	17.57		.504		30.		.25		3.		.1				
6.5		300.		5.32		47.3		.020		.0185		1.5	10.	30.	200.
	14.46		.509		30.		.25		3.		.1				
5.0		300.		3.97		14.4		.0231		.0180		1.5	10.	30.	200.
	11.73		.503		30.		.25		3.		.1				
14.5		130.		8.88		22.6		.049		.0169		1.5	10.	30.	200.
	13.05		.455		30.		.25		3.		.1				
23.5		200.		16.51		33.6		.0353		.0096		1.5	10.	30.	200.
	19.05		.432		30.		.25		3.		.1				
1.5		300.		1.18		36.0		.0237		.0105		1.5	10.	30.	200.
	6.15		.475		30.		.25		3.		.1				
0.98		300.		0.76		1.69		.0248		.0058		1.5	10.	30.	200.
	4.70		.445		30.		.25		3.		.1				
3.5		300.		2.66		2.77		.0274		.0085		1.5	10.	30.	200.
	10.74		.453		30.		.25		3.		.1				
1.3		50.		0.80		28.2		.048		.0065		1.5	10.	30.	200.
	3.98		.307		30.		.25		3.		.1				
0.22		80.		0.15		4.86		.038		.0042		1.5	10.	30.	200.
	1.93		.540		30.		.25		3.		.1				
5.3		50.		1.86		6.82		.1045		.0112		1.5	10.	30.	200.
	7.44		.863		30.		.25		3.		.1				

的总干重(活体)；花期前的最大发育速率；最大发育和零发育对应的临界昼长；花期后的最大发育速率；作物残茬里最小的氮素浓度；贮藏器官和作物残茬里各自的磷素的最小浓度。

——同化产物分配到根、叶、茎和贮藏器官的因子表和比叶面积表，它们都是发育阶段的函数。

——相对发育速率表，是温度的函数。

——土壤水分消耗系数表，是潜在蒸腾的函数。

329～332行　如果一组作物数据不能读出时，就会显示这些行里定义的信息。

子程序CRDAT

336～364行　编译时，插入名为WOFOST·CMN的公用块。

366～371行　从逻辑单元号为9的输出文件中的记录1开始读出质地类型1，从记录11开始读质地类型2，等等。总计给出14个质地类型的数据。这些数据来自Rijtema(1969)，并把毛管上升速率(8个数值)及根层的土壤吸力(10个数值)与根层同地下水位间的距离〔RIJTEM(10,8)〕联系起来。以从表21到34得到的输入文件为例，数据列在表93里。在子程序RIJTEMA里用这些数据计算毛管上升速率。

372～375行　如果数据不能读出，则显示这些行里定义的信息。

子程序CLIMIN

379～407行　编译时，插入名为WOFOST·CMN的公用块。

410～432行　从逻辑单元号为10的输入文件的记录1开始读气候数据集1，从记录14开始读气候数据集2，等等。

表93 顺序文件 RIJTEMA·DAT的一部分包含4个土壤质地类型的数据

20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
43.3	44.1	45.0	46.1	46.8	47.6	48.4	49.4
44.4	45.4	46.7	48.5	49.8	51.6	53.9	58.8
44.5	45.5	46.7	48.6	49.9	51.7	54.0	59.2
44.5	45.5	46.8	48.6	49.9	51.8	54.1	59.5
44.5	45.5	46.8	48.6	49.9	51.8	54.2	59.7
44.5	45.5	46.8	48.6	49.9	51.8	54.2	59.8
44.5	45.5	46.8	48.6	50.0	51.8	54.3	59.9
44.5	45.5	46.8	48.6	50.0	51.9	54.3	60.0
44.5	45.5	46.8	48.6	50.0	51.9	54.3	60.0
3.7	4.3	5.0	6.0	6.6	7.5	8.3	9.4
11.6	13.6	16.5	20.9	24.2	28.9	34.4	43.1
13.9	16.4	20.1	26.2	31.0	38.3	48.1	68.8
14.5	17.2	21.1	27.6	32.2	41.1	52.7	81.5
14.7	17.5	21.5	28.2	33.7	42.4	54.8	87.6
14.9	17.7	21.8	28.7	34.3	43.3	56.4	92.3
15.1	17.9	22.1	29.1	34.9	44.1	57.7	96.4
15.2	18.0	22.3	29.4	35.2	44.6	58.5	98.7
15.3	18.1	22.4	29.5	35.5	45.0	59.1	100.6
15.3	18.2	22.5	29.6	35.6	45.2	59.5	101.6
19.7	19.7	19.8	19.9	19.9	19.9	20.0	20.0
47.9	48.3	48.7	49.1	49.3	49.6	49.7	49.9
82.0	84.5	87.4	90.8	92.7	94.8	96.7	98.9
92.8	97.3	103.3	111.7	117.9	126.7	138.3	165.8
94.1	99.0	105.4	115.0	122.1	133.1	148.7	194.6
95.1	100.2	107.1	117.4	125.4	138.0	156.8	218.1
95.9	101.3	108.5	119.5	128.2	142.2	163.8	238.9
96.4	101.9	109.3	120.7	129.9	144.6	167.9	251.0
96.8	102.4	109.9	121.7	131.2	146.2	171.2	260.9
97.0	102.6	110.3	122.3	131.9	147.6	172.9	266.1
19.1	19.3	19.5	19.7	19.7	19.8	19.9	20.0
47.0	47.5	48.1	48.7	49.0	49.4	49.6	49.9

（续表）

88.0	90.1	92.3	94.7	95.5	97.2	98.3	99.4
137.0	145.4	155.5	169.8	179.5	192.3	206.9	230.0
140.9	150.0	162.0	179.4	192.0	210.6	235.5	297.1
143.3	153.1	166.0	185.3	199.4	222.4	254.7	350.6
145.4	155.6	169.4	190.4	206.7	232.5	271.6	399.9
146.6	157.1	171.4	193.4	210.7	238.4	281.5	429.3
147.5	158.3	173.0	195.8	213.9	243.2	289.5	453.2
148.0	158.9	173.9	197.1	215.6	245.8	293.7	465.9
18.3	18.6	18.9	19.3	19.4	19.6	19.8	19.9
44.2	45.3	46.3	47.5	48.1	48.7	49.2	49.7
81.2	84.2	87.6	91.3	93.3	95.4	97.2	99.0
127.7	137.2	149.2	165.7	176.8	191.3	207.3	231.3
134.4	145.4	160.0	181.4	197.2	220.5	252.1	326.9
138.6	150.7	167.0	191.9	211.1	241.0	285.4	414.7
142.3	156.3	173.0	201.0	223.2	259.1	315.2	500.3
144.4	157.9	176.6	206.3	230.2	269.6	322.8	552.2
146.1	160.1	179.4	210.6	236.0	278.2	347.0	594.7
147.0	161.2	180.9	212.8	239.0	282.8	354.6	617.4
17.7	18.2	18.6	19.0	19.3	19.5	19.7	19.9
42.2	43.5	45.0	46.5	47.3	48.2	48.9	49.6
74.0	77.7	82.1	87.0	89.8	92.9	95.6	98.5
102.6	111.0	122.1	137.8	148.8	164.0	182.0	214.3
104.6	113.7	125.7	143.1	155.7	174.2	198.4	256.5
105.9	115.3	127.8	146.3	160.1	180.6	209.1	287.2
107.0	116.7	129.7	149.1	163.8	186.2	218.3	314.4
107.7	117.5	130.7	150.7	165.9	189.4	223.7	330.5
108.2	118.2	131.6	152.0	167.7	192.0	228.0	343.5
108.5	118.5	132.1	152.7	168.6	193.4	230.3	350.5
18.9	19.1	19.3	19.5	19.7	19.8	19.9	20.0
43.8	44.9	46.0	47.3	47.9	48.6	49.1	49.7
65.4	69.0	73.3	78.9	82.4	86.8	91.1	96.6
71.5	76.4	83.0	92.7	100.1	111.2	126.6	165.5
74.2	79.8	87.4	99.3	108.8	124.0	147.3	218.3

（续表）

76.2	83.3	90.8	104.4	115.6	134.1	163.8	264.7
78.0	84.5	93.7	108.8	121.3	142.7	178.7	307.0
79.0	85.8	95.4	111.3	124.7	147.8	168.7	332.1
79.8	86.8	96.8	113.4	127.5	151.9	193.5	352.5
80.3	87.3	97.5	114.4	128.9	154.1	197.1	363.4
19.4	19.5	19.6	19.7	19.8	19.9	19.9	20.0
47.3	47.8	48.3	48.9	49.1	49.4	49.7	49.9
85.1	87.5	90.1	93.0	94.6	96.3	97.7	99.2
110.0	116.3	124.4	136.0	144.3	156.0	170.9	201.7
113.9	121.2	130.9	145.7	157.0	174.6	200.3	272.7
117.0	125.0	136.0	153.2	167.0	189.4	224.5	338.6
119.6	128.2	140.3	159.6	175.6	202.3	245.8	400.5
121.1	130.1	142.8	163.4	180.6	209.8	258.3	437.6
122.3	131.6	144.8	166.5	184.6	215.9	268.4	467.9
123.0	132.4	145.9	168.1	186.8	219.1	273.8	484.0
14.0	14.9	15.9	17.1	17.7	18.4	19.0	19.7
31.0	33.5	36.5	40.0	42.1	44.4	46.4	48.8
48.1	53.1	59.4	67.9	73.3	80.0	86.6	94.9
58.2	65.3	75.0	89.5	100.1	115.3	134.7	175.0
61.4	69.4	80.5	97.4	110.6	130.8	159.4	235.7
64.7	73.5	85.9	105.6	121.3	146.7	185.2	305.6
67.5	76.9	90.5	112.5	130.5	160.4	208.0	371.7
69.1	79.0	93.2	116.5	135.9	168.5	221.4	411.5
70.4	80.6	95.3	119.8	140.2	175.0	232.2	443.9
71.1	81.5	96.5	121.5	142.6	178.5	238.0	461.1
12.1	13.1	14.3	15.8	16.7	17.7	18.5	19.5
25.6	28.3	31.7	36.0	38.6	41.7	44.7	48.1
37.6	42.4	48.8	57.7	63.8	71.8	80.3	92.0
43.6	49.7	58.2	71.2	80.9	95.2	113.7	153.9
43.9	50.1	58.7	71.8	81.8	96.4	115.8	160.2
44.0	50.3	58.9	72.2	82.3	97.2	117.1	164.0
44.1	50.4	59.1	72.5	82.7	97.9	118.2	167.2
44.2	50.5	59.3	72.7	83.0	98.2	118.8	169.1

（续表）

44.3	50.6	59.4	72.9	93.2	98.5	119.4	170.7
44.3	50.6	59.4	73.0	83.3	98.7	119.6	171.5
17.1	17.6	18.1	18.7	19.0	19.3	19.6	19.9
40.8	42.4	44.0	45.8	46.8	47.8	48.6	49.5
73.4	77.4	81.9	87.0	89.9	93.0	95.6	98.5
114.5	124.7	137.9	156.0	168.3	184.5	202.4	229.3
122.0	134.0	150.1	173.8	191.4	217.3	252.0	332.9
127.1	140.3	158.3	186.1	207.7	241.3	290.7	432.8
131.3	145.6	165.4	196.7	221.8	262.4	325.5	532.3
133.8	148.7	169.6	203.0	230.1	274.9	346.1	593.1
135.8	151.2	173.0	208.0	236.8	284.9	362.9	642.9
136.9	152.6	174.7	210.7	240.4	290.3	371.8	669.6
12.3	13.3	14.5	15.9	16.8	17.2	18.6	19.5
22.3	24.8	28.0	32.3	35.2	38.8	42.4	47.1
28.0	31.7	36.7	44.4	50.0	58.1	67.9	84.8
33.8	38.9	46.2	58.1	67.7	83.0	105.0	158.0
37.1	43.1	51.7	66.3	78.5	98.8	130.2	220.6
39.7	46.2	56.0	72.6	86.9	111.3	150.7	277.1
41.9	49.0	59.6	78.0	94.1	122.1	168.6	329.4
43.1	50.5	61.7	81.2	98.4	128.4	179.1	360.7
44.2	51.8	63.4	83.8	101.8	133.5	187.6	386.1
44.7	52.5	64.3	85.1	103.6	136.3	192.1	399.7
4.7	5.5	6.7	8.6	10.0	12.0	14.3	17.6
7.9	9.5	11.7	15.5	18.5	23.1	29.0	39.8
9.4	11.3	14.1	19.0	23.0	29.5	38.7	60.1
10.4	12.6	15.8	21.6	26.5	34.6	47.0	82.2
11.0	13.3	16.8	23.0	28.4	37.5	51.7	95.9
11.4	13.8	17.5	24.1	29.9	39.7	55.4	106.8
11.8	14.3	18.2	25.1	31.1	41.5	58.5	116.1
12.0	14.6	18.5	25.6	31.8	42.6	60.2	121.5
12.2	14.8	18.8	26.0	32.4	43.5	61.8	125.9
12.3	14.9	19.0	26.3	32.7	44.0	62.6	128.3
15.4	16.1	16.9	17.8	18.3	18.8	19.3	19.7

（续表）

22.9	24.8	27.1	30.4	32.7	35.8	39.2	45.0
24.4	26.6	29.6	34.0	37.4	42.5	49.5	66.5
25.9	28.5	32.0	37.6	42.2	49.5	60.8	95.6
26.7	29.5	33.4	39.7	44.9	53.5	67.4	114.4
27.3	30.3	34.4	41.2	46.9	56.8	72.5	129.5
27.9	30.9	35.3	42.5	48.7	59.2	76.9	142.5
28.2	31.2	32.8	43.3	49.7	60.8	79.5	150.1
28.4	31.6	36.2	43.9	50.5	62.0	81.5	156.3
28.5	31.8	36.3	44.3	51.0	62.7	82.6	159.6

总计包括6个数据集。从每个数据集可以读出以下数据：

——应用气候数据的地区的名称及其地理纬度。

——12个月的日平均气温值、月降雨量、每日潜在蒸发蒸腾速率、每日潜在蒸发速率、密闭的C_3或C_4作物冠层各自的每日总二氧化碳同化速率，每月的有效灌溉量和每月的降雨天数。这个输入文件的一个例子列在表94中。用DAYNUM数据语句得到表中的气候数据，该语句仅包含初始的天数（儒略历的每个月中），而相应的气候数据均为零（408～411行）。

433～447行　计算潜在蒸发速率和蒸发蒸腾速率的月平均值，并送入表中。对于每一个气候变量，把该年的第一月和最后一月的中间值进行平均，得到该年第一和最后一天的值。

子程序APPLE

450～487行　编译时，插入名为WOFOST·CMN的公用块。

493～565行　在初始化时多数变量置零。在缺席选择时，令初始土壤水分含量等于100厘米的基质吸力的含水量。用方程27计算基质吸力为100厘米和16000厘米（萎蔫点）的土壤水

表 94　孟加拉国六个地区的顺序文件 CLIMEAN · DAT

N.E.Bariud 地区					25.5	
17.6	1.01	.159	.213	595.	468.	1.
19.8	1.23	.249	.311	678.	530.	1.
24.5	2.01	.386	.459	799.	619.	2.
28.3	5.34	.524	.614	879.	679.	4.
28.7	16.6	.532	.640	869.	678.	9.
28.7	34.1	.464	.564	736.	593.	19.
28.9	39.8	.408	.493	611.	510.	16.
28.8	32.7	.411	.504	654.	533.	16.
28.4	30.5	.364	.445	584.	478.	13.
26.	13.3	.337	.422	666.	525.	6.
22.4	.950	.220	.285	626.	491.	1.
18.8	.080	.149	.202	587.	462.	1.
N.Tista 泛滥平原					25.75	
17.3	1.13	.156	.210	571.	451.	1.
19.5	1.48	.240	.311	704.	548.	1.
23.5	2.82	.366	.448	798.	618.	2.
27.7	8.46	.488	.584	842.	655.	4.
27.8	29.8	.487	.584	831.	653.	9.
28.3	49.2	.436	.532	697.	568.	19.
28.7	41.1	.429	.526	690.	562.	16.
29.2	33.3	.431	.527	690.	558.	16.
28.9	31.7	.382	.467	617.	500.	13.
26.5	16.6	.347	.431	637.	505.	6.
22.4	1.00	.195	.294	576.	457.	1.
18.9	.140	.149	.198	520.	415.	1.

Gangus 潮汐泛滥平原					22.5	
19.6	1.59	.215	.271	581.	460.	1.
22.2	1.90	.305	.371	654.	516.	1.
26.6	4.81	.435	.513	709.	559.	3.
29.0	10.4	.520	.618	779.	613.	6.
29.5	19.6	.524	.631	793.	627.	11.
28.7	42.3	.412	.496	585.	492.	16.
28.2	45.1	.396	.482	588.	493.	12.
28.3	39.5	.375	.451	532.	452.	16.
28.6	28.5	.400	.488	630.	510.	12.
27.7	19.0	.353	.434	622.	497.	7.
23.9	4.23	.260	.327	605.	478.	1.
20.5	.990	.189	.250	601.	473.	1.
吉大港丘陵地区					23.	
19.6	1.74	.217	.276	588.	465.	1.
21.6	2.88	.308	.380	710.	558.	1.
25.4	5.86	.443	.532	788.	612.	2.
27.8	13.4	.549	.654	848.	659.	5.
28.4	25.1	.548	.662	863.	674.	10.
27.8	49.3	.463	.559	688.	561.	15.
27.4	54.3	.426	.518	644.	531.	19.
27.3	46.9	.430	.529	691.	558.	15.
27.7	30.8	.396	.484	629.	509.	11.
27.1	15.8	.350	.428	578.	464.	7.
24.0	6.36	.273	.351	666.	520.	2.
20.7	3.81	.198	.258	562.	446.	1.

（续表）

达卡					24.	
18.6	.560	.214	.268	587.	464.	1.
21.2	.530	.312	.373	664.	522.	1.
26.0	4.65	.482	.555	738.	578.	3.
28.8	8.99	.597	.690	797.	625.	6.
29.3	24.7	.608	.719	847.	663.	11.
28.6	32.8	.469	.561	657.	540.	16.
28.1	33.4	.454	.550	675.	551.	12.
28.5	33.9	.454	.547	665.	541.	16.
28.5	23.5	.435	.523	630.	510.	12.
27.1	15.2	.386	.467	624.	497.	7.
23.2	10.8	.273	.340	625.	492.	1.
19.3	3.44	.163	.240	576.	455.	1.
锡尔赫特盆地					24.75	
18.5	1.96	.178	.231	574.	454.	2.
20.6	4.74	.261	.325	663.	520.	2.
24.1	8.18	.383	.454	720.	566.	3.
26.4	31.5	.442	.531	746.	591.	11.
26.8	49.4	.435	.534	744.	596.	18.
27.2	97.3	.374	.456	577.	488.	22.
28.0	73.5	.391	.477	606.	506.	25.
28.0	60.0	.382	.467	600.	498.	24.
27.8	42.5	.349	.426	560.	462.	16.
26.2	17.6	.320	.402	625.	497.	8.
22.9	3.53	.232	.298	604.	477.	1.
20.0	1.80	.168	.214	511.	409.	1.

分含量，而最大地表存贮容量用方程41来计算。在后面的计算中块角和地面倾角均从角度转换为弧度。这一计算以1天(DELT)为时间步长进行。

537～549行　初始的根、叶、茎和贮藏器官的总量根据出苗或移栽时的干物质来确定，发育阶段各种植物器官的分配因子均等于零。初始的干物质总量是作为作物数据中一特定的作物的变量给出的。如果研究不同的播种方式或种植密度，该变量会发生改变。比叶面积和分配因子两者均和发育阶段有关。用比叶面积和叶片重量来计算叶面积指数。如果具有光合作用活性的茎和荚很重要，则它的贡献也应考虑。

551～556行　把土壤质地类型、作物生长的开始日期、作物品种的名称和气候数据集的名称分别写入输出文件中，接着把下列数据也写入输出文件；天数，根、茎、叶和贮藏器官的总量，叶面积指数，地下水深度，根层和发育阶段的土壤含水量，所有数据都涉及出苗期或移栽期。表97给出这个输出文件的一个例子。

558～569行　以时间步长 DELT 重复进行计算的动态部分从这里开始。如果发育阶段为2，则作物生长周期已完成，终止计算。由此计算作物生长周期的持续时间。从子程序 CLIMAT 可得到每天(IDAY)的温度、降雨、总的二氧化碳同化速率、潜在蒸发蒸腾速率、潜在蒸发速率和有效灌溉量等方面的数据。用子程序 DAYLEN 来计算昼长，它是日期和地理纬度的函数。按照方程5计算拦截的辐射的比例。如果控制参数 IWB 等于零，则在不考虑水分平衡的情况下进行这种模拟。

573～581行　基质吸力等于地下水深度时，用方程27计算田间持水量时的容积土壤含水量。基质吸力是用同样的

方程来计算的，由相反方向求解出根层的实际容积土壤含水量（方程 68）。求解基质吸力从方程 30 得到导水率。如果基质吸力比特定质地的吸力极限还高，就可用方程 31。用实际吸附加过渡层渗透性（方程 33 和 34）来确定最大渗透率。

585～590行　根据潜在蒸发速率，考虑由于土壤水分含量和植被遮光造成的蒸发减少（方程 37，40 和 71）来计算实际蒸发速率。如果在非水分平衡状态下计算作物生长，则计算最大蒸发速率而不是实际蒸发速率。在水层覆盖大田的情况下，蒸发是从水层外表而不是从土壤上发生。

594～599行　地面蓄水量的变化依赖于降雨、灌溉和蒸发。实际渗透率是计算出来的地面存水量的最大变化值或是最大渗透率。应将最大渗透率对雨量分布和地面倾角进行校正。然而，这些函数在模型中尚未定义，并且不影响渗透量。从计算出来的地表蓄水量减去实际的渗透率和最大地表蓄水量就得到径流，它是全部作物生长期间的累积值。这些关系用方程 42，43 和 44 给出。

603～614行　根层下面，水流的方向依赖于根层底部和地下水位之间的距离以及根层的基质吸力。如果吸力超过这个距离，将发生毛管上升，用子程序 RIJTMA 计算毛管上升速率。然而向上的水流不会导致根层的含水量高于田间持水量。反之也就是重力势超过基质吸力时，将发生自然排水（方程48），但仅在根层水分总量超过田间持水量时水才能排出。

618～637 行　潜在蒸腾速率和最大蒸腾速率 按照方程 51和 52 计算。临界的土壤水分含量根据方程 53 和土壤水消耗比例来计算，土壤水消耗比例依赖于潜在蒸腾速率和作物品种。实际蒸腾速率依赖于土壤水分含量。这里所应用的蒸

腾速率的减少在某种程度上不同于3.2节(方程 54 和 55)的情况，特别是不同于高土壤含水量的情况。土壤气体含量在 0.10 和 0.05 厘米/^{3} 厘米^{3}之间时蒸腾速率的减少与土壤气体含量成正比，如果作物有空气导管 (AIRDUC＝1)，在湿土壤里蒸发速率的减少就不会发生。

641～642行　根层土壤容积含水量的变化由下列因素来确定：实际渗透速率、毛管上升速率、或根层下部排水之间的平衡状况，以及考虑了根层深度(方程24)的实际蒸发与蒸腾速率，在非水分平衡的情况下进行模拟时，不计算实际蒸发及蒸腾速率，并把土壤水分含量的变化均置为零。

646～648行　在人工排水系统是有效的情况下，排水的结果可用方程59计算，假设地下水位和排水深度、土壤的导水率，以及排水管间距和排水管半径是已知的。

653～655行　地下水位的深度可能因自然排水或毛管上升和人工排水(方程60)而变化。假定在地下水位改变时，空的孔隙或由水填满的孔隙等于根层中由空气充满的孔隙。当地下水进入根层时，地下水深度的改变和土壤水分含量的变化是用不同的方法来计算的。在地下水进入根层的瞬间，地下水深度(ZTF)和土壤水分含量(SMF)得到固定的值(775～777，783～785行)。用渗透速率、蒸发速率和使用固定的空气充满孔隙的蒸腾速率来计算地下水深度的变化。在与 ZTF 比较时，用地下水深度的相对变化乘上空气充满孔隙的系数可得到土壤水分含量的变化。

665～679行　花期前的发育速率依赖于昼长和温度。花期后，发育速率仅依赖于温度，并且在同样温度下其变化也和花期前不同。生长的作物的比叶面积和干物质分配到叶、茎等的分配因子依赖于发育阶段，并可从特定作物的表中

(2.2 节)用线性内插法得到。

683～689 行　总的二氧化碳同化率依赖于潜在总同化率、拦截的辐射的比例和实际蒸腾速率(方程 5 和 3.3 节)。计算潜在的总二氧化碳同化率应在加入气候数据之前进行。维持呼吸率依赖于各种植物器官的干物质总量和每种植物器官的相对维持呼吸速率及温度。它不能超过总同化速率，也就是说，假定植物在碳水化合物方面，不会"自身破坏"。总的同化速率减去维持呼吸速率就得到用来转化为植物结构物质(方程 6) 的有效同化量，用各种植物器官效率的加权平均值作为碳水化合物转换为植物结构物质的转换率。

693～748行　根、叶、茎和贮藏器官的生长速率依赖于这种作物的总干物质的增加和分配因子及每种植物器官的死亡率。在发育阶段达到 1.5 之后，根和茎开始死亡。叶子经常更早就开始死亡，因为不仅最老的叶子超过了它的生存期时(DALV)死亡，而且随着水分胁迫的增加，叶子的死亡也增加，就是说，实际蒸腾速率与最大蒸腾速率 (DSLV 1)的比值减少了。此外，假定由于自身遮光，叶面积指数超过 7 时叶子亦将死亡 (DSLV 2)。叶子的生长速率按时间步长分别计算，也就是用LV(1)＝GRLV×DELT 公式(727 行)按天计算；同时计算出对应的叶面积。通过 725 行和 726 行，按天将叶重和叶面积变换一个级别。对最老的那级叶子而言，叶子的总量应加上出苗或移栽时的叶量 (729 行)。已超过生存期的叶子将死亡〔DALV＝LV(ISPAN)；721 行〕。然而，如果那些叶子因水分胁迫 (DSLV) 而死亡，则不再考虑衰老造成的死亡 (709 行)。如果从最早日期 (LV(IL)〕算起的叶子总量还不足以抵偿因水分协迫而死亡的叶子，则更年轻的叶子〔LV(IL－1)，LV(IL－2)等〕将死去 (715 行)。这

样，由于水分胁迫造成的叶子死亡会引起最老叶子的丧失。叶总面积是所有年龄的叶子的叶面积的总和(734行)。

752～759行　计算发育阶段和活的根、叶、茎和贮藏器官的干重时，以时间七时的总量为初值，并以时间步长DELT内的发育或生长速率来进行计算。把地上部和地下部总的活体全部干物质重合并为活体植物器官的干重。

761～769行　用时间七时的总量以及时间步长DELT内的死亡率来计算死亡的根、叶、茎和贮藏器官的干物质重。根、叶、茎和贮藏器官的总干物质重。应由活的和死的植物器官干物质重合并而成。

774～785行　根层里土壤水分含量随土壤水分含量变化率而变，但其变化范围被限制在相应的风干土的水分含量与几乎饱和的土壤水分含量之间。当地下水进入根层时，形成土壤含水量(SMF)的固定值和地下水深度(ZTF)的固定值(775～777行和783～785行)。从总的地表蓄水量减去实际渗透和径流(该蓄水量是最初的地表蓄水总量加上降雨、灌溉和蒸发的平衡值(594行))，就得到新的地表贮水量。地下水位深度由地下水深度的变化状况来确定，但它被限制在每个土地单元(40和41行)确定的最小和最大值之间，该深度是自然地理、河流水位等的函数。当根的深度已达到地下水深度的最大值时根系停止伸长。

786～796行　对具有空气导管的作物而言，与这部分的内容无关。当根深在地下水位之上小于10厘米时，根延伸停止，因为氧气不是妨害其伸长。当地下水进入根层时，根死亡，并且根深度减少。当分配到根系的同化物总量为零时，根的延伸也将是零。用RTDE计算根的深度小于10厘米时的天数。渍水5天以后(RTDF=5)，打印出作物被毁坏的

表95　小麦和水稻数据的顺序文件 PLANTDAT · DAT 的一部分

小麦	2.	0.	2.	.6	.72	.73	.72	.69	60.	.03
	.01	.01	.015	1.2	.03	.02	.02	0.	0.	.01
	.0	10.	100.	0.0292	1.	0.	.0389	.004	.0011	.0005
	0.	.5	.1	.42	.2	.33	.3	.26	.4	.2
	.5	.15	.6	.1	.7	.07	.8	.04	.9	.02
	1.	0.	2.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
	0.	1.	.1	1.	.2	1.	.3	.81	.4	.65
	.5	.51	.6	.38	.7	.25	.8	.12	.9	.06
	1.	0.	2.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
	0.	0.	.2	0.	.3	.19	.4	.35	.5	.49
	.6	.62	.7	.75	.8	.88	.9	.43	1.	0.
	2.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
	0.	0.	.8	0.	.9	.51	1.	1.	2.	1.
	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
	0.	.002	2.	.002	.0	.0	.0	.0	.0	.0
	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
	0.	0.	35.	1.	45.	1.	0.	0.	0.	0.
	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
水稻HYV-IR8	.2	.885	.3	.8	.4	.7	.5	.6	.6	.55
	.7	.515	.8	.465	.9	.43	1.	.4	0.	0.

（续表）

3.	1.	2.	.6	.72	.73	.72	.69	60.	.03
.01	.01	.015	1.2	.03	.02	.02	0.	.0	.0083
.0	10.	200.	0.0233	1.	0.	.0435	.004	.0011	.0005
0.	.6	.1	.325	.2	.225	.3	.14	.4	.075
.5	.075	.6	.07	.7	.07	.8	.055	.9	.04
1.	0.	2.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
0.	.94	.1	.59	.2	.55	.3	.53	.4	.52
.5	.51	.6	.45	.7	.34	.8	.22	.9	.10
1.	0.	2.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
0.	.06	.1	.41	.2	.45	.3	.47	.4	.48
.5	.49	.6	.55	.7	.66	.8	.78	.9	.38
1.	0.	2.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
0.	0.	.8	0.	.9	.52	1.	1.	2.	1.
0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
0.	.0025	2.	.0025	.0	.0	0.	0.	.0	.0
0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
0.	0.	35.	1.	45.	1.	0.	0.	0.	0.
0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
.2	.885	.3	.8	.4	.7	.5	.6	.6	.55
.7	.515	.8	.465	.9	.43	1.	.4	0.	0.

表96 小麦的作物特征*

CRPNAM									
WHEAT									
CROPT	AIRDUC	Q10	EXC	CVL	CVO	CVR	CVS	SPAN	RML
2.	0.	2.	.6	.72	.73	.72	.69	.60	.03
RMO	RMR	RMS	RR	PERDL	PERRT	PERST	SPA	SSA	NPERSO
0.1	.01	.015	1.2	.03	.02	.02	0.	0.	.01
DSL	RD	TDW	$DVRC_1$	DLO	DLC	$DVRC_2$	NPERVE	PPERSO	PPERVE
0.	10.	100.	.0318	1.	0.	.0389	.004	.0011	.0005
FRTB(1,30)									
0.	.5	.1	.42	.2	.33	.3	.26	.4	.2
.5	.15	.6	.1	.7	.07	.8	.04	.9	.02
1.	0.	2.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
FLTB(1,30)									
0.	1.	.1	1.	.2	1.	.3	.81	.4	.65
.5	.51	.6	.38	.7	.25	.8	.12	.9	.06
1.	0.	2.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
FSTB(1,30)									
0.	0.	.2	0.	.3	.19	.4	.35	.5	.49
.6	.62	.7	.75	.8	.88	.9	.43	1.	0.
2.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.

（续表）

FOTB(1,30)									
0.	0.	.8	0.	.9	.51	1.	1.	2.	1.
0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
SLATB(1,30)									
0.	.002	2.	.002	0.	0.	0.	0.	0.	0.
0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
0	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
DVRETB(1,30)									
0.	0.	35.	1.	45.	1.	0.	0.	0.	0.
0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
SWDPTB(1,20)									
.2	.885	.3	.8	.4	.7	.5	.6	.6	.55
.7	.515	.8	.465	.9	.43	.1	.4	0.	0.

* 表中关变量名请参看9.1.5首字母顺序词表。

信息，来代替植物器官干物质重等，并停止计算。

798～800行　用叶、茎和荚的比面积和重量计算绿色面积指数(叶、荚和茎)。根深可由根的延伸率积分得到。作物整个生长期中由于蒸腾消耗的水分通过累加实际蒸腾量得到。

临时输出

804～817行　每10天(日期为儒略历日)，将根、叶、茎和贮藏器官的干物质重，叶面积指数，地下水深度，土壤水分含量和发育阶段写入输出文件(表97)中。继续对下一天进行计算。当发育阶段达到 2 或叶重变为零时，作物生长结束。在这种情况下，最后的一段时间里，输出文件中将省去上述那些每10天写入一次的变量。

818～825行　对于潜在生产状况下计算的叶、茎和贮藏器官的重量、生长期和因蒸腾消耗的总水分重新命名，以区别于水分限制生产状况下的相应各量。

子程序 CLIMAT

833～861 行　编译时，插入名为 WOFOST·CMN 的公用块。

862～871 行　对标明为 RI40 的给定天数，用线性内插法从气候表中读出空气温度、潜在蒸发速率、潜在蒸发蒸腾速率及有效灌溉量除温度以外，这些数据的每月的值均应转换为每天的值。在低于最佳气温时给定日期的总同化速率的减小状况与作物类型有关。此外，把用二氧化碳表示的同化速率转换为碳水化合物。用每月降雨量和每月的降雨天数数据，从子程序 RAINDA，可得到日降雨量。

子程序 RAINDA

874～885行　用这个子程序根据总的月降雨量和每月的降雨天数计算指定日期的降雨量。DATA 语句中给出 30 个

随机数，即一个月中的随机天数。使用 DATA 语句 IDGN（该语句中包含从一月一日开始算每月第一天的天数），从给定的每年的天数（IDAG），来推算每月的天数（ICD）和月数（ICM）。

887～902行　把随机天数(IRAND)同当前天数(ICD)进行比较，相等的重复次数作为降雨天的数(RDA)。如果这些天数相等，给定日期的降雨（RN）可用给定的降雨天数和每月降雨量(RTB)来计算。否则给定日期的降雨量为零。

子程序 RIJTMA

909～944行　毛管上升从 Rijtema 的表(表 21～34)得来。在这些表里，给出的毛管上升速率〔CCR(8)〕是根层和地下水位〔R(8,10)〕之间的距离以及根层〔CMH(10)〕中每种质地类型基质吸力的函数。如果基质吸力小于 20 厘米，该表不能用。在低吸力范围内，用方程 44 计算毛管上升。如果基质吸力等于 20 厘米，可用R(1,1)到R(8,1)的值。如果实际距离小于（R(1,1)或大于 R(8,1)，毛管上升分别是 0.5 或 0.0 厘米/日。否则，将实际距离同R(2,1)到 R(8,1)的值进行比较。例如，如果实际距离 D_i小于或等于 R(5,1)，则首先计算函数的斜率：

SLOPE＝〔CCR(4)－CCR(5)〕/〔R(4,1)－R(5,1)〕

毛管上升速率的结果是：

C＝CCR(5)－SLOPE×(R(5,1)－D_i)

如果基质吸力等于或高于 16 000 厘米，使用 R(1,10) 到R(8,10)的值。计算方法与20厘米土壤基质吸力时的相同。如果实际距离比 R(1,10)小或比 R(8,10)大，则毛管上升分别是 0.5 和 0.0 厘米/日。否则，可按下列计算：

SLOPE＝〔CCR(4)－CCR(5)〕/〔R(4,10)－R(5,10)〕

$C=CCR(5)-SLOPE\times[R(5,10)-D_i]$

如果实际基质吸力在20和16 000 厘米之间，就须将这个吸力同给在数组CMH中的土壤吸力数据进行比较。例如，若实际吸力小于或等于CMH(4)，基质吸力和距离间函数关系的斜率是

$SLOPE=[R(I,3)-R(I,4)]/[CMH(3)-CMH(4)]$

距离VMH的 8 个值(I＝1－8)，可用对实际基质吸力值进行内插来得到：

$VMH(I)=R(I,4)-SLOPE\times[CMH(4)-RMH]$

在这种情形下，如果实际距离比用内插法求得的最高值[VMH(8)]大或比最低值[VMH(1)]小，毛管上升也分别是 0.0 或0.5cmd^{-1}。否则，把实际距离同VMH(2)到VMH(8)进行比较。例如，如果实际距离小于或等于VMH(5)，毛管上升和表中距离间关系的斜率是：

$SLOPE=[CCR(4)-CCR(5)]/[VMH(4)-VMH(5)]$

毛管上升率的结果是：

$C=CCR(5)-SLOPE\times[VMH(5)-Di]$

子程序DAYLEN

950～955行　计算昼长时把它作为地理纬度和太阳方位角的函数。方位角是日期的函数。

函数ASIN

956～965行　这个反正弦函数，用于计算昼长。这里是用近似方程给出的，因为微机的FORTRAN 库里没有反正弦函数。

子程序NUTRI

972～1000行　编译时。插入名为WOFOST・CMN 的公

用块。

1002～1008 行　从独立数据(5.3 节) 得到的磷和氮素的基本吸收量适合于 120 天生长期的作物。对于具有更短或更长的生长期的作物，其基本吸收量相应地减少或增加。表示这一关系的数据在BLOCKDATA中给出。施用肥料的回收系数也是单独定义的。应用这种方法的孟加拉国的实例表明，基本吸收量和回收系数只有很小的变化，对于所有的土壤类型也只有一个数值。但在不同的情形下，表中可能包含与不同土壤质地类型、土地单元、地区或土壤类型有关的基本吸收量和回收系数。变量 MANF 1 和 MANF 2 就在这时使用，它们有可能表示出施用肥料时农民在提高其基本吸收量或回收系数的能力上的差别，例如分期施肥、制备较好的苗床，控制水分等。

1009～1012行　潜在生产状况下需要吸收的氮素是由作物剩余的总干物重乘以它们的最小氮浓度，再加上贮藏器官的干物重与它们的最小氮浓度之积。水分限制生产的情形下计算氮素需要量的方法与潜在生产的情况相同，但由于水分胁迫，叶、茎和贮藏器官的总量可能较小。对于潜在的或水分限制生产的情况，以施肥来供氮时确定氮素需要量的方法是，从这些生产情形下需要的氮素总量减去基本吸收量，然后再除以所施肥料的回收系数。

1014～1024行　在不施肥的情形下，生产情形 3 的氮素吸收量（基本吸收量）是潜在生产情形下的氮素吸收的一部分。当不施用肥料时产生的植物器官总量也按此比例减少，如果除氮素外，在某些生长阶段水分也限制作物生长，则假设所产生的植物器官总量等于这两种情形下的总量的最小值。计算所需的氮肥时，两种情形都应考虑进去。

1029～1044行　如果考虑的是豆科作物(CROPT＝4)，由于存在共生固氮，氮素的需要量得到较大的满足。因此磷素成为限制豆科作物生长的养分。潜在的和水分限制生产的情形下总的磷素需要量，需要的磷肥施用量和不施用磷肥时产出的植物器官总量。用与氮素计算中相同的方法(1009～1024行)来计算。

1047～1051行　从IPS逻辑单元写入输出文件的内容有：潜在的和水分限制生产的状况下氮或磷的施用总量；以120天为生长期的作物氮和磷的基本吸收量；所施氮肥和磷肥的回收系数；最小和最大地下水深度；潜在的和水分限制生产的状况下需要施用的肥料养分量；在潜在的和水分限制生产的情况下作物生长中蒸腾消耗的水分总量；总的地表径流；潜在的和养分限制生产的情况下产生的叶子的干物质重；潜在的和养分限制生产的情况下产生的茎的干物质重，潜在的和养分限制生产的情况下产生的贮藏器官的干重；在水分限制和水分加养分限制生产的情况下叶的干重；在水分限制和水分加养分限制生产的情况下茎的干重；在水分和水分加养分限制生产的情况下贮藏器官的干重。表97中给出这个输出文件的一个例子。

9.1.3　模拟模型的变量数据库

在前一小节里，我们描述了模拟模型所使用的函数关系和数据。应用这个模型时不需要对所有这些数据和关系进行说明。因此本节仅给出必须进行修改以使模型能处理特殊情况的那些数据的摘要。如果没有特定的数据可利用，可采用缺席值或作出合理的假定。在模型的每一部分都给出了数据和数据文件的说明。所有变量的清单及其定义列在9.1.5小

表 97 输出文件

质地类型 6　　开始天 100

作物玉米　　气候 N.Tista 泛滥平原

DAY	WRT	WLV	WST	WSO	LAI	ZT	SM	DVS
100	8.	8.	4.	0.	0.032	200.000	0.343	0.000
109	184.	267.	142.	0.	0.880	200.000	0.343	0.250
119	746.	1520.	996.	0.	3.458	200.000	0.343	0.503
129	1117.	2546.	2556.	0.	4.582	200.000	0.343	0.757
139	1240.	2818.	4273.	459.	4.798	200.000	0.343	1.011
149	1240.	2818.	4273.	2679.	4.798	200.000	0.343	1.288
159	1191.	2818.	4104.	4490.	4.798	200.000	0.343	1.567
169	973.	2551.	3353.	6011.	3.919	200.000	0.343	1.848
176	862.	1862.	2970.	6816.	2.279	200.000	0.343	2.018

质地类型 6　　开始天 100

作物玉米　　气候 N.Tista 泛滥平原

DAY	WRT	WLV	WST	WSO	LAI	ZT	SM	DVS
100	8.	8.	4.	0.	0.032	200.000	0.343	0.000
109	184.	267.	142.	0.	0.880	194.639	0.216	0.250
119	647.	1227.	805.	0.	2.912	200.000	0.137	0.503
129	825.	1547.	1629.	0.	2.885	81.156	0.420	0.757
139	896.	1488.	2447.	279.	2.581	10.668	0.352	1.011
149	896.	1193.	2447.	828.	1.750	7.037	0.398	1.288
159	861.	864.	2350.	1384.	1.226	0.000	0.490	1.567
169	703.	717.	1920.	1384.	0.744	2.365	0.460	1.848
176	623.	606.	1701.	1385.	0.646	2.579	0.457	2.018

nmaxo	= 311.	pmaxo	= 0.
nmaxw	= 51.	pmaxw	= 0.
nbas	= 30.	pbas	= 5.
nrec	= 0.25	prec	= 0.10
ztmi	= 0.	ztma	= 200.
npeo	= 311.	npew	= 51.
wusco	= 25.5	wusew	= 9.2
		tsr	= 0.0

LVOPT	=2818.	$LVBAS_1$	= 545.
STOPT	=4273.	$STBAS_1$	= 826.
SOOPT	=6816.	$SOBAS_1$	=1318.
TWLV	=1926.	$LVBAS_2$	= 545.
TWST	=2447.	$STBAS_2$	= 826.
TWSO	=1385.	$SOBAS_2$	=1318.

节里，并在9.1.2小节提供了更多的信息。

WOFAUTN程序

36～50行：

CLIMT, SOILTY, SURROT, SALT, ZTMIT, ZTMAT, LUSTXT, CONV, HVL, IDISR, TAB1, TAB2。

现有的方案中假定，土地单元确定了以上数组中的下列数据的唯一组合：质地类型、气候数据、地面粗糙度、斜率和地角，及最小和最大的地下水位深度。当然情况并非总是如此，这时就需要修改程序语句。具有特殊质地类型的土地单元的相对面积由LUSTXT来确定。如果收获的产量要求用另一种形式(9.1.2小节)，必须引入CONV中的其他数据。有时可能用到收获损失量(HVL)或病虫害的影响（TAB1, TAB2)这些更特殊的信息，它们可取代上面所给出的数据。

54～59行：

为了完成计算，土地单元和作物品种或栽培品系(表91)的编号和作物开始生长的日期，应从文件WOFOST·IN中按No.1002格式语句(62行)读出。

SOILDATA·RDM, RIJTEMA·RDM和CLIMEAN·RDM分别是包含土壤特性、毛管上升和气候数据的随机存取文件。要改变这些文件的内容，必须先修改具有相同数据的顺序文件，这些顺序文件的文件各是SOILDATA·DAT, RIJTEMA·DAT和CLIMEAN·DAT。其内容稍后在子程序SOILR, CRDAT和CLIMIN中描述。用RANDOM程序把这些顺序文件转换成对应的随机存取文件SOILDATA·RDM, RIJTEMA·RDM和CLIMEAN·RDM。此后，用新的数据集进行作物生长的计算。PLANTDAT·RDM是包含作物特性数据的随机存取文件。要改变这个文件，需要先改变存有

同样数据的名为PLANTDAT·DAT的顺序文件。该文件的内容在子程序PLANTR中描述。用RANDOMP程序把这一顺序文件转换成随机存取文件PLANTDAT·RDM。此后，用新的数据进行作物生长的计算。RESULT·DAT 是输出文件（59行和149～151行），它包含土地单元、质地类型、具有特殊质地类型的土地单元的相对面积，作物生长的开始日期，潜在的和水分限制生产状况下的总蒸腾和作物生长周期中总的地表径流以及每施用单位氮或磷（仅豆科）肥所增加的产量、在潜在的和水分限制生产、养分限制和水分加养分限制生产及有无杂草、病虫害影响状况下作物的生长周期和叶、茎和贮藏器官的产出。

88～91行：

NBASE，NREC，PBASE，PREC

磷和氮的基本吸收量和回收系数常常和土壤类型或土壤质地，土地单元或地区有关；因此可以给出一个数组，但数组最好以试验数据为基础。

数据块（162～207行）

194～200行：

如果没有数据时相应变量就使用缺席值，从PLANTDAT·RDM或SOILDAT·RDM可得到这些缺席值。只有当借助于数据文件SOILDAT·RDM和PLANTDAT·RDM仍不能组合出有用的特定数据来进行计算时，才有必要改变这些缺席值。

202～206行：

仅当有其他适当数据可用时，才应改变气温和总同化速率减小系数之间的关系以及作物生长周期同基本吸收量之间的关系。

子程序SOILR(234～275行)

每一质地类型的土地特征是从SOILDATA·RDM中读出的。顺序文件SOILDATA·DAT(表92)包含14个土壤质地类型的数据。除非是非常特殊的土壤类型，通常这个文件不需要任何变动。每一质地类型所要求的一组土壤特性的完整描述已在9.1.2小节中给出。当把新的土壤特性输入顺序文件时，在用这些新的数据进行计算之前，需先用程序RANDOM把它转换成随机存取文件SOILDATA·RDM。

子程序PLANTR(277～322行)

每一品种或每一栽培品系的作物特征数据从随机存取文件PLANTDAT·RDM中读出。要改变这个文件，首先必须修改顺序文件PLANTDAT·DAT。然后用程序RANDOMP把顺序文件转换成随机存取文件PLANTDAT·RDM。对任一作物品种或栽培品系需要其作物特征的数据，以小麦为例，其特征数据列在表96里。有关这些作物特征的完全的描述已在9.1.2小节里给出。PLANTDAT·DAT文件的一部分列在表95中，它们分别是IR 8高产水稻和小麦的数据。

子程序CRDAT(334～375行)

一方面，毛管上升速率的数据是根层底与地下水位之间距离的函数，另一方面根层的基质吸力〔RIJTEM(10,8)〕应从随机存取文件RIJTEMA·RDM中读出。顺序文件RIJTEMA·DAT(表93)包含14个土壤质地类型(表21～34)的数据。除了非常特殊的土壤类型之外，通常该文件不需要任何改变。在用新数据进行计算之前，需用程序RANDOM把顺序文件转换成随机存取文件RIJTEMA·RDM。

子程序CLIMIN(377～453行)

气候数据从随机存取文件CLIMEAN·RDM中读出。顺

序文件CLIMEAN·DAT(表94)包含孟加拉国的六个地区的数据。每一地区必需的气候数据的完整描述已在9.1.2小节里给出。当其他气候数据插入这顺序文件中后，用新数据进行计算之前，必须用RANDOM程序把这顺序文件转换成随机存取文件CLIEAN·RDM。

子程序APPLE(455～829行)

在程序的这一部分中主要进行水分平衡和作物生长的动态计算。在每一时间步长，即当前程序版本中的每一天，对所有有关的计算结果进行更新。这种动态计算一直继续到作物发育阶段等于2。这些计算所用的数据从子程序SOILR，CRDAT，PLANTR和CLIMIN中得到，关于这一点前面已论述过。

551～556，808～810，817行

把每10天的天数，根、叶、茎和贮藏器官的干重，叶面积指数，地下水深度，根层的土壤容积水分含量和发育阶段均储存在逻辑单元ISP中，也就是把它们打印出来(表97)，因为在程序WOFAUTN的86行把ISP置为1。当完成潜在的和水分限制的作物生长的计算时，表97中的剩余部分就用子程序NUTRI来计算。

子程序NUTRI(968～1067行)

这个子程序计算所需的数据由程序WOFAUTN说明。子程序APPLE完成作物生长模拟之后，把得到的作物生长数据打印出来。在这些表的底部，也打印出用子程序NUTRI计算的结果(即潜在的和水分限制生产的情况下分别施用的肥料的总量)，每一种肥料的基本吸取量和回收系数，最小和最大地下水位深度，每施用单位肥料所增加的干物质产出量，蒸腾所用的水分总量，总地表径流，各种生产情形下每种植

物器官的干重。表 97 中给出这种输出文件的一个例子在9.1.2 小节里可找到打印出的各种变量的更详细的信息。

9.1.4 模型的程序清单(见附录4)

9.1.5 缩写词表

缩写词	说明	单位
ADMI	地上干物质增量	公斤/公顷·日
AIRDUC	表示植物中有空气导管（逻辑的）	无单位
ASRC	用于干物质增加的有效碳水化合物	公斤/公顷·日
CCR(I)	表21～34中每一土壤质地类型的毛管上升速率的值	厘米/日
CLIM	表示特定气候数据集的变量	无单位
CLIMT	包含表示每一土地单元气候数据集的变量的数组	无单位
CLM	表示气候数据集的变量	无单位
CLMNAM	指定的气候数据集的名称（字母数字）	无单位
CLODAN	块/沟角	度
CLODAR	块/沟角	弧度
CMH(I)	在表21～34中每一土壤质地类型使用的基质水头的数值	厘米
CONV(ICROP)	每种作物的计算的干物质折算为商品产量的转换因子	无单位
CRMD	毛管上升速率或自然排水速率	厘米/日
CROP	作物品种或栽培品系	无单位
CROPT	作物类型，C_3(热带或温带)，C_4	

	豆科	无单位
CRPNAM	作物或栽培品系的名称（字母数字）	无单位
CVF	同化物转换成植物干物质的平均效率	公斤/公斤
CVL	同化物转换成叶干物质的效率	公斤/公斤
CVO	同化物转换成贮藏器官干物质的效率	公斤/公斤
CVR	同化物转换成根干物质的效率	公斤/公斤
CVS	同化物转换成茎干物质的效率	公斤/公斤
D	地下水和根深之间的距离	厘米
DAGLEN	子程序 DAYLEN 中的昼长	小时
DALV	老化引起的叶子的死亡速率	公斤/公顷·日
DD	人工排水系统的排水深度	厘米
DECL	太阳的偏角	度
DELT	积分的时间间隔	日
DISFAC	由于病虫害作物产量的减产因子	无单位
DL	子程序 APPLE 中的昼长	小时
DLC	发育的昼长下限	小时
DLO	发育的最佳昼长	小时
DMAX	人工排水率	厘米/日
DMI	作物的干物质增加速率	公斤/公顷·日
DRA	排水管(沟)半径	厘米
DRAINS	有或没有排水管(沟)(逻辑的)	无单位
DRLV	叶子的总死亡速率	公斤/公顷·日
DRRT	根的死亡速率	公斤/公顷·日
DRSO	贮藏器官的死亡速率	公斤/公顷·日
DRST	茎的死亡速率	公斤/公顷·日

DSL	表示作为温度函数的发育速率的变量	/日
DSLV	水分胁迫或叶面积指数引起的叶子死亡速率	公斤/公顷·日
DSLV1	水分胁迫引起的叶子的潜在死亡速率	公斤/公顷·日
DSLV2	由于叶面积指数高叶子的潜在死亡速率	公斤/公顷·日
DSP	排水间距	厘米
DVR	作物的实际发育速率	/日
DVRC	作物的最大发育速率	/日
DVRC1	开花期前作物发育速率的最大值	/日
DVRC2	开花期后作物最大发育速率	/日
DVRED	发育速率的减少因子；昼长的函数	无单位
DVRET	发育速率的减少因子；温度的函数	无单位
DVRETB	发育速率的减少因子表；温度的函数	无单位
DVS	作物的发育阶段	无单位
DWLV	死叶的干重	公斤/公顷
DWRT	死根的干重	公斤/公顷
DWSO	死贮藏器官的干重	公斤/公顷
DWST	死茎的干重	公斤/公顷
DZ	地下水深度的变化速率	厘米/日
E	实际土壤蒸发速率	厘米/日
EO	潜在土壤蒸发速率	厘米/日
EOTB(I)	潜在土壤蒸发速率-天数表	无单位
EL	地表水层的蒸发速率	厘米/日

EM	最大土壤蒸发速率	厘米/日
ETO	潜在蒸发蒸腾速率	厘米/日
ETOTB(I)	潜在蒸发蒸腾速率-天数表	无单位
EXC	总辐射的消光系数	无单位
FINT	作物拦截的辐射比例	无单位
FL	嫩芽干物质增加分配到叶子的比例	无单位
FLTB	FL-发育阶段表	无单位
FO	嫩芽干物质增加分配到贮藏器官的比例	无单位
FOTB	FO-发育阶段表	无单位
FR	总干物质增加分配到根的比例	无单位
FRBASO	在潜在生产情形下基本吸收占总养分吸收的比例	无单位
FRTB	FR-发育阶段表	无单位
FS	嫩芽干物质增加分配到茎的比例	无单位
FSTB	FS-发育阶段表	无单位
GASS	用 CH_2O 表示的实际冠层总同化速率	公斤/公顷·日
GDUR	表示作物生长持续时间的变量	天
GDURO	作物生长期的计数器	天
GEOP	子程序 CLIMIN 中的地区的地理纬度	度
GP	子程序 DAYLEN 中的地区的地理纬度	度
GRLV	叶子中干物质的增长率	公斤/公顷·日
GRRT	根干物质的增长速率	公斤/公顷·日
GRSO	贮藏器官干物质的增长速率	公斤/公顷·日
GRST	茎干物质的增长速率	公斤/公顷·日

GWLV	叶子干物质的净增长速率	公斤/公顷·日
GWRT	根干物质的净增长速率	公斤/公顷·日
GWSO	贮藏器官干物质的净增长速率	公斤/公顷·日
GWST	茎干物质的净增长速率	公斤/公顷·日
HVL(ICROP)	每一作物品种的收获损失比例	无单位
HRD	扎根深度内的基质水头与重力水头之间的差值	厘米
ICROP	作物品种的等级数	无单位
IDAG	子程序 RAINDA 中儒略历的天数	无单位
IDAY	儒略历的天数	无单位
IDISR(ICROP)	按作物品种对病虫害大体上的敏感度进一步细分类(逻辑)	
IHP(ICROP)	表示植物器官1.叶，2.茎，3.贮藏器官的变量	无单位
IL	出苗以后天数的计数器	天
IOPT	水分不平衡时作物生长模拟的允许省略的参数	无单位
IPS	输出控制参数，确定作物生长模拟的输出被写入的逻辑单元号。	无单位
IRAND	包含30个随机(天)数的表	无单位
ISPAN	叶子的寿命	天
IWB	作物生长模拟中的可选参数(1)有水分平衡，(0)无水分平衡	
K0	饱和导水率	厘米/日
KMH	MH 下的导水率	厘米/日
LA(I)	包含每天叶面积生长状况的数组	公顷/公顷
LAI	绿色面积指数(叶、荚和茎)	公顷/公顷
LASUM	总的绿色叶面积	公顷/公顷

LUNIT	土地单元的等级数	无单位
LUSTXT	包含具有特殊土壤质地类型的土地单元的相对面积的数组	无单位
LV(I)	包含每天生长的叶干重的数组	公斤/公顷
LVBAS1	养分限制叶子的干物质产量	公斤/公顷
LVBAS2	水分加养分限制叶子的干物质产量	公斤/公顷
LVOPT	叶子的潜在干物质产量	公斤/公顷
MANF1	农民影响回收系数的估算因子	无单位
MANF2	农民影响基本吸收的估算因子	无单位
MH	根层中的实际基质水头	厘米
MHMAX	特定质地的吸力极限	厘米
MRES	作物在平均气温下的维持呼吸速率	公斤/公顷·日
MT	排水管(沟)中间的水头	厘米
NBAS	实际的氮素基本吸取量，它是作物生长期和农民能力的函数	公斤/公顷
NBASE	以 120 天为生长期的作物品种的氮的基本吸取量	公斤/公顷
NEO	潜在生产情形下所需的肥料-养分施用量	公斤/公顷
NEW	水分限制生产情形下所需的肥料-养分施用量	公斤/公顷
NEOC	潜在生产情形下每施用单位肥料-养分所增加的产量	公斤/公顷
NEWC	水分限制生产情形下每施用单位肥料-养分所增加的产量	公斤/公顷
NMAXO	潜在生产情形下所需要的氮肥量	公斤/公顷
NMAXW	水分限制生产情形下所需的氮肥	

	量	公斤/公顷
NOPT	潜在生产情形下所需的氮素吸收量	公斤/公顷
NPERSO	在存贮器官里最小的氮浓度	公斤/公顷
NPERVE	在作物残茬里最小的氮素浓度	公斤/公斤
NREC	施用氮肥的回收系数	公斤/公斤
NWAB	水分限制生产情形下所需的氮素吸收量	公斤/公顷
OUTPUT(I)	各种生产情形下包含每一植物器官干物质产量的数组	公斤/公顷
PBAS	实际的磷素的基本吸收量，它是作物生长期和农民能力的函数	公斤/公顷
PBASE	以 120 天为生长期的作物品种的磷素的基本吸收量	公斤/公顷
PERDL	由于水分胁迫，叶子的最大相对死亡率	/日
PERRT	根的相对死亡率	/日
PERSO	贮藏器官的相对死亡率	/日
PERST	茎的相对死亡率	/日
PGASS	用 CH_2O 表示的密闭冠层的潜在总同化速率	公斤/公顷·日
PGS3TB(I)	封闭的 C_3 作物的潜在 CO_2 总同化速率与天数的表	公斤/公顷·日
PGS4TB(I)	封闭的 C_4 作物的潜在 CO_2 总同化速率与天数的表	公斤/公顷·日
PMAXO	潜在生产情形下所需的磷肥	公斤/公顷
PMAXW	水分限制生产情形下所需的磷肥	公斤/公顷
POPT	潜在生产情形下所需的磷吸收量	公斤/公顷
PPERSO	贮藏器官里的最小磷素浓度	公斤/公斤

PPERVE	作物残茬里的最小磷素浓度	公斤/公斤
PREC	所施磷肥的回收系数	公斤/公斤
PWAB	水分限制生产情形下所需的磷素吸收量	公斤/公顷
Q10	温度每增加10°C所增加的相对维持呼吸速率	无单位
R(I, J)	在子程序 RIJTEMA 中使用的数组，它包含每个质地类型地下水位和根系底部之间的距离（表21～34）	厘米
RAIN	每日降雨量	厘米/日
RAIND(I)	包含每月降雨天数的数组	天/月
RAINTB(I)	包含每月降雨量的数组	厘米/月
RD	根的深度	厘米
RDA(I)	在子程序 RAINDA 中的包含每月降雨天数的数组	天/月
RDM	最大的根深度	厘米
REC	施用养分时的回收系数，它是养分类型和农民能力的函数	公斤/公斤
RIJTEM(IK, I)	包含每一质地类型的地下水位和根层底部之间距离的数组（表21～34）	厘米
RMH	根层里的实际基质水头	厘米
RML	叶子的相对维持呼吸率	/日
RMO	贮藏器官的相对维持呼吸率	/日
RMR	根的相对维持呼吸率	/日
RMES	在 25°C 温度下作物的维持呼吸速率	公斤/公顷·日
RMS	茎的相对维持呼吸率	/日

RN	在子程序 RAINDA 里的每日的降雨量	厘米/日
RR	根系的垂直延伸速率	厘米/日
RSM	根层中土壤水分含量的变化率	厘米^3/厘米^3·日
RTB(I)	在子程序 RAINDA 里包含每月降雨量的数组	厘米/月
RTDF	RD小于 10 厘米的天数的计量器	无单位
S	土壤的实际吸附	厘米/日$^{0.5}$
S0	土壤的标准吸附	厘米/日$^{0.5}$
SAL	地面的倾角(度)	度
SALR	地面的倾角(弧度)	弧度
SALT	包含每一个土地单元地面倾角的数组	度
SLA	比叶面积	公顷/公斤
SLATB	包含作为作物发育阶段函数的比叶面积的表	无单位
SM	实际的土壤水分含量	厘米^3/厘米^3
SM0	总孔隙度	厘米^3/厘米^3
SM10	0.10 厘米^3/厘米^3 的空气含量下土壤的含水量	厘米^3/厘米^3
SMCR	临界土壤含水量	厘米^3/厘米^3
SMF	地下水进入根层瞬间固定的土壤含水量	厘米^3/厘米^3
SMFC	田间持水量下的土壤水分含量	厘米^3/厘米^3
SMFCF	固定的田间持水量下的土壤水分含量，也就是 100 厘米的基质吸力	厘米^3/厘米^3
SMW	在萎蔫点的土壤含水量	厘米^3/厘米^3

SOBAS1	养分限制下的贮藏器官干物质产量	公斤/公顷
SOBAS2	水分加养分限制下的贮藏器官干物质产量	公斤/公顷
SOILTY	说明每一土地单元的土壤质地类型的表	无单位
SOOPT	贮藏器官的潜在干物质产量	公斤/公顷
SOPE	传导层的导电率	厘米/天
SPA	比荚面积	公顷/公斤
SPAN	叶的生存期	天
SR	地表的径流的速率	厘米/天
SS	地表实际贮水量	厘米
SSA	比茎面积	公顷/公斤
SSMAX	地表最大贮水量	厘米
SSR	在一个时间间隔里(=SS/DELT)地表有效的实际贮水量	厘米/日
STARTD	作物生长开始的日期	日
STBAS1	养分限制时的茎干物质产量	公斤/公顷
STBAS2	水分加养分限制时的茎干物质产量	公斤/公顷
STOPT	茎的潜在干物质产量	公斤/公顷
SURRO	地面粗糙度	厘米
SURROT	说明每一土地单元地面粗糙度的表	厘米
SWDEP	土壤水分的消耗比例	无单位
SWDPTB	土壤水分的消耗比例与潜在蒸腾速率的表	无单位
T	实际蒸腾速率	厘米/日
T0	潜在蒸腾速率	厘米/日

TAB1	作物相对产量与由于病虫害（敏感性强）造成的减产的关系	无单位
TAB2	作物相对产量和由于病虫害（较敏感）造成减产的关系	无单位
TADW	地上部总干重(活体)	公斤/公顷
TBIRR(I)	包含每月的有效灌溉率的数组	厘米/月
TCC3M	气温与总同化速率的减少因子之间的关系(温带的C_3作物)	无单位
TCC3T	气温与总同化速率的减少因子之间的关系(热带作物C_3)	无单位
TCC4	气温与总同化速率的减少因子之间的关系(C_4作物)	无单位
TDW	作物总干物质(活体)	公斤/公顷
TEFF	温度对维持呼吸的影响	无单位
TEMP	日平均温度	°C
TEMPTB(I)	平均温度与天数的表	无单位
TEXTCL	土壤质地类型(字母数字)	无单位
TM	最大蒸腾速率	厘米/日
TSC1	在基质水头与导水率关系中特定质地的经验常数 1	厘米$^{2.4}$/日
TSC2	在基质水头与导水率关系中特定质地的经验常数 2	/厘米
TSGF	在基质水头与土壤含水量关系中特定质地的几何因子	/厘米
TSR	总的地表径流量	厘米
TWLV	叶组织的总干重	公斤/公顷
TWRT	根组织的总干重	公斤/公顷
TWSO	贮藏器官的总干重	公斤/公顷
TWST	茎组织的总干重	公斤/公顷

UPTB	包含生长周期和相对基本吸收量间关系的表	无单位
WLV	活叶的总干重	公斤/公顷
WRT	活根的总干重	公斤/公顷
WSO	活贮藏器官的总干重	公斤/公顷
WST	活茎的总干重	公斤/公顷
WUSE	整个作物生长周期中蒸腾的总用水量	厘米
WUSEO	潜在生产情形下整个作物生长周期中蒸腾的总用水量	厘米
WUSEW	水分限制生产情形下整个作物生长周期中蒸腾的总用水量	厘米
XIE	有效灌溉速率	厘米/日
XIM	实际渗透速率	厘米/日
XIMMAX	最大渗透速率	厘米/日
ZT	实际地下水位深度	厘米
ZTF	地下水进入根层的瞬间确定的地下水深度	厘米
ZTMA	最大地下水深度	厘米
ZTMAT	包含每一土地单元最大地下水深的数组	厘米
ZTMI	最小地下水深度	厘米
ZTMIT	包含每一土地单元最小地下水深的数组	厘米
ZTMRF	地下水深和根深之间的距离	厘米

（刘菊生译　胡文林校）

附录1 练习答案

练 习 1

通过插值法，可从表1（C_3类植物种）和表2（C_4类植物种）得到结果。

通过两个点（X_1，Y_1）和（X_2，Y_2）间的插值法，求对应于X值（这里指纬度）的Y值（这里指总同化作用），一般用的公式是：

$$Y=Y_1+(Y_2-Y_1)\cdot(X-X_1)/(X_2-X_1)$$

练 习 2

已知LAI＝1.5，由方程5得到：$fh=1-e^{-0.9\times1.5}=0.7$

从练习1得到的总同化作用乘以这一降低因数（0.7），就可得到LAI＝1.5时的CO_2同化作用值。

练 习 3

根据表6给出的计算方案，将你所在地区的纬度代入内插法计算程序中。

练 习 4

指定温度的发育速率（日$^{-1}$）

温度（°C）	10	17.5	25	32
○	0.0091	0.0143	0.0192	0.0213
•	0.0098	0.0147	0.0192	0.0222
×	0.0118	0.0192	0.0238	0.0233
●	0.0143	0.0250	0.0303	0.0333
□	-	0.0114	0.0192	0.0250

注：在一个很宽的温度范围内，温度和发育速率之间呈线性关系。

练　习　5

两个栽培种开花以后时期所需的TU值均为650日·°C。

20°C时，开花以后时期的持续时间为650/20＝32.5天，因此，发育速率为1／32.5＝0.031／日。

25°C时，持续时间为650/25＝26天，发育速率等于1/26＝0.038/日。

练　习　6

在帕布琼，平均最高气温为27°C，平均最低气温为20°C。因此，平均温度等于(27＋20)／2＝23.5°C。在长希安，最高和最低平均气温分别为24和17°C，所以平均温度为20.5°。

地区	帕布琼	长希安
出苗期	6月8日	6月5日
开花期	9月16日	10月1日
开花前时期的持续时间	100天	118天
成熟期	10月13日	11月2日
开花后时期的持续时间	27天	32天
平均温度	23.5°C	20.5°C
开花前时期的TU值	100×23.5＝2350日°C	118×20.5＝2419日°C
开花后时期的TU值	27×23.5＝634.5日°C	32×20.5＝656日°C
开花前时期的发育速率	1/100＝0.01/日	1/18＝0.0085/日
开花后时期的发育速率	1/27＝0.037/日	1/32＝0.0313/日

练　习　7　见412—414页

练　习　8

开花以前的TU值＝760日°C

开花以后的TU值＝660日°C

临界温度(T)＝10°C

抽丝以前时期的发育阶段(DVS)（抽丝结束时，DVS＝1.0）根据以下公式计算：

练 习 7

品 种"A"

收获日	总生物量	总增量	发育阶段 结束	发育阶段 平均	分配比例 叶	分配比例 茎	叶 重量	叶 增量	茎 重量	茎 增量	籽粒 重量	籽粒 增量
0	50		0				47.5		2.5		0	
		50		0.053	0.765	0.235		38.3		11.7		0
10	100		0.105				85.8		14.2		0	
		100		0.158	0.571	0.429		57.1		42.9		0
20	200		0.211				142.9		57.1		0	
		200		0.263	0.544	0.456		108.8		91.2		0
30	400		0.316				251.7		148.3		0	
		400		0.368	0.533	0.467		213.2		186.8		0
40	800		0.421				464.9		335.1		0	
		600		0.474	0.523	0.477		313.8		286.2		0
50	1400		0.526				778.7		621.3		0	
		800		0.579	0.465	0.535		372.0		428.0		0
60	2200		0.632				1150.7		1049.3		0	
		1100		0.685	0.366	0.634		402.6		697.4		0
70	3300		0.737				1553.3		1746.7		0	
		1300		0.790	0.246	0.754						
								319.8		980.2		0

（续表）

80	4600		0.842				1875.1		2726.9		0	
		1700		0.895	0.123	0.877		209.1		1490.9		0
90	6300		0.947				2082.2		4217.8		0	
		2100		>1.0	0.015*	0.485*						
								31.5		1018.5		1050*
100	8400		>1.0				2113.7		5236.3		1050	
		2100		>1.0	0	0		0		0		2100
110	10500										3150	
		1400										1400
120	11900										4550	
		600										600
125	12500										5150	

* 开花在第95天，所以在第90天和第95天之间仍有叶和茎的生长。平均发育阶段为第92.5天的发育速率，即0.974。根据图12，分配到叶片的比例等于0.03。10天的总干重增量等于2100公斤/公顷，所以5天的干重增量应为1050公斤/公顷。因此，叶干重增量为0.03×1050＝31.5公斤/公顷。

品 种"B"

收获日	总生物量	总增量	发育阶段 结束	发育阶段 平均	分配比例 叶	分配比例 茎	叶 重量	叶 增量	茎 重量	茎 增量	籽粒 重量	籽粒 增量
0	50	50	0	0.063			47.5		2.5		0	
10	100	100	0.125	0.188	0.731	0.269	84.1	36.6	15.9	13.4	0	0
20	200	200	0.250	0.313	0.556	0.444	139.7	55.6	60.3	44.4	0	0
30	400	400	0.375	0.438	0.539	0.461	247.4	107.7	152.6	92.3	0	0
40	800	600	0.500	0.563	0.526	0.474	457.9	210.5	342.1	189.5	0	0
50	1400	800	0.625	0.688	0.476	0.524	743.7	285.8	656.3	314.2	0	0
60	2200	1100	0.750	0.818	0.363	0.637	1034.1	290.4	1165.9	509.6	0	0
70	3300	1300	0.875	0.938	0.219	0.781	1275.0	240.9	2025.0	859.1	0	0
80	4600	1700	1.000	>1.0	0.073	0.927	1369.9	94.9	3230.1	1205.1	0	0
90	6300	1800	>1.0		0	0		0		0	1700	1700
100	8100	1400									3500	1800
110	9500										4900	1400

$$DVS=\sum_{i=0}^{t_1}(T_a-10)/\text{开花以前的TU值}$$

抽丝以后时期的发育阶段可根据以下公式计算：

$$DVS=1+\sum_{i=t_1}^{t_2}(T_a-10)/\text{开花以后的TU值}$$

其中：T_a 为日期 i 的平均气温，

t_0是出苗日，

t_1为抽丝日，

t_2为成熟日。

日 期	T_a-10	$\Sigma(T_a-10)$	DVS	日 期	T_a-10	$\Sigma(T_a-10)$	$\Sigma(T_a-10)$	DVS
6月 1	6	6	0.0	7月28	16	579		
2	5	11		29	15	594		
3	4	15		30	14	608		0.8
4	6	21		31	15	623		
5	8	29		8月 1	14	637		
6	7	36		2	16	653		
7	6	42		3	15	668		
8	3	45		4	16	684		
9	0	45		5	17	701		
10	−1	45		6	14	715		
11	2	47		7	15	730		
12	6	53		8	14	744		
13	10	63		9	16	760		1.0
14	13	76	0.1	10	17	777	17	
15	12	88		11	18	795	35	
16	9	97		12	20	815	55	
17	8	105		13	21	836	76	
18	8	113		14	18	854	94	
19	6	119		15	21	875	115	
20	10	129		16	20	895	135	
21	12	141		17	19	914	154	
22	11	152	0.2	18	18	932	172	

23	14	166		19	21	953	193	
24	11	177		20	22	975	215	
25	10	187		21	21	996	236	
26	9	196		22	20	1016	256	
27	10	206		23	19	1035	275	
28	9	215		24	19	1054	294	
29	13	228	0.3	25	20	1074	314	
30	8	236		26	16	1090	330	1.5
7月 1	10	246		27	23	1113	353	
2	12	258		28	18	1131	371	
3	11	269		29	19	1150	390	
4	9	278		30	16	1166	406	
5	8	286		31	23	1189	429	
6	8	294		9月 1	23	1212	452	
7	10	304	0.4	2	20	1232	472	
8	9	313		3	20	1252	492	
9	11	324		4	19	1271	511	
10	11	335		5	18	1289	529	
11	12	347		6	20	1309	549	
12	13	360		7	19	1328	568	
13	20	380	0.5	8	18	1346	586	
14	10	390		9	19	1365	605	
15	14	404		10	18	1383	623	
16	14	418		11	17	1400	640	
17	13	431		12	20	1420	660	2.0
18	12	443		13	16	1436	676	
19	13	456	0.6	14	15	1451	691	
20	10	466		15	16	1467	707	
21	12	478		16	15	1482	722	
22	13	491		17	14	1496	736	
23	14	505						
24	13	518						
25	14	532	0.7					
26	16	548						
27	15	563						

如果出苗期是6月15日，计算出来的温度和必须减去到6月14日为止的温度和76日°C。

出苗日期 发育阶段	6月1日 日　期	6月15日 日　期
0.	6月1日	6月15日
0.2	6月22日	6月29日
0.4	7月7日	7月13日
0.6	7月19日	7月25日
0.8	7月30日	8月4日
1.0	8月9日	8月13日
1.5	8月26日	8月30日
2.0	9月12日	9月17日
出苗和抽丝之间的天数	69天	59天
平均发育速率	0.01449/日	0.01695/日
抽丝和成熟之间的天数	34天	35天
平均发育速率	0.02941/日	0.02857/日

练　习　9

DVS	出苗后的天数	叶重的增加数	总叶重	茎重的增加数	总茎重	总重的增加数	总干重
0.0	0	—	—	—	—	—	—
0.154	10		200		0		
		1200		300		1500	
0.308	20		1400		300		
		1400		500		1900	
0.462	30		2800		800		
		1700		1200		2900	
0.615	40		4500		2000		
		1200		1800		3000	
0.769	50	5700	50	5700		3800	9000

DVS是在恒定温度下，考虑到出苗和吐丝之间的间隔为65天，而进行计算的。

总重增量分配到叶片的比例与作物的平均发育阶段的关系列于下表(图74)。

DVS	分配到叶片的比例
0.077	1.0
0.231	0.8
0.385	0.737
0.539	0.586
0.692	0.400

练　习　10

Q以公斤／公顷为单位。Δt以天数表示。因此，R_q的单位为公斤／公顷·日。

$Q_{t+\Delta t}=Q_t+R_q\cdot\Delta t=200+15\times10=350$公斤/公顷

练　习　11

$Q_{t+\Delta t}=Q_t+R_q\cdot\Delta_t=Q_t+a\cdot Q_t\cdot\Delta t=Q_t\cdot(1+a\cdot\Delta t)$

数值：$Q_o=5$公斤／公顷；$a=0.1$／日。应用不同时间步长得到的Q_{30}的不同值与实际值比较表明，时间步长愈小，则所得结果愈精确。假设Q_t在一定时期内不变，则时间步长为5天的结果不如时间步长为3天的结果精确。一般来说，随着时间步长的减小，方程的解可得到改善。

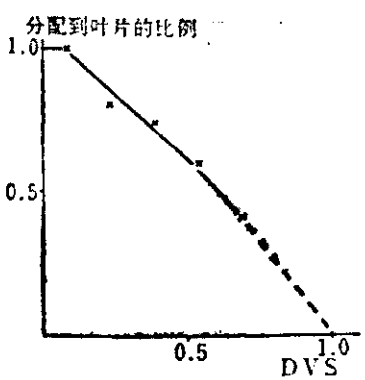


图 74　玉米的同化产物分配到叶片的比例与发育阶段的函数关系

这里所描述的现象称之为指数生长。其中生长速率与现有数量成比例，n 个时间间隔后的数量的一般表达式如下：

$\Delta t=5$			$\Delta t=3$			$\Delta t=1$		
天	Q_i	$R_q \cdot \Delta t$	天	Q_i	$R_q \cdot \Delta t$	天	Q_i	$R_q \cdot \Delta t$
0	5		0	5		0	5	
5	7.5	2.5	3	6.5	1.5	1	5.5	0.50
10	11.25	3.75	6	8.45	1.95	2	6.05	0.55
15	16.875	5.625	9	10.985	2.535	3	6.655	0.605
20	25.313	8.438	12	14.281	3.296	4	7.3205	0.6655
25	37.969	12.656	15	18.565	4.285	5	8.0526	0.7321
30	56.953	18.984	18	22.134	5.569	6	8.8579	0.8053
			21	31.374	7.240	7	9.7437	0.8858
			24	40.787	9.412	8	10.7181	0.9744
			27	53.022	12.236	9	11.7899	1.0718
			30	68.929	15.907	10	12.9689	1.1790
						11	14.2658	1.2969
						12	15.6924	1.4266
						13	17.2616	1.5692
						14	18.9878	1.7262
						15	20.8866	1.8988
						16	22.9753	2.0887
						17	25.2728	2.2975
						18	27.8001	2.5273
						19	30.5801	2.7800
						20	33.6381	3.0580
						21	37.0019	3.3638
						22	40.7021	3.7002
						23	44.7723	4.0702
						24	49.2495	4.4772
						25	54.1745	4.9250
						26	59.5920	5.4175
						27	65.5512	5.9592
						28	72.1063	6.5551
						29	79.3169	7.2106
								7.9317

$Q_1 = Q_0 \cdot (1 + \Delta t \cdot a)$

$Q_2 = Q_1 \cdot (1 + \Delta t \cdot a)$

$Q_n = Q_{n-1} \cdot (1 + \Delta t \cdot a)$

Q_n的表达式可以转换成：

$Q_n = Q_0 \cdot (1 + \Delta t \cdot a)^n$

Q_n是n个步长的Δt以后的值，因此n 可以由时间/Δt代替：

$Q_n = Q_0 \cdot (1 + \Delta t \cdot a))^{时间/\Delta t}$

或$Q_n = Q_0 \cdot ((1 + 1/X)^x)^{a \cdot 时间}$

其中$X = 1/(\Delta t \cdot a)$

对于描述指数生长的方程来说，上述处理有助于得到所谓的分析解。

当Δt接近于零时，X近似无穷大，Q_n的表达式近似于：

$Q = Q_0 \cdot e^{a \cdot 时间}$。e为自然对数底：

$$e = \lim_{X \to \infty} (1 + 1/X)^x = 2.7182$$

带e的这一方程可使时间为30天的Q的精确解能在袖珍计算器上进行运算：

$Q_{30} = Q_0 \cdot e^{0.1 \times 30}$

$e^{0.1 \times 30} = e^3 = 20.09$

$Q_{30} = 5 \times 20.09 = 100.43$

这一结果表明，步长为1天仍然导致对时间为30天的Q值的低估。

练　习　12　见412—423页

练　习　13

用千焦/米^2·秒表示的太阳常数为1.4，即：

1.4×60千焦/米^2·分＝1.4×60/10000千焦/厘米^2·分＝1.4×60×1000/10000焦/厘米^2·分＝1.4×60/10焦/厘

（练习12表）

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	T_a	TSUM	DVS	GASS	MRES	ASAG	DMI	FR	IWRT	WRT
初 始 期		0.	0.							40.
10 天 一 期										
1 月 3	23.4	234	0.16	54.5	2.1	52.4	36.7	0.30	13.9	179
2 月 1	24.5	479	0.32	139.8	7.6	132.2	92.5	0.19	17.6	355
2 月 2	24.5	724	0.48	268.6	21.5	247.3	171.3	0.075	12.8	483
2 月 3	24.5	969	0.65	345.9	47.2	298.7	209.1	0.07	14.6	629
3 月 1	24.8	1217	0.81	393.0	78.5	314.5	220.1	0.065	14.3	772
3 月 2	24.8	1465	0.98	393.0	111.7	281.3	196.9	0.04	7.9	849
3 月 3/1	24.8	1490	1.0	393.0	14.3	25.0	17.5	0.	0.	849
3 月 3/9	24.8	1713	1.27	393.0	97.2	295.8	236.6	0.	0.	849
4 月 1	25.3	1966	1.58	447.0	112.7	334.3	267.4	0.	0.	849
4 月 2	25.3	2219	1.90	447.0	134.1	312.9	250.3	0.	0.	849
4 月 3/3	25.3	2295	2.0	433.7	146.3	287.4	229.9	0.	0.	849

（续表）

	11 FL	12 IWLV	13 WLV	14 FS	15 IWST	16 WST	17 FG	18 IWGR	19 WGR	20 LAI
初 始 期			100.			0.			0.	0.25
10 天 一 期										
1 月 3	0.395	14.5	245	0.225	8.3	83	0.	0.	0.	.6125
2 月 1	0.44	40.7	652	0.37	34.2	425	0.	0.	0.	1.63
2 月 2	0.485	83.1	1483	0.44	75.4	1179	0.	0.	0.	3.66
2 月 3	0.44	92.0	2403	0.49	102.5	2204	0.	0.	0.	6.0
3 月 1	0.29	63.8	3041	0.645	142.0	3624	0.	0.	0.	7.6
3 月 2	0.10	19.7	3238	0.36	70.9	4333	0.5	112.4	1124	8.1
3 月 3/1	0.01	18.0	3256	0.04	72.0	4405	0.95	97.0	1221	8.1
3 月 3/9	0.	65.0	2671	0.	0.	4405	1.	236.6	3351	6.7
4 月 1	0.	−53.3	2138	0.	0.	4405	1.	267.4	6025	5.3
4 月 2	0.	−42.6	1712	0.	0.	4405	1.	250.3	8528	4.3
4 月 3/3	0.	−34.0	1610	0.	0.	4405	1.	229.9	9218	4.0

	21 TADW	22 TDW	23 TDWL	24 Lineno	
初 始 期	100.	140.	140.	a	
10 天 一 期					
1 月 3	326	507	507	b	
2 月 1	1077	1432	1432	c	
2 月 2	2662	3145	3145	d	
2 月 3	4607	5236	5236	e	
3 月 1	6665	7437	7437	f	
3 月 2	8695	9544	9544	g	112.4＝196.9×0.5×0.8/0.7
3 月 3/1	8876	9725	972	h	
3 月 3/9	11006	11855	11270	i	
4 月 1	13630	14529	13411	j	
4 月 2	16183	17032	14639	k	
4 月 3/3	16872	17721	16075	l	

米^2·分＝1.4×6/4.182卡/厘米^2·分＝2卡/厘米^2·分。

练　习　14

$R_1=R_A\cdot(a_A+b_A\cdot nN^{-1})$，其中$a_A=0.29$，$b_A=0.42$

月份	n（小时）	N（小时）	R_A（百万焦/米^2·日）	R_1（百万焦/米^2·日）
1	7.1	11.4	29.9	16.5
2	5.9	11.7	32.9	16.5
3	5.9	12.0	35.8	17.6
4	5.1	12.5	37.5	17.3
5	4.4	12.8	37.7	16.4
6	4.0	13.0	37.5	15.7
7	3.7	12.9	37.4	15.4
8	2.9	12.7	37.3	14.4
9	3.3	12.3	36.4	14.7
10	3.9	11.8	33.8	14.5
11	4.9	11.5	30.7	14.4
12	5.9	11.3	28.8	14.7

练　习　15

$R_B=\sigma\cdot T_k^4\cdot(0.56-0.079e_a^{0.5})\cdot(0.1+0.9nN^{-1})$

单位分析：

焦/米^2·日＝(焦/米^2·日·开^4)开^4·(无量纲)·(无量纲)

e_a为毫巴，系数0.079为毫巴$^{-0.5}$；因此，$(0.56-0.079e_a^{0.5})$为无量纲。

当e_a用公斤/米^3(20°C)，此系数为：

0.079毫巴$^{-0.5}$×(公斤/米^3·毫巴)$^{-0.5}$

$=0.079\times[(20+273)/0.217]^{-0.5}$

$=0.00215$(公斤/米^3)$^{-0.5}$

当e_a用毫米汞柱时，此系数为：

0.079毫巴$^{-0.5}\times$(毫米汞柱/毫巴)$^{0.5}$

$=0.079\times(0.75)^{-0.5}$

$=0.091$毫米汞柱$^{-0.5}$

练　习　16

$R_B=\sigma\cdot T_k^4\cdot(0.56-0.079e_a^{0.5})\cdot(0.1+0.9nN^{-1})$

月份	$(0.56-0.079e_a^{0.5})$*	$\sigma\cdot T_k^4$ (百万焦/米²·日)	$0.1+0.9nN^{-1}$	R_B (百万焦/米²·日)
1	0.1853	39.16	0.6605	4.79
2	0.1603	39.90	0.5539	3.54
3	0.1427	40.71	0.5425	3.15
4	0.1287	41.19	0.4 72	2.48
5	0.1259	40.92	0.4094	2.11
6	0.1331	40.60	0.3769	2.04
7	0.1368	40.33	0.3581	1.98
8	0.1259	40.22	0.3055	1.55
9	0.1287	40.33	0.3415	1.77
10	0.1324	40.28	0.3975	2.12
11	0.1495	39.90	0.4835	2.88
12	0.1836	38.95	0.5699	4.08

* 原文中将0.079误印为0.79。——译注

练　习　17

$R_N=R_i\cdot(1-r)-R_B$，对于水$r=0.05$。

练　习　18

$h_u=a_u\cdot(1+b_u\cdot u)$，其中$a_u=6.4\times10^5$，$b_u=0.54$

练　习　19

干湿表是测定空气湿度的仪器，因此属于湿度表一类。干湿表通常由两个温度表组成：一个用于测定正常温度；另一个则保持湿润，因湿球表面的蒸发而冷却，它记录所谓的湿球温度T_w。如果屏蔽掉辐射，湿球特性可用方程(11)描述：

（练习17表）

月份	R_I（百万焦/米²·日）	R_B（百万焦/米²·日）	R_N（百万焦/米²·日）
1	16.5	4.79	10.9
2	16.5	3.54	12.1
3	17.6	3.15	13.6
4	17.3	2.48	14.0
5	16.4	2.11	13.5
6	15.7	2.04	12.9
7	15.4	1.98	12.7
8	14.4	1.55	12.1
9	14.7	1.77	12.2
10	14.5	2.12	11.7
11	14.4	2.88	10.8
12	14.7	4.08	9.9

（练习18）

月份	u（米/秒）	h_u（百万焦/米²·日·°C）
1	2.0	1.33
2	2.5	1.50
3	2.8	1.61
4	2.0	1.57
5	2.5	1.50
6	2.5	1.50
7	2.4	1.47
8	2.5	1.50
9	2.3	1.43
10	2.1	1.37
11	2.1	1.37
12	1.4	1.12

$H+LE=0$

将方程(12)和(14)代入上式得到：

$$h_u(T_w-T_a)+k_u(e_s-e_a)\cdot L=0$$

因此，

$$e_a=e_s+h_u\cdot k_u^{-1}\cdot L^{-1}\cdot(T_w-T_a)$$

e_a是干球与湿球温度差的函数，因此，用上述方程能够确定e_a。为此，已有人把它列成计算图表。

湿度计算常数的单位：

$$(\gamma)=(h_u)\cdot(k_u^{-1})\cdot(L^{-1})$$

$$=(焦/米^2\cdot 日\cdot ^\circ C)\cdot(公斤/米^2\cdot 日\cdot 毫巴)^{-1}\cdot(焦/公斤)^{-1}$$

$$=毫巴/^\circ C$$

练　习　20

显热损失为：

$$H=h_u(T_s-T_a)$$

蒸发的热量损失：

$$LE=k_u(e_s-e_a)$$

1月份：$R_I=1.65\times10^7$焦/米^2·日

$R_N=1.09\times10^6$焦/米^2·日

$h_u=13.3\times10^5$焦/米^2·日·°C

$K_u=0.8225$公斤/米^2·日·毫巴

$L\cdot K_u=20.2\times10^5$焦/米^2·日·毫巴

$T_a=26.0$°C

$e_a=22.5$毫巴

$T_s=20$°C时，从图20查出e_s为23.4毫巴，

$$H=13.3\times10^5(20-26)=-79.8\times10^5焦/米^2\cdot 日$$

$$LE=20.2\times10^5(23.4-22.5)=18.2\times10^5焦/米^2\cdot 日$$

平衡$=-61.4\times10^5$焦/米^2·日

$T_s=21°C$时，从图20查出e_s为24.9毫巴，

$H=13.3\times10^5(21-26)=-66.5\times10^5$焦/米^2·日

$LE=20.2\times10^5(24.9-22.5)=48.5\times10^5$焦/米^2·日

平衡$=-18.0\times10^5$焦/米^2·日

$T_s=22°C$时，从图20查出e_s为26.5毫巴，

$H=13.3\times10^5(22-26)=-53.2\times10^5$焦/米^2·日

$LE=20.3\times10^5(26.5-22.5)=81.2\times10^5$焦/米^2·日

平衡$=28\times10^5$焦/米^2·日

$T_s=23°C$时，从图20查出es为28.2毫巴，

$H=13.3\times10^5(23-26)=-39.9\times10^5$焦/米^2·日

$LE=20.2\times10^5(28.2-22.5)=115.1\times10^5$焦/米^2·日

平衡$=75.2\times10^5$焦/米^2·日

$T_s=24°C$时，从图20查出e_s为29.9毫巴，

$H=13.3\times10^5(24-26)=-26.6\times10^5$焦/米^2·日

$LE=20.2\times10^5(29.9-22.5)=149.5\times10^5$焦/米^2·日

平衡$=122.9\times10^5$焦/米^2·日

从图77可知，平衡温度即$LE+H==R_N$时的温度，为23.7°C。

$T_s=23.7°C$时，从图20查出e_s为29.4毫巴，

$H=13.3\times10^5(23.7-26.0)=-30.6\times10^5$焦/米^2·日

$LE=20.2\times10^5(29.4-22.5)=139.4\times10^5$焦/米^2·日

平衡$=108.8\times10^5$焦/米^2·日

在此表面温度下，蒸发速率为：

$$\frac{139.4\times10^5}{2450\times10^3}=5.69\text{公斤/米}^2\cdot\text{日}=5.69\text{毫米/日}$$

练　习　21

露点温度的数值，可以根据相应的水汽压从图22查出，

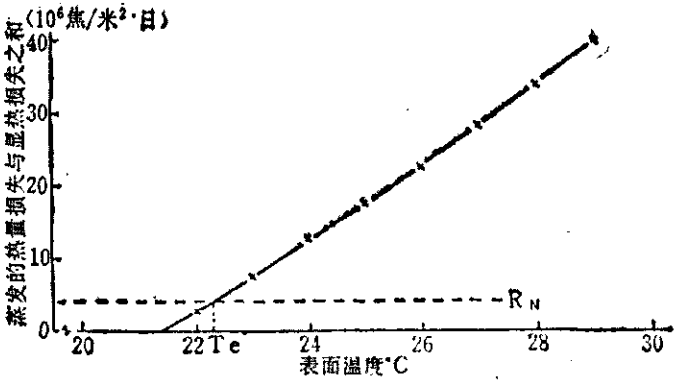


图75　确定水面蒸发的热量损失的图解

也可以按方程(15)求得：

$$e_s = 6.11 \cdot e^{[1.74 \times Ts/(Ts+239)]}$$

上述方程中，若用露点温度(T_d)代替T_s，则得到水汽压e_a。即：

$$e_a = 6.11 \times e^{[17.4 \times T_d/(T_d+239)]}\text{或}$$

$$e_a/6.11 = e^{[17.4 \times T_d/(T_d+239)]}\text{或}$$

$$\ln(e_a/6.11) = 17.4 \times T_d/(T_d+239)\text{或}$$

$$(T_d+239) \times \ln(e_a/6.11) = 17.4 \times T_d\text{或}$$

$$T_d \times \ln(e_a/6.11) + 239 \times \ln(e_a/6.11) = 17.4 \times T_d\text{或}$$

$$T_d = 239 \times \ln(e_a/6.11)/[17.4 - \ln(e_a/6.11)]$$

e_a=10毫巴时，$\ln(e_a/6.11) = 0.49$，

$$T_d = (239 \times 0.49)/(17.4 - 0.49) = 6.9°C$$

e_a=15毫巴时，$\ln(e_a/6.11) = 0.90$，

$$T_d = (239 \times 0.90)/(17.4 - 0.90) = 13.0°C$$

e_a=50毫巴时，$\ln(e_a/6.11) = 2.10$，

$$T_d = (239 \times 2.10)/(17.4 - 2.10) = 32.8°C$$

练　习　22

从图22中可查出相应温度点的△值——饱和水汽压曲线线的斜率，即查出温度比所要求的温度高、低1度时的e_s，两者之差除以2即为所求：

$$\Delta(5)=[e_s(6)-e_s(4)]/2$$

或者根据方程(15)来求算：

$$e_s=6.11\times e^{[1.74\times Ts/(Ts+239)]}$$

此方程表示的就是图22中的曲线。曲线的斜率Δ(见图78)等于de_s/dT，因此，根据微分计算理论：

$$\Delta=17.4\times 6.11\times e^{[1.74\times Ts/(Ts+239\times[1-Ts/(Ts+239)]\cdot[Ts+239]}$$ 或，

$$\Delta=17.4\times e_s\times[1-T_s/(T_s+239)]/(T_s+239)$$

T_s	e_s	Δ
2	7.06	0.51
6	7.36	0.65
10	12.29	0.82
14	16.00	1.04
18	20.67	1.30
22	26.49	1.62
26	33.69	2.00
30	42.54	2.44
34	53.35	2.98
38	66.48	3.60

练　习　23

$(\gamma)=$毫巴/°C

$$(\Delta)=\frac{(e_s-e_a)}{(T_s-T_d)}=\frac{\text{毫巴}}{°C}=\text{毫巴}/°C$$

$$\frac{(R_N)}{(h_u)}=\frac{\text{焦}/\text{米}^2\cdot\text{日}}{\text{焦}/\text{米}^2\cdot\text{日}\cdot°C}=°C$$

练　习　24

蒸发面温度等于空气温度时：

$$T_s = T_a = T_a + \frac{\gamma}{\gamma+\Delta} \cdot \frac{R_N}{h_u} - \frac{\Delta}{\gamma+\Delta} \cdot (T_a - T_d)$$

因此，

$$R_N = h_u(T_a - T_d) \cdot \Delta/\gamma$$

若不存在辐射，气温等于露点温度，即水汽饱和空气的温度，则$T_s = T_a$。

若从净辐射获得的能量大于蒸发损失的能量，则$T_s > T_a$，即

$$R_N > h_u(T_a - T_d) \cdot \Delta/\gamma$$

若蒸发的能量损失大于从净辐射获得的能量，则$T_s < T_a$，即，

$$R_N < h_u(T_a - T_d) \cdot \Delta/\gamma$$

不存在辐射时，方程(20)变为：

$$T_s = T_a - \frac{\Delta}{\Delta+\gamma}(T_a - T_d)$$

上述方程中，T_s代表湿球温度，T_d代表露点温度，因此，

$$T_s = T_a - \frac{\Delta}{\Delta+\gamma} \cdot T_a + \frac{\Delta}{\Delta+\gamma} \cdot T_d$$

$$T_s = T_a\left(1 - \frac{\Delta}{\Delta+\gamma}\right) + \frac{\Delta}{\Delta+\gamma} \cdot T_d$$

$$T_s = \frac{1}{\Delta+\gamma}(\gamma \cdot T_a + \Delta T_d$$

练　习　25

根据方程(22)进行计算。

$\gamma = 0.66$毫巴/°C

$L = 2450 \times 10^3$焦/公斤

$$E_0 = \left[\frac{1}{\Delta+\gamma}(\Delta R_N + h_u(e_d - e_a))\right]/L$$

月份	T_a (°C)	e_d (毫巴)	Δ (毫巴/°C)	e_a (毫巴)	R_N (百万焦/米²·日)	h_u (百万焦/米²·日·°C)
1	26.0	33.7	2.00	22.5	10.9	1.33
3	28.9	39.9	2.31	27.9	13.6	1.61
5	29.3	40.9	2.36	30.2	13.5	1.50
7	28.2	38.3	2.23	28.7	12.7	1.47
9	28.2	38.3	2.23	29.8	12.2	1.43
11	27.4	36.6	2.14	27.0	10.8	1.37

单位用公斤/米²·日或毫米/日

月份	E_0
1	5.63
3	6.97
5	6.48
7	5.99
9	5.56
11	5.29

练 习 26

在正文中已解释过，若反射率为 0.25，原来的彭曼方程就很接近潜在蒸发蒸腾。

因此，R_N是不同的。

月份	R_N (百万焦/米·日)	ET_0 (毫米/日)
1	7.59	4.62
3	10.05	5.85
5	10.19	5.42
7	9.57	5.01
9	9.26	4.63
11	7.92	4.39

练　习　27

土壤含粘粒 0.2克/克，粉砂 0.4克/克，属于壤土（据图25）。

基质吸力为1000厘米时：

$$SM_\psi = SM_0 \cdot e^{-\gamma\cdot(\ln\psi)^2} = SM_0 \cdot e^{-\gamma(\ln 1000)^2}$$

据表16，壤土的$SM_0 = 0.503$厘米^3/厘米^3，$\gamma = 0.0180$/厘米^2。由此得到：

$$SM_\psi = 0.503 \times e^{-0.0180\times(\ln 1000)^2} = 0.213\text{厘米}^3/\text{厘米}^3$$

练　习　28

据表 16，查得粉砂粘土的 $SM_0 = 0.507$，$\gamma = 0.0065$。当$SM_\psi = 0.3$ 厘米^3/厘米^{3}时，将数据代入方程(27)$SM_\psi = SM_0 \cdot e^{-\gamma(\ln\psi)^2}$ 得到：

$$0.3 = 0.507 \times e^{-0.0065\times(\ln\psi)^2}$$

把指数项移至等式左边，去掉指数中的负号，有：

$$e^{0.0065\times(\ln\psi)^2} = 0.507/0.3$$

$$(\ln\psi)^2 = \ln(0.507/0.3)/0.0065$$

$$\psi = \exp[(\ln 0.507/0.3)/0.0065)^{0.5}]$$

$$= 7981.2 \text{ 厘米}$$

据方程(29)，重力水头(g_n)等于点n到地下水位之间的垂直距离。在本例中，地下水位距地面 1 米，点 n 距离地面10厘米，因此

$$g_n = 10 - 100 = -90 \text{ 厘米}$$

若土壤为壤土而不是粉砂粘土，$SM_0 = 0.503$，$\gamma = 0.0180$。$SM_\psi = 0.3$厘米^3/厘米^3。基质吸力为：

$$\psi = \exp[(\ln(0.503/0.3)/0.0180)^{0.5}]$$

$$= 212.4 \text{ 厘米}$$

总水头为：

$H_n = \psi + g_n$

$= 212.4 - 90$

$= 122.4$ 厘米

练　习　29

计算基质吸力为 100 厘米时壤土的导水率：

$k_\psi = k_0 \cdot e^{-\alpha x \psi}$〔方程(30)，因为 ψ 小于吸力极限 ψ_{max}〕

从表 17 查出对于壤土有：

$k_0 = 5.0$ 厘米/日，$\alpha = 0.023$(1/厘米)，$\psi_{max} = 300$ 厘米

$\psi = 100$ 厘米时，$k_\psi = 5.0 \times e^{-0.023 \times 100} = 0.50$ 厘米/日

$\psi = 1000$ 厘米时(大大超过 $\psi_{max} = 300$)，必须采用方程(31)：

$k_\psi = a \cdot \psi^{-1.4}$

根表17，壤土的 $a = 14.4$厘米$^{2.4}$/日

$k_{1000} = 14.4 \times 100^{-1.4} = 0.00091$ 厘米/日

练　习　30

由表 16 和表 18 查出，壤土的 $SM_0 = 0.503$，$S_0 = 11.73$ 厘米/日$^{0.5}$，$A = 3.97$厘米/日，$SM_\psi = 0.35$ 厘米^3/厘米^3，$\Delta t =$ 3 小时 $= 0.125$ 日。由方程(33)和(34)得：

$S = S_0 \cdot (1 - SM_\psi / SM_0) = 11.73 \times (1 - 0.35/0.503)$

$= 3.568$ 厘米/日$^{0.5}$

$IM_{max} = S \cdot (\Delta t)^{0.5} + A = 3.568 \times 0.125^{-0.5} + 3.97$

$= 14.06$ 厘米/日

0.125 天的总入渗为 $14.06 \times 0.125 = 1.76$厘米。此值大于降雨量 1.5 厘米，因此不会发生地面径流。用 $\Delta t =$ 6 小时 $= 0.25$ 天代替 $\Delta t = 0.125$ 天，得

$IM_{max} = 3.568 \times 0.25^{-0.5} + 3.97 = 11.11$ 厘米/日当按同样强度降 6 小时的雨时，则总降雨量为 3 厘米。此值大于

$11.11 \times 0.25 = 2.78$ 厘米（6 小时内土壤的入渗），因此会产生地面径流。

练　习　31

$E_p = E_d \cdot E_f \cdot E_i$〔方程(36)〕，采用表19，在小规模灌溉（<1000公顷）的预定方案中，

$E_i = 0.7$

对于经弯曲沟渠灌溉的小田块，$E_f = 0.7$

壤土采用地面灌溉时，$E_d = 0.7$

因此，

$E_p = 0.7 \times 0.7 \times 0.7 = 0.343$

练　习　32

$E_m = E_0 \cdot e^{-0.4 \times LAI} = 0.5 \times e^{-0.4 \times 3} = 0.15$厘米/日

根据表 21～34，$Z_t = 100$ 厘米，$\psi = 1000$ 厘米时，14 种土壤毛管上升速率分别为：

1. 粗砂土	CR<0.02 厘米/日，	因此形成覆盖层
2. 壤质砂土	CR<0.02 厘米/日，	因此形成覆盖层
3. 细砂土	CR=0.02 厘米/日，	因此不形成覆盖层
4. 细砂壤土	CR>0.5 厘米/日，	因此不形成覆盖层
5. 粉砂壤土	CR>0.5 厘米/日，	因此不形成覆盖层
6. 壤土	CR=0.5 厘米/日，	因此不形成覆盖层
7. 黄土性壤土	CR=0.2 厘米/日，	因此不形成覆盖层
8. 砂质粘壤土	CR>0.5 厘米/日，	因此不形成覆盖层
9. 粉砂粘壤土	CR=0.2 厘米/日，	因此不形成覆盖层
10. 粘壤土	CR=0.1 厘米/日，	因此形成覆盖层
11. 轻粘土	CR>0.5 厘米/日，	因此不形成覆盖层
12. 粉砂粘土	CR<0.15 厘米/日，	因此形成覆盖层
13. 重粘土	CR=0.02 厘米/日，	因此形成覆盖层

14. 泥炭土　　CR<0.06 厘米/日，因此形成覆盖层

练　习　33

将坡度$\phi=10°$，d=20厘米，犁沟夹角$\delta=30°$代入方程(40)中，得到：

$$SS_{max}=0.5\times d\cdot\frac{\sin^2(\sigma-\phi)}{\sin\sigma}\cdot\frac{[tg(\sigma+\phi)]^{-1}+[tg(\delta-\phi)]^{-1}}{2\times\cos\phi\times\cos\sigma}$$

$$=0.5\times20\times\frac{\sin^2(20)}{\sin30}\cdot\frac{[tg(40)]^{-1}+[tg(20)]^{-1}}{2\times\cos10\times\cos30}$$

$$=5.4\text{ 厘米}$$

这比从图 26 中查出的数值 5.5 厘米稍低一些。

练　习　34

已知：$\Delta t=10$天，P=0.5厘米/日，$\psi=623$厘米，LAI=4.0，$SS_t=0$ 厘米，$\phi=10°$，d=2 厘米，$\sigma=30°$，$E_0=0.4$ 厘米/日，$Z_t=150$厘米，

(1)$IM_{max}=S_0\cdot(1-SM_\psi/SM_t)\cdot(\Delta t)^{-0.5}+A$ 对粘壤土，$SM_0=0.445$ 厘米^3/厘米^3，A=0.76 厘米/日，$S_0=4.70$ 厘米/日$^{0.5}$，$\gamma=0.0058$

$$SM_\psi=SM_0\cdot e^{-\gamma(\ln\psi)^2}=0.445\times e^{-0.0058\times(\ln623)^2}$$

$$=0.35\text{ 厘米}^3/\text{厘米}^3$$

$$IM_{max}=4.7\times(1-0.35/0.445)\times10^{-0.5}+7.6$$

$$=1.08\text{ 厘米/日}$$

(2)由图 28 知，SS_{max}为 0.5～0.6 厘米。据方程(40)，$SS_{max}=0.54$厘米(此结果留待后用)。

(3)P=0.5 厘米/日

(4)$I_e=0$厘米/日

(5) $E_m = E_0 \times e^{-0.4 \times I.AI} = 0.4 \times e^{-0.4 \times 4}$

$= 0.08$ 厘米/日

(6) 根据方程(39)计算E_a:

$E_a = E_m \cdot (SM_\psi - SM_{16000}/3)/(SM_0 - SM_{16000}/3)$

$SM_{16000} = 0.445 \times e^{-0.0058 \times (\ln 16000)^2}$

$= 0.258$ 厘米^3/厘米^3

$SM_0 = 0.445$

$E_a = 0.08 \times (0.35 - 0.258/3)/(0.445 - 0.258/3)$

$= 0.059$厘米/日

(7) $Q = P + I_e - E_a - IM_{max}$

$= 0.5 + 0 - 0.06 - 1.08$

$= -0.64$厘米/日

(8)和(9)，$Q < 0$，因此将$-Q$与$SS_t/\Delta t$比较。$SS_t = 0$，故$-Q > SS_t/\Delta t$

$IM = P + I_e - E_a + SS_t/\Delta t = 0.5 + 0 - 0.06 + 0$

$= 0.44$ 厘米/日

$DS = SS_t/\Delta t = 0$ 厘米/日

$SR = 0$ 厘米/日

练　习　35

a. $\psi > g_n$，故可能发生水分向上移动。

b. 已知 RD＝100 厘米，$\psi = 300$ 厘米，$Z_t = 250$ 厘米，土壤质地类型为壤质土，所以

$$CR = \frac{k_0 \cdot (e^{-\alpha \cdot \psi} - e^{-\alpha \cdot (Zt - RD)})}{e^{-\alpha \cdot (Zt - RD)} - 1}$$

$$= \frac{5.0 \times (e^{-0.0231 \times 300} - e^{-0.0231 \times 150})}{e^{-0.0231 \times 150} - 1}$$

$= 0.156$ 厘米/日

c. 据表 26，CR 约为 0.15 厘米/日（根系到地下水位之间的距离为 250－100＝150 厘米）

d. 在任何时刻，水分只能向一个方向移动，即 CR＞0 时，则 $D=0$；或者相反。因此

$(CR-D)=CR=0.15$ 厘米/日

练　习　36

已知RD＝100厘米，$\psi=100$厘米，$Z_t=250$ 厘米，而$g_n=100-250=-150$厘米，水分向下流动。

$H_n=\psi+g_n=100-150=-50$ 厘米（负号表示水分向下流动）

$D=k_\psi=k_0\cdot e^{-\alpha\cdot\psi}=5.0\times e^{-0.0231\times100}$

$=0.5$厘米/日

若D＞0，则CR－D＝－D。因此，

CR－D＝－0.5厘米/日

练　习　37

利用练习 34 的数据，并确定 RD＝75 厘米。

$H_n=\psi-(Z_t-RD)=623-(150-75)$

$=548$ 厘米

$(CR-D)=CR$

据表30，在这 75 厘米的距离内，CR＝0.175 厘米/日。

练　习　38

利用练习 34 的数据并假定 $ET_0=0.35$ 厘米/日。$E_0=0.4$ 厘米/日，$\psi=623$厘米，LAI＝4.0。

（1）$T_0=ET_0-0.1\times E_0=0.35-0.1\times0.4=0.31$ 厘米/日

（2）$T_m=(1-e^{-0.8\times LAI})\cdot T_0=(1-e^{-0.8\times4})\times0.31$

$=0.297$厘米/日

（3）$SM_\psi=0.35$厘米^3/厘米^3（练习34的第 1 步）

(4) $SM_{cr}=(1-p)\cdot(SM_{100}-SM_{16000})+SM_{16000}$

据表 20，

$p=0.8$；据练习 34 的第 6 步，$SM_{100}=0.393$ 厘米^3/厘米^3，

$SM_{16000}=0.258$厘米^3/厘米^3

因此，

$$SM_{cr}=(1-0.8)\times(0.393-0.258)+0.258$$
$$=0.285\text{厘米}^3/\text{厘米}^3$$

(5) $SM_{10}=0.445\times e^{-0.0058\times(\ln 10)^2}$

$$=0.432\text{厘米}^3/\text{厘米}^3$$

(6) $SM_{\psi}<SM_{10}$和SM_{100}，但$SM_{\psi}>SM_{16000}$和SM_{cr}，因此

$T=T_m$

练　习　39

$RSM=[IM+(CR-D)-T]/RD$　　(方程24)

已知：$RD=75$ 厘米

$IM=0.445$厘米/日(练习 34 的第 8～9 步)

$(CR-D)=0.175$厘米/日(练习37)

$T=0.297$厘米/日(练习 38 第 6 步)

故，

$$RSM=(0.445+0.175-0.297)/75$$
$$=0.00431\text{厘米}^3/\text{厘米}^3\cdot\text{日}$$

该时期末土壤水含量为：

$$SM_{\psi(t+\Delta t)}=SM_{\psi(t)}+RSM\cdot\Delta t$$
$$=0.35+0.00431\times 10$$
$$=0.393\text{厘米}^3/\text{厘米}^3$$

该期末的基质势

$$\psi=e^{[(\ln(SM_0/SM_\psi)/\gamma)^{0.5}]}=e^{[(\ln(0.445/0.393)/0.058)^{0.5}]}$$

$$=102.4\text{厘米}$$

练　习　40

已知 RD＝50 厘米，ψ＝100 厘米，DD＝160 厘米，L＝5000 厘米，γ＝8 厘米，M_t＝60 厘米，Δt＝10 天。

$$Z_t = DD - 0.5M_t = 160 - 0.5 \times 60$$
$$= 130 \text{厘米}$$

$$D_{max} = K_0 \cdot M_t / [M_t + L/\pi \cdot \ln(L/(\pi \cdot \gamma))]$$
$$= 5.0 \times \frac{60}{60 + 5000/3.1416 \times (\ln \frac{5000}{3.1416 \times 8})}$$
$$= 0.035 \text{ 厘米/日}$$

据方程(45)，

$$CR = \frac{k_0 \times [e^{-\alpha \cdot \psi} - e^{-\alpha \cdot (Zt - RD)}]}{e^{-\alpha \cdot (Zt - RD)} - 1}$$
$$= 5.0 \times \frac{e^{-0.0231 \times 100} - e^{-0.0231 \times 80}}{e^{-0.0231 \times 80} - 1}$$
$$= 0.346 \text{ 厘米/日}$$

这表明(CR－D)＝0.346 厘米/日

$$\Delta Z = [D_{max} + (CR - D)]/SM_0$$
$$= (0.035 + 0.346)/0.503$$
$$= 0.757 \text{ 厘米/日}$$

$$Z_{(t+\Delta t)} = Z_t + \Delta Z \cdot \Delta t = 130 + 7.6$$
$$= 137.6 \text{厘米}$$

$$M_{(t+\Delta t)} = 2 \times [DD - Z_{(t+\Delta t)}]$$
$$= 2 \times (160 - 137.6) = 44.8 \text{ 厘米}$$

练　习　41

1 公斤 H_2O/公顷・日＝1 分米^3H_2O/公顷・日＝10^6毫米^3H_2O/公顷・日＝$10^6 \times 10^{-10}$毫米^3H_2O/毫米^2・日＝10^{-4}毫米/日

因此，1毫米/日$=10^4$公斤/公顷·日$=10$米^{3}公顷·日。

练 习 42

C_4植物具有气调调节，$T_{tot}=200$毫米H_2O，$RH=75\%$。根据表36，具有调节气孔的C_4植物的蒸腾/同化比率为35公斤H_2O/公斤CO_2。据练习41，200毫米$=2\times10^6$公斤/公顷

$$F_{gct}=T_{tot}/TAR=2\times10^6/35$$
$$=57100\text{公斤}CO_2\text{/公顷}$$

因此，在此环境下共能固定57100公斤CO_2/公顷。根据2.1节的介绍，用总同化作用来估算日干物质产量：

$$\Delta W=0.7\times(F_{gst}-0.015W)$$

生长季节中，W的平均值近似为收获时干物量的一半，即$0.5W_{tot}$。若总生长时间为100天，则方程为：

$$W_{tot}=0.7(F_{gst}-0.75W_{tot})$$

F_{gct}为57100公斤CO_2/公顷，转换为CH_2O为：

$$F_{gst}=57100\times30/44=38932\text{公斤}CH_2O\text{/公顷。}$$
$$W_{tot}=0.7\times(38932-0.75W_{tot})$$
$$=27\ 252-0.525W_{tot}$$

即$1.525W_{tot}=27525$

$$W_{tot}=17870\text{公斤/公顷}$$

根据表36，对不具有调节气孔的C_3植物，TAR$=90$公斤H_2O/公斤CO_2。

$$F_{gct}=T_{tot}/TAR=2\times10^6/90$$
$$=22200\text{公斤}CO_2\text{/公顷}$$

转换为CH_2O则为：15136公斤/公顷。

同理：

$$W_{tot}=0.7\times(15136-0.75W_{tot})$$

$=10595-0.525W_{tot}$

$W_{tot}=6948$公斤/公顷

计算结果表明，水分有限时，C_4植物的光合效率是低光合效率的C_3植物的2.5倍。

练　习　43

图3中直线的斜率的倒数

$$\frac{0.75\times10^{-6}}{2.04\times10^{-3}}=0.37\times10^{-3}\text{公斤}CO_2/\text{米}^3$$

〔单位为：公斤CO_2米$^{-2}$·秒$^{-1}$/(米·秒$^{-1}$)＝公斤CO_2/米^3，后者实际上是浓度单位〕

根据气体定律，把上述单位转换成ppm(v/v)：20°C时，1千摩尔气体所占体积为24米^3。因此，

0.37 公斤 CO_2＝0.37/44×24＝0.2 米^3

浓度下降值为：

0.2×10^{-3}米^3/米^3＝$0.2\times10^{-3}\times10^6$＝200ppm(v/v)

因此，气孔内浓度为：

330－200＝130ppm(v/v)CO_2

练　习　44

由图37，蒸腾系数等于总用水量与非生产性用水量之差除以干物量：

(500－98)毫米/(6.6 吨/公顷)

＝402(公斤 H_2O/米^2)/(0.66 公斤/米^2)

＝609.1 公斤 H_2O/公斤干物质

练　习　45

土壤有效水含量为(0.225－0.09)＝0.135厘米^3/厘米^3。

萎蔫系数＝0.09厘米^3/厘米^3

25毫米水＝2.5厘米^3/厘米^2

土壤体积等于田间持水量除以土壤有效水含量（0.225－0.09）：

$$V_c = 2.5/(0.225-0.09)$$
$$= 18.5\text{厘米}^3$$

由于计算单位为1/厘米^2，因此达到田间持水量的土层深度为18.5厘米。

要使150厘米深度的土层达到田间持水量，需要的水分为：

$$150\times(0.225-0.09) = 20.25\text{厘米}^3/\text{厘米}^2$$
$$= 202.5\text{毫米}$$

练　习　46

根据本模型的理论，DWLV＝WLV×0.2＝400，因此，10天后叶片重量为2000－400＝1600。

本模型的结果与利用时间步长为一天的计算结果存在一定差异。这是由于本模型中所采用的时间步长较长的缘故。这与整个时间间隔内积分数值（WLV）不变这一假设是不相符的。

天	WLV	DWLV
0	2000	40
1	1960	39.2
2	1921	38.4
3	1883	37.7
4	1845	36.9
5	1805	36.1
6	1769	35.4
7	1734	34.7
8	1699	34.0
9	1665	33.3
10	1632	

练　习　47

整个生长季节的蒸腾为 190.7 毫米，其地上部总干物量为 11200 公斤/公顷

根据地上部干物量计算的蒸腾系数：

蒸腾系数＝190.7/11200

＝190.7(公斤H_2O/米^2)/(1.12公斤/米^2)

＝170.3公斤H_2O/公斤干物质

根据总干物量计算的蒸腾系数：

蒸腾系数＝190.7(公斤H_2O/米^2)/(11900 公斤/公顷)

＝160.3公斤H_2O/公斤干物质

练　习　48

N_a (公斤/公顷)	N_g (公斤/公顷)	N_s (公斤/公顷)	N_{tot} (公斤/公顷)
0	49.3	19.8	69.1
50	70.3	20.8	91.1
100	76.9	32.5	109.4
150	90.8	35.2	126.0

(练习 1—48　陈同斌译　杨守春校)

练　习　49

N_a	0	50	100	150
收获指数	0.494	0.512	0.498	0.498

籽粒重用 g 表示，秸秆重用 s 表示。籽/秆比等于g/s，同时收获指数等于g/(g＋s)，因此，g/(g＋s)＝(g/s)/(g/s＋s/s)＝(g/s)/(g/s＋1)。所以HI＝(g/s)/(g/s＋1)

练　习　50

施N的回收率等于(60－20)/100＝0.4

练　习　51

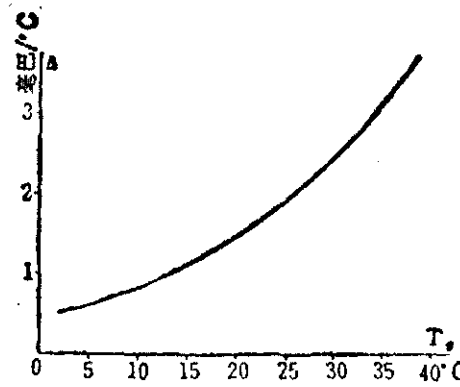


图76　温度与饱和水汽压曲线的斜率间的关系

见图77

练　习　52

从练习49知：收获指数(HI)＝(g/s)/(1＋g/s)

图39a　g/s＝0.53，所以 HI＝0.53/1.53＝0.346

图39b　g/s＝1.3，所以 HI＝1.3/2.3＝0.565

练　习　53

理论效率，以公斤籽粒/公斤N表示

图41a：E_{in}＝1/(0.01＋1.89×0.004)＝57.0

图41b：E_{in}＝1/(0.01＋0.77×0.004)＝76.5

练　习　54

从初始效率计算籽/秆比率：

E_{in}＝410＝1/(0.0011＋0.0005×s/g)

g/s＝0.0005/(1/E_{in}－0.0011)＝0.37

练　习　55

应用的方程是　E_{in}＝1/(n_r＋n_s×新梢/根)

n_r和n_s分别为根和地上部分N素含量的极限，n_r的近似值是0.003，n_s的变幅为0.0065和0.01之间，根/新梢的值在0.8和

1.75 之间。

初始效率是下列有关变量的函数：

	n_g	
新梢/根	0.0065	0.01
1/0.8	89.9	64.1
1/1.75	148.9	114.8

练　习　56

	P/N
1 号地	0.09
2 号地	0.04
3 号地	0.15

根据一般规则，如果P/N比率接近0.15，N素相应短缺，同时如果P/N比率近似 0.04，则磷素相应短缺。可以预期 2 号地施用磷肥将增加吸N 量，同时 3 号地施用 N 肥将增加吸 P 量。1 号地 P/N 比率接近最佳值，因此，N和P 的供应是平衡的。

练　习　57

TADW(总生物量)＝12418 公斤/公顷(表11，21列)

WGR(计算的稻谷产量)＝6844公斤/公顷

管理得好的田埂水稻的例子(这是试验站种的稻田)中，作物的水分供应是最佳的，因此在生产情况 2 条件下的产量将等于生产情况 1 所计算的产量，即 12418 公斤/公顷。

如果不施肥，作物产量为 2000 公斤/公顷，而在生产情况 2 条件下，最高产量为 12418 公斤/公顷，因此，施肥是非常必要的。

如果 N 为最小浓度，则不施肥时作物籽粒含 N 量为

1000×0.01公斤，稻草中为1000×0.004公斤。吸收的N(10+4)等于14公斤。在化学分析中也得到相同的数量。因此可以得出结论，N的有效性限制了作物产量。

练　习　58

对照区完全没有施肥，相应的稻谷产量是：

1952～1953作物年度：1214公斤/公顷，

1953～1954作物年度：1529公斤/公顷，

1954～1955作物年度：1756公斤/公顷。

当对照小区接收了前一年试验施肥的时候，1953～1954年的对照区可能残留有前一年的施肥。1954～1955年的对照区也许在1952～1953和1954～1955年已经施过两次肥。养分的残留表现为较高的自然土壤肥力，从而导致较高的对照区产量。

籽/秆比为2时，产量吸收曲线的斜率E_{in}可以按下式进行计算：

$$E_{in}=\frac{Y}{Y\times 0.0078+(2\times Y)\times 0.0036}=66.7\text{公斤/公斤}$$

式中2×Y代表稻草产量等于籽粒产量的2倍。

连续三年从对照区吸收的N量为Y/E_{in}：

1952～1953作物年度吸收量：1214/66.7＝18.2公斤/公顷

1953～1954作物年度吸收量：1529/66.7＝22.9公斤/公顷

1954～1955作物年度吸收量：1756/66.7＝26.3公斤/公顷

练　习　59

当施P不再增产的时候，显然P是充足的。作物需要的P可以由土壤中供应满足，不需要施用P肥。

1952～1953作物年度，施用P肥的增产效果明显地比对照高，1953～1954年施用P肥的效果较差，这大概是因为在

所有处理施 N 量相同，$A_n=60$公斤/公顷。

可以用方程 79 计算处理 A 的回收率 R_n：

$R_n=(68.4-32.2)/60=0.60$ 公斤/公斤。

各处理的 R_n 计算值如下：

处理A：$R_n=0.60$公斤/公斤	处理E：$R_n=0.55$公斤/公斤
处理B：$R_n=0.59$公斤/公斤	处理F：$R_n=0.41$公斤/公斤
处理C：$R_n=0.43$公斤/公斤	处理G：$R_n=0.33$公斤/公斤
处理D：$R_n=0.16$公斤/公斤	处理H：$R_n=0.27$公斤/公斤

a. 处理 A的回收率 0.6 是令人满意的。有两个处理，肥料施放在一定深度，即施在缺氧的亚表土中。在处理 A中，有一定数量的铵被吸附在粘土矿物的表面而防止了淋失。在处理 B 中，尿素 N 在土壤中被转化成铵，与铵盐肥料中的铵(如处理A)有相同的效果。在氧气很少的亚表土中铵态 N 不会转化为硝态N，因此，防止了过多的 N 通过淋洗和反硝化作用而损失。

b. 施到表土中的 N素化合物将随渗漏水或扩散作用向下移动。如果硝酸盐离子进入到低氧的亚表土中，反硝化将用将迅速发生。N 素化合物进一步向下迁移，N 素移出根系以外（淋失）。因此处理 C 和 D 的 N 素损失很大，所以回收率低。处理 C 以铵态 N 的离子作为部分 N 素的来源，铵态 N 不会发生反硝化作用，而且淋失的速度比硝酸盐小得多，因为粘土矿物在某种程度上有吸附铵盐的能力。可以预测处理 D 的 N 回收率特别低，处理 C 稍高，但不理想。计算的回收率证实了这一点。

c. 对于处理 D，当根系很小移栽时，将活动性很高的硝盐离子施到根区，而且作物对 N 素的需要不多。N 素在土壤停留的时间很长的结果，由于反硝化作用和淋洗作用，必然

导致N素损失很大。处理H是在作物充分发育时施用的硝酸钠，而且施肥部位很好，便于N素的吸收利用。

d.对于处理F，当作物需N量高而且根系很发达时，撒施尿素，在短时间内可能吸收较多的N素。这与移栽时施N情况不同，因此，所观测的N素回收比尿素在移栽时撒施的回收率20%高很多。

练　习　61

TADW(总生物量)＝12418公斤/公顷(表11，21列)

WGR(计算的稻谷产量)＝6844公斤/公顷(表11，19列)

稻草重＝(12418－6844)＝5474公斤/公顷

在生产情况2中最小吸氮总量为：

$6844\times0.01+5574\times0.004=90.7$公斤N/公顷($u_{m.n}$)

计算的产量吸收曲线的初始效率为WGR/N的总吸收量，即6844/90.7＝75.5

籽粒产量为1000公斤的无肥区吸N量为：

1000/75.5＝13.3公斤N/公顷($u_{o.n}$)

N的回收率(R_n)为0.55时，N肥需要量(D_n)等于：

$D_n(u_{m.n}-u_{o.n})/0.55=(90.7-13.3)/0.55=140.7$公斤/公顷

相当于尿素140.7/0.45＝312公斤。

练　习　62

生产情况2最小吸P总量等于：

$6844\times0.0011+5574\times0.005=10.3$公斤/公顷＝$u_{m.p}$

产量吸收曲线的初始效率等于WGR/总吸P量＝6844/10.3＝664。

籽粒产量为1000公斤的无肥区吸P量是：1000/644＝1.5公斤/公顷＝$u_{o.p}$。

P的回收(R_p)为0.02时，磷肥的需要量(D_p)等于(10.3－

1.5)/0.02＝440 公斤/公顷，每公顷施用磷矿石 440/0.116＝2750公斤可以满足需要。

练　习　64

状态变量：WLVI，WI，RDI，Z_t，SS_t，ψ_o。

强迫变量：H_a，T_a，P，E_o，ET_o，SLA，F_{ov}，F_{cl}。

常量：H_g，k_e，E_g，R_m，TU_{pre}，TU_{post}，T_o，p，ϕ，SM_o，γ，S_o，A，K_o，a，α，ψ_{max}，E_d，E_f，E_i，d，σ，DD，L_d，γ_d。对于生产情况 3 产量的计算，不需应用动态模拟。因此，在那个计算中所应用的变量，不能归类到上述几种变量中去。

练　习　65

$SM_0=1-BD/SD$

	A_p	B_1	B_2
容重(克/厘米³)	1.1	1.3	1.3
C_m(克/克)	0.0125	0.006	0.005
土壤比密度(SD)(克/厘米³)	2.554	2.578	2.582
计算的总孔隙度(SM_0)(厘米³/米³)	0.569	0.496	0.497

SM_0 的表征值(表 16)：0.432 厘米³/厘米³

练　习　66

容重低孔隙度高可以用表土层有机碳含量较高来解释。

矿物质含量为0.01－0.05克/克的泥炭，其有机质含量为(1－(0.01－0.05))克/克或 O_m＝0.99－0.95克/克。按照方程 92，泥炭的比密度介于1.44 克/厘米³和 1.46 克/厘米³之间。按照方程 91，它的总孔隙度介于 1－0.05/1.44 和 1－0.15/1.46之间，或0.965 厘米³/厘米³和 0.90 厘米³/厘米³之间。固相部分 $V_s/V_t=1-SM_0$，仅占 0.035～0.10 厘米³/厘米³

注意：大部分矿质土的固相部分占0.4－0.6 厘米³/厘米³($V_s=(1-SM_0)\times V_t$)。泥炭具有例外的基质几何学，自然泥炭呈

水分饱和状态。罗马历史学家Tacit(公元55～118)描述泥炭地时，曾经写到"泥炭地既不是土地也不是水"。

练　习　67

$SM_{\psi}=SM_0\cdot e^{-\gamma(\ln\psi)^2}$(方程 27)

对于沙质粘壤土，$SM_0=0.432$ 厘米^3/厘米^3，$\gamma=0.0096$/厘米^2

测定结果：$SM_{333}=0.15-0.16$ 厘米^3/厘米^3；$SM_{16000}=0.10$厘米^3/厘米^3

	A_p	B_1	B_2	
当$\gamma=0.03$/厘米^{2}时，$SM_0=$	0.569	0.496	0.497	厘米/^{3}厘米^3
计算的SM_{333}:	0.176	0.153	0.153	厘米/^{3}厘米^3
上述SM_{333}的计算值接近测定值				
当$\gamma=0.017$/厘米^{2}时，$SM_0=$	0.569	0.496	0.497	厘米^3/厘米^3
SM_{16000} 的计算值:	0.116	0.101	0.101	厘米^3/厘米^3

SM_{16000} 的这些计算值与测定值 0.1 厘米^3/厘米^{3}相接近。

练　习　68

$SD=3.72/(1.43+2.13\times C_m)$　　(方程93)

$SM_0=1-BD/SD$　　(方程91)

B_{21}的计算值：$W_a=2.8$厘米；$X_g=0.6$厘米^3/厘米^3；$(1-X_g)\times W_a=1.1$ 厘米

最终有效水分量是$(3.6+0.96+2.25+1.1)=7.9$ 厘米。

如果土壤没有石砾，$W_a=(3.6+3.1+8.8+2.8)=18.3$ 厘米。

练　习　69

在 P9 剖面的浅层，即 B_1(19～57 厘米)层可以观察到铁斑，而在剖面 Kpuabu I 没有发现铁斑。因此，Kpuabu I 地下水位较深。

	A_1	A_2	$B_{22}t$	来源
$C_m=$	0.027	0.019	0.007克/克	表52
$BD=$	1.2	1.4	1.5克/厘米^3	表52
$SD=$	2.501	2.530	2.575克/厘米	计算值
$SM_0=$	0.520	0.447	0.417厘米/厘米	计算值
$\gamma=0.03\times I_n\ (SM_0/SM_{333})$				
$SM_{333}=0.19$		0.17	0.22厘米^3/厘米^3	表52
$\gamma=0.030$		0.029	0.019/厘米^3	计算值
计算的$SM_{100}=0.275$		0.242	0.279厘米^3/厘米^3	方程27
$SM_{100}-SM_{1000}=0.145$		0.112	0.099厘米^3/厘米^3	表52
层次深度=25		28	39厘米	表52
$W_a=3.6$		3.1	8.8厘米	方程51
石砾$(X_g)=0$		0.70	0.75厘米^3/厘米^3	表52
$(1-X_g)\times W_a=3.6$		0.93	2.20厘米	计算值

剖面 P9的 B_2 层(深度 57～170 厘米)出现铁斑，当时记载的地下水位是正常的。

练　习　70

在剖面 P9B_2层(57～170厘米)所观察到的根系，粗根和通常的中等根很少，细根很多。从上到下有蚯蚓和蚂蚁洞。扎根不受任何方式的阻碍。在剖面 Kpuabu 1中，5 厘米以下很少看到细根和中等根系，更不用说有蚯蚓和蚂蚁的活动。在剖面 Kpuabu 1 的根系不仅受到了阻碍，而且也不是理想的中等粗根系。

在剖面 P9 的深层可以看到很多小孔隙和中等孔隙及蚯蚓洞。Kpuabu 1 剖面的描述中没有这类生物活动的记载。因此，可以得出结论，剖面 P9 土壤中的生物作用比剖面 Kpuabu 1 更为强烈。

练　习　71

	A_1	A_3		资料来源
土层深度	25	28	厘米	表52
土层体积	25×10^8	28×10^8	厘米³/公顷	
容重	1.2	1.4	克/厘米³	表52
重量	3×10^9	3.92×10^9	克/公顷	
含P量	390	370	ppm	表52
	=0.000390	0.000370	公斤/公斤	
每层全P量	1.17×10^6	1.45×10^6	克/公顷	
	=1170	1450	公斤/公顷	
53厘米以上全P量	(1170+1450)=2620公斤/公顷			
K_2O含量	0.169	0.180	%	表52
	=0.00169	0.0018	公斤/公斤	
K含量	0.00140	0.00149	公斤/公斤	
每层总K量	4.200×10^6	5.841×10^6	克/公顷	
	=4200	=5841	公斤/公顷	
53厘米以上土层总K量：	(4200+58+1)=10041公斤/公顷			

练　习　72

全P比Bray浸提剂测定的P高335倍。土壤Kpuabu 1的全P量很高是不足为奇的，这种土壤的代换性铝含量很高。表47指出在老成土中P的回收率R_p很低，同样的原因，在那种土壤中Fe和Al的含量也很高。

生产3000公斤稻谷需要吸N43～60公斤/公顷，即3000/50～70=43～60公斤/公顷。P/N比率为0.1，在平衡供应的情况下，需要有效P4.3～6公斤，即0.1×(43～60)=4.3～6.0公斤/公顷。计算剖面A_1和A_3层土壤中的有效P大约8

公斤/公顷(用 Bray 1 方法)或 13.5 公斤/公顷(用 Bray 2 方法)。从分析结果看这种土壤似乎不需施用 P肥。

由于多数作物需 K 量比 N 多或相当，故每公顷必须有 43～60公斤的有效钾。

三个土层中含有效钾量为 14.5 公斤/公顷。因此，施用钾肥是必需的。

练 习 73

$CEC_{total}=11.79$ 毫克当量/100 克 (表52)

$CEC_{total}=O_m\times CEC_{om}+(1-O_m)\times CEC_{min}$

$orgC=0.027$克/克 (表52)

$O_m=orgC/0.55=0.0489$克/克

$CEC_{om}=100$ (表55)

$CEC_{min}=(CEC_{total}-O_m\times CEC_{om}/(1-O_m)$

$=(11.79-0.0489\times 100)/(1-0.0489)=7.25$毫克当量/100 克

与表 55 中纯粘土的 CEC_s 相比，上述CEC_{min}的值是比较低的。Kpuabu 土壤保持和交换施入的 K离子的能力较低。表土中的有机质对于阳离子的供应是重要的。虽然表土层中只有 0.0489 克/克的有机质，但是它担负着表土阳离子代换总量的 41.5%的交换作用。

观测的土壤盐基饱和度小于 0.03 毫克当量/毫克当量 表明土壤中养分总量很贫乏。

练 习 74

剖面 Kpuabu 1 25 厘米以下的土层中有 0.7 厘米^3/厘米^{3}的砾石，使得这种土壤养分总量更贫乏。剖面 Kpuabu 1 的表土中 C.E.C.为11.79 毫克当量/100 克土，而剖面 P9表土只有 5.71 毫克当量/100 克土。注意 Kpuabu 1 有机质含量较

高，但在表土 25 厘米以下的土层中，只有 0.3 厘米^3/厘米^{3}的土壤有离子交换作用，石砾部分是没有作用的。分析以前就被去掉了。结论是：这两个剖面真实的代换量和交换性阳离子大致相同，二者都很低。

练　习　75

10000 公斤干物质含有 250 公斤 N/公顷，相当于 250/0.16＝1562.5 公斤蛋白质/公顷，维持呼吸需要 0.035 公斤 CH_2O/公斤（蛋白质）·日。因此，1562.5×0.035＝54.7 公斤 CH_2O/公顷·日。10000 公斤干物质含有 1000 公斤矿物质/公顷，维持呼吸需要 0.07 公斤 CH_2O/公斤(矿物质)·日。因此，1000×0.07＝70 公斤 CH_2O/公顷·日。总计 54.7＋70＝124.7 公斤 CH_2O/公顷·日那就是 0.0125 公斤 CH_2O/公斤（干物）·日，这个数字接近 2.1 节中提出的 0.015 的值。

练　习　76

如果 NO_3^- 是基本成分，则蛋白质的增长效率为 0.404。如果 NH_4^+是基本成分蛋白质的增长效率是 0.616（两者的区别在于硝酸盐还原所需的能量不同）。

结构碳水化合物的生长效率是 0.826，类脂物的是 0.33。

以 NO_3^- 为来源的总生长效率计算如下：

$0.404\times f_{prot}+0.826\times f_{carb}+0.33\times f_{lip}$

以 NH_4^+为来源时有：

$0.616\times f_{prot}+0.826\times f_{carb}+0.33\times f_{lip}$

a. 木薯

采用 NO_3^- 的生长效率为：

$0.404\times 0.075+0.826\times 0.925+0.33\times 0=0.794$

用 NH_4^+时为：

$0.616\times 0.075+0.826\times 0.925+0.33\times 0=0.81$

b. 玉米

用 NO_3^- 的生长效率时为：

$0.404\times0.125+0.826\times0.875+0.33\times0=0.773$

用 NH_4^+ 时为：

$0.616\times0.125+0.826\times0.875+0.33\times0=0.80$

c. 大豆

用 NO_3^- 的生长效率时为：

$0.404\times0.4+0.826\times0.4+0.33\times0.2=0.558$

用 NH_4^+ 时为：

$0.616\times0.4+0.826\times0.4+0.33\times0.2=0.643$

相应的生长速率是：

a. 木薯

1. $400\times0.794=317.6$ 公斤/公顷·日
2. $400\times0.81=324.0$ 公斤/公顷·日

b. 玉米

1. $400\times0.773=309.2$ 公斤/公顷·日
2. $400\times0.80=320.0$ 公斤/公顷·日

c. 大豆

1. $400\times0.558=223.6$ 公斤/公顷·日
2. $400\times0.643=257.2$ 公斤/公顷·日

练　习　77

T_b 估计为 5°C，b＝0.002/日·°C（图 78）

平均气温 12.5°C 时的发育速率是：

$0.002\times(12.5-5)=0.015$

这个品种从抽穗到成熟将需要 1/0.015＝67 天。

地　点	1/N	T_a
哈罗	0.0323	21.1
温太华	0.0345	20.6
诺曼丁	0.0185	15.0
斯威夫特卡伦特	0.0244	19.1
拉科摩	0.0169	14.7
比弗洛奇	0.0185	13.9
弗米利恩堡	0.0208	15.3
辛普森堡	0.0263	16.4

练　习　78

两个春小麦栽培种从出苗到开花的发育速率为：

T_a	栽培种Timgalen	Ia	栽培种Orca
12.5	0.01075	11.6	0.01053
14.1	0.01389	13.2	0.01282
17.0	0.01639	17.0	0.01449

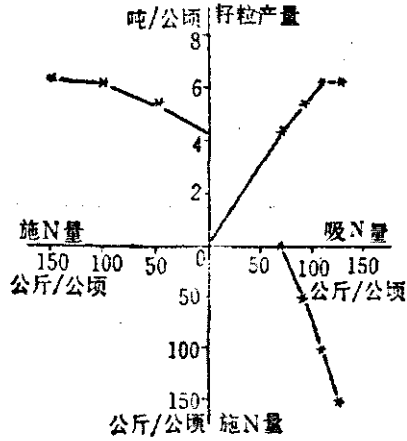


图77　谷类作物的籽粒产量与吸N量的关系，施N量与吸N量的关系以及籽粒产量与施N量的关系

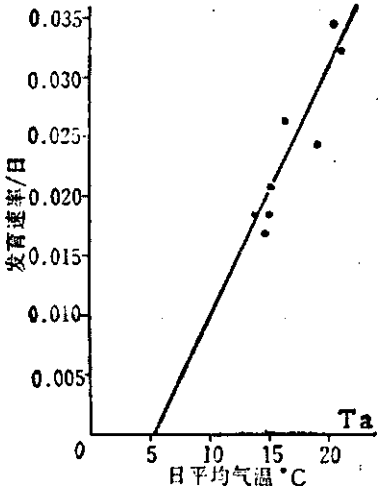


图 78　小麦发育速率与平均温度的关系

两个春小麦栽培种从开花到成熟的发育速率：

I_a	栽培种Timgalen	T_a	栽培种Orca
19.5	0.02041	17.6	0.02326
20.5	0.02083	17.6	0.025
22.1	0.02439	16.9	0.02564

这些结果在图 79 的图示中得到了说明。

（练习49—78　杨守春译　王涌清校）

练　习　79

玉米

时　间	活　动	劳动需要量（小时/公顷）		
		人工	畜力	机械(重型)
5月10—20	第一次犁地		28	6
5月21—30	第二次犁地		28	6
	十　耙　地		24	3
6月1—10	播　　种	80		
	十　施　肥	3		

7月1—10	除　草	145
9月1—10	赶　鸟	55
9月11—20	赶　鸟	
9月21—30	赶　鸟	
11月1—10	收　获	330
	运　输	126
	加　工	210

木薯

时　间	活　动	劳动需要量（小时/公顷）		
		人工	畜力	机械(重型)
4月1—10	第一次犁地		28	6
4月11—20	第二次犁地		28	
	十　耙　地		24	
4月21—30	准备切块	25		
	十　栽　种	70		
	十　施　肥	3		
5月11—20	除　草		7	2～16
6月1—10	除　草	120		
7月1—10	培　土	85		
11月1—10	收　获	180		
	运　输	240		

练　习　80

每公顷的总劳动时数：

水稻　1343

玉米　1029

木薯　810

练　习　81

a. 小麦

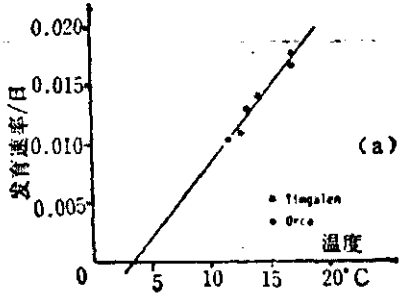
小麦需要播种量150公斤/公顷，每家生产指标为2500公

斤，产量和土地面积之间的关系可描述为：

$$土地面积=\frac{2.500}{(产量-150)}$$（见图80）

b. 木薯

所含能量为 6.0兆焦耳/公斤。家庭需要量为18.5×10^9焦耳/年。



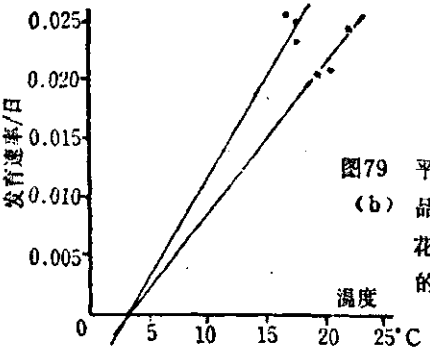


图79 平均温度与两个小麦品种开花前（a）和开花后（b）的发育速率的关系

可食用产量每年必须为$\frac{18.5\times1000}{6}=3100$公斤

非食用部分为 0.2，年生产量必须为 3100/0.8＝3875公斤

每年3875公斤这个数量只是为了消费目的，不包括栽培

目的所要求的木薯量。

练　习　82

Y_t 代表时间为 t（从开始那年起算的过去的年数）的产量。

Y_o 为开始年的产量。

Y_e 为平衡产量，即时间等于无穷大的产量。

k 为描述有关每年产量下降的系数。

估算为：

$Y_o = 2200$公斤/公顷

$Y_e = 900$公斤/公顷

$t = 19$年时，$Y_t = 1500$公斤/公顷

因而，$1500 = (2200 - 900) \times e^{-k \times 19} + 900$

$$600 = 1300e^{-k \times 19}$$

$$k = -\frac{\ln(600/1300)}{19} = 0.0407/\text{年}$$

练　习　83

在'Beharrungspunkt'（平衡点）时，连续多年的产量是常数：

$$R_{n+1} = (R_n + I_r) \cdot (1 - T_c) = R_n$$

因此

$$R_n - (1 - T_c) \times R_n = I_r \times (1 - T_c)$$

$$R_n \times T_c = I_r \times (1 - T_c)$$

$$R_n = \frac{I_r \times (1 - T_c)}{T_c} = I_r \times (\frac{1}{T_c} - 1)$$

由于 I_r = 每公顷1200公斤黑麦当量

$T_c = 0.09$

故得到：$R_n = 1200 \times (\frac{1}{0.09} - 1)$ = 每公顷 12133 公斤黑

麦当量

在平衡时(即$R_{n+1}=R_n$)，产量等于I_r即每公顷1200公斤黑麦当量。

活性由0.09增加到0.16以后，产量为

年	产量	R_{n+1}	年	产量	R_{n+1}
1	2133	11200	11	1363	7157
2	1984	10416	12	1337	7020
3	1859	9757	13	1315	6905
4	1753	9204	14	1297	6808
5	1665	8739	15	1281	6727
6	1590	8349	16	1268	6658
7	1528	8021	17	1257	6601
8	1475	7746	18	1248	6553
9	1431	7515	19	1240	6512
10	1394	7320	20	1234	6478

这些结果表明，产量最终又接近于每年投入到系统中的肥力，然而，这是处在明显的低肥力水平。

练　习　84

除在练习中给的数据外，还必须对所介绍的情况给出平衡时的肥力，这可用下列方程式计算：

$$R_o=\frac{Y_o}{T_c}-I_r$$

(循环周期开始时的肥力)

$$Y_o=\frac{f\cdot I_r}{(1+e^{-k}+e^{-2k}+e^{-3k})}+I_r$$

(用于4年连续收获，'f'年恢复)

$$Y_o=\frac{f\cdot I_r}{(1+e^{-k}+e^{-2k})}+I_r$$

（用于 3 年连续收获，‘f’年恢复）

$K = \ln(1 - T_c)$

$T_c = 0.08$ 或 0.16/年　　（活性）

$I_r = 120$公斤/年　　（肥力的自然投入）

$f = 10$ 或 15 年　　（休闲年数）

如果体系处在平衡状态下，则平均肥力将没有什么变化，这意味着，在几个栽培年中取出了多少肥力，在整个循环期间就得到多少补充：

$$\sum_{i=1}^{n} Y_i = p \cdot I_r \qquad (p = f + n)$$

15年恢复和 3 年种植的平均产量最高，并且播种比值最低。

由此按顺序得到下表中的结果：

$T_c/f/C_1$	肥力在$t=0$时	连续几年				总值	平均	LTAV[1]	SSR[2]
		1	2	3	4				
0.08/15/4	7727	628	587	550	515	2280	570	120	0.105
0.16/15/4	4215	694	602	525	460	2281	570	120	0.105
0.08/10/4	5611	458	431	406	384	1679	420	120	0.143
0.16/10/4	3020	502	441	390	347	1680	420	120	0.143
0.08/15/3	9513	771	719	671	—	2161	720	120	0.083
0.16/15/3	5049	827	714	619	—	2160	720	120	0.083
0.08/10/3	6802	554	519	487	—	1560	520	120	0.115
0.16/10/3	3576	591	516	453	—	1563	521	120	0.115

1. 长期平均值。

2. 由总的播种量（n × 60）除以总产量计算所得的播种比值。

练　习　85

$$L(H_{hw}) = L_w/2 + ((H_c - H_w/2)/H_c) \cdot L_c = 0.75 + 0.375 = 1.125$$

$$L(H_{hc}) = L_c/2 + ((H_w - H_c/2)/H_w) \cdot L_w = 0.75 + 0.6667$$

$=1.4167$

$G_w/G_c=L_w/L_c \cdot e^{(-ke(L(Hhw)-L(Hhc)))}$

$=1\times e^{(-0.65\times(1.125-1.4167))}=1.21$

$G_w+G_c=1$

$G_w=0.55$

因此 $G_c=0.45$

练　习　86

见图81

除草次数	糖用甜菜类	小麦类
0	293	6965
1	3120	——
2	9346	11800

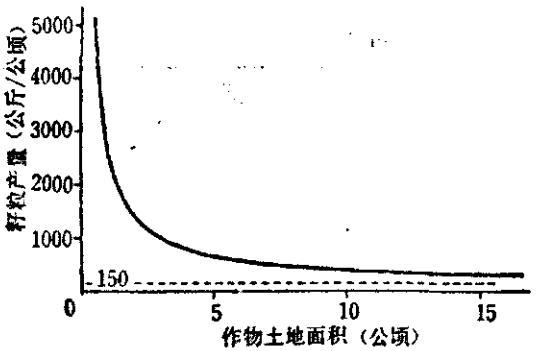


图80　从不同的作物土地面积上获得2500公斤小麦的产量指标所需要的籽粒产量。虚线表示播种量(150公斤/公顷),它保持不变

完全无杂草作物的干物质产量较高，因为暂时存在的杂草要截获一部分辐射，而且，即使在定期除草的作物中，有些杂草也会遗留下来与作物竞争。

练　习　87

正如表74所表明的那样，在估算的必需无杂草相对结束

期和没有控制杂草的相对产量之间存在密切的负相关。两个数字代表表中提到的各种作物的竞争能力，这种竞争能力取决于两个主要因素：出苗后的叶片物质量和以足够高度形成郁闭冠层的能力。列于表上部的各种作物，由于它们的种子大小和将要达到的高度，一般具有在比较短时间内形成郁闭冠层的能力。表下部的各种作物要么种子很小，要么只能形成有限的冠层。

练　习　88

利用方程式108计算r值；利用这些r值，可用方程式107计算流行病的增长速率。

时间(天)	$\gamma(d^{-1})$	dp/dt(公斤/公顷·日)
40～70	0.10	1.00×10^{-6}
70～90	0.161	3.22×10^{-5}
90～110	0.139	6.93×19^{-4}
110～125	0.061	4.49×10^{-3}
125～135	0.092	1.47×10^{-2}

练　习　89(略)

练　习　90

在实行先进的病虫害管理的地方，仅两年发生一次的流行性病虫害都可以监测出，并用适宜的化学药剂防治，在无病虫害发展的年份，可以不防治。因此在先进的管理系统中，年平均产量的增长不再作为标准。为了降低每个生长季节的预期损失，必须以持续不断的观察结果为依据，并在具体情况下，选择合适的化学药剂进行防治。

练　习　91

根深高于地下水位10厘米左右的作物不受地下水的影响。从表71看出，如果地下水位低于地表1米，水稻、花生

绿豆、马铃薯、洋葱、烟草、辣椒和洋麻不会受影响。

深根系作物，如高粱和甘蔗最能适应无灌溉条件的降雨无规律的气候。

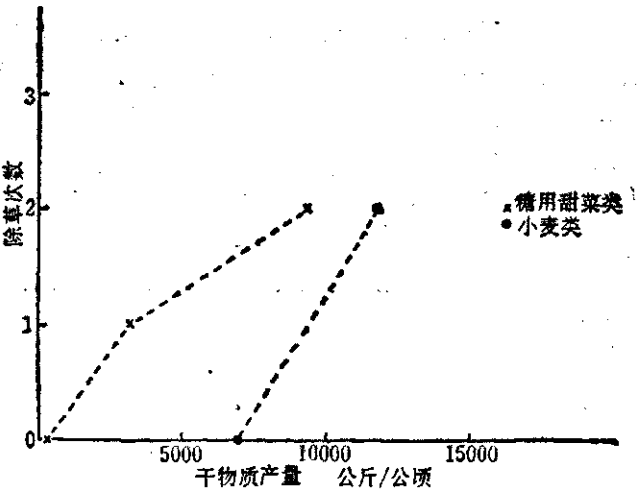


图81 两类作物的总干物产量与除草次数之间的关系

练 习 82

随着籽粒与秸秆比率的降低，秸秆相对含氮量较高，所以籽粒产量与氮素吸收量的比率将降低。从方程式78可以看出，籽粒产量与氮素吸收量的比率随籽秆比下降而降低。

总同化速率的平均下降系数是由平均土壤含水量(表80)决定的。最高产量是由籽粒灌浆期间总同化速率与维持呼吸作用速率之间的平衡确定的(方程6)。例如，当缺水情况下的最高产量是水分供应最适宜而营养生长完全相同的产量的一半时，秸秆与籽粒比率则增加一倍。产量与氮素吸收量的比率是由关系式1/(籽粒中N的含量＋秸秆籽粒×秸秆中N的含

量)计算得来的。以小麦为例，在最适宜的水分条件下，产量和氮素吸收量的比率是$1/(0.01+1.25\times0.004)=67$，而在次适宜水分条件下则为$1/(0.01+2.5\times0.004)=50$。

练　习　93

$T_m=2.5$毫米/日；$SM_0=0.439$厘米^3/厘米^3；$\gamma=0.0312$

$SM_{100}=0.439\times e^{-0.0312\times(\ln100)^2}=0.2265$厘米^3/厘米^3

$SM_{16000}=0.439\times e^{-0.0312\times(\ln16000)^2}=0.0236$厘米^3/厘米^3

临界土壤含水量为：

$SM_{cr}=(1-p)\cdot(SM_{100}-SM_{16000})+SM_{16000}$

其中$p=0.80$；

$SM_{cr}=0.2\times(0.2265-0.0236)+0.0236=0.064$厘米^3/厘米^3

在第35个10日期间，土壤含水量为0.12厘米^3/厘米^3。

作物生长不受限制的有效水含量为：

$$W_a=RD\cdot(SM_w-SM_{cr})$$
$$=75\times(0.12-0.064)=4.2\text{厘米}$$

最大蒸腾速率T_m为2.5毫米/日，即0.25厘米/日时的同化速率不受限制的天数为：

$$W_a/T_m=4.2/0.25=17\text{天}$$

练　习　94

第36个10天期间，$SM_w=0.09$厘米^3/厘米^3，这个数字低于SM_{100}，但比SM_{cr}高。总同化作用等于灌溉花生的总同化作用。

第2个10天期间，$SM_w=0.04$厘米^3/厘米^3。这个数字低于SM_{cr}，高于SM_{16000}，所以，总同化作用的下降系数可以计算为：

$(SM_w-SM_{16000})/(SM_{cr}-SM_{16000})=(0.04-0.0236)/$

$(0.064-0.0236)=0.4$

无灌溉条件下的总同化作用是灌溉小区总同化作用的0.4倍。

在第4个10天期间，$SM_v=0.035$厘米³/厘米³，低于SM_{cr}高于SM_{16000}，所以，总同化作用的下降系数可以计算为：

$(0.035-0.0236)/(0.064-0.0236)=0.282$

练　习　95

作物生长不受限制的有效水含量为：

$W_a=RD\cdot(SM_v-SM_{cr})$

临界土壤含水量为：

$SM_{cr}=(1-P)\cdot(SM_{100}-SM_{16000})+SM_{16000}$

$SM_{100}=0.2265$厘米³/厘米³

$SM_{16000}=0.0236$厘米³/厘米³

最大蒸发速率为：

$T_m=0.25$厘米/日

同化作用不受限制的天数为W_a/T_m。

作物	RD	P	SMcr (厘米³/厘米³)	Wa (厘米)	同化作用不受限制的天数
高粱	150	0.885	0.047	10.95	44
小麦	125	0.85	0.054	8.25	33
洋葱	40	0.50	0.126	0.0	0

高粱表现最好。

练　习　96

改良水平升级需要的活动：

a. 从改良水平I到II，清理A，修建道路A，控制侵蚀或建造土埂（只对种水稻），控制洪水）。

b. 从改良水平II到III：清理B，修建道路B，排水设施，平地/修梯田。

c. 从改良水平III到IV：灌溉设备。

	从改良水平I上升到II		
	动土方（米³/公顷）	人工劳动（小时/公顷）	机械作业（小时/公顷）
修建道路A	10	3.3	0.07
清理A		300	7
控制侵蚀(a)或建造土埂(b)	192	64	1.4
畦埂数：22	704	235	5.0
畦埂数：29	928	309	6.6
涝害的防护	高地不需要		
总的劳动需要量（小时/公顷）			
控制侵蚀		367	8.5
土埂，22条/公顷		538	12.1
土埂，29条/公顷		612	13.7

a 畦埂数/公顷＝6

畦埂高＝0.8米

动土方＝0.5×0.8×0.8×100×6＝192米³

b 土埂数＝H/hr·(1.5或2)＝(坡度·a)/0.8×(1.5或2)

＝11.5/0.8×(1.5或2)＝22或29

动土方＝0.5×0.8×0.8×100×(22或29)＝704或928米³/公顷

	从改良水平II上升到III		
	动土方（米³/公顷）	人工劳动（小时/公顷）	机械作业（小时/公顷）
修建道路B	30	10	0.2
清理B		600	20
排水设施(c)	800	533	14.5(挖土机)
平地/修梯田(d)	2049	1394	17.1
总劳动需要量（小时/公顷）		2537	51.8或68.1

c 梯田数＝7

排水沟长＝(100＋100/7)×7＝800米/公顷

动土方＝800米³/公顷

d 梯田数＝7

$p=H/(2\times N_t)=11.5/(2\times 7)=0.82$米

$q=a/(2\times N_t)=100/14=7.14$米

动土方$=0.5\times p\times q\times W\times N_t=0.5\times 0.82\times 7.14\times 100\times 7$

$=2049$米³/公顷

平均移动距离$=2/3\times a/N_t=2/3\times 100/7=9.5$米

依照表86的资料，劳动生产率近似等于(砂土)

1.47米³/小时(总人工)，

120米³/小时(推土机)。

	从改良水平III上升到IV		
	动土方 (米³/公顷)	人工劳动 (小时/公顷)	机械作业 (小时/公顷)
灌溉设施	800	533	14.5(挖土机) 30.8(索斗铲)
总劳动需要量(小时/公顷)		533	14.5或30.8

(练习答案79—96孙昭荣译　王涌清校)

附录2 符号表

符号	描述	单位	方程序号	缩写词
a	特定质地的经验常数	厘米$^{2.4}$/日	31	
a_f	田块长度	米		
a_A	埃斯屈朗公式中的经验常数	无单位	8	
a_u	h_u的方程中的经验常数	焦耳/米^2·日·°C	13	
A	传导区的传导率	厘米/日	34	
A_x	X养分的施用量	公斤/公顷	79	
ASAG	对增加干物重有效的同化产物量	公斤CH_2O/公顷.日		
b	土埂基部宽	米		
b_A	埃斯屈朗公式中的经验常数	无单位	8	
b_t	作物发育速率方程中的常数	日$^{-1}$°C^{-1}	94	
b_u	hn的方程中的经验常数	秒/米	13	
BD	土壤容重	克/厘米^3	89	
C_m	土壤含碳量	克/克	93	
C_s	冠层的水汽传导率	焦耳/米^2·日·°C	23	
C.E.C.	阳离子代换量	毫克当量/100克		
CR	毛管上升速度	厘米/日	24	
$(CO_2)_{ext}$	外部空气中 CO_2 的浓度	公斤/米^3	65	

符号	描述	单位	方程序号	缩写词
$(CO_2)_{int}$	气孔内 CO_2的浓度	公斤/米^3	65	
d	地面粗糙度	厘米	41	
dM_r	因根系生长而增加的土壤水分	毫米/日	72	DMR
dH_n	两点间的总水头差	厘米	28	
d_l	冠层下半部的病害比例	无单位	116	
d_s	衰老引起的叶片最大死亡率	日$^{-1}$	115	DS
d_{wr}	根层土壤水分变化速率	毫米/日	72	
d_u	冠层上半部的发病率	无单位	117	
d_w	水分胁迫引起的叶片最大死亡率	日$^{-1}$	115	
D	自然排水速率	厘米/日	24	
D_{max}	人工排水速率	厘米/日	59	
D_N	肥料氮需要量	公斤/公顷		
D_{nr}	尚未长根的潜在扎根层厚度	毫米	73	
D_r	扎根深度	毫米	75	
D_{rm}	潜在扎根深度	毫米	72	
DA	X 营养元素的需要量	公斤/公顷	80	
DD	排水沟深度	厘米	61	
DS	地面积蓄水的减少速率	厘米/日	25	
DVS	发育阶段	无单位		
DWLV	叶片死亡速率	公斤/公顷·日	77	DMLV
DWLVC	作物叶片死亡速率	公斤/公顷·日		DWLVC
DWLVW	杂草叶片死亡速率	公斤/公顷·日		DWLVW
e_a	标准百叶箱高度下，大气的实际水汽压	毫巴	9	

符号	描述	单位	方程序号	缩写词
e_d	大气的饱和水汽压	毫巴	22	
e_s	饱和水汽压	毫巴	15	
e_w	湿球温度时的饱和水汽压	毫巴	84	
E	水面蒸发速率	公斤H_2O/米^2·日	11	
E_a	土壤表面实际蒸发速率	厘米/日	25	
E_d	田间利用效率系数	无单位	36	
E_f	田间沟渠的有效系数	无单位	36	
E_g	碳水化合物转化为干物质的效率	公斤/公斤	6	
E_i	水渠输送的有效系数	无单位	36	
E_{in}	产量-吸收曲线的初始斜率	公斤/公斤	78	
E_m	最大土壤蒸发速率	厘米/日	37	
E_p	灌水的总有效系数	无单位	35	
E_o	潜在蒸发速率	厘米/日	37	
EC_e	饱和土壤泥浆的电导率	毫西/厘米		
ET_o	潜在蒸发蒸腾速率	厘米/日	49	
f_g	干重增量分配到籽粒的比例	无单位		FG
f_h	冠层拦截光的比例	无单位	5	RA
f_l	干重增量分配到叶片的比例	无单位		FL
f_o	阴天的比例	无单位	4	
f_r	干重增量分配到根的比例	无单位		FR
f_s	干重增量分配到茎的比例	无单位		FS

符号	描述	单位	方程序号	缩写词
F	水分流动速率	厘米/日	32	
F_{cl}	以 CO_2表示的晴天密闭冠层的潜在总同化速率	公斤/公顷·日	3	
F_d	病叶和健康叶相对死亡率之比	无单位	112	
F_g	以 CO_2表示的单叶最大总同化速率	公斤/公顷·小时		
F_{gc}	以 CO_2表示的密闭冠层最大总同化速率	公斤/公顷·日	3	
F_{gct}	以 CO_2表示的冠层全季潜在总同化作用	公斤/公顷		
F_{gs}	以 CH_2O 表示的密闭冠层的潜在总同化速率	公斤/公顷·日	6	GRA
F_m	以 CO_2表示的单叶最大净同化速率	公斤/公顷·小时		
F_{gst}	以 CH_2O 表示的冠层全季潜在总同化作用	公斤/公顷		
F_n	土壤中水分流动速度	厘米/日	28	
F_{ov}	以 CO_2表示的阴天日密闭冠层的潜在总同化速率	公斤/公顷·日	3	
F_s	病害严重程度的比例系数	无单位	115	FDS
g	籽粒干重	公斤/公顷	78	
g_n	重力水头	厘米	29	
G_c	作物的生长速率	公斤/公顷·日	100	GC
G_t	作物加杂草的总生长速率	公斤/公顷·日	100	

符号	描述	单位	方程序号	缩写词
G_w	杂草的生长速率	公斤/公顷·日	100	GW
G_a	'Gattung'，即肥效系数	无单位	99	
G_e	肥料等的籽粒平衡	公斤/公顷	99	
GASS	以 CH_2O 表示的冠层实际总同化速率	公斤/公顷·日		
h_b	围埂高度	米		
h_{ic}	作物高度的增加速率	米/日		
h_{iw}	杂草高度的增长速率	米/日		
h_r	土埂高度	米		
h_u	显热转换系数	焦耳/米²·日·°C	12	
H	显热损失	焦耳/米²·日	11	
H_a	测定的全球总辐射	焦耳/米²·日	4	
H_c	作物高度	米	103	HC
H_g	晴天的全球总辐射	焦耳/米²·日	4	
H_{hc}	作物的一半高度	米	104	
H_{hw}	杂草的一半高度	米	103	
H_n	总水头	厘米	29	
H_{RD}	下部根层的水头	厘米		
H_w	杂草高度	米	103	HW
$(H_2O)_{int}$	气孔内部水汽的浓度	公斤/米³	66	
$(H_2O)_{ext}$	大气中水汽的浓度	公斤/米³	66	
I	下半部叶面积指数L_t的辐射强度	焦耳/米²·日	102	
I_e	有效灌水速率	厘米/日	25	
I_g	渠首的计划放水速率	厘米/日	35	
I_o	冠层上部的辐射强度	焦耳/米²·日	102	
I_r	肥力的增加	公斤/公顷	97	

符号	描述	单位	方程序号	缩写词
IM	水分进入上部根层的净输入速率	厘米/日	24	
IM_{max}	最大入渗速率	厘米/日	34	
IWGR	籽粒干物质增长速率	公斤/公顷·日		
IWLV	叶片干物质增长速率	公斤/公顷·日		
IWRT	根干物质增长速率	公斤/公顷·日		
IWST	茎干物质增长速率	公斤/公顷·日		
K_e	可见光的消光系数	无单位	5	
k_o	饱和导水率	厘米/日	28	
k_r	根层的导水率	厘米/日	68	
k_u	水汽转换系数	公斤/米²·日·毫巴	14	
k_ψ	基质水头为 ψ 时的导水率	厘米/日	30	
K	群体增长所用的中间变量	无单位	110	
L	水分汽化的潜热	焦耳/公斤	11	
L_c	作物的叶面积指数	米²/米²	100	LC
L_d	排水沟间距	厘米	58	
L_n	两点间的距离	厘米	28	
L_w	杂草的叶面积指数	米²/米²	100	LW
$L(H_{hc})$	作物上半部的叶面积指数	米²/米²	104	LHHC
$L(H_{hw})$	杂草上半部的叶面积指数	米²/米²	103	LHHW
LAL	植被的叶面积指数	米²/米²	5	LT
LL	水分移动距离	厘米	23	
M_t	时间为 t 时，排水沟			

符号	描述	单位	方程序号	缩写词
	中间的水头	厘米	59	
MRES	以 CH_2O 表示的维持呼吸速率	公斤/公顷·日		
n	晴天的实际日照时数	小时	8	
N	晴天的日照时数	小时	8	
N_{ac}	出苗到开花的天数	日		
N_{am}	开花到成熟的天数	日		
N_b	每公顷的田埂数	公顷$^{-1}$		
N_d	物候期的长短	日	94	
N_{hm}	抽穗到成熟的天数	日		
N_r	每公顷土埂数	公顷$^{-1}$		
N_s	每公顷苗数	公顷$^{-1}$	101	
N_t	每公顷梯田数	公顷$^{-1}$		
N_A	植物组织中实际氮浓度	无单位		
$N_{(P-Y)}$	作物残茬中的最小氮浓度	无单位		
N_r	商品产品中的最小氮浓度	无单位		
O_m	土壤有机质含量	克/克	92	
P	最大蒸腾速率时，各类作物能自由地吸收的水分所占比例	无单位	52	
P	实际降雨速率	厘米/日	25	
P_{ac}	以 CO_2表示的冠层实际同化速率	公斤/公顷·日		
P_m	最大群体水平	无单位	107	
P_n	以 CO_2表示的叶片净同化速率	公斤/米^2·秒		
P_t	时间 t 时的群体水平	无单位	107	

符号	描述	单位	方程序号	缩写词
P_o	初始群体水平	无单位	107	
PGASS	以 CH_2O 表示的冠层潜在总同化速率	公斤/公顷·日		
PROPD	病害严重程度	无单位		
q	挖土宽度	米		
q_d	老病叶的相对死亡率	日$^{-1}$	112	
q_i	病叶的相对死亡率	日$^{-1}$	112	
q_t	叶片的综合相对枯死率	日$^{-1}$	112	
Q_t	时间 t 时的数量	公斤/公顷	7	
$Q_{t+\Delta t}$	时间 $t+\Delta t$ 时的数量	公斤/公顷	7	
r	相对生长速率	日$^{-1}$	101	R
r_a	表面反射率	无单位	10	
rd	排水管半径	厘米	59	
R_A	在没有空气的情况下，所接收的辐射的理论值（Angot 值）	焦耳/米^2·日	8	
R_B	净射出长波辐射	焦耳/米^2·日	9	
R_{co_2}	CO_2扩散阻力	秒/米	65	
R_s	干物质积累的下降系数	无单位	116	
R_d	以 CO_2表示的每个叶片的叶暗呼吸速率	公斤/公顷·小时		
R_{H_2O}	水汽的扩散阻力	秒/米	67	
R_I	全球总辐射	焦耳/米^2·日	8	
R_m	相对维持呼吸作用速率	公斤/公斤·日	6	
R_n	'Reichtum'，即n年的肥力	公斤/公顷	95	
R_N	净射入辐射	焦耳/米^2·日	10	
R_q	相隔时间Δt 时数量 Q			

符号	描述	单位	方程符号	缩写词
	的变化速率	公斤/公顷·日	7	
R_r	根系生长速率	毫米/日	73	
R_v	发育速率	日$^{-1}$	94	
R_x	元素 X 的回收比例	公斤/公斤	79	
RD	扎根深度	厘米	24	
RDR	缺水引起的叶片死亡率	日$^{-1}$	78	RDR
RSM	根层含水量的变化速率	厘米^3/厘米^3·日	24	
s	秸秆的干重	公斤/公顷		
S	实际吸附率	厘米/日$^{0.5}$	33	
S_r	根层的基质水头	厘米	67	
S_o	标准吸附率	厘米/日$^{0.5}$	33	
SD	土壤物质的比密度	克/厘米^3	90	
SLA	比叶面积	米^2/公斤		
SM_a	风干土的含水量	厘米^3/厘米^3	70	
SM_{cr}	临界土壤含水量	厘米^3/厘米^3	52	SMCR
SM_{fc}	田间持水量时的土壤含水量	厘米^3/厘米^3	70	
SM_r	根层土壤含水量	厘米^3/厘米^3	67	SMR
SM_w	永久凋萎点的土壤含水量	厘米^3/厘米^3	71	
SM_ψ	基质水头ψ时的土壤含水量	厘米^3/厘米^3	27	
$SM_{\psi,t}$	时间 t 时的土壤含水量	厘米^3/厘米^3	57	
SM_s	总孔隙度	厘米^3/厘米^3	27	
SM_{10}	基质水头为10厘米时的土壤含水量	厘米^3/厘米^3	54	
SM_{16000}	基质水头为 16000 厘米时的土壤含水量	厘米^3/厘米^3	52	

符号	描述	单位	方程序号	缩写词
SR	地表径流速率	厘米/日	25	
SS_{max}	地面蓄水能力	厘米	40	
SS_t	时间 t 时的地面蓄水量	厘米	25	
t	时间	日		
T	作物实际蒸腾速率	厘米/日	24	
T_a	标准百叶箱高度的日平均气温	°C	12	
T_c	'Tätigkeit'，即活性	无单位	95	
T_d	大气的露点	°C	18	
T_k	绝对的气温	K	9	
T_m	作物的最大蒸腾速率	厘米/日	48	
T_o	作物发育的临界温度	°C		
T_s	蒸发表面的温度	°C	12	
T_w	湿球温度	°C	84	
T_o	作物的潜在蒸腾速率	厘米/日	49	
TADW	地上部总干重	公斤/公顷		
TAR	蒸腾-同化比率	公斤/公斤(固定的CO_2)		
TDW	作物总干重	公斤/公顷		
TDWC	作物总干重	公斤/公顷		
TDWD	作物枯死部分的总干重	公斤/公顷		
TDWL	作物活体物质的总干重	公斤/公顷		
TDWW	杂草总干重	公斤/公顷		
TRC	蒸腾系数	公斤/公斤(干物质)		
TU	温度总和(积温)	日°C		
$\bar{u}$	平均风速	米/秒	13	
$u_{o,x}$	从无肥区吸收X养分的量	公斤/公顷	79	

符号	描述	单位	方程序号	缩写词
$u_{o,n}$	从无肥区吸收的氮	公斤/公顷		
$u_{m,n}$	从施肥区吸收的氮	公斤/公顷		
$u_{m,x}$	从施肥区吸收 x 养分的量	公斤/公顷	79	
U_H	在高度 H 处测定的风速	米/秒	85	
V_{co_2}	CO_2向植物扩散的速率	公斤/米^2·秒	65	
V_{H_2O}	水汽向大气扩散的速率	公斤/米^2·秒	66	
V_g	土壤空气的体积	厘米^3	87	
V_I	土壤水分的体积	厘米^3	87	
V_s	固相土壤物质的体积	厘米^3	87	
V_t	土壤样品的体积	厘米^3	87	
W	地块宽	米		
W	作物生命部分的总干重	公斤/公顷	6	
W_o	幼苗的平均重量	公斤	101	
W_a	最大有效水含量	厘米	51	
W_{nr}	尚未长根的潜在根层的总含水量	毫米	72	WNR
W_r	根层的水分总量	毫米	74	
W_t	干土壤样品的重量	克	89	
W_w	空气绝对湿度	公斤/米^3	82	
WGOC	作物其他器官干重	公斤/公顷		
WGOW	杂草其他器官干重	公斤/公顷		
WGR	籽粒干重	公斤/公顷		
WLV	叶片干重	公斤/公顷		
WLVC	作物叶片干重	公斤/公顷		
WLVW	杂草叶片干重	公斤/公顷		
WR	根区的水分总量	毫米		

符号	描述	单位	方程序号	缩写词
WRT	根干重	公斤/公顷		
WST	茎干重	公斤/公顷		
Y_i	染病叶片重	公斤/公顷	111	
Y_o	起始年或时间为0时的产量	公斤/公顷	101	
Y_c	肥料试验中对照小区的产量	公斤/公顷		
Y_d	染病叶片的枯死率	公斤/公顷·日	111	YD
Y_e	平衡时的产量	公斤/公顷		
Y_m	活叶片的重量	公斤/公顷	111	
Y_n	n年的产量	公斤/公顷	95	
Y_t'	时间t时的产量	公斤/公顷	101	
Y_t	病叶重量	公斤/公顷	111	
Y_{Ax}	施用A公斤x养分的小区产量	公斤/公顷		
Z_o	地面粗糙度长度	厘米	85	
Z_t	时间 t 时的地下水位深度	厘米	46	
α	特定质地的经验常数	厘米$^{-1}$	30	
γ	特定质地的几何学因子	厘米$^{-2}$	27	
γ	湿度计常数	毫巴/°C	16	
Δ	平均气温与露点之间的饱和水汽压曲线的斜率	毫巴/°C	18	
Δt	时间间距的持续期	天	7	
ΔW	冠层干重的增长速率	公斤/公顷·日	6	DMI
ΔW_r	根层含水量的变化	毫米/日	74	
ΔZ	地下水位的变化速率	厘米/日	57	
ε	单叶同化作用的初始光			

符号	描述	单位	方程序号	缩写词
	能利用效率	公斤CO_2/焦耳	41	
ϕ	地面倾角	度	14	
ψ	土壤吸力或基质水头	厘米	27	
ψ_{cr}	标准基质水头	厘米		
ψ_{max}	特定质地的吸力极限	厘米	31	
σ	犁沟与地面的夹角	度	40	
σ	波尔兹曼常数	焦耳/米^2·日·K^4	9	

附录 3　参考文献

Agarwal, M.M., 1980. Phosphorus and potassium requirement of rice in relation to time of application. Indian Journal of agricultural Research 14: 53–56.

Andrus, J.R., 1948. Burmese economic life. Stanford University Press, Stanford, California, 362 p.

Anonymous, 1977. Agricultural statistics of Thailand; crop year 1976/77, No. 72. Ministry of Agriculture and Co-operatives, Bangkok.

Anonymous, 1980. Database of the supply module of the Thailand Agricultural Model (THAM-I). Research Report SOW-80-4, Centre for World Food Studies, Amsterdam-Wageningen.

Asseldonk, J.S.O. van, 1980. Reclamation and required technical inputs. Internal note of Centre for World Food Studies.

Bakel, P.J.T. van, 1981. Unsaturated zone and evapotranspiration. In: Evaporation in relation to hydrology. Verslagen Mededelingen Commissie Hydrologische Onderzoekingen T.N.O. 28, The Hague.

Balasubramanian, V. & L. Singh, 1982. Efficiency of nitrogen fertilizer use under rainfed maize and irrigated wheat at Kadawa, northern Nigeria. Fertilizer Research 3: 315–324.

Basak, M.N., 1962. Nutrient uptake by rice plant and its effect on yield. Agronomy Journal 54: 373–376.

Bauder, J.W. & A. Bauer, 1978. Irrigated alfalfa forage production on a well-drained sandy loam at Oakes, North Dakota 1972–1977. North Dakota Farm Research 36: 19–24.

Beek, J., 1979. Phosphate retention by soil in relation to waste disposal. Pudoc, Wageningen. 162 p.

Benneke, R.R. & R. Winterboer, 1973. Linear Programme applications to agriculture. Iowa State University Press, Ames, Iowa.

Beye, G., 1974. Etude comparative de l'action de la potasse et de la paille enfouié sur le développement et le rendement du riz, sur sol argileux de basse Casamance. Agronomie tropicale 29: 803–811.

Black, J.N., C.W. Bonython & G.A. Prescott, 1954. Solar radiation and the duration of sunshine. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society 80: 231–235.

Blair, G.J., C.P. Mamaril & M. Ismunadji, 1980. Sulfur deficiency in soils in the tropics as a constraint to food production. In: Soil-related constraints to food production in the tropics. IRRI, Los Baños, Philippines.

Boerboom, B.W.J., 1978. A model of dry matter distribution in cassava (Manihot esculenta Crantz). Netherlands Journal of agricultural Science 26: 267–277.

Bohn, H., B. McNeal & G. O'Connor, 1979. Soil Chemistry. John Wiley and Sons, New York.

Bouldin, D.R., R.S. Reid & P.J. Stangel, 1980. Nitrogen as a constraint to nonlegume food crop production. In: Soil-related constraints to food production in the tropics. IRRI, Los Baños, Philippines.

Bouwmeester, R.J.B. & P.G.L. Vlek, 1981. Rate control of ammonia volatilization from

rice paddies. Atmospheric Environment 15: 131 - 140.
Bredero, Th.J., 1965. Nitrogen, phoshorus and potassium uptake by lowland rice and its relation to yields on some Nigerian alluvial soils. Agronomy Journal 57: 421 - 425.
Bredero, Th.J., 1966. Fertilizer responses in swamp rice (*Oryza sativa* L.) in northern Nigeria. Experimental Agriculture 2: 33 - 43.
Briggs, L.J. & H.L. Shantz, 1913. The water requirements of plants. I. Investigations in the Great Plains in 1910 and 1911. USDA - Bureau of Plant Industry. Bulletin 282. 48 p.
Briggs, L.J. & H.L. Shantz, 1914. Relative water requirement of plants. Journal of agricultural Research 3: 1 - 65.
Brockman, J.S., C.M. Rope & M.T. Stevens, 1971. A mathematical relationship between nitrogen input and output in cut grass swards. Journal of the British Grassland Society 26: 75 - 77.
Brouwer, R., 1963. Some aspects of the equilibrium between overground and underground plant parts. Jaarboek IBS 1963: 31 - 39.
Brown, R.H., 1978. A difference in N-use efficiency in C3 and C4 plants and its implications in adaptation and evolution. Crop Science 18: 93 - 98.
Brunt, D., 1932. Notes on radiation in the atmosphere. I. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society 58: 389 - 420.
Buol, S.W., P.A. Sanchez, R.B. Cate & M.A. Granger, 1975. Soil fertility capability classification: a technical soil classification for fertility management. In: Bornemisza, E. & A. Alvaredo (Eds.). Soil management in tropical America. North Carolina State University, Raleigh, U.S.A.
Buringh, P. & H.D.J. van Heemst, 1979. Potential world food production. In: Linnemann, H., J. de Hoogh, M.A. Keyzer & H.D.J. van Heemst. MOIRA: Model of International relations in agriculture. Contributions to Economic Analysis 124. North-Holland Publishing Company, Amsterdam. p 19 - 72.
Cours, G., 1948. Le manioc à Madagascar. Mémoires de l'Institut Scientifique de Madagascar. Serie B-Tome III-Fascicule 2: 291 - 294, 299.
Dabin, B., 1980. Phosphorus deficiency in tropical soils as a constraint on agricultural output. In: Soil-related constraints to food production in the tropics. IRRI, Los Baños, Philippines.
Darwinkel, A., 1980a. Grain production of winterwheat in relation to nitrogen and diseases. I. Relation between nitrogen dressing and yellow rust infection. Zeitschrift für Acker- und Pflanzenbau 149: 299 - 308.
Darwinkel, A., 1980b. Grain production of winterwheat in relation to nitrogen and diseases. II. Relation between nitrogen dressing and mildew infection. Zeitschrift für Acker- und Pflanzenbau 149: 309 - 317.
Dash, R.N., S.K. Mohanty & S. Patnaik, 1982. Comparative study of reactivity and agronomic effectiveness of Indian, US, African and Middle East rock phosphates for growing rice. Fertilizer Research 3: 177 - 189.
Diest, A. van, 1978. Factors affecting the availability of potassium in soils. In: Potassium Research - Reviews and Trends. Proceedings of the 11th International Congress of the International Potash Institute, Bern.
Dobben, W.H. van, 1979. Aanpassingen bij het milieu. In: Alberda, Th. (Ed.), De groene aarde. Aula-boek 250. Het Spectrum, Utrecht/Antwerpen, 313 - 396.
Doorenbos, J. & A.H. Kassam, 1979. Yield response to water. Irrigation and Drainage

paper 33, F.A.O., Rome. 193 p.
Doorenbos, J., A.H. Kassam, C. Bentvelder & G. Uittenboogaard, 1978. Yield response to water. U.N. Economic Commission West Asia, Rome.
Doorenbos, J. & W.O. Pruitt, 1977. Guidelines for predicting crop water requirements. Irrigation and Drainage paper 24, F.A.O., Rome. 144 p.
Downton, W.J.S., 1975. The occurrence of C4 photosynthesis among plants. Photosynthetica 9: 96–105.
Driessen, P.M., 1978. Peat Soils. In: Soils and Rice. IRRI, Los Baños, Philippines.
Dufournet, R. & P. Goarin, 1957. Note sur la culture du manioc à Madagascar. Riz et Riziculture 3: 15–16.
Duncan, W.G., R.S. Loomis, W.A. Williams & R. Hanau, 1967. A model for simulating photosynthesis in plant communities. Hilgardia 38: 572–582.
Erdman, J.W., 1972. Een vergelijkend groei-analytisch onderzoek van de rijstcultivars IR8 en Acorni. CELOS-rapporten No. 78, CELOS, Paramaribo, Suriname. 30 p.
Esakkimuthu, N., K.K. Krishnamoorthy & S. Loganathan, 1975. Influence of nitrogen and potassium and method of application of potassium on yield and nutrients uptake in rice. Journal of the Indian Society of Soil Science 23: 452–457.
Farrington, J., 1975. Farm surveys in Malawi: the collection and analysis of labour data. Development Study no. 16. University of Reading. Department of Agricultural Economics and Management. 109 p.
F.A.O., 1979. Watershed development, with special reference to soil and water conservation. F.A.O. Soils Bulletin 44.
Flynn, L.M., C.W. Gehrke, M.E. Mührer, G.E. Smith & M.S. Zuber, 1957. Effects of temperature, rainfall and fertilizer on yields and composition of corn plants. Agricultural Experiment Station of Missouri. Research Bulletin 620. 24 p.
Fox, R.H., H. Talleyrand & D.R. Bouldin, 1974. Nitrogen fertilization of corn and sorghum grown in Oxisols and Ultisols in Puerto Rico. Agronomy Journal 66: 534–540.
Fox, R.H., H. Talleyrand & T.W. Scott, 1975. Effect of nitrogen fertilization on yields and nitrogen content of cassava, Llanera cultivar. Journal of Agriculture of the University of Puerto Rico 59: 115–124.
Frère, M. & G.F. Popov, 1979. Agrometeorological crop monitoring and forecasting. F.A.O. Plant Production and Protection Paper 17, F.A.O., Rome, 64 p.
Geus, J.G. de, 1973. Fertilizer guide for the tropics and subtropics. Centre d'Etude de l'Azote, Zurich.
Gifford, R.M., 1974. A comparison of potential photosynthesis, productivity and yield of plant species with differing photosynthetic metabolism. Australian Journal of Plant Physiology 1: 107–117.
Glover, J. & J.S.G. McCulloch, 1958. The empirical relation between solar radiation and hours of sunshine. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society 84: 172–175.
Goudriaan, J., 1977. Crop micrometeorology: a simulation study. Simulation Monographs. Pudoc, Wageningen. 249 p.
Goudriaan, J. & H. H. van Laar, 1978a. Calculation of daily totals of the gross CO2 assimilation of leaf canopies. Netherlands Journal of agricultural Science 26: 416–425.
Goudriaan, J. & H.H. van Laar, 1978b. Relations between leaf resistance, CO2-concentration and CO2-assimilation in maize, beans, Lalang grass and sunflower. Photo-

synthetica 12: 241–249.
Grace, J., 1983. Plant-atmosphere relationships. Outline studies in ecology. Chapman & Hall, London, New York. 92 p.
Greenland, D.J., 1974. Evolution and development of different types of shifting cultivation. In: Shifting cultivation and soil conservation in Africa. FAO, Rome, Soils Bulletin 24: 5–13.
Grove, T.L., K.D. Ritchey & G.C. Naderman, Jr., 1980. Nitrogen fertilization of maize on an Oxisol of the Cerrado of Brazil. Agronomy Journal 72:261–265.
Hanway, J.J., S.A. Barber, R.H. Bray, A.C. Caldwell, M. Fried, L.T. Kurtz, K. Lawton, J.T. Pesek, K. Pretty, M. Reed & F.W. Smith, 1962. North Central regional potassium studies. III. Field studies with corn. North Central regional publication no. 135. Agricultural and home economics experiment station. Iowa State University. Research Bulletin 503: 407–438.
Heemst, H.D.J. van, J.J. Merkelijn & H. van Keulen, 1981. Labour requirements in various agricultural systems. Quarterly Journal of international Agriculture, Frankfurt (Main) 20: 178–201.
Hochman, Z., 1978. Wheat in a semi-arid environment: A field and simulation study of the effects of water stress on yield. M.Sc. Thesis. University of Sydney, Australia. 172 p.
Hochman, Z., 1982. Effect of water stress with phasic development on yield of wheat grown in a semi-arid environment. Field Crops Research 5: 55–67.
Howeler, R.H., 1981. Mineral nutrition and fertilization of cassava. Centro Internacional de Agricultura Tropical, CIAT, Apartado 6713, Cali, Colombia. 52 p.
ILRI, 1972. Veldboek voor land- en waterdeskundigen. International Institute for Land Reclamation and Improvement, Wageningen.
Ismunadji, M. & Sismiyati, 1976. Studies on fertilizer nitrogen efficiency in lowland rice on an acid latosol of Indonesia. Paper presented at IRRI Annual Conference, April 12–15.
Jacob, A. & H. von Uexküll, 1958. Fertilizer use. Nutrition and manuring of tropical crops. Verlaggesellschaft für Ackerbau m.b.H., Hannover.
Jung, Jr., P.E., L.A. Peterson & L.E. Schrader, 1972. Response of irrigated corn to time, rate, and source of applied N on sandy soils. Agronomy Journal 64: 668–670.
Kamolpatana, H. & L.D. Walker, 1969. Crop labour time and motion study of selected crops in North-East Thailand. Bangkok, U.S.O.M. 65 p.
Kanapathy, K., 1974. Fertilizer experiments on shallow peat under continuous cropping with Tapioca. Malaysian agricultural Journal 49: 403–412.
Kang, B.T., F. Donkoh & K. Moody, 1977. Soil fertility management investigations on Benchmark soils in the humid low altitude tropics of West Africa: Investigations on Egbeda soil series. Agronomy Journal 69: 651–656.
Kang, B.T. & M. Yunusa, 1977. Effect of tillage methods and phosphorus fertilization on maize in the humid tropics. Agronomy Journal 69: 291–294.
Kemmler, G., 1980. Potassium deficiency in soils of the tropics as a constraint to food production. In: Soil-related constraints to food production in the tropics. IRRI, Los Baños, Philippines.
Kennes, W., 1981. Analysis of food expenditure patterns in Thailand. Staff working paper 81-5 (draft), Centre for World Food Studies, Amsterdam-Wageningen.
Keulen, H. van, 1975. Simulation of water use and herbage growth in arid regions. Simulation Monographs, Pudoc, Wageningen. 176 p.

Keulen, H. van, 1976. A calculation method for potential rice production. Contributions of the Central Research Institute for Agriculture, Bogor (Indonesia), no. 21, 26 p.

Keulen, H. van, 1977. Nitrogen requirements of rice with special reference to Java. Contributions of the Central Research Institute for Agriculture, Bogor (Indonesia), no. 30, 67 p.

Keulen, H. van, 1982. Graphical analysis of annual crop response to fertiliser application. Agricultural Systems 9: 113–126.

Keulen, H. van & H.D.J. van Heemst, 1982. Crop response to the supply of macronutrients. Verslagen Landbouwkundige Onderzoekingen (Agricultural Research Reports) 916. Pudoc, Wageningen, 46 p.

Keulen, H. van & N.G. Seligman, 1986. Simulation of water use, nitrogen nutrition and growth of a spring wheat crop. Simulation Monographs, Pudoc, Wageningen. (in prep.)

Khind, C.S. & F.N. Ponnamperuma, 1981. Effects of water regime on growth, yield, and nitrogen uptake of rice. Plant and Soil 59: 287–298.

Kirkham, D., 1958. Seepage of steady rainfall through soil into drains. Transactions of the American Geophysical Union 39: 892–908.

Kirkham, D., 1961. The upper limit for the height of water table in drainage design formulas. ISSS Proceedings of the Madison Conference 486–492.

Köhnlein, J., 1972. Einfluss der winterlichen Stickstoffauswaschung auf die Stickstoffversorgung des Getreides. Untersuchungen auf lehmiger Parabraunerde in Schleswig-Holstein. Landwirtschaftliche Forschung 25: 1–15.

Koyama, T., C. Chammek & N. Niamsrichand, 1973. Nitrogen application technology for tropical rice as determined by field experiments using 15N tracer technique. Tropical Agricultural Research Center, Tokyo. Technical Bulletin no. 3, 79 p.

Krantz, B.A., W.L. Nelson, C.D. Welch & N.S. Hall, 1949. A comparison of phosphorus utilization by crops. Soil Science 68: 171–177.

Lathwell, D.J., H.D. Dubey & R.H. Fox, 1972. Nitrogen-supplying power of some tropical soils of Puerto Rico and methods for its evaluation. Agronomy Journal 64: 763–766.

Lehr, J.J., 1950. Differences in the recovery of nitrogen from ammoniacal and nitrate sources in the reclaimed polders of the Zuyder Zee. Plant and Soil 2: 345–357.

Linnemann, H., J. de Hoogh, M.A. Keyzer & H.D.J. van Heemst, 1979. MOIRA: Model of International relations in agriculture. Contributions to Economic Analysis 124. North-Holland Publishing Company, Amsterdam. 379 p.

Loué, A., 1963. A contribution to the study of the inorganic nutrition of maize, with special attention to potassium. Fertilité 20: 5–32.

Lusanandana, B., S. Suwanwaong & P. Sanitwongse, 1966. A study on comparative efficiency of different forms of fertilizer nitrogen for rice. Technical Division, Rice Department, Ministry of Agriculture, Bangkok.

Mahapatra, I.C. & S.C. Panda, 1972. Uptake and utilization of nitrogen, phosphorus and potassium by dwarf *Indica* rices. IRC-Newsletter 21: 1–19.

Majumdar, D.K., 1973. Uptake of nitrogen and phosphate as influenced by sowing time and fertilization and recoveries of nitrogen and phosphate from the added fertilizers by rice (*Oryza sativa* L.). Indian Agriculturist 17: 69–74.

Meadows, D.L., D. Meadows & J. Randers, 1972. The limits to growth. Universe Books, New York.

Mederski, H.J., M.E. Miller & C.R. Weaver, 1973. Accumulated heat units for classifying corn hybrid maturity. Agronomy Journal 65: 743–747.

Mitra, G.N., V.A.K. Sharma & B. Ramamoorthy, 1958. Comparative studies on the potassium fixation capacities of Indian soils. Journal of the Indian Society of Soil Science 6: 1–6.

Monteith, J.L., 1965. Evaporation and environment. In: Fogg, G.E. (Ed.), The state and movement of water in living organisms. Cambridge University Press, London.

Monteith, J. L., 1973. Principles of environmental physics. William Clowes & Sons, London. 241 p.

Moormann, F.R. & N. van Breemen, 1978. Rice: Soil, Water, Land. IRRI, Los Baños, Philippines.

Moschler, W.W. & D.C. Martens, 1975. Nitrogen, phosphorus, and potassium requirements in no-tillage and conventionally tilled corn. Soil Science Society of America Proceedings 39: 886–891.

Motsara, M.R. & N.P. Datta, 1971. Rock phosphate as a fertilizer for direct application in acid soils. Journal of the Indian Society of Soil Science 19: 107–113.

Müller, P. & W. Reiher, 1966. Auswertung langjahriger Ertragsfeststellungen (dargestellt am Versuch "ewiger Roggenbau" in Halle). Albrecht Thaer Archiv 10. 47 p.

Nijholt, J.A., 1936. Opname van voedingsstoffen uit den bodem bij cassave. Buitenzorg Algemeen Proefstation voor den Landbouw. Mededeelingen no. 15, 25 p.

Nuttonson, M.Y., 1953. Phenology and thermal development as a means for a physiological classification of wheat varieties and for predicting maturity dates of wheat. American Institute of Crop Ecology, Washington DC, 188 p.

Nuttonson, M.Y., 1955. Wheat climate relationships and the use of phenology in ascertaining the thermal and photoperiodic requirements of wheat. American Institute of Crop Ecology, Washington DC, 388 p.

Odell, R.T., J.C. Dijkerman, W. van Vuure, S.W. Melsted, A.H. Beavers, P.M. Sutton, L.T. Kurtz & R. Miedema, 1974. Characteristics, classification and adaptation of soils in selected areas in Sierra Leone, West Africa. Bulletin 4, Njala University College, University of Sierra Leone.

Olson, R.V., 1980. Fate of tagged nitrogen fertilizer applied to irrigated corn. Soil Science Society of America Journal 44: 514–517.

Olson, R.A., K.D. Frank & A.F. Dreier, 1964. Controlling losses of fertilizer nitrogen from soils. Proceedings of the 8th International Congress of Soil Science, Bucharest, Romania, 1023–1032.

Oostendorp, D., 1964. Stikstofbemesting en grasgroei in het voorjaar. Landbouwkundig Tijdschrift 76: 101–110.

Orioli, G.A., I. Mogilner, W.L. Bartra & P.A. Semienchuk, 1967. Acumulacion de materia seca, N, P, K y Ca en Manihot esculenta. Bonplandia Tomo II 13: 175–180.

Patnaik, S. & S.T. Gaikawad, 1969. Efficiency of phosphorus and potassium absorbed during various growth stages of 'IR 8' for grain production. Indian Journal of agricultural Science 39: 117–121.

Patrick, Jr., W.H., W.A. Quirck, III, F.J. Peterson & M.D. Faulkner, 1967. Effect of continuous submergence versus alternate flooding and drying on growth, yield, and nitrogen uptake of rice. Agronomy Journal 59: 418–419.

Penman, H.L., 1948. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. Proceedings of the Royal Society A193: 120–145.

Penman, H.L., 1956. Evaporation: an introductory survey. Netherlands Journal of

agricultural Science 4: 9 – 29.

Penman, H.L., 1963. Vegetation and hydrology. Commonwealth Bureau of Soils, Harpenden, Technical Communications no. 53. 124 p.

Penning de Vries, F.W.T., 1975a. The use of assimilates in higher plants. In: Cooper, J.P. (Ed.), Photosynthesis and productivity in different environments. Cambridge University Press, p. 459 – 480.

Penning de Vries, F.W.T., 1975b. The cost of maintenance processes in plant cells. Annals of Botany 39: 77 – 92.

Penning de Vries, F.W.T. & H. van Keulen, 1982. La production actuelle et l'action de l'azote et du phosphore. In: Penning de Vries, F.W.T. & M.A. Djitèye (Eds.). La productivité des pâturages sahéliens. Une étude des sols, des végétations et de l'exploitation de cette ressource naturelle. Pudoc, Wageningen. p. 196 – 226.

Penning de Vries, F.W.T., J.M. Krul & H. van Keulen, 1980. Productivity of Sahelian rangelands in relation to the availability of nitrogen and phosphorus from the soil. In: Rosswall, T. (Ed.). Nitrogen cycling in West African Ecosystems.

Penning de Vries, F.W.T. & H.H. van Laar (Eds.), 1982. Simulation of plant growth and crop production. Simulation Monographs, Pudoc, Wageningen. 308 p.

Penning de Vries, F.W.T., H.H. van Laar & M.C.M. Chardon, 1983. Bio-energetics of growth of seeds, fruits and storage organs. Symposium 'Potential Productivity of field crops under different environments'. IRRI, Manila, Philippines. p. 37 – 59.

Penning de Vries, F.W.T., J.M. Witlage & D. Kremer, 1979. Rates of respiration and of increase in structural dry matter in young wheat, ryegrass and maize plants in relation to temperature, to water stress and their sugar content. Annals of Botany 44: 595 – 609.

Puh, Y.S. & H. Khunathai, 1971. A comparative study on testing methods for determining available phosphorus of paddy soils in Thailand. FAO/UNDP. Soil Fertility Research Project, Bangkok. (Mimeograph).

Rabbinge, R. & F.H. Rijsdijk, 1982. Disease and crop physiology: a modeller's point of view. In: Ayres, P.G. (Ed.), Effects of diseases on the physiology of the growing plant. Society for Experimental Biology – Seminar Series II. Cambridge, p. 201 – 220.

Rabbinge, R., E.M. Drees, M. van der Graaf, F.C.M. Verberne & A. We sselo, 1981. Damage effects of cereal aphids in wheat. Netherlands Journal of Plant Pathology 87: 217 – 232.

Rabuffetti, A. & E. J. Kamprath, 1977. Yield, N, and S content of corn as affected by N and S fertilization on coastal plain soils. Agronomy Journal 69: 785 – 788.

Raghavendra, A.S. & V.S.R. Das, 1978. The occurrence of C4 photosynthesis: A supplementary list of C4 plants reported during late 1974 – mid 1977. Photosynthetica 12: 200 – 208.

Raschke, K., 1975. Stomatal action. Annual Review of Plant Physiology 26: 309 – 340.

Reddy, K.R. & W.H. Patrick, Jr., 1978. Utilization of labelled urea and ammonium sulfate by lowland rice. Agronomy Journal 70: 465 – 467.

Rietveld, M.R., 1978. A new method for estimating the regression coefficients in the formula relating solar radiation to sunshine. Agricultural Meteorology 19: 243 – 252.

Rijsdijk, F.H., 1979. Verliezen in de Nederlandse tarweteelt. Gewasbescherming 10: 196 – 199.

Rijsdijk, F.H. 1980. System analysis on the cross-road of plant pathology and crop

physiology. Zeitschrift für Pflantzenkrankheiten und Pflantzenschütz 8: 404–408.
Rijsdijk, F.H. & J.C. Zadoks, 1979. A data bank on crop losses: First experiences. EPPO Bulletin 9: 297–303.
Rijtema, P.E., 1965. An analysis of actual evapotranspiration. Verslagen landbouwkundige Onderzoekingen (Agricultural Research Reports) 659, Pudoc, Wageningen. 107 p.
Rijtema, P.E., 1969. Soil moisture forecasting. Nota 513, I.C.W., Wageningen. 18 p.
Ritchie, J.T., 1972. Model for predicting evapotranspiration from a row crop with incomplete cover. Water Resources Research 8: 1208–1213.
Roche, P., L. Grière, D. Babre, H. Calba & P. Fallavier, 1978. La carence en phosphore des sols intertropicaux et ses méthodes d'appreciation. Abstracts 11th International Congress of Soil Science, Volume I, 24. Edmonton, Canada.
Rose, C.W., 1966. Agricultural Physics. Pergamon Press, London. 230 p.
Roy, R.N. & B.C. Wright, 1973. Sorghum growth and nutrient uptake in relation to soil fertility. I. Dry matter accumulation patterns, yield and N-content of grain. Agronomy Journal 65: 709–711.
Roy, R.N. & B.C. Wright, 1974. Sorghum growth and nutrient uptake in relation to soil fertility. II. N, P and K uptake pattern by various plant parts. Agronomy Journal 66: 5–10.
Sadanandan, A.K., S.K. Mohanty, S. Patnaik & K.B. Mistry, 1980. 32P tracer studies on the efficiency of ammonium nitrate phosphates and polyphosphates for growing rice on different soil types. Journal of nuclear Agriculture Biology 9: 135–13.
Sanchez, P.A. & T.T. Cochrane, 1980. Soil constraints in relation to major farming systems in tropical America. In: Soil-related constraints to food production in the tropics. IRRI, Los Baños, Philippines.
Sanchez, P.A., G.E. Ramirez & M.V. de Calderon, 1973. Rice responses to nitrogen under high solar radiation and intermittent flooding in Peru. Agronomy Journal 65: 523–529.
Shantz, H.L. & L.N. Piemeisel, 1927. The water requirements of plants at Akron, Colorado. Journal of agricultural Research 34: 1093–1190.
Sibma, L., 1968. Growth of closed green crop surfaces in the Netherlands. Netherlands Journal of agricultural Science 16: 211–216.
Sieben, W.H., 1974. Effect of drainage conditions on nitrogen supply and yield of young loamy soils in the IJsselmeerpolders. Van Zee tot Land 51. 180 p. (Dutch, with English summary).
Sinclair, T.R. & C.T. de Wit, 1975. Photosynthesis and nitrogen requirements for seed production by various crops. Science 189: 565–567.
Slobbe, W.G. van, 1973. Een vergelijkend groei-analytisch onderzoek van de rijstcultivar Acorni bij verschillende plantdichtheden. CELOS- rapporten No. 86, CELOS, Paramaribo, Surinam. 27 p.
Somsak, C., 1974. Cassava production and its future in Thailand. In: FAO/UNDP International Expert Consultation on the use of improved technology for food production in rainfed areas of tropical Asia. Annex II. FAO, Rome.
Spitters, C.J.T. & R. Aerts, 1983. Simulation of competition for light and water in crop-weed associations. Aspects of applied Biology 4: 467–483.
Stolwijk, H.J., 1983. The supply component of BAM. Working paper SOW-83-8, Centre for World Food Studies, Amsterdam, Wageningen.
Strahler, A.N., 1963. The earth sciences. Harper & Row Publishers, New York. 681 p.

Stroosnijder, L. 1976. Infiltratie en herverdeling van water in grond. Verslagen Landbouwkundige Onderzoekingen (Agricultural Research Reports) 847, Pudoc, Wageningen. 213 p.

Stroosnijder, L. & D. Koné, 1982. Le bilan d'eau du sol. In: Penning de Vries, F.W.T. & M.A. Djitèye (Eds.). La productivité des pâturages sahéliens. Une étude des sols, des végétations et de l'exploitation de cette ressource naturelle. Pudoc, Wageningen, p. 133–165.

Suwanarit, A., 1975. Integrated research program on soil and fertilizer requirement for increasing yields of corn and sorghum. In: Thailand National Corn and Sorghum program. Annual Report Kasetsart University, Department of Agriculture, p. 228–266.

Tanaka, A., S.A. Navasero, C.V. Garcia, F.T. Parao & E. Ramirez, 1964. Growth habit of the rice plant in the tropics and its effect on nitrogen response. IRRI, Technical Bulletin no. 3, 80 p.

Thai Rice Department, 1956. A summary report on yield response of some Thai rice verieties to varying N and P_2O_5 combinations. Soil Fertility Branch, Ministry of Agriculture, Bangkok.

Traoré, M.-F., 1974. Etude de la fumure minerale azotée intensive des céréales et du rôle specifique de la matière organique dans la fertilité des sols au Mali. Agronomie tropicale 29: 567–586.

U.S.D.A. Soil Conservation Service, 1975. Soil Taxonomy. Agriculture Handbook no. 436, Washington D.C.

Veen, J.A. van, 1977. The behaviour of nitrogen in the soil. A computer simulation model. Ph.D. thesis, Univ. of Amsterdam. 164 p.

Veihmeyer, F.J. & A.H. Hendrickson, 1949. Methods of measuring field capacity and wilting percentages of soils. Soil Science 68: 75–94.

Viets, F.G. Jr., 1962. Fertilizers and the efficient use of water. Advances in Agronomy 14:223–264.

Vuure, W. van & R. Miedema, 1973. Soil survey of the Makeni Area, Northern Province, Sierra Leone. Njala University College, University of Sierra Leone.

Walcott, J.J., M. Chauviroj, A. Chinchest, P. Choticheuy, R. Ferraris & B.W. Norman, 1977. Long-term productivity of intensive rice cropping systems on the central plain of Thailand. Experimental Agriculture 13: 305–315.

Williams, N.H., M.D. Morse & J.R. Ruckman, 1972. Burning vs. incorporation of rice crop residues. Agronomy Journal 64: 467–463.

Wit, C.T. de, 1953. A physical theory on placement of fertilizers. Verslagen landbouwkundige Onderzoekingen (Agricultural Research Reports) 59.4. Staatsdrukkerij, 's-Gravenhage. 70 p.

Wit, C.T. de, 1957. An analysis of some pilot fertilizer experiments on paddy. Netherlands Journal of agricultural Science 5: 284–289.

Wit, C.T. de, 1958. Transpiration and crop yields. Verslagen landbouwkundige Onderzoekingen (Agricultural Research Reports) 64.6, Pudoc, Wageningen. 88 p.

Wit, C.T. de, 1965. Photosynthesis of leaf canopies. Verslagen landbouwkundige Onderzoekingen (Agricultural Research Reports 663, Pudoc, Wageningen, 57 p.

Wit, C.T. de, 1969. Een bodemvruchtbaarheidstheorie uit de eerste helft van de 19e eeuw. Landbouwkundig Tijdschrift 81: 245–251.

Wit, C.T. de, 1974. Early concepts in soil fertility. Netherlands Journal of agricultural Science 22: 319–324.

Wit, C.T. de et al., 1978. Simulation of assimilation, respiration and transpiration of crops. Simulation Monographs, Pudoc, Wageningen. 141 p.
Wit, C.T. de & J. Groudriaan, 1978. Simulation of ecological processes. Simulation Monographs, Pudoc, Wageningen. 175 p.
Wulfen, C. von, 1823. Ideeen zur Grundlage einer Statik des Landbaues. Mogliner Annalen, Band XI.
Yoshida, S., 1980. Fundamentals of rice crop science. IRRI, Los Banos, Philippines. 269 p.
Yoshida, S., F.T. Parao & H.M. Beachell, 1972. A maximum annual rice production trial in the tropics. IRC-Newsletter 21: 27–32.

附录 4　模型的程序清单

```
Pro Fortran Compiler-Version zz 1. 2
Compilation of: B: RANDOM. FOR
Options:        L
   1            DIMENSION A (180), C (48), D (48)
   2            OPEN (3, 'CLIMEAN. DAT')
   3            OPEN (4, 'SOILDATA. DAT')
   4            OPEN (6, 'RIJTEMA. DAT')
   5            OPEN (7, 'SOILDATA. RDM', RECL=160)
   6            OPEN (9, 'RIJIEMA. RDM', RECL=48)
   7            OPEN (10, 'LLIMLHN. RDM', RECL=48)
   8            DO 10 I=1, 150
   9            READ (4, 1000, END=21) A
  10     10     WRITE (7, 1000, REC=1) A
  11     21     DO 30 I=1, 150
  12            READ (6, 1000, END=31) C
  13     30     WRITE (9, 1000, REL=1) C
  14     31     DO 40 I=1, 150
  15            READ (3, 1000, END=41) D
  16     40     WRITE (10, 1000, REC=1) D
  17     41     CONTINUE
  18   1000     FORMAT (160A1)
  19            STOP
  20            END
Pro Fortran Compiler-Version zz 1.2
```

```
Compilation of: B: RANDOMP. FOR
Options:        L
  1             DIMENSION B (100)
  2             OPEN (5, 'PLANTDAT. DAT')
  3             OPEN (8, 'PLANTDAT. RDM', RECL=100)
  4             DO 20 I=1, 900
  5             READ (5, 1000, END=21) B
  6       20    WKITE (8, 1000, REC=I) B
  7     1000    FORMAT (120A1)
  8       21    STOP
  9             END
Pro Fortran Compiler-Version zz 1.2
Compilation of: B: WOFAUTN. FOR
Options: L
  1       C     MAIN PROGRAM LENTRE FOR WORLD
                FOOD SIUDIES
  2       C     MILRO VERSION LP/M PRUSPERO
                FORTRAN 66
  3       C
  4             INCLUDE 'WOFOST. LMN'
  5       C     DATA BLOCK OF DATABASE
  6             IMPLICIT REAL (A-H, J-Z), INTEGER (I)
  7             COMMON/PLANT/CVL, CVO, CVR, CVS, EXC
  8             COMMON/PLANT/PERDL, PLRRT,
                PERST, Q10, RD
  9             COMMON/PLANT/RML, RMO, RMR, RMS,RR
 10             COMMON /PLANT/SLATB (30), SPA, SSA
 11             COMMON /PLANT/TBASE, TDW, CROPT,
                DVRC1, DLO,DLC, DVRC2, DSL
 12             COMMON /PLANT/FLTB (30), PRTB (30),
```

```
      FOTB (30), FSTB(30), SWDPTB (30)
      COMMON /PLANT/DVRETB (30), ISPAN,
     nperso, nperve, pperso, pperve
      COMMON /PLANT/AIRDUC, nptb (30)
C
      COMMON /SOIL/LEF, CLODAN, DD, DRA, OSP
      COMMON /SOIL/FAEF, FCEF, K0, MHMAX,
     RDM, S0
      COMMON /SOIL/SAL, SM0, SOPE, SURRO,
     ZTMI, ZTMA
      COMMON /SOIL/TSC1, TSC2, TSGF, ZT TEXTCL
      COMMON /SOIL/SM, SMEC, SMFCF, SMW,
     SM10, SSMAX, RIJTEM (8, 10)
      COMMON /SOIL/DRAINS, nbase, pbase, nrec, prec
C
      COMMON /CLMT/TEMPTB (30), RAINTB (12),
     ETOTB (30), EOTB (30), PGS4TB (30)
      COMMON /CLMT/PGS3TB (30), TBIRR (30),
     TCC4 (30), TCC3T (30), TCC3M (30)
      COMMON /CLMT/GEOP, raind (12)
C
      common /div/manf1, manf2, twlv, twst, tweo,
     lvbas1, stbas1, sobas1.
     1 lvbas2, stbas2, sobas2, umax, pmax, gdur,
     lvopt, stopt, soopt, neo, new,
     2 wusew, wuseo, tsr
C
      LOGICAL * 1 CRPNAM, CLMNAM
      COMMON /NAMES/CRPNAM (30),CLMNAM (30)
      dimension conv (40), hvl (40), idisr (40),
```

```
      tabl (30), tab2 (30), ihp (40)
      dimension output (18), climt (5), soilty (5),
      surrot (5), salt (5)
      dimension ztmit (5), ztmat (5), lustxt (5,5)
      data climt/1., 2., 3., 5., 6/
      data soilty/5., 6., 9., 10., 11./
      data surrot/2., 2., 2., 2., 2./
      data salt/1. 5, 1. 5, 1. 5, 1. 5, 1. 5/
      data ztmit/5 * 0./
      data ztmat/500., 400., 300., 200., 100./
      data lustxt/. 35., 52, 0., 0., 0., 5., 05., 7, 0.,
      0., 25., 43., 2., 65, 0.,
     1  0., 0., 0., 1., 25., 0., 0., 1., 25., 75/
C
      data conv/1. 15, 6 * 1. 4, 2 * . 28., 75, 1., 1.
      15., 4., 79, 1. 12., 78, 4. 55,
     1  1. 14., 44, 1. 14, 3. 13, 7. 14., 53, 4. 35, 16 * 1.
      data hvl/7 * . 07, 2 * 0., 2., 0., 07., 1., 1, 3 * .
      05., 1., 2., 07, 4 * . 1, 16 * 0.7
      data idisr/14 * 1, 2, 2, 4 * 1, 2, 2, 1, 2, 16 * 1/
      data tab1/. 3., 15., 7., 4, 26 * 0./
      data tab2/. 3., 3./., 45, 26 * 0./
      data ihp/7 * 3, 2 * 2, 3, 2, 3 * 3, 1,3,2, 7 * 3 16 * 3,
C
C
      OPEN (3, 'WOFOST. IN')
      OPEN (7, 'SOILDATA. RDM', RECL=150)
      OPEN (8, 'PLANTDAT. RDM', RECL=100)
      OPEN (9, 'RIJTEMA. RDM', RECL=48)
      OPEN (10, 'CLIMEAN. RDM', RECL=48)
```

```
59          open (15, 'result. dat')
60    C
61    1     READ (3, 1002, END=999) lunit, CROP, STARTD
62    1002  FORMAT (2F2. 0, 1 4.0)
63          icrop=crop
64          ilunit=lunit
65          clim=climt (ilunit)
66          surro=surrot (ilunit)
67          sal=salt (ilunit)
68          ztmi=ztmit (ilunit)
69          ztma=ztmat (ilunit)
70          iopt=0
71          do 10 i 10= 1, 5
72          if (lustxt (ilunit, i 10). eq.0.) goto 10
73          textcl=soilty (i 10)
74          it (iopt.gt. 0) goto 5
75    C
76          CALL SOILR
77    C
78          CALL CRDAT
79    C
80    C
81          CALL PLANTR (CROP)
82    C
83    C
84          CALL CLIMIN (CLIM)
85    C
86          IPS=1
87          IDAY=STARTD
88          NBASE=33,
```

```
      NREC=.2
      PBASE=5.
      PREC=. 1
C
C
      CALL APPLE (IDAY, 0, IPS)
      iopt=1
5     CALL SOILR
      CALL PLANTR (CROP)
      IDAY=STARTD
      CALL APPLE (IDAY, 1, IPS)
      call nutri (ips)
C
      output (1)=lvopt
      output (2)=stopt
      output (3)=soopt
      output(4)=twlv
      output(5)=twst
      output(6)=twso
      output(7)=lvbas1
      output(8)=stbas1
      output(9)=sobas1
      output(10)=lvbas2
      output(11)=stbas2
      output(12)=sobas2
      do 222 i1=1, 12,3
      i11=i1-1
      do 223 i2=1, 3
      i3=i2-1
223   output(i1+i3)=output(i1+i3) * (1. -hvl
```

```
        (icrop)) * 1.15
119     i111=ihp(icrop)+i11
120 222 output(i111)=output(i111)/1.15 * conv(icrop)
121 C
122     ichoic=ihp(icrop)
123     goto (20, 30, 40), ichoic
124 20  neoc=(output(1)-output(/))/neo
125     newc=(output(4)-output(10))/neo
126     goto 50
127 30  neoc=(output(2)-output(8))/neo
128     newc=(output(5)-output(11))/neo
129     goto 50
130 40  neoc=(output(3)-output(9))/neo
131     (newc=output(6)-output(12))/neo
132 50  do 224 i4=13, 15
133     i5=i4-6
134     i6=i4-12
135     if(idisr(icrop). eq. 1)
136  1  distac-afgen(tabl, output (i5)/(output(i6)+1.))
137     if(idisr(icrop). eq. 2)
138  1  distac=afgen(tab2, output(i5)/(output(i6)+1.))
139 224 output(i4)-output(i5) * (1.-distac)
140     do 225 i4=16, 18
141     i5=i4-6
142     i6=i4-15
143     if (idisr(icrop). eq. 1)
144  1    distac=afgen(tabl, output(i5)/(output(i6)+1.))
145     if(idisr(icrop).eq.2)
146  1    distac=afgen(tab2, output(i5)/(output(i6)+1.))
147 225 output(i4)-output(i5) × (1. -distac)
```

```
148   C
149         write(15,2222)lunit, TEXTCL, lust×t
            (ilunit,i 10), CROP, STARTD,
150    1    wuseo, wusew, tsr, neoc, newc, gdur, output
151   2222  format(2f4. 0, t5. 2, 2f5. 0, 6f7, 2,/22×,6f8.
            0,/22×, 6f8, 0, 122×, 6f8, 0)
152   C
153   C
154   10    CONTINUE
155         GOTO 1
156   999   CLOSE (3)
157         close (15)
158         STOP
159   C
160         END
161   C*    * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * *
162         BLOCK DATA
163   C*    * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * *
164         INCLUDL 'WOFOST. LMN'
165   C     DATA BLOCK OF DATABASE
166         IMPLICIT REAL (A-H, J-Z), INTEGER(I)
167         COMMON /PLANT/LVL, LVU, LVR. LVS, EXC
168         COMMON /PLANT/PERDL, PERRT,
            PERST, Q10, RD
169         COMMON /PLANT/RML, RMU, RMR, RMS, RR
170         COMMON /PLANT/SLATB(30), SPA, SSA
171         COMMON /PLANT/TBASE, TDW, CROP1,
            UVRC1. DLU, DLL, DVRC2. DSL
172         COMMON /PLANT/FLTB(30), FRTB(30),
            FOTB(30), FSTB(30), SWUPTB(30)
```

```
      COMMON /PLANT/DVRETB(30), 15PAN,
     nperso, nperve, pperso, pperve
      COMMON /PLANT/AIRDUC, uptb(30)
C
      COMMON /SOIL/CEF, CLODAN, DD, DRA, DSP
      COMMON /SOIL/FAEF, FCEF, K0,
     MHMAX, RDM, S0
      COMMON /SOIL/SAL, SM0, SOPE,
     SURRO, ZTMI, ZTMA
      COMMON /SOIL/TSC1, TSC2, TSGF, ZT, TEXTCL
      COMMON /SOIL/SM, SMFC, SMFCI, SMW,
     SM10, SSMAX, RIJTEM(8, 10)
      COMMON /SOIL/DRAINS, nbase, pbase,
     nrec, prec
C
      COMMON /CLMT/TEMPTB(30), RAINTB(12),
     ET0TB(30), E0TB(30), PGS4TB(30)
      COMMON /CLMT/PGS3TB(30), TBIRR(30),
     TCC4(30), TCC3T(30), TCC3M(30)
      COMMON /CLMT/GEOP, raind(12)
C
      common /div/manf1, manf2, twlv, twst, twso,
     lvbas1, stbas1, sobas1,
     1 lvbas2, stbas2, sobas2, nmax, pmax, gdur,
     lvopt, stopt, soopt, neo, new,
     2 wusew, wuseo, tsr
C
      LOGICAL*1 CRPNAM, CLMNAM
      COMMON /NAMES/CRPNAM(30), CLMNAM(30)
C
```

```
      DATA CEF, CLODAN, DD, DRA, DSP/.
     65, 30., 100., 10., 20./
      DATA FAEF, FCEF, K0, MHMAX, RDM, S0/.
     7., 7, 14. 5, 130., 12., 13, 05/
      DATA SAL, SM0, SOPE, SURRO, ZTMI,
     ZTMR/1.5,. 455, 8.88, 2., 0., 900./
      DATA TSC1, TSC2, TSGF, ZT, TEXTCL/22.6
     049,. 0169, 150., 7./
      DATA ISPAN/60/
      DATA AIRDUC /0./,DRAINS/0./
      DATA MANF1/1./,MANF2/1./
C
      DATA TCC4/0., 0., 8., 0., 13., 1., 35., 1., 45., 0.,
     0., 20 * 0./
      DATA TCC3M/0., 0., 3., 0., 8., 1., 25.,
     1., 35., 0., 20 * 0./
      DATA TCC3T/0., 0., 8., 0., 13., 1., 30., 1.,
     40., 0., 20 * 0./
      data uptb/.0, 0., 40., 0., 50., 25, 60.,
     40, 70., 55, 80., 67, 90.,
     1 77, 100.,. 85, 120., 1., 180., 1. 3, 240., 1,
     56, 300., 1. 8, 360., 2., 4 * 0./
      END
C*    * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * *
      FUNCTION AFGEN(TABLE, X)
C*    * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * *
      DIMENSION TABLE(30)
      IF(X.LE.TABLE(1)) GOTO 60
      DD 10 I=1, 30, 2
      II=I
```

```
      IF(TABLE(I). GE.X) GOTO 50
      IF(I.EQ.1) GOTO 10
      IF(TABLE(I). LT. TABLE(I-2)) GOTO 40
10    CONTLNUE
      GOTO 45
40    I=II-2
45    IF(I. GT. 30) I=29
      AFGEN=TABLE(I+1)
      GOTO 100
50    SLOPE=0.
      IF(TABLE(I-2)-TABLE(I). EQ. 0.) GOTO 55
      SLOPE=(TABLE(I-1)-TABLE(I+1))/
      (TABLE(I-2)-TABLE(I))
55    BETA=TABLE(I+1)-SLOPE * TABLE(I)
      AFGEN=SLOPE * X+BETA
      GOTO 100
60    AFGEN=TABLE(2)
100   RETURN
      END
C     * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * *
      SUBROUTINE SOILR
C     * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * *
      INCLUDE 'WOFOST CMN'
C     DATA BLOCK OF DATABASE
      IMPLICIT REAL(A-H, J-Z), INTEGER(I)
      COMMON /PLANT/CVL,CVU, CVR, CVS, EXC
      COMMON /PLANT/PERDL, PERRT,
      PERST, Q10, RD
      COMMON /PLANT/RML, RMU, RMR, RMS, RR
      COMMON /PLANT/SLATB(30), SPA, SSA
```

```
      COMMON /PLANT/TBASE, TDW, CROPT,
     DVRL1, DLO, DLC, DVRC2, DSL
      COMMON /PLANT/FLTB(30), FRTB(30),
     FOTB(30), FSTB(30), SWDPTB(30)
      COMMON /PLANT/DVRETB(30), ISPAN,
     nperso, nperve, pperso, pperve
      COMMON /PLANT/AIRDUC, nptb(30)
C
      COMMON /SOIL/LEF, CLODAN, DD, DRA, DSP
      COMMON /SOIL/FAEF, FCEF, K0,
     MHMAX, RDM, S0
      COMMON /SOIL/SAL, SM0, SOPE,
     SURRO, ZTMI, ZTMA
      COMMON /SOIL/TSC1, TSC2, TSGF,
     2T, TEXTCL
      COMMON /SOIL/SM, SMFC, SMFCF, SMW,
     SM10, SSMAX, RIJTEM(8, 10)
      COMMON /SOIL/DRAINS, nbase, pbase,
     nrec, prec
C
      COMMON /CLMT/TEMPTB(30), RAINTB(12),
     ET0TB(30), E0TB(30), PGS4TU(30)
      COMMON /CLMT/PGS3TB(30), TBIRR(30),
     TCC4(30), TCC3T(30), TCC3M(30)
      COMMON /CLMT/GEOP, raind(12)
C
      common /div/manf1, manf2, twlv, twst, twso,
     lvbas1, stbas1, sobas1,
     1 lvbas2, stbas2, sobas2, nmax, pmax, gdur,
     lvopt, stopt, soopt, neo, new,
```

```
261     2   wuŝew, wuŝeo, tsr
262     C
263         LOGICAL * 1 CRPNAM, CLMNAM
264         COMMON /NAMES/CRPNAM(30), CLMNAM(30)
265     C
266         IREL=TEXTLL
267         READ(7,1000, ERR=999, REC=IREC)K0,
            MHMAX, SOPE, TSC1, TSL2, TSGF, SHL,
268         1SURRO, LLODAN, ZT, S0, SM0
269     1000 FORMAT(161 10. 4)
270         RDM=150
271         RETURN
272     999 WRITE(1, 2000) IREL
273     2000 FORMAT' (LANNOT READ SOILDATA FOR
            TEXTURE CLASS', 14)
274         STOP
275         END
276     C   * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * *
277         SUBROUTINE PLANTR(CROP)
278     C   * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * *
279         INCLUDE WOFOST. CMN'
280     C   DATA BLOCK OF DATABASE
281         IMPLICII READ(A-H, J-Z), INTEGER(I)
282         COMMON /PLANT/CVL, CVO, CVR,CVS, EXC
283         COMMON /PLANT/PERDL, PERRT,
            PERST, Q10, RD
284         COMMON /PLANT/RML, RMO, RMR, RMS, RR
285         COMMON /PLANT/SLATB(30), SPA, SSA.
286         COMMON /PLANT/TBASE, TDW, CROPT,
            DVRL1, DLD, DLC, DVRC2, DSL
```

```
      COMMON /PLANT/FLTB(30), FRTB(30),
     FOTB(30), FSTB(30), SWDPTB(30)
      COMMON /PLANT/DVRETB(30), ISPAN,
     nperso, nperve, pperso, pperve
      COMMON /PLANT/AIRDUC, uptb(30)
C
      COMMON /SOIL/LEF, CLODAN, DD, DRA, DSP
      COMMON /SOIL/FAEF, FCEF, K0,
     MHMAX, RDM, S0
      COMMON /SOIL/SAL, SM0, SOPE,
     SURRO, ZIMI, ZTMA
      COMMON /SOIL/TSC1, TSC2, TSGF, ZT
     TEXTLL
      COMMON /SOIL/SM, SMFC, SMFCF, SMW,
     SM10, SSMAX, RI JTEM(8, 10)
      COMMON /SOIL/DAAINS, nbase,
     pbase, nrec, prec
C
      COMMON /CLMT/TEMPTB(30), RAINTB(12),
     E10TB(30), E0TB(30), PGS4TB(30)
      COMMON /CLMT/PGS3TB(30), TBIRR(30),
     TCC4(30), TCC3T(30), TCC3M(30)
      COMMON /CLMT/GEOP, raind(12)
C
      common /div/manf1, manf2, twlv, twst,
     twso, lvbas1, stbas1, sobas1,
     1 lvbas2, stbas2, sobas2, nmax, pmax, gdur,
     lvopt, stopt, soopt, neo, new,
     2 wusew, wuseo, tsr
C
```

```
      LOGICAL*1 CRPNAM, LLMNAM
      COMMON /NHMES/CRPNAM(30), CLMNAM(30)
C
C
      IREC=1+24*(IFIX(CROP)-1)
      READ(8, 1000, ERR=999, REL=IREL)LRPNAM
 1000 FORMAT(72A1)
      READ(8, 2000, ERR=999)LROPT, AIRDOL,
     Q10, EXC, LVL, LVU, LVR, LVS, SPAN,
     1RML
      ISPAN=SPAN
      READ(8, 2000, ERR=999)RMU, RMR, RMS,
     RR, PERDL, PERR1, PERST, SPA, SSA,
     1 nperso
      READ(8, 2000, ERR=999)DSL, RD, TDW,
     DVFC1, DLO, DLC, DVRC2, nperve,
     1 pperso, pperve
      READ(8, 2000, ERR=999)FRTB
      READ(8, 2000, ERR=999)FLTB
      READ(8, 2000, ERR=999)FSTB
      READ(9,2000, ERR=999)FOTB
      READ(8, 2000, ERR=999)SLATB
      READ(8, 2000, ERR=999)DVRETB
      READ(8, 2000, ERR=999)  (SWDPTB(I),I=1,20)
 2000 FORMAT(10F10.4)
      RETURN
 999  WRITE(1,3000)CROP
 3000 FORMAT('CANNOT READ PLANT DATA
     FOR LROP',F3.0)
      STOP
```

```
      END
C     * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * *
      SUBROUTINE CRDAT
C     * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * *
      INCLUDE 'WOFOST.CMN'
C     DATA BLOCK OF DATABASE
      IMPLICIT REAL(A-H, J-Z), INTEGER(I)
      COMMON /PLANT/CVL, CVU, CVR, CVS, EXC
      COMMON /PLANT/PERDL, PERR1,
     PERST, Q10, RD
      COMMON /PLANT/RML, RMO, RMR, RMS, RR
      COMMON /PLANT/SLATB(30), SPA, SSA
      COMMON /PLANT/TBASE, TDW, CROP1,
     DVRL1, DLO, DLC, DVRL2, DSL
      COMMON /PLANT/FLTB(30), FRTD(30),
     FOTB(30), FSTB(30), SWDPTB(30)
      COMMON /PLANT/DVRETB(30), ISPAN,
     nperso, nperve, pperso, pperve
      COMMON /PLANT/AIRDUC, uptb(30)
C
      COMMON /SOIL/LEF, LLODAN, DD, DRA, DSP
      COMMON /SOIL/FAEF, FCEF, K0,
     MHMAX, RDM, S0
      COMMON /SOIL/SAL, SM0, SOPE,
     SURRO, ZTMI, ZTMA
      COMMON /SOIL/TSC1, TSC2, TSGF,
     ZT, TEXTLL
      COMMON /SOIL/SM, SMFC, SMFCF, SMW,
     SM10, SSMAX, RIJTEM(8, 10)
      COMMON /SOIL/DRAINS, nbase, pbase,
```

```
      nrec, prec
C
      COMMON /CLMT/TEMPTB(30), RAINTD(12),
      ET0TB(30), E0T0(30), PGS4TB(30)
      COMMON /CLMT/PGS3TB(30), TBIRR(30),
      TCC4(30), TCC31 (30), TCC3M(30)
      COMMON /CLMT/BEUP, raind(12)
C
      common /div/manf1, manf2, twlv, twst,
      twso, lvbag1, stbas1, sobas1,
    1 lvbas2, stbas2, sobas2, nmax, pmax, gdur,
      lvodt, stopt, soopt, neo, new,
    2 wusew, wuseo, tsr
C
      LOGICAL * 1 CRPNAM, LLMNAM
      COMMON /NAMES/CRPNAM(30), LLMNAM(30)
L
      IREC=1+10 * (IFI × (TE × TCL)-1)
      DO 1 I=1, 10
      READ(9, 1000, ERR=999, REC=IREC)
      (RIJTEM(IK, I), IK=1,8)
    1 IREC=IREL+1
 1000 FORMAT (8F6.1)
      RETURN
  999 WRITE(1, 2000)TEXTCL
 2000 FORMAT('LANNUT READ RIJJEMA"S
      DATA FOR TEXTURE CLASS, F3.0)
      STOP
      END
C     * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * *
```

```
377        SUBROUTINL CLIMIN(CLM)
378   C    * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * *
379        INCLUDE WUFOST. CMN'
380   C    DATA BLOCK OF DATABASE
381        IMPLILIT REAL(A-H,J-Z), INTEGER(1)
382        COMMON /PLANT/CVL, LVU, CVR, LVS, EXC
383        COMMON /PLANT/PERDL,
           PERRT, PERST, Q10, RD
384        COMMON /PLANT/RML, RMO, RMR RMS, RR
385        COMMON /PLANT/SLAIB(30), SPA, SSA
389        COMMON /PLANT TBASE, TDW, CROPI,
           DVRL1, DLO, DLC, DVRL2, DSL
387        COMMON /PLANT/FLTB(30), FRTB(30),
           FUTB(30), FSTB(30), SWDPTB(30)
388        COMMON /PLANT/DVRETB(30), ISPAN,
           nperso, nperve, pperso, pperve
389        COMMON /PLANT/AIRDUC, uptb(30)
390   C
391        COMMON /SOIL/LEF, CLODAN, DD, DRA, DSP
392        COMMON /SOIL/FAEF, FLEF, K0,
           MHMAX, RDM, S0
393        COMMON /SOIL/SAL, SM0, SOPE,
           SURRO, ZTMI, ZTMA
394        COMMON /SOIL/TSC1, TSC2, TSGF,
           ZT, TEXTCL
395        COMMON /SOIL/SM, SMFC, SMFCF SMW,
           SM10, SSMAX, RIJTEM(8, 10)
396        COMMON /SOIL/DRAINS, nbase, phase,
           nrec, prec
397   C
```

```
398          COMMON /CLMT/TEMPTB(30), RAINTB(12),
             ET0TB(30), E0TB(30), PGS4TB(30)
399          COMMON /CLMT/PGS3TB(30), TBIRR(30),
             TCC4(30), TCC3T(30), TCC3M(30)
400          COMMON /CLMT/GEOP, raind(12)
401     C
402          common /div/manf1, manf2, twlv, twst,
             twso, lvbas1, stbas1, sobas1,
403      1   lvbas2, stbas2, sobas2, nmax, pmax,
             gdur, lvopt, stopt, soopt, neo, new,
404      2   wusew, wuseo, tsr
405     C
406          LOGICAL * 1 LRPNAM, CLMNAM
407          COMMON /NAMES/CRPNAM(30),
             CLMNAM(30)
408          DIMENSION DAYNUM(30)
409     C
410          DATA DAYNUM/1., 0., 15., 0., 45., 0.,
             74., 0., 105., 0., 135., 0., 166., 0.,
411      1   196., 0., 227., 0., 258., 0., 0., 288., 0., 319.,
             0., 349., 0., 365., 0., 2 * 0./
412     C
413          ihelp=clm-1.
414          IREL=1+13 * lhelp
415          READ(10, 1000, ERR=999, REC=IREC)
             CLMNAM, GEOP
416     1000 FORMAT(30A1, F5.1)
417     C
418     C
419          DO 10 I 10=1, 30
```

```
420          TEMPTB(I 10)=DAYNUM(I 10)
421          ET0TB(I 10)=DAYNUM(I 10)
422          E0TB(I 10)=DAYNUM(I 10)
423          PGS4TB(I 10)=DAYNUM(I 10)
424          PGS3TB(I 10)=DAYNUM(I 10)
425          TBIRR(I 10)=DAYNUM(I 10)
426     10   CONTINUE
427     C
428     15   DO 20 120=4, 26.2
429          ii20=(i20-2)/2
430          READ(10, 4000, END=25) TEMPTB(120),
             RAINTD(II20), ETOTB(120),
431          1E0TB(120), PGS4TB(120), PGS3TB(120),
             TBIRR(I20), raind(ii20)
432   4000   FORMAT (8F6.2)
433          E0TB(I20)=E0TB(I20) * 30
434          ET0TB(I20)=ET0TB(I20) * 30
435     20   CONTINUE
436     25   TEMPTB(2)=(TEMPTB(4)+TEMPTB(26))/2.
437          TEMPTB(28)=TEMPTB(2)
438          ET0TB(2)=(ET0TB(4)+ET0TB(26))/2.
439          ET0TB(28)=ET0TB(2)
440          E0TB(2)=(E0TB(4)+E0TB(26))/2.
441          E0TB(28)=E0TB(2)
442          PGS4TD(2)=(PGS4TB(4)+PGS4TB(26))/2.
443          PGS4TB(28)=PGS4TB(2)
444          PGS31B(2)=(PGS3TB(4)+PGS3TB(26))/2,
445          PGS3TB(28)=PGS3TB(2)
446          TBIRR(2)=(TBIRR(4)+TBIRR(26))/2,
447          TBIRR(28)=TBIRR(2)
```

```
448   L
449         RETURN
450   999   WRITE(1, 3000)CLM
451   3000  FORMAT(' CANNOT READ CLIMATE
            DATA FOR LLIMATE',F3.0)
452         STOP
453         END
454         * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * *
455         SUBROUTINE APPLE(iday, IWB, ISP)
456   C     * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * *
457   C     * * * * * * DRTABASE  INTERFACE * * * * *
458   C
459         INCLUDE 'WOFOST. CMN'
460   C     DATA BLOCK OF DATABASE
461         IMPLICIT REAL(A-H, J-Z), INTEGER(I)
462         COMMON /PLAN1/CVL, CVO, CVR, CVS, EXC
463         COMMON /PLANT/PERDL, PERRT,
            PERST, Q10, RD
464         COMMON /PLANT/RML, RMO RMR, RMS, RR
465         COMMON /PLANT/SLATB(30), SPA, SSA
466         COMMON /PLANT/TBASE, TDW, CROPT,
            DVRC1, DLU, DLL, DVRC2, DSL
467         COMMON /PLANT/FLTB(30), FRTB(30),
            FOTB(30), FSTB(30), SWDPTB(30)
468         COMMON /PLANT/DVRETB(30), ISPAN,
            nperso, nperve, pperso, pperve
469         COMMON /PLANT/AIRDUC, uptb(30)
470   C
471         COMMON /SOIL/LEF, CLODAN, DD, DRA, DSP
472         COMMON /SOIL/FAEF, FLEF, K0,
```

```
      MHMAX, RDM, S0
      COMMON /SOIL/SAL, SM0, SOPE, SURRD,
     ZTMI, ZTMA
      COMMON /SOIL/TSC1, TSC2, TSGF, ZT,
     TEXTCL
      COMMON /SOIL/SM, SMFC, SMFLF, SMW,
     SM10, SSMAX, RIJTEM(8, 10)
      COMMON /SOIL/DRAINS, nbase,
     pbase, nrec, prec
C
      COMMON /CLMT/TEMPTB(30), RAINTB(12),
     ET0TB(30), E0TB(30), PGS4TB(30)
      COMMON /CLMT/PGS3TB(30), TBIRR(30),
     TLC4(30), TLL3T(30), TCL3M(30)
      COMMON /CLMT/GEOP, raind(12)
C
      common /div/manf1, mant2, twlv, twst,
     twso, lvbas1, stbas1, sobas1,
     1 lvbas2, stbas2, sobas2, nmax, pmax, gdur,
     lvopt, stopt, soopt, neo, new,
     2 wusew, wuseo, tsr
C
      LOGICAL * 1 CRPNAM, CLMNAM
      COMMON /NAMES/CRPNAM(30),
     LLMNAM(30)
C
C
      DIMENSION LV(1/0). LA(170)
C
C
```

```
493   C * * * * * * INITIALISATION * * * * * * * * *
494   C
495         dz=0
596         tsr=0.
497         wuse=0,
498         gdur0=0.
499         SM10=SM0-0. 1
500         SMFLF=SM0 * EXP(-1. * TSGF * ALOG
            (100.) * * 2)
501         SMW=SM0 * EXP(-1. * TSGF * ALOG
            (16000.) * * 2)
502         SM=SMFCF
503         CLODAR=CLODAN * 0.01/444
504         SALR=SAL * 0.01/4444
505         SSMAX=0. 5 * SURRO *
            (SIN(CLODAR-SALR) * * 2/SIN(LODAR)
506         1 * (COS(CLDDAR+SALR)/SIN(CLODAT+SALR)
            +COS(CLODAR-SALR)/
507         2SIN(CLODAR-SALR))/2/COS(CLODAR)
            /COS(SALR))
508         DEL=1
509         IL=1
510         ID=0
511         DO 5 I5=1, 170
512         LA(I5)=0
513   5     LV(I5)=0.
514   C
515         GWRT=0.
516         GWLV=0.
517         GWST=0.
518
```

```
      GWSO=0.
C
      DRRT=0.
      DRLV=0.
      DRST=0.
      DRSO=0.
C
      DWRT=0.
      DWLV=0.
      DWST=0.
      DWSO=0.
C
      TSUMA=0.
      TSUMR=0.
C
      DVS=0.
      SS=0.
      RTDF=0.
C
      FR=AFGEN(FRTB, DVS)
      FL=AFGEN(FLTB, DVS)
      FS=AFGEN(FSTB, DVS)
      FO=AFGEN(FOTB, DVS)
C
      WRT=FR * TDW
      TADW=(1.-FR) * TDW
      WLV=FL * TADW
      WST=FS * TADW
      WSO=FO * TADW
      SLA=AFGEN(SLATB, DVS)
```

```
C
      LAI=SLA * WLV+SSA * WST+SPA * WSO
C
      WRITE(ISP, 1001)TEXTCL,
      IDAY, CRPNAM, LLMNAM
      WRITE(ISP, 1000)IDAY, WRT, WLV,
      WST, WSO, LAI, ZT, SM, DVS
 1001 FORMAT(///SX, 'Texture class', F3.0,
      24X, 'Start day', 13,
      1/ Crop ',30A1', Climate ',30A1,
      1//' DAY WRT WLV WST WSO LAI
      1' ZT SM DVS'/)
C
C     * * * * * * DYNAMIC CALCULATIONS * * * *
C
 1    IF(DVS.GE.2.) GOTO 100
      gdur0=gdur0+delt
C
C
C     INTAKE OF CLIMATA .DATA
      CALL CLIMAT(IDAY, TEMP, RAIN,
      PGASS, ET0, E0, XIE)
      call daylen(iday, geop, dl)
      FINT=(1.-EXP(-1. * EXC * LAI))
C
C     IF(IWB. EQ. 0) GOTO 164
C
C     * * * * * * WATER BALANCE  * * * * * * *
C
      SMFC=SM0*EXP(-1. *TSGF*ALOG(ZT+1.) × × 2)
```

```
      MH=EXP(SQRT(-1.*ALOG(SM/SM0)/TSGF))
      KMH=K0*EXP(-1.*TSC2*MH)
      IF(MH. GT. MHMAX) KMH=TSC1*MH**(-1.4)
C
C     CALCULATION OF XIMMAX
C
      S=S0*(1.-SM/SM0)/SQRT(DELT)
      XIMMAX=S+SOPE
C
C     CALLULATION OF THE ACTUAL
      EVAPORATION E
C
      E=AMAX1(0., E0*EXP(-0. 4*LAI)*
      (SM-SMW/3)/(SM0-SMW/3))
      if (iwb.eq. 0) E=AMAX1(0., E0*EXP
      (-0. 4*LAI))
      E=AMIN1(E, E0*EXP(-0. 4*LAI))
      EL=0.
      IF(SS. GT. 0.) EL=L
      IF(SS. GT. 0.) E=0.
C
C     INFILTRATION
C
      SS=SS+(RAIN+XIE-EL)*DELT
      SSR=SS/DELT
C     XIMMAX=XIMMAX*AFGEN(SALTB. SAL)
      *AFGEN(RNTB, RAIN))
      XIM=AMIN1(XIMMAX,SSR)
      SR=AMAX1(0., SSR-SSMAX/DELT-XIM)
      tsr=tsr+sr
```

```
C
C     CALCULATION OF THE WATER FLOW
      THROUGH THE LOWER ROOT ZONE BOUNDA
C     -RY
      ZTMRD=ZT-RD
      IF(ZTMRD. LE. 0.) GOTO SS
      HRD=MH-(ZTMRD)
      IF (HRD. GT. 0) GOTO 60
      IF (HRD. LT. 0) GOTO 70
55    CRMD=0.
      GOTO 80
60    CALL RIJTMA(RIJTEM, MH, ZTMRD,
      CRMD, KMH)
      LRMD=AMIN1(CRMD, (SMFC-SM) * RD/DELT)
      GOTO 80
70    CRMD=AMAX1(-1.* KMH, -1.(SM-SMFL) * RD)/
      DELT
80    CONTINUE
C
C     CALCULATION OF THE ACTUAL
      TRANSPIRATION
C
      T0=ET0-0. 1 * L0
      TM=AMAX1(0.0001,(1,-EXP
      (-1.* EXC * LAI) * T0)
C
      if (iwb. eq. 0) goto 130
      SWDEP=AFGEN(SWDPTB, T0)
      SMCR=(1. -SWDEP) * (SMFCF-SMW)+SMW
      IF(SM. GE. (SM0-0.05). OR. SMW.
```

```
      GT. SM) GOTO 150
      IF ((SM0-0.05). GT. SM. AND. SM. GE.SM10)
      GOTO 140
      IF (SM10. GT. SM. AND. SM. GE.
      SMCR) GOTO 130
      T= (SM-SMW)/(SMLR-SMW) * TM
      GOTO 160
130   T=TM
      GOTO 160
140   T=AMIN1(1.,((SM0-0.05)-SM)/
      ((SM0-0.05)-SM10)) * TM
      GOTO 160
150   T=0.
160   CONTINUE
      IF (AIRDUC. EQ. 0.) GOTO 162
      IF (SM. GE. SM10) T=TM
162   CONTINUE
C
C     CALLULATION OF THE RATE OF CHANGE
C     IN WATER CONTENT OF
C     THE RODTED ZONE
      RSM=(XIM+CRMD-T-E)/RD
      if (iwb. eq. 0) rsm=0.
C
C     CALCULATION OF DRAINAGE
C
      MT=2. * (DD-ZT)
      DMAX=AMAX1(0., K0 * 3. 14 * MT/(3.14 *
      MT+DSP * ALOG(DSP/(3.14 * DRA))))
      IF(DRAINS. EQ. 0.) DMAX=0.
```

```
C
C     CALCULATION OF THE CHANGE
      IN GROUND WATER DEPTH
C
      if(iwb. eq. 0) goto 165
      DZ=AMAX1(-1.*ZT, 2.*
      (DMAX+CRMD)/(SM0-SM))
      IF(ZTMRD. LE. 0.) DZ=AMAX1
      (-1. *2T, (E+T-XIM)/(SM0-SMF))
      IF (ZTMRD. LE. 0.) RSM=-1.*
      (SM0-SMF)*DZ/(ZTF+1.)
C
C
C
C
C
C
C
C     DEVELOPMENT STAGE
C
165   DVRED=1.
      IF(DVS. LT. 1.) DVRED=AMAX1
      (0., AMIN1(1., (DL-DLC)/(DLO-DLC)))
      DVRET=AFGEN(DVRETB, TEMP)
      IF(DVS. LT. 1.. AND. DSL. EQ. 1.) DVRET=1
      DVRC=DVRC1
      IF (DVS. GT. 1.) DVRC=DVRC2
      DVR=DVRC*DVRED*DVRET
      SLA=AFGEN(SLATB, DVS)
C
```

```
674   C   PARTITIONING  FACTORS
675   C
676       FR=AFGEN(FRTB, DVS)
677       FL=AFGEN(FLTB, DVS)
678       FS=AFGEN(FSTB, DVS)
679       FO=AFGEN(FOTB, DVS)
680   C
681   C   DAILY DRY MATTER INCREASE
682   C
683       GASS=PGASS * FINT * T/TM
684       RMRES=RMR * WRT+RML * WLV+
          RMS * WST+RMO * WSO
685       TEFF=Q10 * * (0.1 * TEMP-2.5)
686       MRES=AMIN1(GASS, RMRES * TEFF)
687       LVF=(CVL * FL+CVS * FS+CVO * FO) *
          (1.-FR)+CVR * FR
688       ASRC=AMAX1(0., GASS-MRES)
689       DMI=CVF * ASRC
690   C
691   C   GROWTH RATE ROOTS
692   C
693       GRRT=FR * DMI
694       DRRT=0.
695       IF(DVS. GI. 1. 5) DRRT=PERRT * WRT
696       GWRT=GRRT-DRRT
697   C
698   C   GROWTH RATES OF THE AIRIAL PARTS
699   C
700       ADMI=DMI-GRRT
701   C
```

```
C     GROWTH RATE LEAVES
C
      GRLV=FL * ADMI
      DSLV1=(1. -T/TM) * PERDL * WLV
      DSLV2=WLV * AMAX1(0., 1.-7./AMAX1
      (0. 01, LAI))
      DSLV=AMAX1(DSLV1, DSLVZ)
C
      LV(IL)=LV(IL)-DSLV
      IF(LV(IL)) 190, 210, 210
190   IKIL=IL-1
      DO 200 IK-1, IKIL
      IIK=IKIL-IK+1
      if (iik. eq, 0) goto 200
      LV(IIK)=LV(IIK)+LV(IIK+1)
      LV(IIK+1)=0.
      IF(LV(IIK)) 200, 210, 210
200   CONTINUE
210   IL=IL+1
      IF(IL. GT. ISPAN) IL=ISPAN
      DALV=LV(ISPAN)
      IF (IL. EQ. 1) GOTO 230
      DO 220 IIK=2, IL
      IK=IL-IIK+2
      LA(IK)=LA(IK-1)
220   LV(IK)=LV(IK-1)
230   LV(1)=GRLV * DELT
      LA(1)=GRLV * SLA * DELT
      IF(IL. EQ.2) LV(1)=LV(1)+WLV
      IF(IL. EQ. 2) LA(1)=LA(1)+WLV * SLA
```

```
      LASUM=0.
      DO 240 I=1, II
      IF(LV(I). LE. 0.) LA(I)=0.
240   LASUM=LASUM+LA(I)
C
      DRLV=DSLV+DALV
      GWLV=GRLV-DRLV
C
C     GROWTH RATE STEMS
C
      GRST=FS * ADMI
      DRST=0.
      IF(DVS. GT. 1.5) DRST=PERST * WST
      GWST=GRST-DRST
C
C     GROWTH RATE STORAGE ORGANS
C
      GWSO=FO * ADMI
C
C     INTEGRALS OF THE CROP
C
      DVS=DVS+DVR * DELT
      WRT=WRT+GWRT * DELT
      WLV=WLV+GWLV * DELT
      WST=WST+GWST * DELT
      WSO=WSO+GWSO * DELT
C
      TADW=WLV+WST+WSO
      TDW=TADW+WRT
C
```

```
761          DWRT=DWRT+DRRT * DELT
762          DWLV=DWLV+DRLV * DELT
763          DWST=DWST+DRST * DELT
764          DWSO=DWSO+DRSO * DELT
765    C
766          TWRT=WRT+DWRT
767          TWLV=WLV+DWLV
768          TWST=WST+DWST
769          TWSO=WSO+LWSO
770    C
771    C     INTEGRALS OF THE WATER BALANCE
772    C
773    C
774          SM=AMAX1(SMW/3., AMIN1
             (SM+RSM * DEL1, SM0-0. 001))
775          IF(ZTMRD. LE. 0.) GOTO 777
776          SMF=SM
777    777   CONTINUE
778          SS=SS-SR * DELT-XIM * DELT
779          ZT=ZT+DZ
780          ZT=AMIN1(ZT, ZTMA)
781          ZT=AMAX1(ZT, ZTMI)
782          if (rd. ge. rdm) rr-0.
783          IF(ZTMRD. LE. 0.) GOTO 888
784          ZTF=ZT
785    888   CONTINUE
786          IF(AIRDUE. EQ. 1.) GOTO 250
787          if (rd. ge. (zt-10.)) rr=0.
788          IF (ZTMRD. LE. 0.) RR=0.1 * (ZTMRD)/DELT
789          IF(FR  LE. 0.) RR=0.
```

```
790          IF(RTDF. GE. S. and. iwb. eq.1) GOTO 245
791          IF (RD. LT. 10.) RTDF=RTDF+1.
792          IF (RD. GE. 10.) RTDF=0..
793          GOTO 250
794    245   WRITE (ISP, 3221)
795   3221   FORMAT ('Lrop tailure due to waterlogging l')
796          RETURN
797    C
798    250   LAI=LASUM+SSA * WST+SPA * WSO
799          RD=RD+RR * DELT
800          wuse=wuse+t
801    C
802    C
803    C
804    C     * * * * * TEMPORARY OUTPUT * * * * *
805    C
806          ID=ID+1
807          if (wlv. le. 1. and. dvs. gt. 0. 5) goto 100
808          IF (MOD(ID, 10). EO. 0)WRITE(ISP, 1000)
             IDAY, WRT, WLV, WST, WSO, LAI,
809          1ZT, SM, DVS
810   1000   FORMAT(1X, 13, 4F9. 0, 2F9. 3, 2F7.3)
811          IDAY=IDAY+1
812          IF (IDAY. GT. 365) IDAY=IDAY-365
813    C
814          GOTO 1
815    C
816    100   CONTINUE
817          WRITE(ISP, 1000) IDAY, WRT, WLV, WST,
             WSO, LAI, ZT, SM, DVS
```

```
818          if (iwb. eq. 1) goto 101
819          lvopt=twlv
820          stopt=twst
821          soopt=twso
822          gdur=gdur0
823          wuseo=wuse
824    101   continue
825          wusew=wuse
826    C     * * * * * DATABASE OUTPUT * * * * *
827    C
828          RETURN
829          END
830    C     * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * *
831          SUBROUTINE CLIMAT(I, TEMP, RAIN,
             PGASS, ET0, E0, XIE)
832    C     * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * *
833          INCLUDE 'WOFOST. CMN'
834    C     DATA BLOCK OF DATABASE
835          IMPLILIT REAL (A-H, J-Z), INTEGER(I)
836          COMMON /PLANT/LVL, LVU, LVR, CVS, EXC
837          COMMON /PLANT/PERDL, PERRT, PERST,
             Q10, RD
838          COMMON /PLANT/RML, RMU, RMR, RMS, RR
839          COMMON /PLANT/SLATB(30), SPA, SSA
840          COMMON /PLANT/TBASE, TDW, CROPT,
             DVRL1, DLO, DLC, DVRC2, DSL
841          COMMON /PLANT/FLTB(30), FRTB(30),
             FOTB(30), FSTB)30), SWDPTB(30)
842          COMMON /PLANT/DVRETB(30), ISPAN,
             nperso, nperve, pperso, pperve
```

```
843         COMMON /PLANT/AIRDUC, uptb(30)
844   C
845         COMMON /SOIL/CEF, CLODAN, DD, DRA, DSP
846         COMMON /SOIL/FAEF,FCEFK0,MHMAX, RDM, S0
847         COMMON /SOIL/SAL, SM0, SOPE,
            SURRO, ZTMI, ZTMA
848         COMMON /SOIL/TSC1, TSC2, TSGF, ZT,
            TEXTCL
849         COMMON /SOIL/SM, SMFC, SMFCF, SMW,
            SM10, SSMAX, RIJTEM(8, 10)
850         COMMON /SOIL/DRAINS, nbase, pbase,
            nrec, prec
851   C
852         COMMON /CLMT/TEMPTB(30), RAINTB(12),
            ET0TB(30), E0TB(30), PGS4TB(30)
853         COMMON /CLMT/PGS3TB(30), TBIRR(30),
            TCC4(30), TCC3T(30), TCC3M(30)
854         COMMON /CLMT/GEOP, raind(12)
855   C
856         common /div/manf1, manf2, twlv, twst,
            twso, lvbas1, stbas1, sobas1,
857         1 lvbas2, stbas2, sobas2, nmax, pmax, gdur,
            lvopt, stopt, soopt, nco, new,
858         2 wusew, wuseo, tsr
859   C
860         LOGICAL * 1 CRPNAM, LLMNAM
861         COMMON/NAMES/LRPNAM(30), CLMNAM(30)
862         RI40=1
863         TEMP=AFGEN(TEMPTB, RI40)
864         call rainda(raintb, raind, i, rain)
```

```
      ET0=AFGEN(ET0TB RI40)/30.
      E0=AFGEN(E0TB, RI40)/30.
      IF(CROP1. EO. 1.)PGASS=AFGEN(PCS4TB,
      RI40) * AFGEN(TCC4, TEMP) *. 682
      IF(LROPT. EO. 2.)PGASS=AFGEN(PGS3TB,
      RI40) * AFGEN(TCC3M, TEMP) * 682
      IF(CROPT. GE. 3.)PGASS=AFGEN(PGS3TB,
      RI40) * AFGEN(TLL3T, TEMP) * .682
      XIE=AFGEN(TBIRR, RI40)/30.
      RETURN
      END
C     * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * *
      subroutine rainda(rtb, rda,idag, rn)
C     * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * *
      dimension rtb(12), rda(12), irand(30), idgn(12)
      data irand/, 6, 13, 9, 8, 21, 25, 12, 23, 1,
      4, 28, 16, 20, 29, 1/, 27, 3, 15,
      1 2, 11, 18, 26, 5, 19, 14, 28, 30, 22, 10/
      data idgn/0, 31, 59, 90, 120, 151, 181, 212,
      243, 274, 304, 335/
      do 10 i=1, 12
      if (idag. le. idgn(i)) goto 11
10    continue
      i=13
11    icd=idag-idgn(i-1)
      icm=i-1
C     * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * *
      a=0.
      f=1.
      fact=0. 01389 * rda(icm) +0.672
```

```
890          irada=rda(icm)
891          do 100 ik=1, irada
892          a=a+f
893    100   f=f * fact
894          r=rtb(icm)/a
895          do 200 i=1, irada
896          if (irand(i). eq. icd) goto 150
897          goto 200
898    150   rn=r * fact * * (i-1)
899          goto 300
900    200   continue
901          rn=0.
902    300   return
903          end
904    C     * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * *
905          SUBROUTINE RIJTMA(R, RMH, D, L, KMH)
905    C     * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * *
907          REAL KMH
908          DIMENSION R(8, 10), CMH(10),
             LLR(8). VMH(8)
909          DATA CMH/20., 50., 100., 250., 500., 1000.,
             2000., 5000., 10000., 16000./
910          DATA CCR/. 5., 4., 3., 2., 15., 1.. 06,. 02/
911          IF(RMH. LT. 20.) GOTO 130
912          IF(RMH. EQ. 20.) GOTO 60
913          IF(RMH. GE. 16000.) GOTO 65
914          DO 20 I20=2. 10
915          K20=I20
916          J20=I20-1
917          IF(RMH. LE. CMH(I20)) GOTO 30
```

```
20      CONTINUE
30      DO S0 150=1, 8
        SLOPE=(R(150, J20)-R(150, K20))/
        (CMH(J20)-CMH(K20))
50      VMH(I50)=SLOPE * RMH+R
        (I50, K20)-SLOPE * CMH(K20)
        GOTO 70
60      DO 61 I61=1, 8
61      VMH(I61)=R(I61, 1)
        GOTO 70
65      DO 66 I66=1, 8
66      VMH(I66)=R(I66, 10)
70      IF(D. LT. VMH(1)) GOTO 140
        IF(D. GT. VMA(8)) GOTO 120
        DO 100 I 100=2, 8
        K100=I 100
        J100=I 100-1
        IF (D. LE. VMH(I100)) GOTO 110
100     CONTINUE
110     SLOPE=(CCR(J100)-CCR(K100))/
        (VMH(J100)-VMH(K100))
C       L=SLOPE * D+CLR(K100)-
        SLOPE * VMH(K100)
        RETURN
120     L=0,
        RETURN
130     L=KMH * (RMH/D-1.)
        RETURN
140     C=0.5
        RETURN
```

```
944          END
945    C     * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * *
946    C
947          subroutine daylen(i, gp, daglen)
948    C
949    C  * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * *
950          DECL=-23. 4 * COS(0. 01/2055 * (I+10)
951          COSLD=COS(DELL * 0. 0174444) *
             COS(gp * 0.0174444)
952          SINLD=SIN(DECL * 0.0174444) *
             SIN(gp * 0.0174444)
953          DAGLEN=3. 82166 * (3. 14+2. * ASIN(sinld/cosld)
954          return
955          END
956          function asin(ix)
957          asinhp=1. 6. * * * * 3
958          asin= x + asinhp
959          do 10 i=3. 101, 3
960          asinhp=asinhp * i * * 2 * * * * 2/(i+1)
             * (i+2))
961          asin=asin+asinhp
962          if (abs(asin-asino).lt. 1. E-8) goto 20
963    10    asino=asin
964    20    return
965          end
996    C     * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * *
967    C
968          subroutine nutri (ips)
969    C
970    C     * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * *
```

```
971   C
972         include 'wofost. cmn'
973   C     DATA BLOCK OF DATABASE
974         IMPLICIT REAL (A-H, J-Z, INTEGER(I)
975         COMMON /PLANT/LVL, LVU, CVR, LVS, EXC
976         COMMON /PLANT/PERDL, PERRT,
            PERST, O10, RD
977         COMMON /PLANT/RML, RMO, RMR, RMS, RR
978         COMMON /PLANT/SLATB(30), SPA, SSA
979         COMMON /PLANT/TBASE, TDW, CROPT,
            DVRC1, DLO, DLC, DVRC2, DSL
980         COMMON /PLANT/FLTB(30), FRTB(30),
            FOTB(30), FSTB(30), SWDPTB(30)
981         COMMON /PLANT/DVRETB(30), ISPAN,
            nperso, nperve, pperso, pperve
982         COMMON /PLANT/AIRDUC, uptb(30)
983   C
984         COMMON /SOIL/CEF, CLODAN, DD, DRA, DSP
985         COMMON /SOIL/FAEF, FCEF, K0,
            MHMAX, RDM, S0
986         COMMON /SOIL/SAL, SM0, SOPE, SURRO,
            ZTMI, ZTMA
987         COMMON /SOIL/TSC1, TSC2, TSGF, ZT,
            SEXTCL
988         COMMON /SOIL/SM, SMFC, SMFCF, SMW,
            SM10, SSMAX, RIJTEM(8, 10)
989         COMMON /SOIL/DRAINS, nbase,
            pbase, nrec, prec
990   C
991         COMMON /CLMT/TEMPTB(30), RAINTB(12),
```

```
      ET0TB(30), E0TB(30), PGS4TB(30)
992   COMMON /CLMT/PGS3TB(30), TBIRR(30),
      TCC4(30), TLL3T(30), TCC3M(30)
993   COMMON /CLMT/GEOP, raind(12)
994 C
995   common /div/manf 1, mant2, twlv, twst,
      twso, lvbas1, stbas1, sobas1,
996 1 lvbas2, stbas2, sobas2, nmax, pmax, gdur,
      lvopt,stopt, soopt, neo, new,
997 2 wusew, wuseo, tsr
998 C
999   LOGICAL * 1 CRPNHM, LLMNAM
1000  COMMON /NAMES/CRPNAM(30),CLMNAM(30)
1001 C
1002  pbas=pbase * atgen(uptb, gdur) * mant2
1003  nbas=nbase * afgen(uptb, gdur) * mant2
1004  if(cropt. eq. 4) goto 10
1005 C
1006 C non-leguminous crops
1007 C
1008  rec=nrec * manf1
1009  nopt=nperve * (lvopt+stopt)+nperso * soopt
1010  nwab=nperve * (twlv+twst)+nperso * twso
1011  nmaxo=AMAX1(0., (nopt-nbas)/rec)
1012  nmaxw=AMAX1(0., (nwab-nbas)/rec)
1013 C
1014  frbaso=amin1(1.,nbas/nopt)
1015  lvbas1=f rbaso * lvopt
1016  stbas1=f rbaso * stopt
1017  sobas1=f rbaso * soopt
```

```
1018          lvbas2=amin1(lvbas1, twlv)
1019          stbas2=amin1(stbas1, twst)
1020          sobas2=amin1(sobas1, twso)
1021    C
1022          neo=(nopt-nbas)/rec
1023          new=(nwab-nbas)/rec
1024          goto 50
1025    C
1026    C
1027    C     leguminous crops
1028    C
1029    10    rec=prec * manf1
1030          popt=pperve * (lvopt+stopt)+pperso * soopt
1031          pwab=pperve * (twlv+twst)+pperso * twso
1032          pmaxo=amax1(0., (popt-pbas)/rec)
1033          pmaxw=amax1(0., (pwab-pbas)/rec)
1034    C
1035          trbaso=amin1(1., pbas/popt)
1036          lvbas1=frbaso * lvopt
1037          stbas1=f rbaso * stopt
1038          sobas1=f rbaso * soopt
1039          lvbas2=amin1 (lvbas1, twlv)
1040          stbas2=amin1 (stbas1, twst)
1041          sobas2=amin1 (sobas1, twso)
1042    C
1043          neo=(popt-pbas)/rec
1044          new-(pwab-pbas)/rec
1045    C
1046    50    continue
1047          write(ips, 8754)nmaxo, pmaxo, nmaxw,
```

```
      pmaxw, nbase, pbase, nrec,
      1 prec, ztmi, ztma, neo, new, wuseo, wusew, tsr
      1 LVOPT, LVBAS1, STOPT, STBAS1,
      1 SOOPT, SOBAS1, TWLV, LVBAS2,
      TWST, STBAS2,
      2 TWSO, SOBAS2
8754  format(//20x, 'nmaxo=',f4.0,' pmaxo=', f4.0,/
      1 20x, 'nmaxw=', f4.0,' pmaxw=', f4.0,/
      2 20x,'nbas=', f4.0,' pbas=', f4.0,/
      2 20x, 'nrec=',f5.2, prec=', f5.2,/
      2 20x,'ztmi=,'f4.0,' ztma=,'f4.0,/
      2 20x,' npeo=,'f4.0,' npew=,'f4.0,/
      2 20x,' wuseo=,'f4.1,' wusew=,'f4.1,/
      2 31x,' tsr=,'f4.1,//
      1 18x,'LVOPT=,'f6.0,5x,'LVBAS1=,'f6.0,5x,/
      2 18x,'STOPT=',f6.0,5x,'STBAS1=',f6.0,5x,/
      3 18x,'SOOPT=',f6.0,5x,'SOBAS1=',f6.0,5x,//
      1 18x,'TWLV=',f6.0,5x,'LVBAS2=',f6.0,5x,/
      2 18x,'TWST=',f6.0,5x,'STBAS2=',f6.0,5x,/
      3 18x,'TWSO=',f6.0,5x,'SOBAS2=',f6.0,5x,/'1'/)
      return
      end
```

译者注：书中程序是用FORTRAN 66语言编写的。该语言已由FORTRAN 77语言代替。中国农业科学院土壤肥料研究所计算机组用FORTRAN 77语言移植该程序在IBM PC和长城系列微机上。所移植的程序已选入IBM PC微机土壤肥料试验和农业统计程序包(SFAP)中，欢迎农业工作者使用此程序包。

附录 5　模拟专题方面已出版的著作

C.T. de Wit and H. van Keulen. Simulation of transport processes in soils (2nd ed., revised). 1975. 109pp. 90-220-0591-7. Price Dfl. 15.00

J. Beek and M.J. Frissel. Simulation of nitrogen behaviour in soils. 1973. 76 pp. ISBN 90-220-0440-6. (out of print)

H.G. Fransz. The functional response to prey density in an acarine system. 1974. 149 pp. ISBN 90-220-0509-7. (out of print)

M.J. Frissel and P. Reiniger. Simulation of accumulation and Teaching in soils. 1974. 124 pp. ISBN 90-220-0530-5. (out of print)

H. van Keulen. Simulation of water use and herba gegrowth in arid regions. 1975. 184 pp. ISBN 90-220-0557-7. Price Df1.30.00

G.F. Makkink and H.D.J. van Heemst. Simulation of the water balance of arable land and pastures. 1975. 87 pp. ISBN 90-220-0566-6. (out of print)

G.W. Arnold and C.T. de Wit (Eds). Critical evaluation of systems analysis in ecosystems research and management. 1976. 114 pp. ISBN 90-220-0593-3. (out of print)

J. van den Bos and R. Rabbinge. Simulation of the fluctuations of the grey larch bud moth. 1976. 91 pp. ISBN 90-220-0589-5 (out of print)

R. Rabbinge. Biological control of fruit-tree red spider mite. 1976. 234 pp. ISBN 90-220-0590-8. (out of print)

J. Goudriaan. Crop micrometeorology: a simulation study. 1977. 257 pp. ISBN 90-220-0614-X. Price Dfl. 41.00

E. van Elderen. Heuristic strategy for scheduling farm operations. 1977. 233 pp. ISBN 90-220-0612-3. (out of print)

P. Kampmeijer and J.C. Zadoks. EPIMUL, a simulator of foci and epidemics in mixtures of resistant and susceptible plants, mosaics and multilines, 1977. 56 pp. ISBN 90-220-0636-0. (out of print)

T. Kozai, J. Goudriaan and M. Kimura. Light transmission and photosynthesis in greenhouses. 1978. 105 pp. ISBN 90-220-0646-8. Price Dfl. 17.00

K. R. Christian et al. Simulation of grazing systems. 1978. 121 pp. ISBN 90-220-0645-X. Price Dfl. 1900

C. T. de Wit and J. Goudriaan. Simulation of ecological processes. (2nd ed. revised and extended). 1978. 183 pp. ISBN 90-220-0652-2. Price Dfl. 23.00

C. T. de Wit et al. Simulation of assimilation, respiration and transpiration of crops. 1978. 148 pp. ISBN 90-220-0601-8. Price Dfl. 23.00

R. A. Feddes, P. J. Kowalik and H. Zaradny. Simulation of field water use and crop yield. 1978. 195 pp. ISBN 90-220-0676-X. Price Dfl. 35.00

S. M. Welch and B. A. Croft. The design of biological monitoring systems for pest management. 1979. 84 pp. ISBN 90-220-0687-5 Price Dfl. 26.00

N. D. Barlow and A. F. G. Dixon. Simulation of lime aphid population dynamics. 1980. 171 pp. ISBN 90-220-0706-5. Price Dfl. 3900

N. Carter, A. F. G. Dixon and R. Rabbinge. Cereal aphid population biology, simulation and prediction. 1982. 91 pp. ISBN 90-220-0804-5. Price Dfl. 27.00

F. W. T. Penning de Vries and H. H. van Laar. Simulation of plant growth and crop production. 1982. 320 pp. ISBN 90-220-0809-6. Price Dfl 70.00

D. A. Haith, L. J. Tubbs and N. B. Pickering. Simulation of pollution by soil erosion and soil nutrient loss. 1984. 77 pp. ISBN 90-220-0842-8. Price Dfl. 25.00

E. Ng and R. S. Loomis. Simulation of growth and yield of the potato crop. 1984. 147 pp. ISBN 90-220-0843-6. Price Dfl. 34.00

S. J. Troester, F. A. Ress, A. S. Felsot and W. G. Ruesink. Modelling of the persistence of pesticides applied to the soil. 1984. 149 pp. ISBN 90-220-0844. 4. Price Dfl 43.00

H. van Keulen and J. Wolf (Eds). Modelling of agricultural production: weather soils and crops. 1986. 464 pp. ISBN 90-220-0858-4. Price Dfl. 110.00