



荷兰经验对中国畜禽粪便治理的启发 白皮书

闫杰, F.E. de Buissonjé, R.W. Melse



WAGENINGEN
UNIVERSITY & RESEARCH

荷兰经验对中国畜禽粪便治理的启发

白皮书

闫杰¹

F.E. de Buissonjé²

R.W. Melse²

¹ 瓦赫宁根大学及研究中心中国办公室

² 瓦赫宁根大学及研究中心 - 畜牧科学研究院

瓦赫宁根大学及研究中心 - 畜牧科学研究院受荷兰经济事务部的委托和资助，在“种子基金项目”SMP16015 框架下承担了本项目的研究。An English version of this report has been published as “WHITE PAPER-Livestock Manure Treatment Technology of the Netherlands and situation of China” (Yan Jie , F.E. de Buissonjé, R.W. Melse, 2017),

瓦赫宁根大学及研究中心 - 畜牧科学研究院

瓦赫宁根，2017 年 9 月

报告编号：1049

闫杰, F.E. de Buissonjé, R.W. Melse, 2017. 白皮书--荷兰经验对中国畜禽粪便治理的启发。报告编号: 1049.

简介

本报告分析了中荷两国有关畜禽粪便的问题和政策, 讨论了荷兰现有的粪便管理策略和处理技术, 在此基础上评估了适用于中国部分地区的三种粪便处理方案。

本报告免费下载网址: <https://doi.org/10.18174/423995> (英文版) 或 <https://doi.org/10.18174/423982> (中文版), 或者在 www.wur.nl/livestock-research (在 Wageningen Livestock Research publications 下查找)。

© 2017 瓦赫宁根畜牧科学研究院

地址: P.O. Box 338, 6700 AH Wageningen, The Netherlands

电话: +31 (0)317 48 39 53 E-mail: info.livestockresearch@wur.nl

网址: www.wur.nl/livestock-research.

瓦赫宁根畜牧科学研究院隶属于瓦赫宁根大学及研究中心

保留所有权利。未经发行人或作者事先许可, 不得以印刷品、影印本、缩微胶卷或任何其他方式复制和/或公开本出版物的任何部分。



DNV 的 ISO 9001 认证可以为我们的质量水平背书。我们所有的研究活动都符合动物科学研究院的通用条款和条件。上述认证在兹沃勒地区法院(District Court of Zwolle)均有备案。

荷兰瓦赫宁根畜牧科学研究院 报告编号: 1049

目录

1 项目概况及目标	5
2 中国的背景情况	7
2.1 畜禽行业规模增长迅速	7
2.2 畜禽粪便对环境的影响	7
2.3 对畜禽粪便管理实地考察的描述	8
2.3.1 考察黑龙江省鹤奥奶牛场和鹤园奶牛场	8
2.3.2 考察河北省栾城定远奶牛场	9
2.3.3 考察广东省温氏集团种鸭场	10
2.4 畜禽粪便污染治理新规	11
2.4.1 关于畜禽废弃物处理的法律法规中的主要条款	11
2.4.2 结论和建议	12
2.5 中国畜禽粪便和耕地的分布状况	13
2.5.1 畜禽粪便的分布状况	13
2.5.2 不同地形和耕地的分布状况	14
2.5.3 结论	15
3 荷兰畜禽粪便生产及相关法规	17
3.1 对过剩粪便进行处理是生产的前提	17
3.2 养殖场数据及自给自足	17
3.3 过剩粪便数据	17
3.4 磷氮的应用标准	18
3.4.1 磷肥的施用标准	19
3.4.2 氮肥的施用标准	19
3.5 执行	21

3.6 对过剩粪便进行加工和出口的强制要求	21
3.7 结论	22
4 荷兰普遍采用的畜禽粪便管理技术	23
5 适用于中国的畜禽粪便管理方案	27
5.1 概述	27
5.2 方案 1：将粪浆施用于草地和耕地	27
5.2.1 养分回收	27
5.2.2 无处理及粪浆施用	27
5.2.3 简易的机械化固液分离	28
5.3 方案 2：生物废物废水处理系统	29
5.4 方案 3：先进的分离系统	30
6 总结和结论	
.....	
.....	33
6.1 中国采用和实施技术所需的要求	33
6.2 推荐的三种方案所适应的中国不同区域	33

1 项目概况及目标

2014年，中国的肉蛋奶总产量分别为 8706 万吨、2893 万吨和 3724 万吨（见图 1）。随着产量增加，畜禽养殖场的规模也大幅扩张，因此产生了更多的粪便。据报道，全国集约经营的畜禽养殖场每年产生数十亿吨的粪便。然而，由于处理成本高又缺乏技术支持，这些粪便的有效循环利用率不足 60%¹。畜禽粪便正在成为导致环境污染的主要来源之一，是畜禽业可持续发展面临的重大挑战。

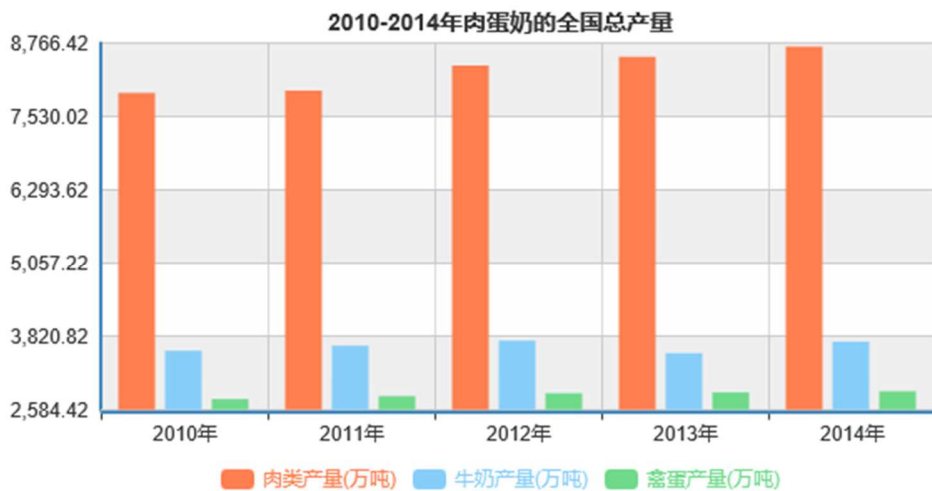


图 1：2010-2014 年间中国肉蛋奶总产量（单位：万吨）

（数据来源：中国国家统计局网站 <http://data.stats.gov.cn>）

在此背景下，瓦赫宁根大学及研究中心(Wageningen UR)的研究小组申请了“如何将荷兰畜禽粪便管理系统运用于中国现状”的种子基金项目。该项目由荷兰经济事务部资助，项目主要包括以下几个方面的内容：

- 联合中荷双方的企业及研究机构，构建合作平台；
- 实地考察中荷两国的畜禽养殖场，互相了解彼此的做法，然后进行有效对比。
- （从立法和市场因素的角度）选择出可适用于中国的管理技术和基础设施系统，制定出相应计划；

1 http://www.moa.gov.cn/zwl/m/zwdt/201609/t20160928_5294748.htm

-
- 最终以促成两国共同资助的具体合作项目为目标（例如，成立中荷畜禽废弃物资源化中心），进行具体的项目设计、设备系统的调试以及市场推广；

本文中，“畜禽粪便”指奶牛、猪或家禽养殖场产生的粪水或粪浆（尿液、粪便、冲洗用水的混合物，通常含水率**90%**或以上）。原因在于干粪的处理和施用相对简单，粪浆的管理和处理在世界范围内都是难点。本文作者尝试选择出一些能够普遍适用的粪浆管理技术并根据中国的实际情况进行调整和说明。

2 中国的背景情况

2.1 畜禽行业规模增长迅速

自上世纪七十年代中国改革开放以来，畜禽行业得到了迅速的发展。畜禽养殖业总产值占整个农业产值的比重从1978年的14.96%上升到2011年的31.70%²；与此同时，畜禽业产生的粪便也在迅速增加（从表2看出，自2000年以来增长了20%）。但是，自1960年代以来，畜禽粪便的循环利用却变得越来越少，主要原因是化肥逐渐代替了粪肥的使用³。从而导致目前畜禽粪便已成为主要农业污染源的既成事实，给畜牧业的可持续发展带来重大挑战。据《农业生产展望》预计，到2020年和2030年，畜禽粪便的产量将分别达到28.7亿吨和37.4亿吨。因此，为产量如此之大的畜禽粪便找到处理方案已成为中国亟待解决的问题。

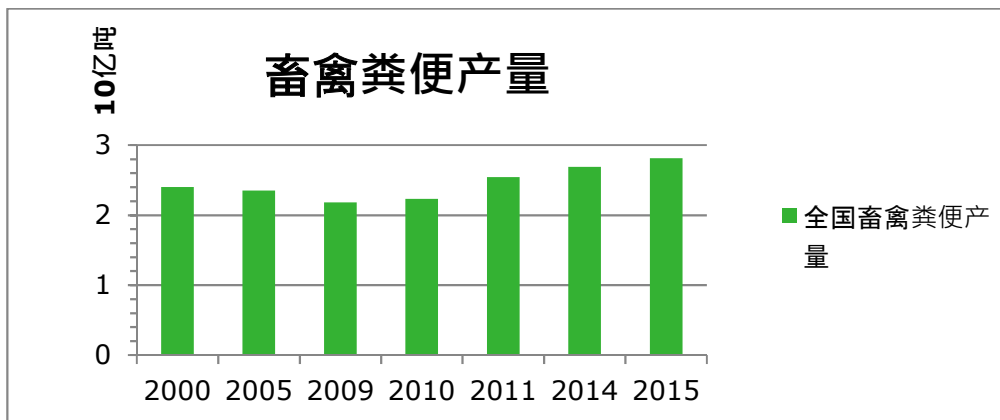


图2: 2000-2015年间中国畜禽粪便产量⁴

2.2 畜禽粪便对环境的负面影响

畜禽养殖业和畜禽粪便处理不当对环境的主要影响包括以下几个方面⁵：

- 1) 硝酸盐淋溶渗入地下水。土壤微生物将粪便中的铵离子(NH_4^+)转化为硝酸盐(NO_3^-)，在土壤中形成游离氮。部分硝酸盐会溶解到根系层以下，最终渗入地下水。当硝酸盐富集在地表水时（与磷一起，见下文），会造成水体富营养化。存在于食物和水中的硝酸盐如果摄入体内，可被还原成亚硝酸盐(NO_2^-)。亚硝酸盐会使血液中的红细胞失去携氧功能，引发“蓝婴综合症”。
- 2) 同样畜禽粪便在某区域过量施用或堆积也会引起磷素在地表水的富集。地表水所含的高位磷素水平有利于有害藻类的生长，从而导致水体的富营养化。而滋长在饮用水水源附近的有害藻类，对我们人类安全、鱼类群落均有威胁，还有导致海滩污染的风险。

² <http://data.stats.gov.cn>

³ 我国集约化畜禽养殖场污染治理障碍分析及对策，2006，苏杨，中国畜牧杂志，第4卷，第14期，第31-34页

⁴ 《农业生产展望》(Agricultural production outlook)，2014，第1期，《农业环境科学学报》2014(3):435-445，《农业工程学报》，2013(1):171-179

⁵ 荷兰畜禽粪便处理之战，2016年3月 Buissonjé, F.E. de; Melse, R.W.; Hoeksma, P.; 《世界环境》2016(2)

3) 动物粪便的不当储存、运输和施用过程中都有大量的氨气排放。氨气 (NH₃) 的随水沉降也会造成地表水的富营养化。如果在富集氨源附近栽培敏感作物, 可能使其受到损害。在缓冲能力低的土壤上沉积的氨可导致土壤酸化和阳离子消耗。此外, 氨的沉积可能导致自然生态系统和植被发生不必要的变化。

在空气中, 氨与其他化合物 (例如来自工业源的二氧化硫) 反应形成直径为 2.5 微米或更小的颗粒物 (PM), 称为“PM2.5”。微小的粒子会被吸入肺部, 也是我们非常关心的大气污染问题之一。

其他负面的环境影响还包括臭味问题以及产生非二氧化碳温室气体, 如甲烷和一氧化二氮, 会导致全球变暖。

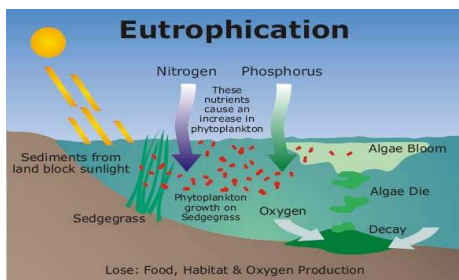


图 3: 畜禽粪便对环境的负面影响

2.3 对畜禽粪便管理实地考察的描述

种子基金项目获得资助后, 研究小组对中国的几家奶牛场和鸭场进行了实地考察。

2.3.1 考察黑龙江省鹤岗奶牛场和鹤园奶牛场

鹤岗奶牛场拥有 2000 余头奶牛, 是农垦九三管理局下属的鹤岗农场下面的 13 个农场之一。农垦九三管理局拥有 11 个国有农场, 鹤岗农场是其中一个。

鹤岗奶牛场有两种牛粪处理系统: 一种是粪便厌氧发酵产气系统。由于黑龙江冬季气温可达零下 30 摄氏度, 粪便无法在低温下发酵, 这种系统在该地区仅能在夏季使用。生产的沼气主要用于发电和供暖, 供应奶牛场和办公区域。另一种系统是通过斜筛将固体和液体分离, 固体部分用于堆肥, 然后作为有机肥施用于耕地, 液体部分泵入蓄粪池, 分包给可以将其处理为浓缩肥料的第三方服务公

司。这家奶牛场在一个月前购买了一台法国产的施粪车，计划在来年春季将肥料施用于户外农田。在中国这还是一个处理粪便的新方法。



图 4：黑龙江鹤奥奶牛场的粪便处理

在同一地区，鹤园奶牛场和鹤奥奶牛场一样，也是农垦九三管理局的下属农场。该农场设计可容纳 4800 头牛，但 2016 年 4 月考察时实际养殖仅 1200 头奶牛。中国奶业当时正在经历艰难时期，因此农场都在减少奶牛存栏数量。

鹤园奶牛场也采用两种处理粪便的系统。一种是从德国购买的有氧堆肥系统，可以将粪便固体部分制成堆肥。由于黑龙江当地冬季温度极低，该系统也只能在夏季使用。即便是在夏秋季，利用该系统腐熟一批粪便要花费 3 个月，这意味着他们每年最多可以制作两批堆肥。另一种系统是采用螺旋压力分离器将粪便的固体和液体部分分离。相比于斜筛，螺旋压机可使固体部分更干燥，不过成本更高昂，而且如果粪便中混有过多砂子，使用寿命也会大大降低。分离的固体部分进行堆肥，液体部分进入蓄粪池，部分液体也可重复使用以冲洗管道。生长季节到来时，蓄粪池储藏的液体部分可以施用于耕地。这里的农田通常面积广大、平坦，便于运输和再利用。



图 5：黑龙江鹤园奶牛场的粪便处理

2.3.2 考察河北省栾城定远奶牛场

定远奶牛场设计容纳 2000 头奶牛，同样由于近几年乳业低迷，仅有 850 头奶牛存栏。农场首先将牛粪固液分离，干粪卖给当地做粪便倒卖的第三方，每月获利约 3000 元；液体粪污，包括冲洗后的废水和尿液，用于给邻近的苗圃浇肥。

然而，附近的苗圃消耗不了太多的液体粪污。奶牛场就想办法与邻近种植玉米的农民签合同，免费为农场附近的 2500 亩玉米地浇水，作为回报，农民将以比市场更低的价格向奶牛场出售玉米。这个模式在河北地区越来越受欢迎。



图 6：河北省定远奶牛场的粪便处理

2.3.3 考察广东省温氏集团种鸭场

在这家高新技术示范工厂里，200 万只种鸭产生的液体粪污通过生物废水处理系统进行处理。种鸭粪含水量非常高，纤维质含量又非常低，不适合用一般的干湿分离设备做处理。温氏的做法是使用城市污水处理常见的生物处理法，在生物处理之前，鸭粪经过两个简易的沼气发生罐儿生产沼气，然后再将沼液进行硝化反硝化等反应，处理后的水排到鸭场外的氧化塘，利用大自然的净化能力再进一步净化。



图 7：广东省温氏集团种鸭场的粪便处理

2.4 畜禽粪便污染治理新规

2.4.1 关于畜禽废弃物处理的法律法规中的主要条款

自 2014 年以来，中国新出台了多部法律、法规和办法以保护环境。表 1 列出了一些有关畜禽粪便处理的条款。

表 1: 关于畜禽废弃物处理的法律法规中的主要条款

	法律、法规和办法
	<p style="text-align: center;">环境保护法 (2015 年修订)</p> <ul style="list-style-type: none">➤ 公民、法人及其他组织有权获取环境信息，参与环保活动，并对非法行为进行监督和举报。➤ 经营畜禽养殖场的农民及所有者业主应采取科学的措施处理牲畜粪便、尸体和废水。➤ 县级以上环保部门有权通过各种方式限制污染物排放，例如减少农场/企业的数量，或者甚至责令关闭、停业。➤ 政府鼓励清洁生产和资源循环利用。
	<p style="text-align: center;">规模畜禽养殖场污染防治条例 (2014 年颁布)</p> <ul style="list-style-type: none">➤ 政府鼓励和支持畜禽粪便的再利用，如用于农田、沼气生产、有机肥生产以及其他综合回收利用。➤ 政府鼓励和支持粪便存储、运输和沼气生产基础设施的建设。➤ 施肥时，将废水或发酵物送入耕地作为肥料，施用的营养剂量应与土地的保肥能力相适应（条例未规定保肥能力）；禁止将未经任何处理的粪便排入环境。此外，还要采取措施，防止可能的环境污染和疾病传播。➤ 如果粪便排放不符合国家相关标准或总量控制指标，企业或养殖场可被处以 5 万元以下罚款。
	<p style="text-align: center;">全国农业可持续发展规划 (2015—2030 年) 2015 年颁布)</p> <ul style="list-style-type: none">➤ 政府支持规模化畜禽养殖场按照推荐的标准重建或新建。目的是到 2020 年和 2030 年，使规模养殖场的畜禽废弃物的再利用或回收利用率分别达到 75% 和 90%，逐步提高粪便资源通过生态发酵后的回收利用或达标排放。➤ 在有畜牧业发展优势的省区县一级开展粪便处理示范试点。
	<p style="text-align: center;">防止水污染的行动计划 (2015 年颁布)</p> <ul style="list-style-type: none">➤ 到 2016 年，规模化养殖场必须具备粪便储存、处理和回收利用的设施。具有畜禽养殖场密集的区域应当单独收集粪便进行集中处理和利用。

防止土壤污染的行动计划（2016年颁布）

- 鼓励施用有机化肥，减少化肥的使用；开展农业废弃物回收试点项目，目的是将粪便商业模式应用于其他案例。
- 到 2020 年，实现化肥和化学农药使用零增长，同时，将施肥效率提高至少 40%。到 2020 年，土壤测试和配方施肥率应提高到 90%。
- 严格防止畜禽药物和饲料添加剂的过量食用，从源头控制土壤污染。
- 深化土壤污染控制研究。例如，土壤环境质量标准、土壤环境容量和承载力、污染物运输和转化法律、重金属积累的作物选择，或有补救功能的植物等方面的基础研究，以及土壤污染、农产品质量与人体健康之间的关系。

生态文明体制改革总体方案（2015年颁布）

- 建立农业、畜牧养殖、水产养殖废弃物处理系统，实现农业、畜牧业和水产养殖业的有效整合和流通。

到 2020 年化肥使用量零增长行动方案（2015年颁布）

- 中国粪便养分回收率不足 50%，秸秆养分回收率不足 35%。
- 化肥的过量使用不仅增加了农业生产成本，也导致土壤板结、酸化。
- 到 2020 年，农田粪便养分施用率应达到 60%，比当前提高 10%。
- 到 2020 年，40% 的主要作物耕种面积实现机械化施肥，比当前提高 10%。
- 到 2020 年，耕地土壤的有机物质含量应提高 0.2%。
- 2015 至 2019 年，化肥使用增长率控制在 1% 以内；到 2020 年，主要农作物的化肥使用达到零增长。

2.4.2 结论和建议

随着多项法律政策的出台，中国政府决心引领中国走向一个环境更清洁的未来。通过细读这些法规的条款，可以了解到中央政府是计划解决禽畜废弃物问题的思路：

- 畜禽粪便更多地被称作“粪便资源”，而非“废弃物”，可以看出政府支持回收再利用。
- 粪便施用于农田、沼气生产和堆肥成为有机肥料是政府推荐的具体方法，但对耕地的最大施用限度没有明确规定。
- 禁止将未经处理的粪便向周围环境排放。
- 政府将支持开展粪便处理/回收试点项目；改建达标畜禽养殖场或使其具备粪便处理能力。
- 在中国很多地区，耕地土壤板结、酸化、盐碱化是土壤条件存在的主要问题。有机肥还田将改善土壤质量。

总而言之，中央政府认为粪便回收再利用到农田是处理畜禽粪便问题和作物种植土壤质量问题的一种正确途径。但政府还表示，“禁止将未经处理的粪便向周围环境排放”，这在粪便回收再利用的实

践中引起了很多争议。首先，这里使用的术语“未经处理的粪便”是一个模糊的定义。例如，对粪浆进行物理固液分离可能被认为是一种处理方法，但此处理不会降低对环境带来的任何潜在风险。此外，只要以正确的方式和正确的剂量，在正确的季节，将未经处理的粪便再利用到耕地并且以向作物提供营养物质为目的，该行为就不应当被视为“排放污染物”而是向作物“施肥”。最后，同样重要的是，中国使用的废水排放标准是为了限制工业和城市废水排放而制定的（最大 COD 为 120 mg/L，最大总氮浓度为 20 mg/L，最大总磷浓度为 5mg/L）⁶，可能不适用于调节畜禽粪便的利用。因此，要进一步完善法规，详细阐述未经处理的粪便在何种条件下可以施用于耕地，有哪些粪便管理/处理的技术需要强制执行，以及处理后要达到什么标准。如前所述，美国和荷兰等许多国家的经验证明，只要施用方式、季节和剂量正确，未经处理的粪便可以安全地用于耕地的施肥。

2.5 中国畜禽粪便和耕地的分布状况

畜牧业的快速发展和规模化增长以及畜牧业逐渐与作物种植分离，是造成中国畜禽粪便管理问题越来越严重的两大原因。一些研究表明，小型养殖场更倾向于将粪便作为养分，再施用到土壤中。然而，大型养殖场通常找不到能够消纳大量粪便的可耕种农场。这就是我们看到过去几十年间畜禽养殖场扩容或合并的时候，粪便的回收利用率却相对降低的原因⁷。为了提高回收利用率，有必要分析中国畜禽粪便规模生产和耕地的分布情况，然后确定“粪便还田”的策略和技术。

2.5.1 畜禽粪便的分布状况

本文所提到的畜禽粪便生产包括从猪、牛、蛋肉鸡养殖场产生的粪便。根据杨世琦等 2013 年的关于中国全国规模化养殖场畜禽粪便生产状况的统计数据（图 8），我们可以得出以下结论：

- 畜禽粪便规模产量最高的前四个省是：山东、河北、四川和河南；
- 广东、福建、湖南、湖北、安徽和江苏属于全国畜禽粪便生产的第二梯队；
- 内蒙古及东北三省（辽宁、吉林、黑龙江）是畜禽粪便生产的第三梯队也有重要的研究价值。

⁶ <http://huanbao.bjx.com.cn/news/20160108/699613.shtml>

⁷ 仇焕广，廖绍攀，井月，梁江. 我国畜禽粪便污染的区域差异与发展趋势分析. 环境科学, 2013, 34(7): 2766-2774

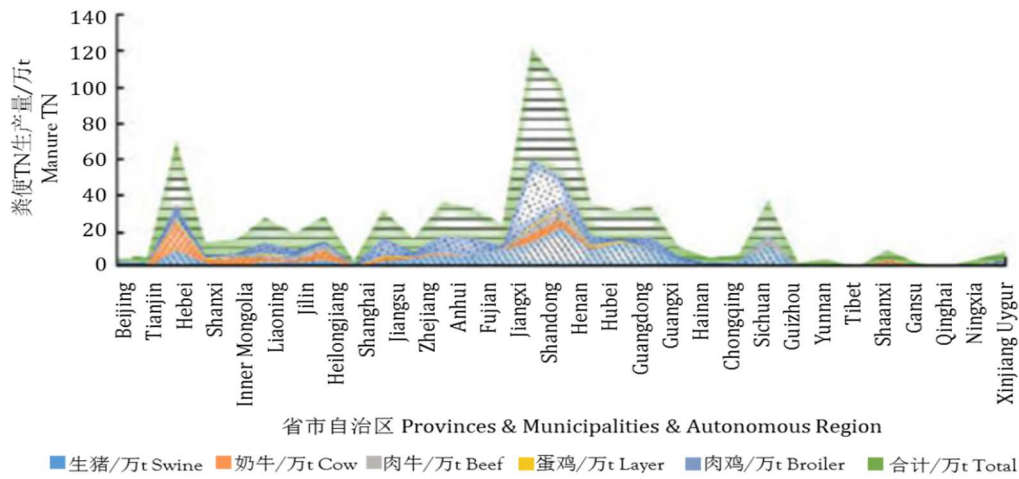


图 8: 2013 年中国各省区规模农场畜禽粪便的总氮产量, 纵轴单位: 10000 吨氮/年⁸

2.5.2 不同地形和耕地的分布状况

中国的地形可分为高原、盆地和平原。

- 中国有四大高原，分别是青藏高原（青海和西藏）、内蒙古高原（内蒙古和宁夏）、黄土高原（山西和陕西），云贵高原（云南和贵州）。其中，只有内蒙古高原地势平坦，气候降水条件良好，适合大规模种植农作物，而同时又便于粪便还田运输。当地主要作物包括大米、土豆、玉米和饲草。从图 8 可看出，内蒙古和宁夏的畜牧业也相当发达，是实现畜牧业和作物生产之间的养分再循环的理想之地。
- 新疆和四川大部分地区处于盆地。新疆幅员辽阔，盆地腹地地势平坦，由于当地土地政策特殊（建设兵团使用和管理大面积土地），作物规模化种植相当普遍，很适合畜禽粪便的规模化还田。四川虽然是畜禽养殖大省，但由于多山地和水域，全省仅有 5.3% 的面积是平原，机械化大规模种植带来困难。这就意味着粪便运输和还田都有一定难度。要解决以四川为代表的畜禽粪便处理的问题，需要找到有效降低粪便体积的技术，将浓缩后的养分还田或运走，不但能大大降低运输难度也能有效控制运输成本。
- 平原主要覆盖三个区域：东北平原（东三省和部分内蒙古地区），华北平原（京、津、山东、河北、河南、安徽北部、江苏北部），以及长江中下游平原（湖北、湖南、安徽南部、江苏南部和浙江等）。平原地区土壤条件优渥，气候适宜耕作，均有大量农田作物分布。由图 8 可以看出，这些区域也正是畜禽粪便生产相当集中的地区。如果能找到适当途径，将区域内畜禽粪便均匀、适量分布到上述区域，不但能够解决畜禽废弃物的问题，也能够增加土壤有机质含量，有效的改良土壤质量。

⁸ 杨琦, 韩瑞芸, 刘晨峰, 省域尺度下畜禽粪便的农田消纳量及承载负荷研究. 中国农业大学学报 2016,21 (7) : 142-151



图 9：长江下游典型的稻田

- 广东和福建位于中国东南部沿海地区，山地丘陵占两省面积的 80%左右，耕地分布零散，面积小，每户平均耕地面积为 0.37 亩，是全国平均水平的 1/4。上述两个原因使得在稻田使用机械作业非常困难。两省在畜牧业生产中处于全国前列，但地形不利使粪肥运输和施用，与四川省一样，这里也必须找到有效减少粪便体积方法。

2.5.3 结论

由于当前的畜禽养殖业水平有别于小农时期，社会关心的畜禽粪便处理的问题主要是如何在较短时间内处理掉较大规模养殖场的粪便。因此本报告中着重探索的管理办法、技术经验以及还田利用等都将围绕规模化养殖场产生的粪便。

对于一些看似有粪便还田条件的地区，如平坦高原地区与平原地区，畜禽废弃物规模化还田要注意以下两个因素：1) 粪便还田方法/设备是否受土地规模和土地制度的制约。中国人均占有耕地 1.35 亩，而上述提到的大部分区域都属于中国人口分布最稠密的东部地区，人均耕地占有量大大少于全国平均值。这些小块儿耕地使用权属于不同的农户，地块标志以陇为界（见图 9），作物种植不具有统一性，因此给任何机械作业和规模操作都带来极大困难。2) 粪便还田是否受种植作物的限制。例如长江中下游的平原地区多以种植水稻为主，稻田内以水覆盖，相对于旱地作物而言，粪肥施用会有更大的操作难度和时间限制。

以处理规模化养殖场粪便为目标，根据上一章节对畜牧业和耕地分布的分析，综合考虑畜禽粪便生产分布、耕地分布、主要作物（旱田或水田）以及耕地区域地形和土地制度等因素，中国可以分为三个典型的畜禽粪便还田操作区域，图 10 用三种颜色标出了这几个区域类型。

黄色区域包括新疆、黑龙江、吉林、辽宁、河北、山东、河南、内蒙古自治区及宁夏回族自治区。这些区域都是畜禽粪便生产大省，旱地作物种植广泛，地势平坦，同时土地流转化程度较高，地理条件和种植条件均比较适合将当地生产的畜禽粪便（或粪便产品）就近还田。

绿色区域包括江苏、安徽、浙江、江西、湖南、湖北等省。这些地区属于长江中下游流域，降水充沛，河网密布，主要种植作物为水稻，由于水稻种植方式的特殊性，粪便或者粪肥在水稻田中规

模化施用技术仍需要进一步摸索。因此，能否有效实现粪便规模还田取决于技术的突破。此外，如果短期内大规模还田受技术的掣肘，可以采取相关技术有效降低粪便的体积或/和将处理后的粪便运走。

蓝色区域包括福建，广东和四川三省。该地区耕地分布零散，地形复杂，直接大规模施用畜禽粪便非常困难，该类地区需要借助从粪便中分离养分或大幅减少粪便体积的技术来处理畜禽粪便。

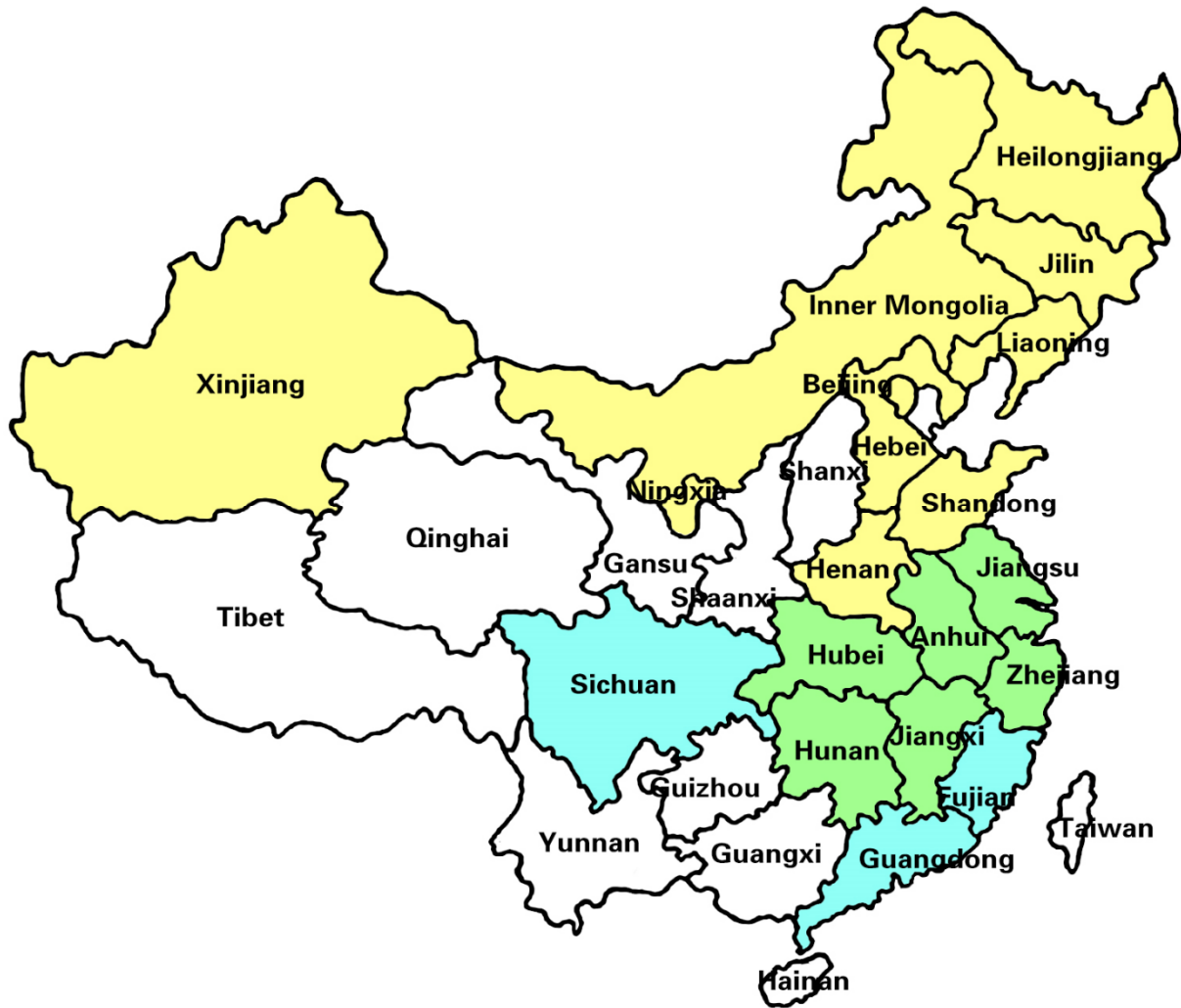


图 10：中国各地区在粪便处理和管理技术方面有着不同的机遇和需求，上文对颜色标示有所说明。

3 荷兰畜禽粪便生产及相关法规

3.1 对过剩粪便进行处理是生产的前提

了解荷兰的畜禽粪便管理有三条主线：

- 粪便过剩的畜禽养殖场（根据荷兰相关还田标准，养殖场生产的粪便大于其本身可以还田消耗的量，称之为粪便过剩的畜禽养殖场）
- 粪便运输公司
- 粪便接收农场（耕地或拥有足够土地的养殖场）

考虑到环境原因，荷兰的过剩畜禽粪便必须从养殖场运往拥有更大施用空间的农场。为了将剩余粪便运走，养殖场必须向运输公司支付每吨 10 至 23 欧元的费用，而运输公司则需要向接收粪便的种植农民支付每吨约 3 至 10 欧元的“粪便接收费”。两者的差价刨除运输成本后才是运输公司的赢利部分。这种粪便处理体系对于粪便生产养殖场来说代价高昂，而接收粪便的农场可以获得免费粪肥以及额外的现金收入。在荷兰，这被看作是养殖场生产过剩粪便的生产许可证。

3.2 养殖场数据及自给自足⁹

荷兰约有 17000 个奶牛场，共有 160 万头奶牛，每年共产生超过 130 亿公斤牛奶。一个一般规模的荷兰奶牛场（家庭农场）拥有约 100 头奶牛和 50 公顷的农田。每头奶牛的平均产奶量为每年 8100 升。

荷兰约有 4800 个养猪场，存栏量共 1200 万头，国内生产总值（屠宰和出口量）每年约 2400 万头。

荷兰蛋禽业约有 1000 家养殖场，有 3600 万只母鸡，每年大约生产 110 亿枚鸡蛋。一般养殖场约养殖 3.5 万只蛋鸡。

荷兰有 580 个肉鸡养殖场，共有 4700 万余头肉鸡。肉鸡场的平均养殖规模为 81,000 只，肉鸡年产量约 100 万吨。

荷兰大多数畜产品的自给率在 300%左右；这意味着多出的乳制品、肉类和蛋类大部分用于出口。

3.3 过剩的粪便

荷兰大多数奶牛场自有土地（平均每个农场 50 公顷），但大多数养猪场和养鸡场都没有土地。因此，奶牛场可以将部分粪便施用于自有土地，只有剩余部分的牛粪必须运往其他（可耕种）农场。

⁹ 来源：荷兰合作银行，2016。

但是，大多数养猪场和家禽养殖场根本就没有任何土地，这意味着几乎所有的猪粪和鸡粪必须运往其他农场。表 5 显示了不同粪便（牛，猪，家禽）一般成分和固体物质含量。

2014 年，78%的奶牛场生产的磷肥比自我消纳量高，剩余量为 1920 万公斤（相当于约 1160 万吨的粪浆的含磷量，见表 2）。

荷兰的大约 90%的畜禽粪便以粪浆的形式存在（粪便、尿液和清洁水的液体混合物，从漏粪地板下收集），每年产量超过 7000 万吨，其中约 80%是牛粪浆，20%是猪粪浆。由于奶牛存栏量的增加，2015 年荷兰历史上头一次，运输的牛粪浆多于猪粪浆（表 2）。2015 年，运输了 62 万卡车，共 2200 万吨的粪浆，其中一半以上是牛粪浆，其余为猪粪浆。

将畜禽养殖场生产的剩余粪便施用于耕地、用于农作物生产，是荷兰农业系统的要素之一。由于近年来种植户获得的粪肥费用增加了，因此化肥越来越多地被畜禽粪便肥料所取代。

表 2：2015 年荷兰畜禽粪便运输情况

粪便种类	每年货车装运数量	粪便数量（百万吨/年）
牛粪浆	322,000	11.6
猪粪浆	300,000	10.2
家禽粪便	55,000	1.6
马粪	119,000	2.1
其他	107,000	3.3
合计	903,000	28.8

2015 年，荷兰仅有 570 万吨畜禽粪便未施用于农田，主要用于私家花园或出口后施用于邻国的耕地。

3.4 磷、氮的施用标准

荷兰畜禽粪便政策的基础是它有一个农田氮肥和磷肥施用标准体系，就是说对每公顷农田的氮肥和磷肥最大施用量有规定。欧盟有氮肥施用标准（见下文），虽然大多数欧盟国家认为氮肥的施用标准为防止施用过多磷肥提供了足够的保障。不过，荷兰除了遵守欧盟氮肥施用标准外，还有额外一套更加严格的磷肥施用标准。

荷兰的磷肥施用标准于 1987 年成形（见表 3），而欧盟氮肥施用标准于 1998 年推出。经过不断的修改和演变，最新的磷肥施用标准于 2015 年出台，氮肥施用标准于 2006 出台（近期有些小修改，主要针对拥有 80% 以上草地的农场的牛粪施用标准，具体内容见下一节）。

3.4.1 磷肥的施用标准

1987 年制定的磷肥施用标准注重下几方面：

- 每公顷耕地、草地和玉米地上分别施用磷肥(P2O5) 的最大量（见表 3）；这里的磷肥包括粪源磷肥和化肥中的磷肥。
- 畜禽粪便的施用期：8-来年 2 月间禁止在土地上进行粪便施用，以防淋溶和渗流。
- 粪便施用：为减少氨气和臭气排放，粪便应直接施用于土壤或深施到土壤表层以下（例如，采用粪浆深施，而非喷洒。

表 3：1987-2015 年间荷兰磷肥最大施用标准*，单位：kg P2O5/公顷/年（1 公顷=15 亩）

年份	土地使用		
	耕地	草场	玉米地
1987	125	250	350
1991	125	250	200
1995	110	150	
1998	100	120	
2000	85	85	
2002	80	80	
2015	50-75**	80-100**	

* 畜禽粪便和化肥中磷肥的总和。

**：最终标准取决于土壤的含磷情况，需经土壤分析确定。

3.4.2 MINAS 系统和氮肥的施用标准

MINAS 系统最早于 1990 年由荷兰的一家农业环境咨询公司（CLM）开发，假设独立的农场为黑箱，营养物质的输入物（量）和输出物（量）会直接影响黑箱的产能和产量。MINAS 工具意在为农场主提供一个农场的营养物质输入物和输出物（成分）的科学认知，从而让农场主知道如何去选择饲料等输入物质。

从 1993 年开始，荷兰政府与农场主一起把 MINAS 农场管理工具逐渐发展成为一个兼具经济手段的政策工具，这期间做了大量的准备和推广工作。直到 1998 年，MINAS 工具才开始在整个荷兰普遍应用。

MINAS (mineral accounting system) 工具以“农场营养物质过剩指标”为参照标准，特点就是一笔“流水账”，流水账记录的是某个农田或农场含“氮”和“磷”等营养物质的入量（饲料、化学肥料、粪肥等）和出量（用作物和畜产品产量进行换算）。入量和出量做减法即得出该农田

区域“氮”和“磷”等营养成分的过剩量（损失量），具体表示为每年每公顷剩余/损失“氮”和“磷”的千克数。一般而言，农场主为了增产一般都会过量使用营养物质，因此在农场层面而言，营养物质“损失”的情况基本可以忽略不计。

在定义了什么是营养物质（以氮、磷为代表）过剩，和怎样量化营养物质过剩之后，荷兰政府又规定了“氮、磷过剩的天花板”，即对最大允许过剩量进行了规定，超过“天花板”的氮、磷使用都会被征税。“氮、磷过剩天花板”的设置体现了荷兰政策制定的谨慎和聪明之处。政策制定者并没有一味追求营养物质在农田层面达到绝对的平衡，而是参考了多方面的因素，对施肥过剩给予一个缓冲的空间。这个缓冲空间不是平白构思出来的，而是以科学实践为依据的。科学实验表明，氮、磷元素在施肥过程中都存在不同程度的损耗，其中氮元素损失最为可观，在氧气充足的条件下，农家肥中的含氮有机化合物会进行分解，使粪水中的有机氮降解为氨气，逃逸到空气中。另外，在降雨的情况下，粪水中的营养物质会以不同形式流失到河流和地下水当中（荷兰恰恰是个降雨非常充沛的国家）。因此综合以上因素，每年每公顷农田中，养分氮的损失量可以达到 180 公斤。磷元素流失量相对较小，每年每公顷可达 20 公斤（以 P₂O₅ 计算）。因此，天花板中规定的氮和磷的最高可接受过剩施用量分别为 180 公斤和 20 公斤每年每公顷（更具体的规定详见表二）。以此为参照，营养物质施用的过剩量额如果小于上述标准，仍被认为是环境可接受的；大于该标准的部分被征税，税额为 € 2.30/ kg N 和 € 9.00 /kg P₂O₅。

MINAS 系统一经荷兰推出之后，被许多国家推崇并学习，是个在当时、甚至拿到现在来讲理念都相当先进的法规。他的以目标为导向的法规制定思路给农民和养殖者很大的决策自由，使农场主们可以殊途同归，根据自身情况制定经济利益最大化农场战略。然而，令人唏嘘的是这个政策于 2003 年被欧盟法庭裁定为与欧盟硝酸盐指令相违背，最终导致基于 MINAS 系统的法规执行措施于 2006 年中断。

MINAS 系统实际上是针对欧盟硝酸盐指令的一个荷兰版实施方案，这个方案在当时过于超前，与欧盟规定的粪源氮肥必须有施用上限的规定相违背，因此遭到欧盟否决，不得不部分废除。然而我们需要思考的是，欧盟的固定上限是否值得推敲？作物生长季长短、作物吸收氮的能力，土壤脆弱与否，土壤的渗透能力和脱硝能力等各种因素都会影响作物对营养物质的吸收。先进的以营养物质平衡为出发点的政策居然败给了守旧的最大阈值的欧盟指令，这在当时和现在仍然有很大的争议。

欧盟硝酸盐指令允许每公顷耕地或草地每年施用畜禽粪便中氮肥的最大标准是 170 千克；对于 80% 以上土地面积是永久性草地的养牛场，允许施用更高标准的氮肥（粪便中的氮肥可达 230 或 250 千克/公顷/年），欧盟硝酸盐指令仅涉及来自粪便的氮肥，不考虑合成氮肥的施用影响。自执行欧盟硝酸盐指令以来，荷兰的粪肥政策进一步收紧。欧盟水框架指令又于 2000 年推出，旨在保护地表水水质免受氮、磷和其他多种化学污染物质的污染，如农药、除草剂和重金属。由于荷兰当时的地下水质量非常糟糕，因此，当时必须被欧盟强制采取以下措施以提高地下水水质：

- 根据农作物对氮肥的吸收情况¹⁰，不同农作物设定专用氮肥施用标准（同时仍然要遵守磷肥施用标准），设定值为粪便和化肥中的含氮总和。
- 缩短粪肥施用期（每年二月——八月，即 7 个月）。
- 种植在沙土地的玉米收获后，强制性要求种植间作作物以减少硝酸盐淋溶。
- 进一步降低磷肥施用标准（2015 年制定出最终标准，见表 3）。

3.5 执行

虽然 MINAS 系统被部分地废除，但与该系统一同引进的行政性记账系统和数据库仍在使用，并在执行中发挥着重要作用。农田的平衡氮磷水平要经过计算，同时，离开养殖场的全部畜禽产品和粪便的产量要经过称重、登记和实验室分析（若没有标准成分表注明的情况下）。

荷兰有关粪肥和化肥的立法中，核心在于，产业链上所有的农民和运输商都要提交各自与农场、粪便运输相关的数据，政府将这些数据相互建立联系，并据此进行具体的治理工作。

经济事务部从行政管理和实地监督两个方面对粪肥运输业务、数据登记、粪肥和化肥施用、实验室化学分析、数据库录入和数据链接等工作进行监测。如果违反这些一般规则，就意味着经济犯罪，是可以依法追究刑事责任的。

3.6 对过剩粪便进行加工和出口的强制要求

2014 年，新法的颁布迫使农民必须出口过剩的粪便。每家磷产出过剩的养殖场都必须对一定比例的粪肥进行处理后转向出口。这个比例每年会增加，直到荷兰磷肥生产和现有农田之间达到期望的平衡水平。预计到 2020 年之前将达到这一平衡。在畜禽养殖集中的地区（南部和东部），这个比例高于其他地区的农场（见表 4）。粪肥出口用磷肥的千克数表示。

表 4： 根据单个畜禽养殖场磷肥过剩情况，荷兰各养殖集中区域在不同年份对畜禽粪便中的过剩磷肥进行加工后出口的强制性比例

地区	2014	2015	2016	到 2018 ?
南部养殖集中区	30 %	50 %	55 %	70 %
东部养殖集中区	15 %	30 %	35 %	50 %
荷兰其他地区	5 %	10 %	10 %	10 %

将粪便加工成具有高养分水平和低水分的肥料产品，可提升包括出口地在内的营养物质分配的效率。

¹⁰ 可登陆 <http://www.rvo.nl/file/tabel-1-stikstofgebruiksnormen-2015-2017-1> 查阅每种作物的氮肥施用标准。

3.7 结论

通过引入肥料施用标准，提升粪肥施用技术来限制养分流失到大气或水中，就有可能实现环境的重大改善。前提条件是全境内的粪便运输和施用的基础设施必须完善。自 1980 年代以来，荷兰的氨气排放和硝酸盐淋溶大幅减少，使得地下水和地表水的质量大幅提高。

成功的先决条件是构建一套连贯、明确、切合实际、并且因地制宜的监管标准（例如农田养分施用标准）。粪便储存和分配的高效物流系统、准确的记录、监测、管理和执行系统也是不可或缺的条件。

4 荷兰普遍采用的畜禽粪便管理技术

在荷兰，有几种最为普遍采用的粪便管理技术适用于以下几种不同的情况：

1. 荷兰全部畜禽粪便产量的 90%:

固态粪便（以及沼液）的低排放施用，施用前粪便基本不经任何处理。



图 11：粪浆低排放还田草地

2. 荷兰全部畜禽粪便产量的 5%:

对粪浆进行机械化固液分离，然后将固体部分外运或出口，施用于其他欧盟成员国的农田（德国、比利时、法国）。



图 12：螺旋压力机对粪浆进行机械化固液分离

3. 荷兰全部畜禽粪便产量的 1%:

通过反渗透法从液体粪便中生产出矿物质浓缩液（液体氮肥和钾肥），作为肥料施用于荷兰的农田。



图 13: 反渗透法生产浓缩液的生产线

4. 荷兰全部畜禽粪便产量的 1%:

将犊牛粪的液体部分进行生物处理（硝化/脱氮），将其固体部分和沉渣作为肥料施用于荷兰的农田。



图 14: 犊牛粪液体部分的生物处理

5. 荷兰全部畜禽粪便产量的 1%:

将干燥的鸡粪出口到欧盟其他成员国。



图 15：用带地面拖车的卡车装运鸡粪

优势 1)：很明显，荷兰最常见的畜禽粪便利用方式是将其作为肥料施用在农田上。技术要求是，必须先将粪便注射到草地上，在施用后立即用土壤覆盖，这样才能施用粪便。在农作物生长初期，禁止施用粪便。通过给农作物施用畜禽粪便作为养分来源的方式，取代了 90%的合成磷肥和 60%的合成氮肥的施用。

优势 2)：2014 年推出了对过剩磷肥进行加工出口的强制性条例，其结果是 2015 年的磷肥出口达到 3500 万千克，约 300 万吨是固态粪便（来源：经济事务部，2016）。像干燥的鸡粪和猪粪的固体部分这种水分含量低、富养分的粪便浓缩产品可进行高效的长途运输。荷兰的种植户偏好牛粪，因为和猪粪和鸡粪相比，他们更喜欢牛粪氮磷比高且磷含量低的特点¹¹。因此，在荷兰，水分含量高、营养水平低的牛粪浆的液体部分仍然被作为液肥，而猪粪和鸡粪更倾向于出口。

优势 3)：采用溶气浮选法(DAF)和膜滤法（反渗透法，RO）将猪粪浆的液体部分加工成的矿物质浓缩液（液体氮肥和钾肥）约含 1%的氨态氮和 1%的碳酸钾，95%是水分。它暂时被赋予非“畜禽粪便产品”的合法身份，而被认为等同于人工肥料。因此，在粪源氮肥的最大施用标准之上仍可继续施加。其他终产品就是清洁水和固体部分。

在荷兰，这种液体氮肥和钾肥是为了响应欧盟有关肥料的立法以及种植户对磷酸盐含量低的粪肥产品的喜好（因为有严格的磷肥施用标准）而生产的。按照欧盟硝酸盐指令，粪源氮肥施用量仅为 170 千克/公顷/年（可以根据作物的摄入量而补充化学氮肥或者矿物质浓缩液）。如果没有这样专门的立法，那么生产此类矿物质浓缩液的成本效率在多数情况下比直接施用粪浆或简单机械化分离过的液体部分更低（见 5.4 节）。

优势 4)：从 1980 年开始，犊牛粪在 4 家区域性的生产线上进行集中处理（年产 80 万吨）。经机械化分离后，用硝化/反硝化工艺进一步加工液体部分，产生以氮气为主的气体释放到大气中。不过，部分氮素将被转化成一氧化氮，这是一种温室气体。沉渣就作为肥料用于农田。仍然富含碳酸钾的液体流出物及其他盐类被排放到污水处理厂进行进一步加工，再进行排放。

¹¹ 在荷兰，由于磷肥施用标准严格，种植户更偏好将氮磷比高且磷含量低的粪便作为肥料施用在他们的农田上，因此，在荷兰，牛粪比猪粪和鸡粪更适合作为肥料。

优势 5): 2014 年推出强制性的粪便磷肥加工出口条例后 (见表 4), 向欧盟其他成员国出口的干燥鸡粪和猪粪浆分离后的固体部分不断增加。大部分牛粪 (粪浆和固体) 留在荷兰, 原因是其磷酸盐含量较低, 而含氮比例更高。表 5 显示了荷兰的粪浆和固体粪便所具有的一般特征。

表 5: 荷兰的牛粪浆、牛粪浆的固体部分、固体牛粪、育肥猪粪浆、猪粪浆的固体部分以及蛋鸡固体粪便的一般成分和氮/磷比例

	干物质 (g/kg)	有机物 质 (g/kg)	N- tot* (g/kg)	N- min* (g/kg)	N- org* (g/kg)	P ₂ O ₅ * (g/kg)	K ₂ O* (g/kg)	N/P₂O₅
牛粪浆	85	64	4.1	2.0	2.1	1.5	5.8	2.7
牛粪浆的固体部分	250	188	7.8	1.6	6.2	4.4	5.8	1.8
固态牛粪便	194	152	5.3	0.9	4.4	2.8	6.1	1.9
育肥猪粪浆	93	43	7.1	4.6	2.5	4.6	5.8	1.5
猪粪浆的固体部分	250	116	10.5	3.8	6.7	12.4	5.8	0.9
固态鸡粪 (蛋鸡)	573	416	25.6	2.5	23.1	19.6	15.5	1.3

*: N-tot = 总氮, N-min = 氨态氮, N-org = 有机氮, P₂O₅ = 磷酸盐, K₂O = 碳酸钾, N/P₂O₅ = 总氮/磷酸盐

由于强制出口的粪源磷肥产量不断增加, (见表 4), 可以预测的是未来几年中, 猪粪和沼液固液分离的固体部分, 以及干鸡粪的出口将会增加。

5 适用于中国的畜禽粪便管理方案

5.1 概述

前几章对中国和荷兰在畜牧业、作物耕种、粪肥管理和立法方面的情况作了概述。在此基础上，本章分析了中国可以考虑的、潜在的粪肥管理方案，以防止粪肥的生产和使用对环境造成负面环境影响。对荷兰的粪便管理技术及其是否适用于中国的情形作了评估后，我们现在确定了三种可行的粪肥管理方案，并在以下几节中作了说明（5.2-5.4节）；第5.5节讨论了这些方案在中国成功采用所需的条件。

5.2 方案 1：将粪浆施用于草地和耕地

5.2.1 养分回收

因为大型畜禽养殖场的存在而使粪便过剩时，这些粪便通常被视为废弃物，给环境带来风险。然而，从农学的角度来看，畜禽粪便是一种有价值的肥料和养分资源。由于畜禽的养分转化效率仅有30%左右，这意味着饲料中约70%的养分最终流向粪便。这些养分不仅包括氮（N）、磷（P）、钾（K）、镁（Mg）、钙（Ca）和硫（S），还包括微量元素，如钠、氯、铜、锌、锰、铁、铬、钼、钴和硒。它们都对植物和作物生长很重要。此外，动物粪便还含有可提高土壤肥力和质量的有机物质。因此，一种较好的粪便管理技术是通过将畜禽粪便带回生产型草地和耕地来回收养分。这是方案1的基础，该方案不涉及或仅涉及一些基本粪便处理技术。这也意味着化学氮肥和磷肥被替代，或至少在很大程度上受到替代。对于高产农作物，仍然有必要使用合成氮肥，以补偿在粪肥施用期间和之后发生的氮损失。

5.2.2 无处理及粪浆施用

如前几章所述，本项关注的是“液体粪便”或“粪浆”，就是说含水量高达90%-98%，也就是说每吨粪便的养分浓度相对较低。这种粪浆主要由猪场和奶牛场生产。由于粪便呈浆状，所以需要粪罐车或铺设管道/灌渠等设施输送。

将这种粪浆施用于草地或耕地上，就是要将其不经加工而原样地运送到农田。由于用粪罐车运输粪浆的成本比浓缩肥料（如固体粪便）相对昂贵¹²，施用粪浆的耕地应该离养殖场越近越好，比如，不超过100或200公里。荷兰和其他几个国家已开发了低排放粪浆的施用技术。这些技术涉及粪便混合和注射深施，其结果是，与常规露天喷撒粪便的技术相比，臭气和氨气的排放显著降低。根据所用技术的不同，在实践中降低了50-90%左右的氨气排放，也就是说，更多的氮可用于作物生长，并且对额外施肥的需求显著降低了。。

¹² 每吨每公里的运输成本是相对的，但运输的只要是浓缩粪肥（量较少）而不是粪浆，运输成本明显就低。

从第二章可了解到，尽管中国中央政府认为粪便回收利用到耕地是解决粪便问题的一个正确方法，但还没有适合的技术手段或机械用来对粪便或粪浆进行回收再利用。其次，有些规定禁止将粪便（粪浆）直接排放到环境中，也就是通常所说的“不得将未经处理的粪便施用于土地”。再次，在中国，为保证每户农户可以靠地生存，政府将很多耕地按户划分成很小的地块。这些小块农田用手工施用固体粪便，很难施用液体粪便。为了发展集约化生产和机械操作，虽然政策正在发生着变化，逐步将土地进行整合，但需要一些时间才能彻底改变。最后，耕地施用粪浆还受到地形的限制。例如，广东省山区的很多耕地分布分散，使得运输或大量使用畜禽粪便或粪浆变得很困难。

总的来说，中国值得推行粪浆施用技术，但要注意以下几个前提：

- 适合的运输、人力成本和条件
- 是否具备适宜的土壤条件（土壤表层非岩土）和是否可实现作物的大面积耕作
- 是否具备粪浆施用机械
- 是否具备完善的运输基础设施和适宜的地形（无山脉）
- 种植户有意愿使用畜禽粪便代替人工肥料，农作物是否适宜粪浆的施用
- 法律法规是否促进或限制粪浆施用技术的发展（无论是有意还是无意）

5.2.3 简易的机械化固液分离

通过机械化分离，比如用螺旋压力机，粪浆被分为固体部分（每吨粪浆出 150 公斤）和液体部分（每吨粪浆出 850 公斤）。前者含有 35-65%的磷肥和 20-30%的氮肥，后者含有其余比例的磷肥和氮肥。其他更先进的分离器，例如离心机或带式压力机，可更加高效地实现氮磷分离，最终使固体部分含有氮磷量更高。这种分离过程一般是用在农场就地完成。

在这个方案中，液体部分仍然被施用于离养殖场近的耕地上（如果具备上述前提），磷含量较高的固体部分被运往离养殖场较远的农田。固体部分的干物质含量约占 25-30%，与原有粪浆相比是浓缩肥料，由于量少，其运输总成本要比粪浆低得多。因此，从成本因素考虑，运输距离可放得更远。固体部分更偏向于施用到耕地上，如蔬菜种植农场。

直接将固体部分施用于耕地的一种替代性方法是，将固体部分堆肥。堆肥（或“生物热力干燥”）是利用细菌将有机物质氧化腐熟并产生大量热量的过程。堆肥通常产生高含量的干物质，减少了病原体和杂草种子。堆肥技术分“粗放堆肥”（无干预或干预有限的条形堆肥）和室内“集约堆肥”（隧道式堆肥），即强制性耗氧，规律地翻堆，控温，气体清除（去除臭气和氨气）。

图 16 系统地显示了方案 1，它包括粪浆和主要养分（氮磷钾）总质量的分布。

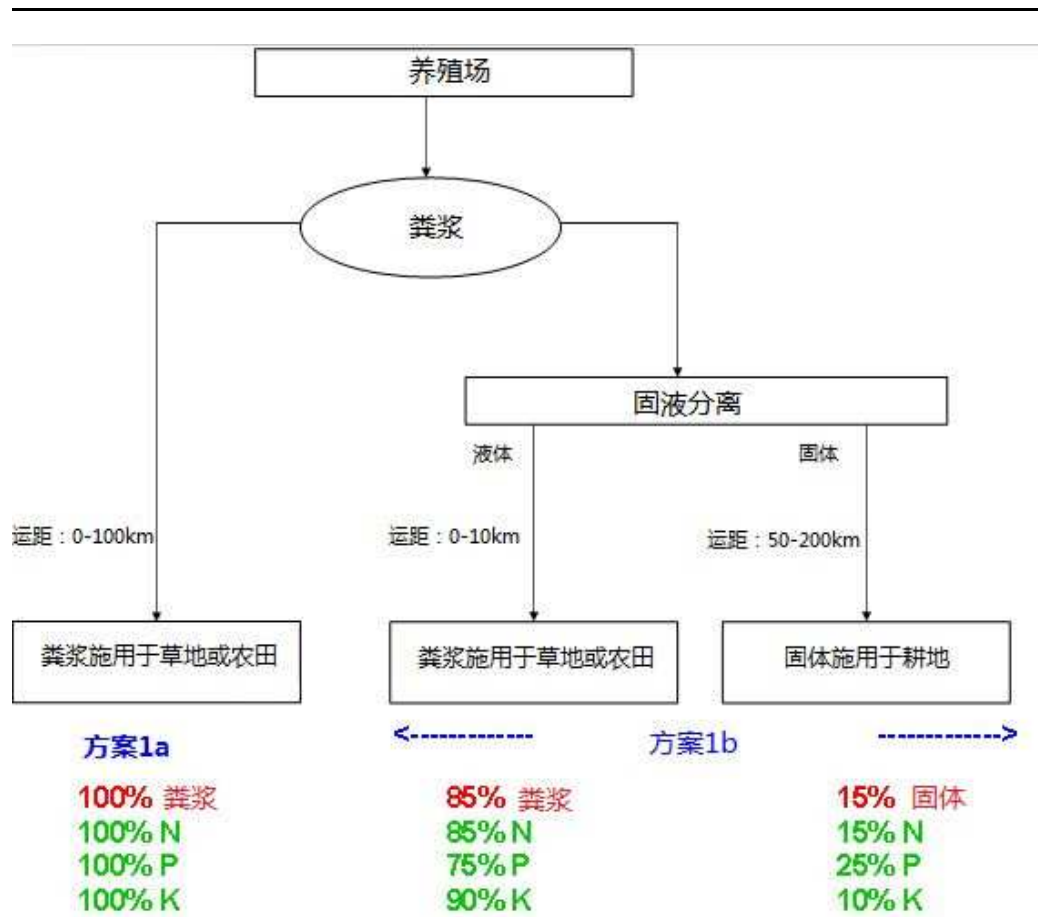


图 16: 系统地描述方案 1-经过或未经过固液分离的粪浆在草地和耕地上的施用方案

5.3 方案 2: 生物废水处理系统

正如方案 1 所述，循环利用粪便的基本理念是将养分回田利用，以此达到养分投入产出之间平衡的目的它的前提是采用各项施用上限来确保其可持续性。况且，粪便还田需要大面积的耕地能够就近施用，当然，如需运输条件允许则离养殖场的距离可近可远。

另一种方案是，当农田面积有限时，采用生物硝化/反硝化过程将粪便中主要的氮肥转化为无害的氮气 (N₂)，大气的 80% 就是由这种气体组成的。这种方式大量降低了粪便中的氮含量。不过，它的副作用是会产生一些一氧化二氮 (N₂O)，这是一种潜在的温室气体。尽管，处理过后氮含量骤减但是磷含量却保持不变。磷被浓缩成污泥。因此，方案 2 的基础是通过除去氮而减少过剩的氮量，然后再施用于农田，污泥中的磷仍然需要回田。

图 17 是方案 2 的示意图，反映出粪浆和主要养分 (氮、磷、钾) 的总质量分布。图 17 显示，大部分氮和磷从粪浆中被去除，90% 的原料粪浆最终被处理成“水”。这些水可以排放或用于灌溉离养殖场近的农田。经生物处理后，产生的水仍含有一些氮 (氮总量 < 200 mg/l) 和一些磷 (25-250mg/l)，这取决于采用的污泥/磷去除技术。因此，与直接向地表水排放相比，将这些水用于农田灌溉或许是更加可持续的选择。此外，这些水含有一定量的盐，如钾、钠、氯，这些盐的浓度和原料粪浆中的浓度是一样的。

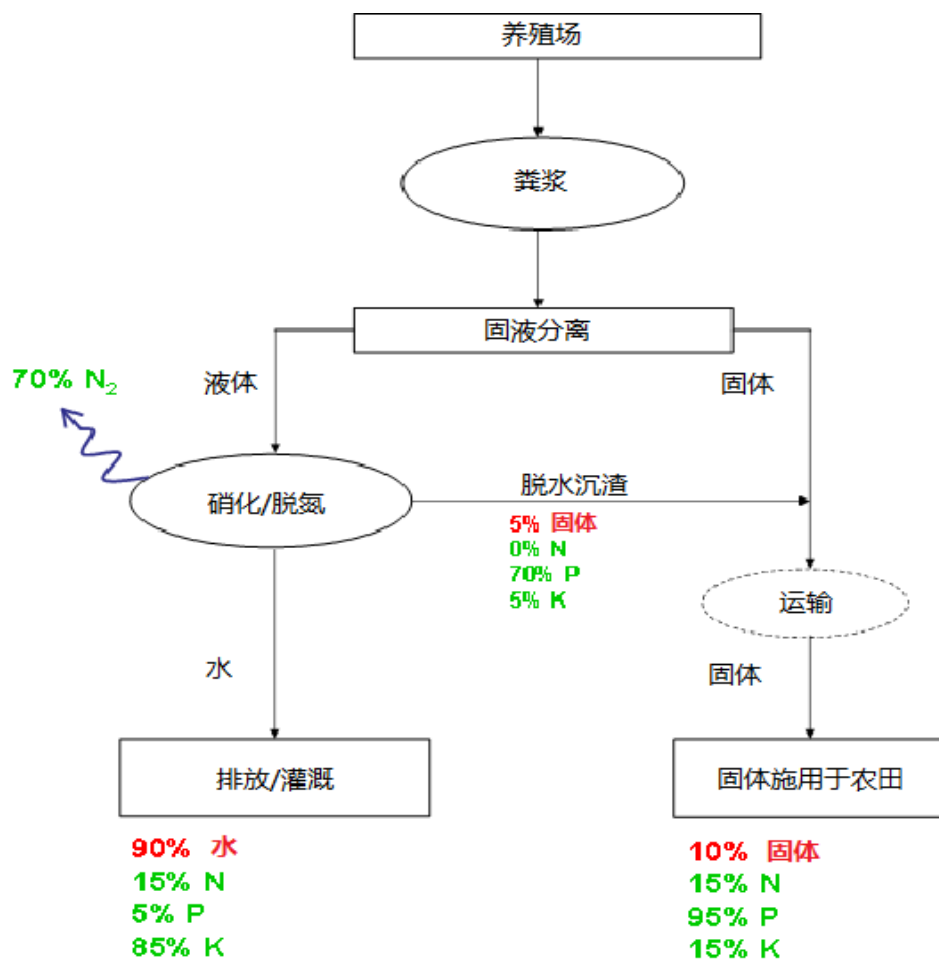


图 17：系统地描述方案 2-生物处理后进行机械化分离（硝化/脱氮）

产生的污泥（占原始液体粪便总量的 20%，干物质总量约 4%）可通过脱水技术，如带式压榨机、离心机等进一步浓缩成含 20-25%干物质的固体部分，以此方式将污泥量减少 75%。这部分固体与第一步分离步骤产生的固体一起组成了仅占原料液体粪便总量 10%的固体部分。这个固体部分比原始粪浆的浓缩度高得多，适合于（远程）运输到其他区域后施用于农田。或者，这个固体部分可经堆肥后再在外运，并施用于农田（如方案 1 所述）。

硝化/反硝化技术已作为城市污水处理的“标准”技术在世界各地得到应用，也可用于畜禽液体粪便的处理。在荷兰，这类大型装置用于犊牛粪便的处理；在比利时和法国，主要用于液体猪粪的全面处理；在中国，我们参观了一家将该技术作了改进的鸭场（见第 2.3.2 节）。

5.4 方案 3：先进的分离系统

如上所述，粪便管理技术最终的目的应使粪便养分回到生产性草地和耕地。然而，液体粪便非常稀释，养分浓度低，用罐车运往草地和耕地需要肥料的其他地区，其运输成本相对较高。

处理液体畜禽粪便的大多数技术中，用螺旋压力机或离心机进行机械化固液分离是第一步。上述的两个方案也都是从这一步开始处理的。经机械化分离步骤后产生的液体部分仍含有大量氮、磷、钾这样的有机化合物（方案 1 有说明）。再经进一步过滤步骤后，可净化液体，产生不含任何污染物或养分的清洁水，这一部分可直接排放或大量用来灌溉农田。这也是方案 3 的基础，即产生可排放或可灌溉的清洁水。全部养分集中于浓缩液和固体部分中。含有高浓缩氮和钾的“浓缩液”的运输成本比粪浆低，原因是浓缩液的体积比原粪浆要少得多。在中国，温室种植者也对这种浓缩肥感兴趣，因其可以替代部分人工肥料。不过，由于可能存在病原体，这种浓缩肥不适于施用在不经烹饪而直接食用的蔬菜和水果上面。温室种植者可能还对固体部分感兴趣，因为可以给植物和作物生长的土壤提供保水保肥的有机质。

生产这种清洁水的过滤技术称为“反渗透法”。它采用带有小孔的薄膜，小孔直径 1 纳米，除了水 (H₂O) 以外，其他大多数分子和离子都无法通过薄膜。用这种薄膜过滤后产生非常洁净的水，几乎不含任何矿物质。水通过薄膜实现传输是通过施加 40-80Bar 的压力，这个压力比渗透法除盐的压力更大。

为防止薄膜被堵塞，有必要对液体作预处理。经第一道机械化分离步骤后的液体会经过第二道步骤进一步去除杂质，比如采用溶气浮选法(DAF)或超细过滤法。目前，荷兰普遍采用的是带式压滤法进行第一步固液分离，再用溶气浮选法进一步去除杂质，原因是超细过滤法成本高，耐用性低。最后，经过溶气浮选法后的液体被送入滤膜加压过滤，从而产生矿物浓缩液和清洁水。这个过程产生的浓缩氮肥和钾肥是一种氮浓度为 0.7%，钾浓度 0.7%，磷浓度非常有限（0.01%）的液体。

图 18 是方案 3 的示意图，显示了粪浆和主要养分（氮磷钾）总质量的分布。

如图 18 所示，液体粪便初始量的 50% 被转化成了水，排放成本很低。所有矿物质集中在液体浓缩物和固体部分中，这部分占初始量的其余 50%。也就是说，如果养殖场周围有足够的农田进行消纳，粪便初始量的 50% 仍需要被运往其他地区，成本还是很高。不过，荷兰采用这种先进的固液分离系统的主要原因是，欧盟相关规定不把它产生的液体浓缩氮肥和钾肥视为畜禽粪便，而视为人工化肥。换句话说，耕种者可以根据作物的需要施用这种浓缩肥，以在粪源氮肥最高施用标准 170 千克/公顷/年之上添加，而不施用人工肥料（见第 3.4.2 节）。由于荷兰的养殖粪便处于过剩水平，使用这种浓缩液的荷兰种植农民可从养殖场那里获得一定的费用，因此种植农民乐意使用（在荷兰，养殖场和种植农民的类似合作同样适用于未经处理的粪便）。但是，如果养殖粪便并不总体过剩，种植者会更加注重还田浓缩物的营养物质构成。总体而言，荷兰养殖场通过这种途径多了一种解决过剩氮素问题的机会。

值得说明的是，虽然反渗透处理畜禽粪便技术在荷兰的发展和源自欧盟硝酸盐指令的执行压力，整套技术对于管理、运营方面的要求很高，投入成本也很大，不一定适合中国现阶段的治理情况。但是该技术提供的技术思路值得我们借鉴，即在无法就近还田的情况下，考虑最大限度的减少畜禽粪便的体积以降低处理和运输压力。

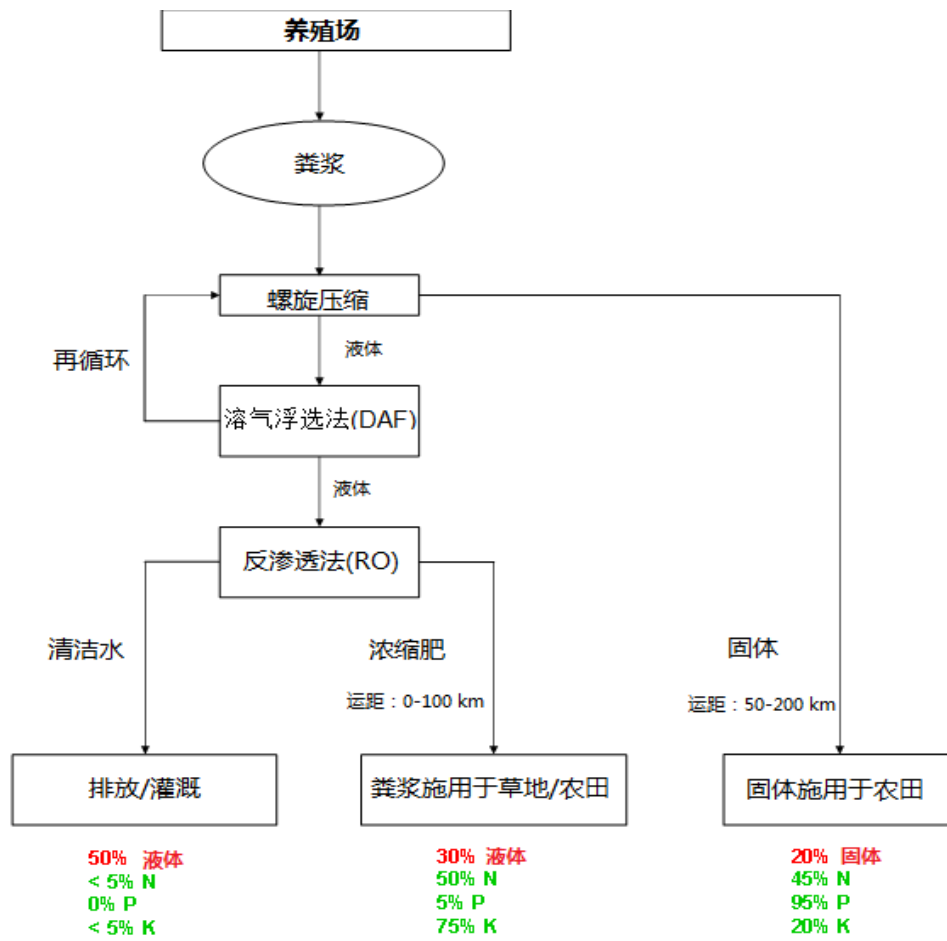


图 18：系统地描述方案 3- 先进的反渗透分离法

6 总结和结论

回顾全文，第 2 章介绍了中国的问题和粪便管理政策制度；第 3 章和第 4 章介绍了荷兰粪便管理政策和普遍采用的技术。在中荷两国的异同基础上，第 5 章则对粪便管理技术和管理方案提出了一些具体的建议。第 6 章总结了本文的发现。

6.1 中国采用和实施技术所需的要求

要想在中国成功地施行第 5 章所述的几种方案，必须全面分析方案需要符合的要求。

如前几章所述，如何结合国家和地方立法对几种畜禽粪便管理方案进行适应化改进和落实，是非常重要的一个方面。

首先，荷兰应用这些技术的驱动力是有一套制度，它规定了每公顷草地或耕地上氮肥和磷肥的最大施用量，以使施肥和生长需求达到平衡。规定驱使着农民和工程师们不断开发粪便处理技术，上述所有方案都是在这种情形下开发出来的。Melse 等人 (2017)¹³以中国一家实施粪便处理的奶牛场为例进行了平衡施肥计算。因此，将粪便施用和处理技术纳入中国国家立法是很有必要的。

其次，必须制定一套行政制度（数据库），对每个养殖场的畜禽存栏量、粪便产量、每车粪便的运输起点和终点、粪便存储空间（自有或租用）、每车粪便的氮磷含量以及耕地和菜地的面积等数据进行登记。有了这样一套制度，就有可能识别出不合规的养殖场，进而防止环境破坏（粪便倾倒、过量施肥等）。最好由国家或省级行政主管部门（比如农业部或环保部的隶属部门）负责管控和执行。

最后，有必要建设运输和施用粪便和粪肥产品的基础设施体系。在方案 1 中讨论过（同样适用于方案 3 中所说的浓缩肥），需要建设用于液体粪肥的运输、存储和施用的基础设施。此外，还有必要建设用于固体肥料部分的运输、存储和施用的基础设施（三种方案均需要）。为了保证有足够多的农田负责粪肥的施用，与种植农户和园艺企业等签订协议也是基础设施系统的一部分，这里需根据土壤和作物的需求而考虑粪肥的最大施用量。

6.2 推荐的三种方案所适应的中国不同区域

第 2.5 节讨论了中国几个地区在粪肥生产、作物生产、适宜农田面积、气候及地形等方面的差异。将这些因素结合到第 6 章介绍的三种方案中以后，我们现在可以在哪些地区适用这几种方案的问题上得出结论，见下表 6。

表 6: 粪便管理方案及适宜实施的地区

¹³ Melse, R.W.; Buissonjé, F.E. de; 乔玮; 董仁杰. (2017). 中国带有耕地的奶牛场对粪便养分的施用：基于荷兰平衡施肥经验的案例研究. 国际农业生物工程学报. 10 (4), p. 182-188.

方案	主要因素	地区/省份
方案 1: 将粪浆施用于草地和耕地 (是否进行固液分离均可)	<ul style="list-style-type: none"> - 将未经处理的粪浆施用于养殖场附近的农田 (距离 < 100 km) - 如果进行固液分离: <ul style="list-style-type: none"> * 将分离的液体部分施用于附近的农田 (距离 < 10 km) * 固体部分的外运 (运距 50-200 km) + 农田施用 - 成本: 相对低廉 	华北、东北、长江中下游、新疆地区: 新疆、黑龙江、吉林、辽宁、河北、河南、山东、内蒙古、宁夏 ⁽¹⁾ ; 江苏、安徽、浙江、江西、湖南、湖北 ⁽²⁾
方案 2: 先进行机械化固液分离, 再对液体部分进行生物处理 (硝化脱氮)	<ul style="list-style-type: none"> - 缩减体积: 液体排放/灌溉 (90%) - 去除氮 - 固体部分的外运 (运距 50-200 km) (10%) - 成本: 中等 	东南地区, 耕地以水稻为主的长江中下游地区: 江苏、安徽、浙江、江西、湖南、湖北 ⁽²⁾ 福建、广东、四川 ⁽³⁾ (原则上, 该方案亦可适用于华北和东北地区, 不过比在这一地区采用方案 1 代价更高)
方案 3: 先进的反渗透分离系统	<ul style="list-style-type: none"> - 缩减体积: 液体排放/灌溉 (50%) - 浓缩肥的外运 (运距 < 100 km) + 农田施用 (30%) - 固体部分的外运 (运距 50-200 km) + 农田施用 (20%) - 成本: 高昂 	东南地区: 福建、广东、四川 ⁽³⁾ (原则上, 该方案亦可适用于华北和东北地区, 不过比在这一地区采用方案 1 代价更高)

(1) 这几个省份在图 10 中对应的是黄色区域; (2) 这几个省份在图 4 中对应的是绿色区域; (3) 这几个省份在图 1 中对应的是蓝色区域; (4) 成本绝对值不易与荷兰作比较。这里主要的一个信息是, 三个方案的成本从 1 至 3 依次增加。

总体而言, 方案 1 的成本一般比较低廉, 也是受到偏好的一种方案。然而, 如果因地区具体的情况而无法施行这种方案 (见第 5.2 节中的前提条件清单), 就有必要采用更先进, 成本也更高的技术。如此一来, 就要考虑方案 2, 原因是该方案可大幅缩减粪便的体积, 同时也解决了过剩氮肥的问题。若因某些原因而不能采用方案 2, 或者说方案 3 可以带来额外效益, 那么就可以选择方案 3。总之, 在养殖场规模大而草地或耕地面积有限的情况下 (比如, 福建和广东), 施行方案 2 要比方案 3 更加合理, 原因是方案 3 的成本要高得多。

瓦赫宁根畜牧科学研究院
P.O. Box 338
6700 AH Wageningen
The Netherlands
T +31 (0)317 48 39 53
info.livestockresearch@wur.nl
www.wur.nl/livestock-research

瓦赫宁根大学及研究中心的使命是“探索自然的潜力，改善生活质量”。在瓦赫宁根大学及瓦赫宁根研究基金会各专业研究机构的共同努力下，为健康食品和生活环境领域的重要问题寻求解决方案而做出了贡献。瓦赫宁根大学及研究中心拥有约 30 个分支机构、5000 名雇员和 10000 名学生，是其研究领域内的领先机构之一。瓦赫宁根研究方法的独特之处在它善于将方法和问题相结合，并寻求多学科交叉解决方案。

瓦赫宁根畜牧科学研究院
报告编号：1049

