



Development of microalgal industries in the past 60 years due to biotechnological research in China: a review

Scientia Sinica Vitae

Gao, F.

<https://engine.scichina.com/publisher/scp/journal/SSV/doi/10.1360/SSV-2020-0166?slug=fulltext>

This article is made publicly available in the institutional repository of Wageningen University and Research, under the terms of article 25fa of the Dutch Copyright Act, also known as the Amendment Taverne. This has been done with explicit consent by the author.

Article 25fa states that the author of a short scientific work funded either wholly or partially by Dutch public funds is entitled to make that work publicly available for no consideration following a reasonable period of time after the work was first published, provided that clear reference is made to the source of the first publication of the work.

This publication is distributed under The Association of Universities in the Netherlands (VSNU) 'Article 25fa implementation' project. In this project research outputs of researchers employed by Dutch Universities that comply with the legal requirements of Article 25fa of the Dutch Copyright Act are distributed online and free of cost or other barriers in institutional repositories. Research outputs are distributed six months after their first online publication in the original published version and with proper attribution to the source of the original publication.

You are permitted to download and use the publication for personal purposes. All rights remain with the author(s) and / or copyright owner(s) of this work. Any use of the publication or parts of it other than authorised under article 25fa of the Dutch Copyright act is prohibited. Wageningen University & Research and the author(s) of this publication shall not be held responsible or liable for any damages resulting from your (re)use of this publication.

For questions regarding the public availability of this article please contact openscience.library@wur.nl



Development of microalgal industries in the past 60 years due to biotechnological research in China: a review

高风正, 葛保胜, 向文洲 and 秦松

Citation: [中国科学: 生命科学](#); doi: 10.1360/SSV-2020-0166

View online: <http://engine.scichina.com/doi/10.1360/SSV-2020-0166>

Published by the [《中国科学》杂志社](#)

Articles you may be interested in

[Review of ESACP/WMO Typhoon Committee Development in Past 50 Years](#)

Tropical Cyclone Research and Review 7, 1 (2018);

[Review of Chinese atmospheric science research over the past 70 years: Synoptic meteorology](#)

SCIENCE CHINA Earth Sciences 62, 1946 (2019);

[Review of Chinese atmospheric science research over the past 70 years: Climate and climate change](#)

SCIENCE CHINA Earth Sciences 62, 1514 (2019);

[Review of Chinese atmospheric science research over the past 70 years: Atmospheric physics and atmospheric environment](#)

SCIENCE CHINA Earth Sciences 62, 1903 (2019);

[A 60-year journey of mycorrhizal research in China: Past, present and future directions](#)

SCIENCE CHINA Life Sciences 53, 1374 (2010);

生物技术研究引领中国微藻产业发展的六十年： 回顾与展望

高风正¹, 葛保胜², 向文洲³, 秦松^{4*}

1. 荷兰瓦赫宁根大学生物工程, 藻类生产与研究中心, 瓦赫宁根 6700 AA;
2. 中国石油大学(华东)化学工程学院生物工程与技术中心, 青岛 266580;
3. 中国科学院南海海洋研究所, 广州 510301;
4. 中国科学院烟台海岸带研究所, 烟台 264003

* 联系人, E-mail: sqin@yic.ac.cn

收稿日期: 2020-05-25; 接受日期: 2020-07-10; 网络版发表日期: 2020-09-29

国家自然科学基金(批准号: 41876188)和山东省自然科学基金重大基础研究项目(批准号: ZR2019ZD17)资助

摘要 微藻是单细胞放氧光合作用微生物。据记载, 早在1500年前的晋代, 中国人就有食用微藻的传统, 并尝试将其作为中药治疗疾病。1959~1962年的三年困难时期, 党和国家鼓励科学家开展小球藻替代粮食的研究, 微藻生物技术开始得到发展。20世纪80年代的“把螺旋藻作为全民蛋白质的补充”国家战略, 为微藻生物技术的进步注入了创新活力。随着藻种选育技术、跑道式和管道式反应器的进步, 以及微藻培养方式的根本性创新, 我国的螺旋藻、小球藻、雨生红球藻和裸藻生物量接连取得根本性的突破, 中国成为世界最大的微藻生产国。我国微藻生物技术研究将在引领产业降低生产成本、提高生产规模和效益的同时, 引导建立微藻精准应用及环境治理的生物经济新模式。

关键词 微藻, 生物技术, 微藻产业, 生物经济

微型藻类通常是指肉眼看不到, 需要用显微镜才能观察到的藻类, 简称微藻, 是地球上广泛分布、极具环境适应能力和生态学意义的营放氧光合作用的微生物。微藻生物技术是指生产、加工和利用微藻生物量(biomass)的技术。早在1500年前的晋代, 荆州(今湖北)的人民就食用一种俗称“葛仙米”的蓝藻, 并被葛洪用作中药。1959年到20个世纪90年代, 是微藻生物产业的初创时期。在党和政府的高度重视下, 微藻面向“替代粮食不足”和“全民蛋白质补充剂”等国家需

求, 通过藻种驯化、改进反应器技术等生物技术创新驱动, 螺旋藻(*Spirulina*)、小球藻(*Chlorella*)等几种微藻的生物量取得显著突破。20世纪90年代以来的30年, 是微藻生物产业的快速发展时期, 面向“人类健康”和“水产饵料”等需求, 针对雨生红球藻(*Haematococcus pluvialis*)、杜氏盐藻(*Dunaliella salina*)、裸藻(*Euglena*)和饵料微藻的规模化生产和培养方式变革的生物技术研究相继实现突破(图1)。1959年以来的60年间, 微藻生物技术研究带动螺旋藻、小球藻、雨生红球

引用格式: 高风正, 葛保胜, 向文洲, 等. 生物技术研究引领中国微藻产业发展的六十年: 回顾与展望. 中国科学: 生命科学, 2020, 50 (Chinese). Sci Sin Vitae, 2020, 50, doi: [10.1360/SSV-2020-0166](https://doi.org/10.1360/SSV-2020-0166)

藻年产量分别实现约1万吨、2000吨和400吨干品, 杜氏盐藻、葛仙米(*Nostoc sphaeroids* Kütz)和裸藻的生物量也实现关键性突破(表1)^[1]。目前我国已成为世界上规模最大的微藻生产国, 微藻生物经济的雏形正在孕育。

1 葛仙米生物技术: 带动人工养殖初步实现突破

葛仙米是一种淡水固氮蓝藻, 野生葛仙米自然生长于湖北等地的水稻田中, 产量可达到25吨(鲜重)/年。据文献报道, 早在1500年前的晋代, 道士葛洪最早食用这种蓝藻, 此后人们将其命名为“葛仙米”。20世纪80年代, 中国科学院水生生物研究所刘永定和黎尚豪^[2]曾研究利用这种固氮蓝藻提高水稻产量。

葛仙米人工养殖的技术瓶颈为: (i) 生长周期长; (ii) 培养过程中易发生污染, 杂藻和细菌竞争营养, 影响产量; (iii) 球体易破裂, 产量低。例如, 邓中洋等人^[3]

研究发现, 接种直径为3~4 mm的葛仙米到培养池, 培养6天, 约23%的群体发生破裂, 生产效率从理论的0.383 g/(L·d)降低为实际的0.104 g/(L·d)。

中国科学院水生生物研究所胡征宇团队^[4~6]对葛仙米的人工养殖技术(表2)进行了多年攻关, 首先选择干净的地下水、河水、自来水等; 然后选用未脱水的优质藻种进行接种, 养殖过程中及时收获, 避免球体过大, 出现破裂; 同时在接种过程中尽量避免污染, 培养过程中抑制球体破裂, 避免释放营养供竞争者或有害生物利用^[7], 并于2001年成功实现了葛仙米的人工养殖, 2007年在湖南常德实现了葛仙米的大规模培养。目前葛仙米人工养殖的年产量达200吨鲜重(表1)。2019年, 葛仙米被国家批准为新食品原料, 葛仙米人工养殖成为一个新兴微藻产业。

尽管中国人食用葛仙米的历史悠久, 但葛仙米及其活性成分的功能尚不明确, 精深加工技术和产品缺乏, 这也是目前葛仙米生物产业大规模推广应用的主要技术瓶颈, 有待于进一步深入研究。

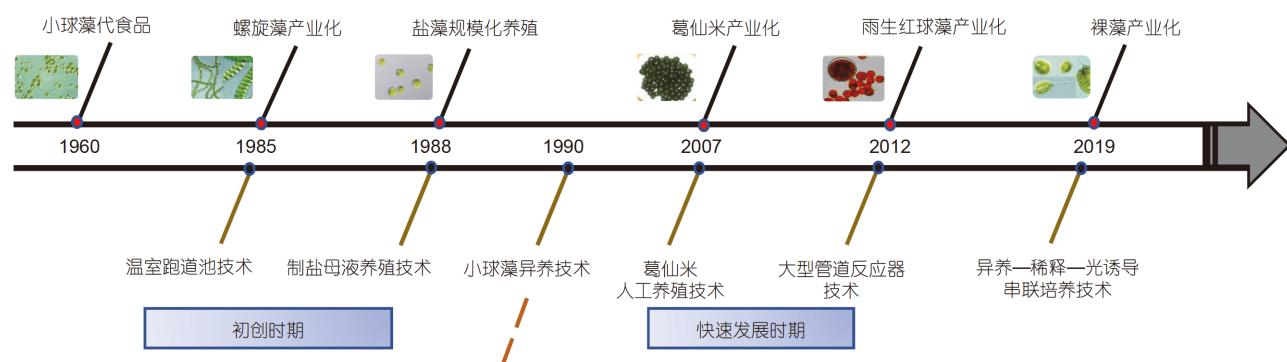


图1 生物技术研究带动的中国微藻产业60年发展主要里程碑(网络版彩图)

Figure 1 Major milestones following 60 years of microalgal industrial development in China due to biotechnological research (color online)

表1 中国主要的产业化微藻及产品列表

Table 1 List of main industrial microalgal species and products in China

微藻种类	主要产品	产量(吨/年, 干重) ^{a)}	许可类别	批准年份
螺旋藻	藻粉、藻片、藻蓝蛋白、多糖	~10000	普通食品	2004
小球藻	藻粉、藻片、热水提取物(CGF)	~2000	新资源食品	2012
雨生红球藻	藻粉、虾青素	~400	新资源食品	2010
杜氏盐藻	藻粉、β-胡萝卜素	~40	新资源食品	2009
葛仙米	鲜藻	~200(鲜重)	新食品原料	2019
裸藻	藻粉、藻片	~10	新资源食品	2013

a) 生物质产量参考Chen等人^[1]的报道及最新的企业数据

表 2 主要养殖微藻的种类及生物技术突破**Table 2** The main microalgal species and biotechnological breakthroughs

藻种	生理特性	技术瓶颈	技术突破	实际效果	文献
葛仙米	1. 群体生长, 呈球形	1. 易破裂	1. 藻种选育: 筛选球体完整藻种	1. 显著降低破壁率	[3]
	2. 对某些离子较敏感	2. 水质要求高	2. 水处理技术: 如自来水去氯, 地表水过滤及降低养殖用水硬度	2. 显著降低生产成本	[4~7]
	3. 接种阶段易染菌	3. 容易污染杂菌	3. 严格控菌技术、控杂藻技术	3. 实现室外大规模培养	[4~7]
小球藻	可自养、异养、复合培养	1. 缺乏廉价碳源	1. 开发乙酸作为大规模室外培养碳源	1. 实现室外大规模培养	-
		2. 异养培养易染菌、叶绿素和蛋白质含量偏低	2. 异养培养-稀释-光诱导复合培养技术	2. 产量达到40~100 g/L干重, 蛋白和叶绿素含量显著提高	[16,17]
螺旋藻	1. 生长速度快, 喜碱性环境	1. 养殖成本高	1. 跑道池培养技术	1. 相较于室内管道式反应器培养, 生产成本降低50%以上	[23~26]
	2. 生长温度为30℃~38℃	2. 养殖限制于南方地区	2. 筛选耐低温藻株, 温室技术	2. 在内蒙鄂尔多斯建成8000亩螺旋藻产业园	[27]
	3. 只能光合自养	3. 碳酸氢钠消耗量大, 生产成本高	3. 二氧化碳补碳利用技术	3. 替代部分碳酸氢钠, 进一步降低生产成本	[28~31]
雨生红球藻	1. 生长缓慢, 开放培养易染菌	1. 开放式反应器容易染菌, 封闭式光生物反应器成本高 2. 易污染敌害生物	1. 低成本管道式光生物反应器技术 2. 预防为主, 可使用有机杀虫剂	1. 实现室外大规模培养 2. 有效控制敌害	[32,33] [38,39]
	2. 仅在胁迫条件下积累虾青素	3. 生物量与虾青素积累之间的矛盾	3. 两步串联培养技术	3. 实现生物量与虾青素含量双提高	[32,33,40]
	3. 虾青素极易氧化	4. 缺乏有效的虾青素的提取及保存技术	4. 虾青素超临界提取及微胶囊制备技术	4. 实现虾青素的规模化提取与商业化利用	[54~59]
杜氏盐藻	1. 喜高盐环境	1. 要求培养液盐度高, 培养成本高	1. 制盐母液养殖盐藻技术	1. 成功实现室外大规模培养	[62,63]
	2. 休眠期细胞变脆, 易受外力破裂	2. 培养液黏度高, 细胞易破碎, 采收困难	2. 气浮法盐藻采收技术	2. 实现盐藻低成本高效采收	[62,64,65]
	3. 胁迫条件下可大量积累β-胡萝卜素	3. 胡萝卜素易氧化	3. β-胡萝卜素精制技术	3. 实现β-胡萝卜素的规模制备及商业化应用	[66,67]

2 小球藻生物技术——由自养、异养到复合培养

在1959~1961三年困难时期, 毛主席亲自批示发展小球藻养殖, 将其作为粮食替代资源。北京大学、中国科学院植物研究所等单位对小球藻的人工养殖技术展开攻关。当时小球藻的养殖依赖冰醋酸, 但由于我国处于经济发展的特殊困难时期, 冰醋酸的缺乏影响了小球藻养殖业规模的迅速扩展。

小球藻既可自养又可异养^[8~10]。我国的小球藻养

殖从自养起步, 20世纪90年代初期中国采用开放的圆池和跑道池进行小球藻的自养培养。台湾地区主要采用圆形开放跑道池进行小球藻养殖, 利用底刷搅动藻液(图2A), 而大陆地区则采用椭圆跑道池进行小球藻养殖, 利用搅拌桨搅动藻液, 培养模式与螺旋藻类似。国际上封闭反应器也被用于小球藻生产, 例如德国Klötzte利用封闭反应器年产小球藻约100吨干重(表3)^[11]。采用光自养方式进行小球藻户外大规模生产的生物量较低, 约1 g/L干重即进行收获, 成本比较高^[12]。

20世纪90年代, 香港大学陈峰^[13]及其合作者研究

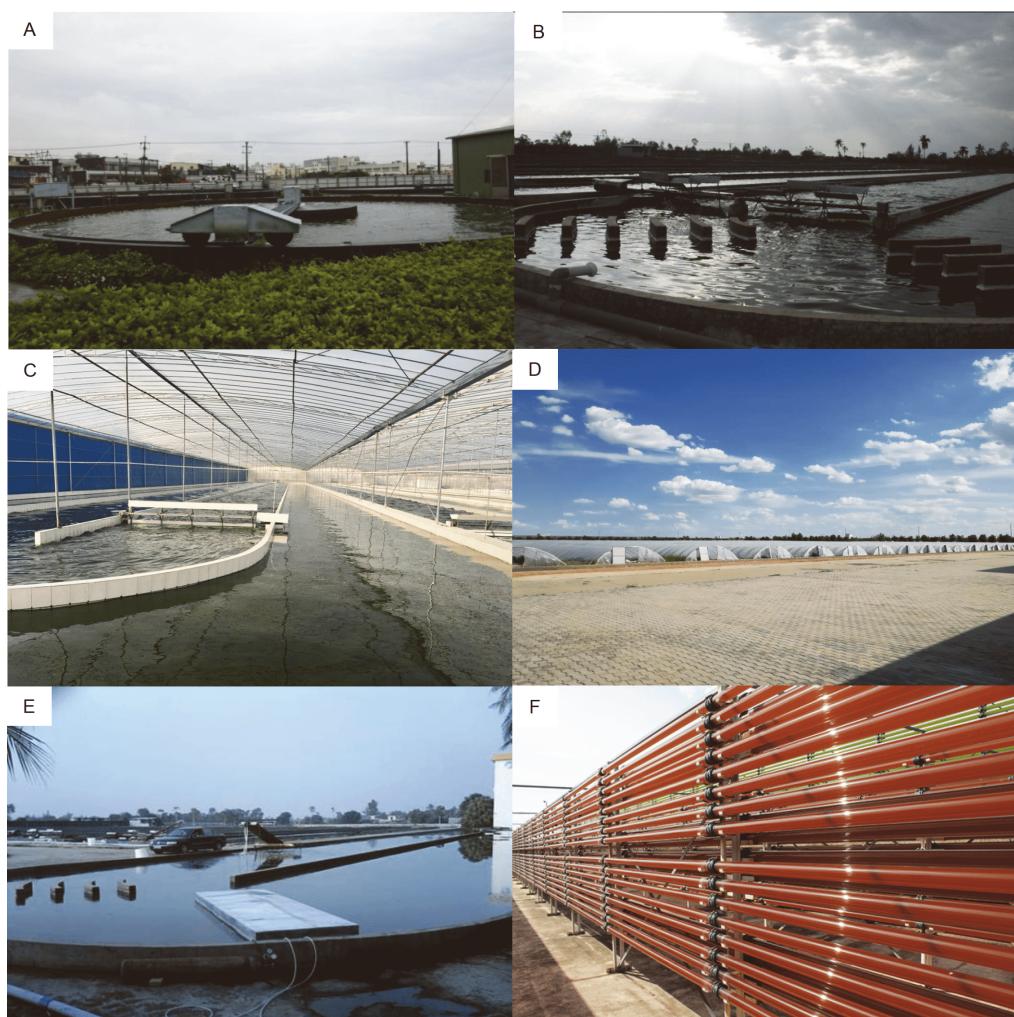


图 2 微藻大规模养殖. A: 台湾地区的小球藻圆池养殖; B: 海王三亚螺旋藻跑道池养殖; C: 内蒙古温室跑道池室内; D: 内蒙古温室跑道池室外; E: 二氧化碳补碳防漏罩; F: 云南雨生红球藻管道光生物反应器养殖(网络版彩图)

Figure 2 Microalgae large-scale cultivation. A: *Chlorella* cultivation in circular pond in Taiwan, China; B: raceway pond for *Spirulina* production in Sanya; raceway pond in greenhouse in Inner Mongolia greenhouse interior (C) and exterior (D); E: anti-leakage equipment for CO₂ supplementation; F: *Haematococcus pluvialis* production in tubular photobioreactor in Yunan, China (color online)

表 3 国际上微藻生产的典型案例

Table 3 Examples of microalgal biomass production outside China

微藻种类	国别	代表性企业	生产方式	产量(吨/年, 干重)	文献
小球藻	德国	Klötzte	封闭反应器	~100	[11]
螺旋藻	美国	Earthrise Nutritionals	跑道池	~550	[18]
螺旋藻	美国	Cyanotech Corporation	跑道池	~300	[19]
雨生红球藻	以色列	Algatech	300 km管道反应器	未提及	[37]
杜氏盐藻	澳大利亚	BASF	开放跑道池	13~14吨β-胡萝卜素	[60]
裸藻	日本	Euglena	室外跑道池	未提及	[68]

了小球藻异养培养技术, 即利用葡萄糖等有机碳源, 在不提供光照的条件下对小球藻进行培养。异养小球藻具备高密度生产的商业潜质, 但也存在容易污染及蛋白质和色素积累低等问题^[14]。陈峰团队^[15]验证了小球藻异养的可行性, 异养培养生物量达到53 g/L干重, 异养生物质中叶黄素、脂肪酸、虾青素等含量丰富。

近10年以来, 华东理工大学李元广团队^[16]对小球藻异养技术的规模化进行攻关, 将异养和自养结合使用, 发明了“异养-稀释-光诱导”串联培养技术, 即复合培养技术(表2)。将该技术应用于三种小球藻(*Chlorella vulgaris*, *C. pyrenoidosa*和*C. ellipsoidea*), 它们经24 h光照后, 脂肪含量分别提高了84.57%、70.65%和121.59%。三种小球藻通过“异养-稀释-光诱导”串联培养的生产效率分别是单纯自养的20.9、26.9和25.2倍, 生物质生产效率分别是直接光自养的1.91、1.51和1.48倍^[17]。该技术的成功放大, 推动了小球藻产业化进程。我国小球藻目前的年产量约为2000吨干重(表1, 包括自养、异养和复合培养)。2012年, 小球藻被国家列为新资源食品, 成为继螺旋藻之后中国生产规模第二大的微藻品种。

3 螺旋藻生物技术: 跑道池技术改进与深加工突破

1968年, 墨西哥首先建立了螺旋藻的跑道池养殖设施, 实现了产业化培养。目前国际上多采用开放跑

道池进行螺旋藻生产, 如美国的Earthrise Nutrionals^[18]和Cyanotech Corporation^[19]年产螺旋藻分别约550和300吨干重(表3)。中国对螺旋藻规模化生产的研究始于1985年国家“七五”攻关计划“藻类饲料蛋白专题”, 由中国科学院海洋研究所曾呈奎和水生生物研究所黎尚豪牵头主持。

曾呈奎指导了中国科学院南海海洋研究所承担的螺旋藻中试项目, 并于1990年成功对海水螺旋藻进行了中试研究。之后, 曾呈奎等人对成果转化做了大量努力, 1993年于深圳建成了海水螺旋藻企业, 之后又在三亚中国科学院海南热带海洋生物实验站建立了3000平米的微藻实验基地(图2B), 并完成了藻蓝蛋白中试研究, 相继开发了海水螺旋藻片、藻蓝蛋白、蛋白多糖等系列产品, 取得了良好的社会经济效益^[20-22]。

螺旋藻生长速度快, 喜碱性环境, 发展初期养殖成本高。中国科学家和企业家创造性地发明了温室跑道池技术(表2)^[23,24]。该技术是螺旋藻产业化过程中最关键的技术突破, 直接带来了中国螺旋藻生物量的飞跃, 同时显著降低了生产成本——较管道反应器减少1/2以上^[25,26]。内蒙古鄂尔多斯利用温室跑道池技术建成了8000亩的螺旋藻产业园(图2C和D), 成为中国螺旋藻养殖的中心^[27]。

温室跑道池示意图如图3所示, 水池墙高度一般为40 cm, 培养基深度一般为25~30 cm。温室跑道池的结构简单, 搭建方便, 成本较低, 可实现较好的收益回报。此外, 目前螺旋藻仅能自养, 养殖过程需要大量碳酸氢

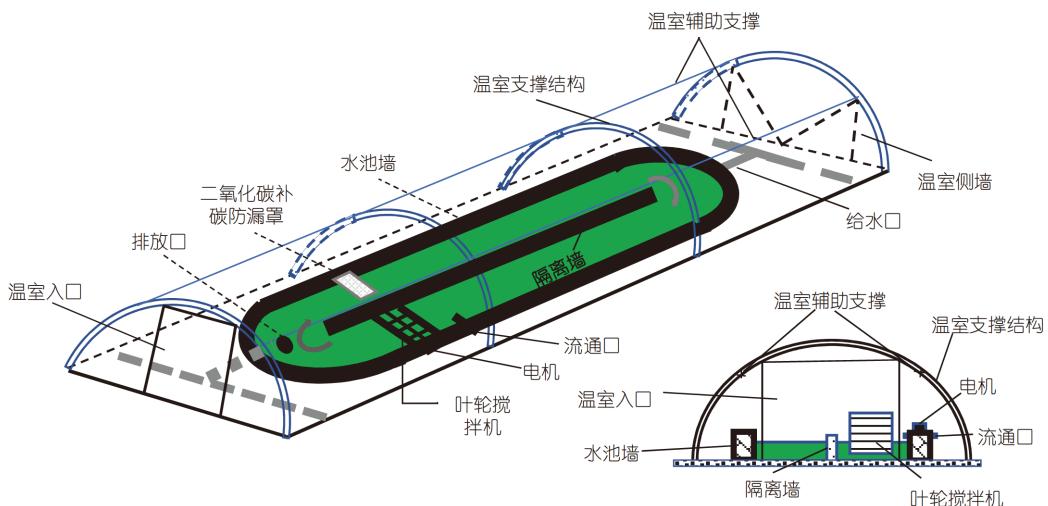


图3 温室跑道池结构示意图(网络版彩图)

Figure 3 Diagram of raceway pond in greenhouse (color online)

钠, 成本较高。二氧化碳补碳技术(表3)逐渐得到开发和重视, 利用CO₂进行补碳, 代替碳酸氢钠可进一步降低螺旋藻的生产成本, 促进生物量的进一步提升^[28~30]。中国科学院南海海洋研究所向文洲团队^[31]利用防漏罩实现了螺旋藻补碳养殖。通过在微孔气头鼓气点的培养物外层倒扣防漏罩, 汇集CO₂的同时形成较大面积的气液交换面, 减少开放池中直接充气补充CO₂的浪费(图2E)。补碳技术在保证获得高质量产品的同时, 使螺旋藻年产量提高了20%, 年碳酸氢钠用量减少了66%, 碳源成本减少了58%。目前, 中国年产螺旋藻干粉约1万吨, 占世界总产量的70%~80%, 成为全球第一大生产国(表1)^[20]。

4 雨生红球藻生物技术: 降低成本、敌害防治与高效诱导

雨生红球藻被认为是自然界天然虾青素的最佳来源, 2020年全球虾青素市场预计高达11亿美元。20世纪80年代中后期, 美国Cyanotech Corporation公司率先在夏威夷利用开放式跑道池技术, 探索商业化生产雨生红球藻。我国在20世纪90年代开始研究雨生红球藻规模培养技术, 最初是用开放跑道池养殖雨生红球藻, 尽管小试和中试获得成功, 但大规模培养时污染的风险大幅升高, 严重影响了产量和品质稳定性。

中国科学院海洋研究所刘建国、中国科学院武汉植物园胡鸿钧和李夜光、中国科学院青岛生物能源与过程研究所刘天中、暨南大学张成武等人分别对雨生红球藻跑道池、管道反应器、膜反应器等多种养殖方式进行了多年探索, 为雨生红球藻产业化奠定了基础^[32~36]。进入21世纪, 我国利用大型管道光生物反应器大规模培养雨生红球藻获得成功(表2), 云南多家企业实现了雨生红球藻规模化生产(图2F)。国际上也多采用管道光生物反应器生产雨生红球藻, 如以色列的Algatech公司(表3)^[37]。

雨生红球藻产业化生产过程中面临的主要威胁依然是敌害生物, 尤其是原生动物, 该问题即使是在封闭式光生物反应器也难以完全避免。刘建国团队^[38,39]研究了有机杀虫剂对微藻养殖敌害生物的危害与综合防治策略, 证明苦皮藤素、川楝素等有机杀虫剂可有效抑制微藻敌害生物, 且不影响微藻生长(表2)。尽管有机杀虫剂等在微藻敌害生物防治中作用显著, 但很难

彻底杀死敌害生物, 现阶段仍以预防为主要控制手段。

虾青素产量低是制约其广泛应用的主要因素。目前雨生红球藻的虾青素含量平均为2%干重左右。雨生红球藻仅在胁迫下积累虾青素, 无法实现生物量和虾青素产量的共赢。二步串联培养技术^[29]的关键在于, 通过两个阶段的培养协同以实现生物量和虾青素含量的双赢(表2)。首先, 通过控制培养条件, 让雨生红球藻在游动细胞阶段快速繁殖, 获得生物量; 然后, 改变培养参数, 诱导游动细胞转变为不动细胞, 让细胞大量积累虾青素。例如, Zhang等人^[33]利用两步法在3~12 L开放圆池中培养雨生红球藻12天, 细胞密度积累阶段为5或6天, 实现了平均2.10 g/100 g干重的虾青素产率。Li等人^[40]利用8000 L反应器和100 m²跑道池串联两步法培养雨生红球藻, 生产含2.5%干重虾青素生物质的成本仅18美元/kg。除两步法外, 化学诱导剂诱导^[41~45]、培养过程优化^[46~50]和藻种筛选等^[51~53]方法和策略均可显著提高虾青素产率(表4)。

虾青素易氧化、提取率低等技术瓶颈同样限制了其应用。微胶囊造粒技术可利用壳聚糖等壁材将虾青素以微型胶囊(粒径5~50 μm)的形式包裹起来, 隔绝外部环境, 最大程度地保护虾青素不被氧化, 同时可消除颜色影响^[54~56]。超临界二氧化碳萃取技术是近年来应用于雨生红球藻虾青素制备的新技术, 其特点是高效、安全、无残留^[57]。Pan等人^[58]报道了优化条件下, 超临界二氧化碳萃取虾青素的得率可达73.9%。Sanzo等人^[59]利用超临界二氧化碳实现了98.6%的虾青素回收率。

我国雨生红球藻产量约为400吨干重(表1), 约占世界红球藻市场的50%。2010年, 雨生红球藻在我国被批准为新资源食品, 其成为螺旋藻、小球藻之后, 第三大微藻生物质资源。

5 杜氏盐藻生物技术: 亟待规模发展

杜氏盐藻被认为是最好的天然β-胡萝卜素的细胞工厂, 是良好的营养保健食品。20世纪60~70年代, 澳大利亚、美国、以色列等国家率先开始了杜氏盐藻的人工养殖研究。以上国家的杜氏盐藻养殖规模依然全球领先, 例如, 澳大利亚BASF公司养殖杜氏盐藻年产β-胡萝卜素13~14吨(表3)^[60]。在国家“七五”计划支持下, 20世纪80年代以来, 中国开始杜氏盐藻规模化培养研

表 4 提高虾青素含量的技术**Table 4 Techniques for improving astaxanthin content**

类别	技术	实验规模	效果	文献
化学诱导	23种诱导剂	250 mL锥形瓶	虾青素含量提高20.6%~64.2%	[41]
	赤霉素20 mg/L	-	95%细胞变红; <i>bkt1</i> 基因转录提高6.7倍; <i>bkt2</i> 和 <i>bkt3</i> 基因转录提高8.0倍	[42]
	水杨酸50 mg/L	1 L锥形瓶	85%细胞变红, 虾青素产量2.74 mg/L, 无水杨酸对照组0.39 mg/L	[43]
	乙醇3%(v/v)	300 mL柱式光生物反应器	虾青素产率11.26 mg/(L·d), 是对照组的2.03倍	[44]
	Na ₂ WO ₄ 3.0 mmol/L	250 mL锥形瓶	虾青素含量是对照组1.94倍	[45]
过程优化	褪黑素10 μmol/L	3 L柱式光生物反应器	虾青素含量提高2.36倍, 达干重的3.1%	[46]
	异养-自养串联培养	2.8 L锥形瓶异养, 1 L柱式光生物反应器自养	虾青素产率由2.5 mg/(L·d)提高到10.5 mg/(L·d)	[47]
	温度控制(白天28℃, 夜间低于28℃)	200 L跑道池	虾青素产率提高2.9倍	[48]
	异养-稀释-光自养	1 L柱式光生物反应器和200 L跑道池	虾青素含量占干重的4.6%, 产率6.4 mg/(L·d)	[49]
	添加不同形式铁	250 mL锥形瓶	36 μmol/L FeC ₆ H ₅ O ₇ 使虾青素产量提升7倍	[50]
藻种选育	甲基磺酸乙酯、紫外线	-	虾青素含量提高28%, 产量提高120%	[51]
	甲基磺酸乙酯、紫外线	-	虾青素含量占干重1.9%~2.5%, 野生株为1.2%	[52]
	介质阻挡放电等离子体	平板、锥形瓶	虾青素含量占干重3.35%, 是野生株的159%	[53]

究, 在我国天津、内蒙古等盐田盐湖, 建立了大规模养殖基地, 初步实现了杜氏盐藻产业化.

杜氏盐藻的培养条件苛刻, 需要盐田盐湖养殖, 而且杜氏盐藻生产周期短, 细胞收获难度大, 离心易破碎, 造成活性成分损失. 尽管杜氏盐藻的β-胡萝卜素含量是胡萝卜的百倍以上, 但其养殖、收获、干燥等的成本投入却高出胡萝卜很多^[61].

中盐制盐工程技术研究院等单位通过制盐母液养殖技术(表2)使杜氏盐藻养殖不依赖于优良盐湖, 可实现室外人工大规模培养^[62]. 制盐母液养殖技术利用真空制盐蒸发母液中的盐分同盐湖水配成养殖卤水, 通过除杂等方法得到较纯的NaCl溶液培养杜氏盐藻. 制盐母液经高温蒸煮, 养殖过程中避免了敌害生物繁殖^[63]. 其次, 杜氏盐藻的气浮采收技术(表2)逐渐成熟, 大大降低了杜氏盐藻的采收成本^[62,64]. 气浮采收利用溶气采收细胞, 采收效率高(86%~96%)^[65], 且避免了离心等对细胞的损伤. 随后, β-胡萝卜素的提取精制技术^[66](表2)得到发展, 实现了工业化规模制备和商业应

用. 针对β-胡萝卜素对光热敏感问题, 微胶囊技术可显著提高其稳定性和生物可接受率^[67].

2009年, 我国将杜氏盐藻及其提取物列为新资源食品. 目前, 我国杜氏盐藻年产量约为40吨干重(表1), 亟待进一步规模发展.

6 裸藻生物技术: 复合培养的典范

裸藻又叫眼虫, 可积累高达50%以上干重的多糖. 2016年, 李元广等人利用“异养培养-稀释-光诱导”串联培养技术在三角瓶进行裸藻人工养殖. 2017年, 解决了异养发酵裸藻细胞密度低、多糖产量低的问题. 次年, 在5 L、50 L和500 L规模的复合培养实验陆续取得成功, 并成功放大到10吨的工业化培养. 2019年, 国内建立了年产能力50吨的裸藻生产线, 实现了裸藻的产业化, 生物量可达60 g/L干重, 蛋白含量约20%, 多糖含量大于59%. 日本Euglena公司近年来利用开放跑道池也实现了裸藻产业化(表3)^[68]. 今后, 裸藻深加

工产品开发等将成为新的关注点。

2013年, 中国将裸藻列为新资源食品。目前采用复合培养方式的裸藻在中国初步实现产业化, 年产量约为10吨干重(表1)。

7 微藻生物经济的挑战

微藻生物技术引领中国微藻产业走过60年, 目前在生物量的突破方面, 中国已经走在了世界的前列, 但我国的微藻年产量只有1万多吨干重, 相较于其他产业来讲, 其产业规模仍偏小。其次, 生产成本仍较高, 例如生产成本最低的螺旋藻, 其价格仍高于或趋近2万人民币每吨, 是鱼粉的3倍左右。在这种情况下, 微藻生物技术的新使命是引领产业降低生产成本的同时, 引导建立微藻精准应用及环境治理的生物经济新模式。下文以微藻调水和微藻固碳举例说明。

7.1 微藻的生态应用: 微藻调水剂

中国是世界第一水产养殖大国, 据《2019年中国渔业统计年鉴》数据, 2018年水产养殖总量接近5000吨, 约占水产总量的77%。

微藻调水的作用模式如图4所示。建立和维持养殖水体中特定微藻种群的过程称为调水色, 利用微藻进行养殖在国外被称为绿水(green water)^[69]养殖, 相对

的, 没有微藻被称为清水(clear water)养殖^[70]。绿水养殖的主要类别有: (i) 棕色, 主要含硅藻, 是养虾的最佳水色; (ii) 淡绿/翠绿色, 主要含绿藻; (iii) 淡黄、金黄、黄绿, 主要含金藻、微拟球藻(*Nannochloropsis*)等^[70]。绿水养殖的效果显著高于清水养殖, 可显著提高养殖品质和效率。广东海洋大学黄翔鹤等人^[71]对微藻调水攻关近20年, 攻克了卵囊藻(*Oocystis*)调水技术, 显著提高了对虾养殖的成活率、养成率和产量, 取得了良好的经济效益。卵囊藻调水使对虾养殖水体中的溶氧量提高13.0%, 氨氮含量降低51.7%, 与抵抗疾病相关的超氧化物歧化酶和酚氧化酶分别提高72.7%和75.0%。卵囊藻调水技术在湛江对虾养殖中推广成功, 扭转了当地对虾养殖亏损的困境。一般对虾种苗投放80天后, 就可收获上市, 相比传统养殖模式, 养殖户的收益平均提高了50%以上, 创造了120亩冬棚虾的纯利润达600万的记录。

中国微藻调水剂的市场需求巨大, 年需求量在6000吨干重以上^[70]。微藻调水的经济效益显著, 微藻调水将成为微藻生物经济的一种新模式。

7.2 微藻固碳联产高附加值产品

据联合国政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)数据, 2018年CO₂排放量的增加使全球升温超过1.5°C。IPCC称,

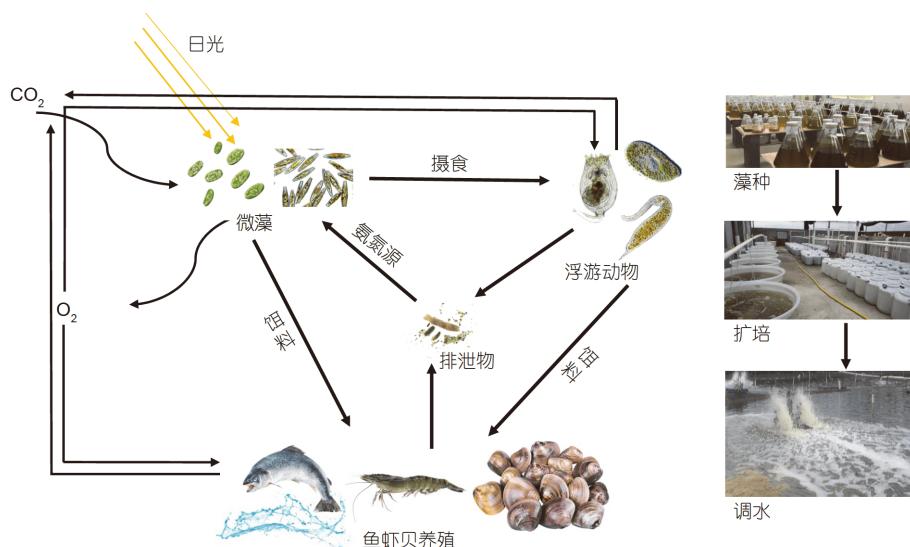


图 4 微藻调水示意图(网络版彩图)

Figure 4 Diagram of water quality improvement using microalgae (color online)

将升温限制在2°C以内, 到2030年全球CO₂排放量应下降约20%. 减少CO₂排放和积累是解决全球气候变暖的重点. 生物固碳是重要的固碳途径, 微藻因其显著的固碳效率成为生物固碳中的最佳选择之一^[72,73].

20世纪90年代, 全球20多个公司和科研机构投资约2.5亿美元用于封闭反应器微藻固碳, 因成本太高(100美元/kg生物质), 没有成功^[74]. 之后, 美国Cyanotech Corporation探索开放跑道池固碳, 利用发电机组产生的CO₂供给67个螺旋藻开放养殖池(单个养殖池0.3公顷)补碳, 浓度8%的CO₂固定效率达75%, 月固碳67吨, 生物质产量36吨, 每年可节约电力和CO₂成本30万美元^[75]. Oliveira等人^[76]利用40 m长、内径0.3 m反应器估算, 固定葡萄牙天然气联合循环(natural gas combined cycle, NGCC)电厂产生的CO₂, 可生产5000吨生物质, 年产值高达3800万欧元.

微藻固碳面临的首要挑战是藻种CO₂耐受程度低, 一般为10%以下, 而工业烟气中的CO₂含量高达15%以上, 且含有大量氮氧化物和硫氧化物等, 它们均可对微藻生长产生抑制作用. 因此, 高烟气CO₂耐受藻种选育成为微藻固碳的前提. 程军等人^[77]利用核辐射得到的小球藻突变株可耐受15%的CO₂, 且生物量较野生株提高25%, 油脂含量提高54.9%. Hussain等人^[78]在CO₂胁迫下筛选得到可耐受20%的CO₂的藻株. Li等人^[79]通过20%的CO₂驯化得到斜生栅藻(*Scenedesmus obliquus*), 在100 L中试条件下固碳效率高达67%. Kang等人^[80]通过基因改造鱼腥藻(*Anabaena*), 显著提高了其

CO₂吸收和转化能力. 这均为微藻生物固碳提供了良好的工作基础.

微藻养殖成本降低和藻种选育为微藻固碳提供了工作基础, 中国微藻固碳近年来取得了一定突破. 浙江大学程军在内蒙古和山东烟台分别建立了螺旋藻和微拟球藻固碳示范工程. 其中, 1191 m²螺旋藻跑道池五个曝气区固定燃煤电厂烟气CO₂, 固碳速率达18.4~40.7 g/(m²•d), 烟气中CO₂被藻液固定约1/3^[81]. 固碳过程中, 通过改变曝气方式, 增加气液传质, 气泡停留时间延长27%, 微藻生物质产量提高29%^[82]. Cui等人^[83]在江苏利用烟气在70 L户外平板光生物反应器培养螺旋藻, 节约了42%的营养盐成本, 且获得的生物质品质优良, 符合中国饲料相关标准. Yu等人^[84]在125 m²开放跑道池中通过小球藻混养固定5%的CO₂, 平均固碳效率达0.29 g/(L•d), 验证了混养小球藻规模化固碳的可行性.

2014年, 在国家高技术研究发展计划(863计划)“微藻生物固碳关键技术与产品开发”支持下, 中国科学院水生生物研究所宋立荣团队在江苏建立了微藻固碳示范工程, 建成了50 m²室内养殖、300 m²养殖温室及332 m²室外规模的中试基地, 开展发电厂烟气减排、回收和利用的技术研发. 以该中试基地每年8个月运行周期估算, 年产微藻可达2.4吨, 固碳4.4吨, 若将该规模放大至100亩, 一年可生产微藻240吨, 固碳432吨. 山西农业大学李润植团队利用微藻与燃煤排放烟气中的CO₂进行光合作用, 研发出一套微藻固碳

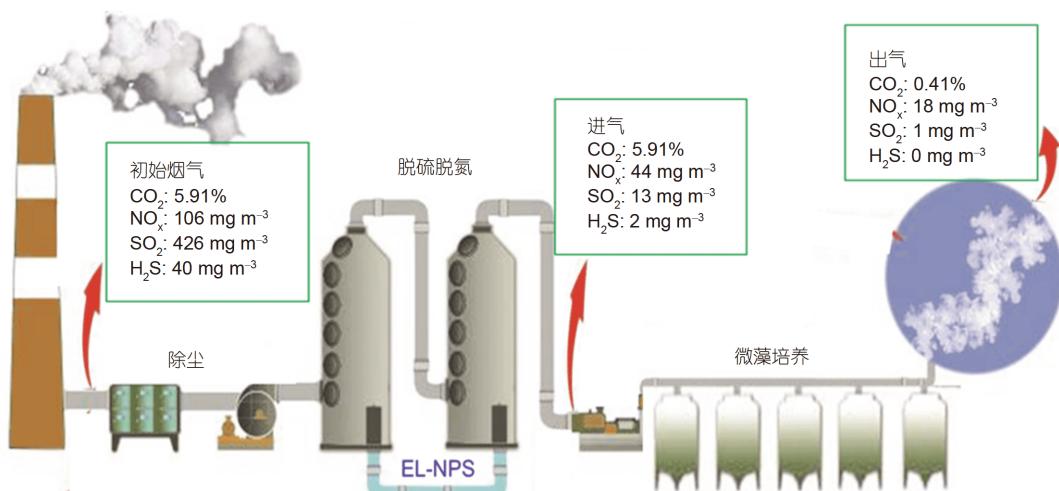


图 5 微藻固碳减排烟气示意图(网络版彩图)

Figure 5 Diagram of CO₂ fixation using microalgae (color online)

表 5 国外的微藻生物经济模式探索**Table 5** Exploitation of microalgal biomass for bio-economy outside China

微藻种类	经济模式	国家或组织	规模	效果	文献
栅藻	城市污水处理	美国	12~48个45.7 m长, 1.83 m宽的跑道池, 日处理5万加仑污水	氮清除率达75%, 磷清除率达93%; 生物质产率3.5~22.7 g/(m ² •d)	[85]
螺旋藻、小球藻等	食品、饵料	欧盟	-	欧盟在全球微藻市场份额占比少, 科技创新可推动微藻在食品、饵料中的应用	[86]
未提及	城市景观	德国	BIQ五层大楼, 总面积约1600 m ²	世界首座微藻供能大楼	[87]
硅藻、栅藻	生物能源	美国	100公顷	生产所得生物原油约2美元/升, 微藻饲料1400美元/吨	[88]
螺旋藻、小球藻	生物肥料	印度	水稻田, 规模未提及	水稻产量提高7.0%~20.9%	[89]
微拟球藻、杜氏盐藻	化妆品	瑞士	体外细胞实验	微藻提取物具有护肤作用	[90]
雨生红球藻、杜氏盐藻	生物医药	西班牙	细胞与病毒(HSV-1)实验	75 µg/mL雨生红球藻提取物对病毒感染抑制率达85%	[91]

减排系统。该系统首先将排放烟气进行预处理, 如除去灰尘、脱硫脱氮等, 然后通入微藻培养系统进行微藻培养, 实现了约93%的碳减排(图5)。生产所得生物质可进一步被加工为饲料、生物肥料等高价值产品, 进一步提高经济所得, 降低固碳成本。按照在山西连续生产5个月的产能估算, 微藻生物质年产量可达360吨, 成本投入为60万美元, 年收入高达360万美元, 经济效益显著。微藻固碳可以将生态意义和经济效益有效结合, 微藻固碳示范工程为产业化大规模固碳提供了参考。

可以预见, 微藻固碳减排联产高值产品将成为一种新的微藻经济模式。

除微藻调水和微藻固碳两个经济模式外, 微藻在城市污水处理、食品、饵料、城市景观、生物能源、生物肥料、化妆品和生物医药等诸多领域具有经济前景(表5)^[85~91]。微藻生物经济将呈现多元化发展趋势。

受篇幅所限, 本文只引用部分微藻生物技术领域的文献, 国内还有很多工作未能展示, 在此表示歉意。

致谢 我们对山西农业大学李润植教授, 中国科学院水生生物研究所胡征宇研究员、宋立荣研究员, 中国科学院海洋研究所刘建国研究员, 华东理工大学李元广教授, 广东海洋大学黄翔鹄教授等人提供相关素材表示衷心感谢!

参考文献

- Chen J, Wang Y, Benemann J R, et al. Microalgal industry in China: challenges and prospects. *J Appl Phycol*, 2016, 28: 715–725
- Liu Y D, Li S H. Species composition and vertical distribution of blue-green algae in rice field soils, Hubei, China. *Nova Hedwigia*, 1989, 48: 55–67
- Deng Z Y. Studies on mass culture of *Nostoc sphaeroides* and *N. commune* (Cyanophyta) and the structural and physiological characteristics of *N. sphaeroides* (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Wuhan: Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, 2006 [邓中洋. 葛仙米、地木耳的大量培养及葛仙米形态生理特征研究. 博士学位论文. 武汉: 中国科学院水生生物研究所, 2006]
- Han D, Deng Z, Lu F, et al. Biology and biotechnology of edible *Nostoc*. In: Richmond A, Hu Q, eds. *Handbook of Microalgal Culture: Applied Phycology and Biotechnology*. 2nd Ed. Chichester: John Wiley and Sons, 2013. 433
- Deng Z, Hu Q, Lu F, et al. Colony development and physiological characterization of the edible blue-green alga, *Nostoc sphaeroides* (Nostocaceae, Cyanophyta). *Prog Nat Sci*, 2008, 18: 1475–1483
- Ma R, Lu F, Bi Y, et al. Effects of light intensity and quality on phycobiliprotein accumulation in the cyanobacterium *Nostoc sphaeroides*

- Kützing. *Biotechnol Lett*, 2015, 37: 1663–1669
- 7 Yi S F, Tian Y. Raceway pond large-scale production technique of *Nostoc sphaeroids* Kützing (in Chinese). *Mod Agric Sci Technol*, 2019, 16: 79–82 [易思富, 田云. 葛仙米跑道池规模化培养技术. 现代农业科技, 2019, 16: 79–82]
- 8 Kim S, Park J, Cho Y B, et al. Growth rate, organic carbon and nutrient removal rates of *Chlorella sorokiniana* in autotrophic, heterotrophic and mixotrophic conditions. *Bioresour Tech*, 2013, 144: 8–13
- 9 Mitra D, van Leeuwen J H, Lamsal B. Heterotrophic/mixotrophic cultivation of oleaginous *Chlorellavulgaris* on industrial co-products. *Algal Res*, 2012, 1: 40–48
- 10 Liang F, Wen X, Geng Y, et al. Growth rate and biomass productivity of *Chlorella* as affected by culture depth and cell density in an open circular photobioreactor. *J Microbiol Biotechnol*, 2013, 23: 539–544
- 11 Posten C, Walter C. Microalgal Biotechnology: Integration and Economy. Berlin: Walter de Gruyter, 2012
- 12 He Q, Yang H, Hu C. Culture modes and financial evaluation of two oleaginous microalgae for biodiesel production in desert area with open raceway pond. *Bioresour Tech*, 2016, 218: 571–579
- 13 Chen F, Johns M R. Effect of C/N ratio and aeration on the fatty acid composition of heterotrophic *Chlorella sorokiniana*. *J Appl Phycol*, 1991, 3: 203–209
- 14 Chen F. High cell density culture of microalgae in heterotrophic growth. *Trends Biotech*, 1996, 14: 421–426
- 15 Sun N, Wang Y, Li Y T, et al. Sugar-based growth, astaxanthin accumulation and carotenogenic transcription of heterotrophic *Chlorella zofingiensis* (Chlorophyta). *Proc Biochem*, 2008, 43: 1288–1292
- 16 Fan J, Huang J, Li Y, et al. Sequential heterotrophy-dilution-photoinduction cultivation for efficient microalgal biomass and lipid production. *Bioresour Tech*, 2012, 112: 206–211
- 17 Han F, Huang J, Li Y, et al. Enhancement of microalgal biomass and lipid productivities by a model of photoautotrophic culture with heterotrophic cells as seed. *Bioresour Tech*, 2012, 118: 431–437
- 18 Costa J A V, Freitas B C B, Rosa G M, et al. Operational and economic aspects of *Spirulina*-based biorefinery. *Bioresour Tech*, 2019, 292: 121946
- 19 Gershwin M E, Belay A. *Spirulina* in Human Nutrition and Health. Boca Raton: CRC Press, 2007
- 20 Xiang W Z, Li T, Wu H L, et al. The strategic studies on developing industry of seawater *Spirulina* with efforts (in Chinese). *Guangxi Sci*, 2014, 21: 573–579 [向文洲, 李涛, 吴华莲, 等. 海水螺旋藻产业发展战略研究. 广西科学, 2014, 21: 573–579]
- 21 Wu B, Xiang W, Zeng C. *Spirulina* cultivation in China. *Chin J Ocean Limnol*, 1998, 16: 152–157
- 22 Wu B, Tseng C K, Xiang W. Large-scale cultivation of *Spirulina* in seawater based culture medium. *Bot Marina*, 1993, 36: 99–102
- 23 Borowitzka M A. Commercial production of microalgae: ponds, tanks, and fermenters. In: Osinga R, Tramper J, Burgess J G, eds. Progress in Industrial Microbiology. Marine Bioprocess Engineering. Amsterdam: Elsevier, 1999. 313–321
- 24 Lee Y K. Commercial production of microalgae in the Asia-Pacific rim. *J Appl Phycol*, 1997, 9: 403–411
- 25 Benemann J R. Open ponds and closed photobioreactors-comparative economics. In: 5th Annual World Congress on Industrial Biotechnology and Bioprocessing. Chicago. 2008
- 26 Belay A. Biology and industrial production of *Arthrospira (Spirulina)*. In: Richmond A, Hu Q, eds. Handbook of Microalgal Culture: Applied Phycology and Biotechnology. 2nd Ed. Chichester: John Wiley and Sons, 2013. 339–358
- 27 Lu Y M, Xiang W Z, Wen Y H. *Spirulina (Arthrospira)* industry in Inner Mongolia of China: current status and prospects. *J Appl Phycol*, 2011, 23: 265–269
- 28 Bao Y, Liu M, Wu X, et al. *In situ* carbon supplementation in large-scale cultivations of *Spirulina platensis* in open raceway pond. *Biotechnol Bioproc E*, 2011, 17: 93–99
- 29 Soletto D, Binaghi L, Ferrari L, et al. Effects of carbon dioxide feeding rate and light intensity on the fed-batch pulse-feeding cultivation of *Spirulina platensis* in helical photobioreactor. *Biochem Eng J*, 2008, 39: 369–375
- 30 Sivakumar M, Ranjith Kumar R, Shashirekha V, et al. Influence of carbon-dioxide on the growth of *Spirulina* sp. (MCRC-A0003) isolated from Muttukadu backwaters, South India. *World J Microbiol Biotechnol*, 2014, 30: 2775–2781
- 31 Zhang F, Xiang W Z, Xiao B, et al. CO₂ sequestration coupled with industrial cultivation of microalgae (in Chinese). *Acta Microbiol Sin*, 2012, 52: 1378–1384 [张峰, 向文洲, 萧娜, 等. 植物与微生物学报, 2012, 52: 1378–1384]
- 32 Liu J, van der Meer J, Zhang L, et al. Cultivation of *Haematococcus pluvialis* for astaxanthin production. In: Slocombe S P, Benemann J R, eds.

- Microalgal Production for Biomass and High-Value Products. Boca Raton: CRC Press, 2016. 267–293
- 33 Zhang B Y, Geng Y H, Li Z K, et al. Production of astaxanthin from *Haematococcus* in open pond by two-stage growth one-step process. *Aquaculture*, 2009, 295: 275–281
- 34 Miao F P, Lu D Y, Zhang C W, et al. The synthesis of astaxanthin esters, independent of the formation of cysts, highly correlates with the synthesis of fatty acids in *Haematococcus pluvialis*. *Sci China Ser C*, 2008, 51: 1094–1100
- 35 Zhang W, Wang J, Wang J, et al. Attached cultivation of *Haematococcus pluvialis* for astaxanthin production. *Bioresour Tech*, 2014, 158: 329–335
- 36 Wang F, Gao B, Wu M, et al. A novel strategy for the hyper-production of astaxanthin from the newly isolated microalga *Haematococcus pluvialis* JNU35. *Algal Res*, 2019, 39: 101466
- 37 Borowitzka M A. Algal biotechnology. In: The Algae World. Dordrecht: Springer, 2015. 319–338
- 38 Huang Y, Liu J, Li L, et al. Efficacy of binary combinations of botanical pesticides for rotifer elimination in microalgal cultivation. *Bioresour Tech*, 2014, 154: 67–73
- 39 Huang Y, Li L, Liu J, et al. Botanical pesticides as potential rotifer-control agents in microalgal mass culture. *Algal Res*, 2014, 4: 62–69
- 40 Li J, Zhu D, Niu J, et al. An economic assessment of astaxanthin production by large scale cultivation of *Haematococcus pluvialis*. *Biotech Adv*, 2011, 29: 568–574
- 41 Yu X, Niu X, Zhang X, et al. Identification and mechanism analysis of chemical modulators enhancing astaxanthin accumulation in *Haematococcus pluvialis*. *Algal Res*, 2015, 11: 284–293
- 42 Lu Y, Jiang P, Liu S, et al. Methyl jasmonate- or gibberellins A3-induced astaxanthin accumulation is associated with up-regulation of transcription of β-carotene ketolase genes (*bkts*) in microalga *Haematococcus pluvialis*. *Bioresour Tech*, 2010, 101: 6468–6474
- 43 Gao Z, Meng C, Zhang X, et al. Induction of salicylic acid (SA) on transcriptional expression of eight carotenoid genes and astaxanthin accumulation in *Haematococcus pluvialis*. *Enzyme Microbial Tech*, 2012, 51: 225–230
- 44 Wen Z, Liu Z, Hou Y, et al. Ethanol induced astaxanthin accumulation and transcriptional expression of carotenogenic genes in *Haematococcus pluvialis*. *Enzyme Microb Tech*, 2015, 78: 10–17
- 45 Li Y, Cui D, Zhuo P, et al. A new approach to promote astaxanthin accumulation via Na₂WO₄ in *Haematococcus pluvialis*. *J Ocean Limnol*, 2019, 37: 176–185
- 46 Ding W, Zhao P, Peng J, et al. Melatonin enhances astaxanthin accumulation in the green microalga *Haematococcus pluvialis* by mechanisms possibly related to abiotic stress tolerance. *Algal Res*, 2018, 33: 256–265
- 47 Zhang Z, Wang B, Hu Q, et al. A new paradigm for producing astaxanthin from the unicellular green alga *Haematococcus pluvialis*. *Biotechnol Bioeng*, 2016, 113: 2088–2099
- 48 Wan M, Zhang J, Hou D, et al. The effect of temperature on cell growth and astaxanthin accumulation of *Haematococcus pluvialis* during a light-dark cyclic cultivation. *Bioresour Tech*, 2014, 167: 276–283
- 49 Wan M, Zhang Z, Wang J, et al. Sequential heterotrophy-dilution-photoinduction cultivation of *Haematococcus pluvialis* for efficient production of astaxanthin. *Bioresour Tech*, 2015, 198: 557–563
- 50 Cai M, Li Z, Qi A. Effects of iron electrovalence and species on growth and astaxanthin production of *Haematococcus pluvialis*. *Chin J Ocean Limnol*, 2009, 27: 370–375
- 51 Sun Y, Liu J, Zhang X, et al. Strain H2-419-4 of *Haematococcus pluvialis* induced by ethyl methanesulphonate and ultraviolet radiation. *Chin J Ocean Limnol*, 2008, 26: 152–156
- 52 Chen Y, Li D, Lu W, et al. Screening and characterization of astaxanthin-hyperproducing mutants of *Haematococcus pluvialis*. *Biotech Lett*, 2003, 25: 527–529
- 53 Liu J, Chen J, Chen Z, et al. Isolation and characterization of astaxanthin-hyperproducing mutants of *Haematococcus pluvialis* (Chlorophyceae) produced by dielectric barrier discharge plasma. *Phycologia*, 2016, 55: 650–658
- 54 Higuera-Ciapara I, Felix-Valenzuela L, Goycoolea F M, et al. Microencapsulation of astaxanthin in a chitosan matrix. *Carbohydrate Polym*, 2004, 56: 41–45
- 55 Zhang X, Yin W, Qi Y, et al. Microencapsulation of astaxanthin in alginate using modified emulsion technology: Preparation, characterization, and cytostatic activity. *Can J Chem Eng*, 2017, 95: 412–419
- 56 Shen Q, Quek S Y. Microencapsulation of astaxanthin with blends of milk protein and fiber by spray drying. *J Food Eng*, 2014, 123: 165–171

- 57 Gupta R B, Shim J J. Solubility in Supercritical Carbon Dioxide. Boca Raton: CRC Press, 2006
- 58 Pan J L, Wang H M, Chen C Y, et al. Extraction of astaxanthin from *Haematococcus pluvialis* by supercritical carbon dioxide fluid with ethanol modifier. *Eng Life Sci*, 2012, 12: 638–647
- 59 Sanzo G D, Mehariya S, Martino M, et al. Supercritical carbon dioxide extraction of astaxanthin, lutein, and fatty acids from *Haematococcus pluvialis* microalgae. *Mar Drugs*, 2018, 16: 334
- 60 Grunwald P. Industrial Biocatalysis. Singapore: Jenny Stanford Publishing, 2014
- 61 Kyriakopoulou K, Papadaki S, Krokida M. Life cycle analysis of β-carotene extraction techniques. *J Food Eng*, 2015, 167: 51–58
- 62 Zhang J J, Guo L C, Cui Z Q, et al. Dunaliella factory farming technology and product development (in Chinese). *J Salt Chem Ind*, 2010, 1: 39–41 [张俊杰, 郭连城, 崔志强, 等. 盐藻工厂化养殖技术与产品开发(二). 盐业与化工, 2010, 1: 39–41]
- 63 Zhou Q. Study on the techniques of salt mother liquor breeding and air floatation harvesting of *Dunaliella salina* (in Chinese). *Sea Lake Salt Chem Ind*, 1995, 6: 11–16 [周全. 制盐母液养殖盐藻及气浮采收技术的研究. 海湖盐与化工, 1995, 6: 11–16]
- 64 Xu L, Wang F, Li H Z, et al. Development of an efficient electroflocculation technology integrated with dispersed-air flotation for harvesting microalgae. *J Chem Technol Biotechnol*, 2010, 85: 1504–1507
- 65 Cui J Q, Zheng Y, Cong W, et al. Recovery of *Dunaliella salina* cells by dissolved air flotation (in Chinese). *Chin J Proc Eng*, 2003, 3: 151–155 [崔景芹, 郑毅, 从威, 等. 溶气气浮法采收盐藻(*Dunaliella salina*)细胞. 过程工程学报, 2003, 3: 151–155]
- 66 Chen J R, Wu J J, Lin J C T, et al. Low density supercritical fluids precipitation of 9-cis and all trans-β-carotenes enriched particulates from *Dunaliella salina*. *J Chromatogr A*, 2013, 1299: 1–9
- 67 Gómez-Mascaraque L G, Pérez-Masiá R, González-Barrio R, et al. Potential of microencapsulation through emulsion-electrospraying to improve the bioaccessibility of β-carotene. *Food Hydrocoll*, 2017, 73: 1–12
- 68 Schwartzbach S D, Shigeru S. Euglena: Biochemistry, Cell and Molecular Biology. Berlin: Springer, 2017
- 69 Neori A. “Green water” microalgae: the leading sector in world aquaculture. *J Appl Phycol*, 2011, 23: 143–149
- 70 Wei D, Yu J Z. Microalgae: application in aquaculture for healthy cultivation of animal and development of new animal feed (in Chinese). *Ocean Fish Fisheries Adv Mag*, 2014, 4: 84–89 [魏东, 俞建中. 微藻在水产养殖和新型饲料开发中的应用. 海洋与渔业·水产前沿, 2014, 4: 84–89]
- 71 Huang X H, Li C L, Liu C W, et al. Studies on two microalgae improving environment of shrimp pond and strengthening anti-disease ability of *Penaeus vannamei* (in Chinese). *Acta Hydrobiol Sin*, 2002, 26: 342–347 [黄翔鹄, 李长玲, 刘楚吾, 等. 两种微藻改善虾池环境增强凡纳对虾抗病力的研究. 水生生物学报, 2002, 26: 342–347]
- 72 Zhou W G, Ruan R S. Biological mitigation of carbon dioxide via microalgae: recent development and future direction (in Chinese). *Sci Sin Chim*, 2014, 44: 63–78 [周文广, 阮榕生. 微藻生物固碳技术进展和发展趋势. 中国科学: 化学, 2014, 44: 63–78]
- 73 Zhou W, Wang J, Chen P, et al. Bio-mitigation of carbon dioxide using microalgal systems: advances and perspectives. *Renew Sustain Energy Rev*, 2017, 76: 1163–1175
- 74 Benemann J, Pedroni P M, Davison J, et al. Technology roadmap for biofixation of CO₂ and greenhouse gas abatement with microalgae. In: Second National Conference on Carbon Sequestration. Washington. 2003
- 75 Pedroni P, Davison J, Beckert H, et al. A proposal to establish an international network on biofixation of CO₂ and greenhouse gas abatement with microalgae. *J Energy Environ Res*, 2001, 1: 136–150
- 76 Oliveira G M, Caetano N, Mata T M, et al. Biofixation of CO₂ emissions from natural gas combined cycle power plant. *Energy Rep*, 2020, 6: 140–146
- 77 Cheng J, Lu H, Huang Y, et al. Enhancing growth rate and lipid yield of *Chlorella* with nuclear irradiation under high salt and CO₂ stress. *Bioresour Tech*, 2016, 203: 220–227
- 78 Hussain F, Shah S Z, Zhou W, et al. Microalgae screening under CO₂ stress: Growth and micro-nutrients removal efficiency. *J Photochem Photobiol B-Biol*, 2017, 170: 91–98
- 79 Li F F, Yang Z H, Zeng R, et al. Microalgae capture of CO₂ from actual flue gas discharged from a combustion chamber. *Ind Eng Chem Res*, 2011, 50: 6496–6502
- 80 Kang R J, Shi D J, Cong W, et al. Effects of co-expression of two higher plants genes ALD and TPI in *Anabaena* sp. PCC7120 on photosynthetic CO₂ fixation. *Enzyme Microb Tech*, 2005, 36: 600–604
- 81 Cheng J, Yang Z, Huang Y, et al. Improving growth rate of microalgae in a 1191m² raceway pond to fix CO₂ from flue gas in a coal-fired power plant. *Bioresour Tech*, 2015, 190: 235–241

- 82 Cheng J, Yang Z, Ye Q, et al. Improving CO₂ fixation with microalgae by bubble breakage in raceway ponds with up-down chute baffles. *Bioresour Tech*, 2016, 201: 174–181
- 83 Cui H, Yang Z, Lu Z, et al. Combination of utilization of CO₂ from flue gas of biomass power plant and medium recycling to enhance cost-effective *Spirulina* production. *J Appl Phycol*, 2019, 31: 2175–2185
- 84 Yu Q, Wang H, Li X, et al. Enhanced biomass and CO₂ sequestration of *Chlorella vulgaris* using a new mixotrophic cultivation method. *Proc Biochem*, 2020, 90: 168–176
- 85 Novoveská L, Zapata A K M, Zabolotney J B, et al. Optimizing microalgae cultivation and wastewater treatment in large-scale offshore photobioreactors. *Algal Res*, 2016, 18: 86–94
- 86 Vigani M, Parisi C, Rodríguez-Cerezo E, et al. Food and feed products from micro-algae: Market opportunities and challenges for the EU. *Trends Food Sci Tech*, 2015, 42: 81–92
- 87 Elrayes G M. Microalgae: prospects for greener future buildings. *Renew Sustain Energy Rev*, 2018, 81: 1175–1191
- 88 Beal C M, Gerber L N, Sills D L, et al. Algal biofuel production for fuels and feed in a 100-ha facility: A comprehensive techno-economic analysis and life cycle assessment. *Algal Res*, 2015, 10: 266–279
- 89 Dineshkumar R, Kumaravel R, Gopalsamy J, et al. Microalgae as bio-fertilizers for rice growth and seed yield productivity. *Waste Biomass Valor*, 2018, 9: 793–800
- 90 Stolz P, Obermayer B. Manufacturing microalgae for skin care. *Cosmet Toiletr*, 2005, 120: 99–106
- 91 Santoyo S, Jaime L, Plaza M, et al. Antiviral compounds obtained from microalgae commonly used as carotenoid sources. *J Appl Phycol*, 2012, 24: 731–741

Development of microalgal industries in the past 60 years due to biotechnological research in China: a review

GAO FengZheng¹, GE BaoSheng², XIANG WenZhou³ & QIN Song⁴

¹ Wageningen University, Bioprocess Engineering, AlgaePARC, Wageningen 6700 AA, Netherlands;

² College of Chemical Engineering and Center for Bioengineering and Biotechnology, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China;

³ South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301, China;

⁴ Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003, China

Microalgae are unicellular photosynthetic microorganisms. About 1500 years ago, at the Jin Dynasty, the Chinese consumed microalgae as food and tried its use as traditional medicines. During the “three-year period of famine” from 1959 to 1962, the central Chinese government encouraged scientists to conduct research on the cultivation of *Chlorella* as a food substitute, thus initiating the early developmental stage of microalgal biotechnology. A newer biotechnological innovation was conceived in the 1980s, when the national strategy which states that “*Spirulina* should be taken as a protein supplement by the Chinese” was instituted. Since then several key biotechnological innovations have been developed over the past 60 years, which are related to the breeding of microalgal species, raceway pond and tubular photobioreactor technology and “from 0–1” originality of microalgal cultivation modes. In China, a series of breakthroughs as regards the biomass scaling-up of *Spirulina*, *Chlorella*, *Haematococcus pluvialis*, and *Euglena gracilis* have been achieved; this has therefore made China the largest producer of microalgal biomass globally. The core missions of the research and development of microalgal biotechnology in China are to reduce production cost, and develop new bio-economy modes for both precise application and environmental governance through microalgal biomass usage.

microalgae, biotechnology, microalgal industry, bio-economy

doi: [10.1360/SSV-2020-0166](https://doi.org/10.1360/SSV-2020-0166)