

国家重点研发计划资助 (National Key R&D Program of China)

(项目编号: 2019YFA0906300)

# 微藻生物合成与转化

范建华◎主编

Microalgal Biosynthesis and Biotransformation

加快我国生物资源的开发利用  
促进我国合成生物技术产业的转型升级和可持续发展

微藻绿色生物制造

基础生物学|光驱固碳|基因编辑|减污降碳|工艺装备|高附加值产品

助力实现“双碳”目标 支撑微藻类产业转型



华东理工大学出版社  
EAST CHINA UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY PRESS

国家重点研发计划资助(National Key R&D Program of China)

(项目编号: 2019YFA0906300)



一流学科建设研究生教学用书

本书获华东理工大学研究生教育基金资助

# 微藻生物合成与转化

Microalgal Biosynthesis and Biotransformation

范建华 主编



华东理工大学出版社  
EAST CHINA UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY PRESS

· 上海 ·

## 图书在版编目(CIP)数据

微藻生物合成与转化 / 范建华主编. -- 上海 : 华东理工大学出版社, 2024. 8. -- ISBN 978-7-5628-7436-2

I. Q949.2

中国国家版本馆 CIP 数据核字第 202492FW10 号

## 内 容 提 要

微藻是古老的原核或真核光合生物,光合作用效率高,是地球上的主要初级生产力。微藻细胞作为“天然的绿色工厂”,可以合成先进燃料与高值化学品,在合成生物制造领域具有独特优势。本书作者多年来密切跟踪微藻合成生物技术研究的前沿和进展,并结合自身的研究实践和体会,组织课题组成员共同对现有信息进行了归纳整理和总结,希望能够为我国微藻生物技术研究开发尽绵薄之力。本书首先对微藻、微藻生物产业的发展、碳中和背景下的微藻生物技术发展机遇与挑战进行了概括,随后介绍了微藻基础生物学、微藻的光合固碳属性、微藻的生长与繁殖、微藻基因编辑技术与合成生物学、微藻生物质下游处理技术、微藻生物转化与合成高价值产品,最后本书还介绍了代表性的经济微藻,以及典型的微藻绿色低碳产品与应用。

本书可作为高等学校生物工程相关专业本科高年级学生、研究生的学习用书,以及教师、科技工作者和企业专业技术人员的参考书;尤其对从事微藻研究的科研人员将具有很好的指导意义。

---

项目统筹 / 韩 婷

责任编辑 / 韩 婷

责任校对 / 陈婉毓

装帧设计 / 徐 蓉

出版发行 / 华东理工大学出版社有限公司

地址:上海市梅陇路 130 号,200237

电话:021-64250306

网址:www.ecustpress.cn

邮箱:zongbianban@ecustpress.cn

印 刷 / 上海新华印刷有限公司

开 本 / 710 mm × 1000 mm 1/16

印 张 / 14.5

字 数 / 256 千字

版 次 / 2024 年 8 月第 1 版

印 次 / 2024 年 8 月第 1 次

定 价 / 128.00 元

---

版权所有 侵权必究

# 前言 | Foreword

微藻是古老的原核或真核光合生物,光合作用效率高,是地球上的主要初级生产力。微藻细胞作为“天然的绿色工厂”,可以合成先进燃料与高值化学品,在合成生物制造领域具有独特优势。此外,微藻也是水体生态系统中的重要组成部分,是增加陆地/海洋碳汇和解决环境问题的有效手段,对固碳减排、土壤/水体修复、水生动物健康以及生态系统的平衡具有重要的意义。微藻绿色生物制造研究可开辟以光能和 CO<sub>2</sub> 为原料的新型绿色细胞工厂,微藻生物质正成为提供战略蛋白、脂质,以及具有重要营养价值和保健功能的食品、食品添加剂、化妆品等产品的重要组成成分,支撑着大健康产业和大水产行业的持续发展。

当今是前沿生命科学蓬勃发展、尖端生物技术层出不穷的时代,微藻生物合成技术的研究范畴更是大幅拓展,研究内容不断深化,产业转型升级迫在眉睫。最近,农业农村部发布了农发〔2023〕1号文件,其中明确要求要“培育壮大藻类产业”;《“健康中国 2030”规划纲要》中提出要“支撑微藻类产业顺利转型”;《科技支撑碳达峰碳中和实施方案(2022—2030年)》中提出要“重点研发微藻肥技术,研究盐藻/蓝藻固碳增强技术”。这些文件纲要为广大藻类科技工作者指明了方向。

微藻相关研究和产业化开发,契合国家重大需求。微藻是研究光合作用的重要领域,也是极具潜力的光驱固碳制造平台,现今亟须开发基因操作工具、揭示科学规律、开展工程应用示范;微藻培养与 CO<sub>2</sub>/N/P 的资源化利用互相结合,有望为高端生物制品进口替代、饲料蛋白短缺,以及养殖减抗行动等“卡脖子”问题提供一体化解决方案,加快我国生物资源的开发利用,促进我国合成生物技术产业的转型升级和可持续发展,实现“双碳”目标。

在 18 年的文献阅读、教学积累以及科研摸索中,作者密切关注微藻合成生物技术研究的前沿和进展,并结合自身多年的研究实践和体会,组织课题组成员共同对现有信息进行了归纳整理和总结,希望能够为我国微藻生物技术研究开

发尽绵薄之力。在此,感谢各位成员的辛勤付出,也要感谢帮助审阅本书的专家学者。适逢国家发布《“十四五”生物经济发展规划》和对健康中国的战略需求,作者的研究工作得到了教育部、科技部、基金委以及上海市各类科技项目等的大力支持,在此一并致谢。

此外,感谢马可、季亮、魏凯欣、吴萍、邱晟、曲高品、罗叶玲、周左东、何宇龙、张颖秋、袁雨晨、胡田幽子、赵晨妮等对本书的帮助。

由于学识眼界有限,尽管我们慎之又慎,但难免会有疏漏,不当之处敬请读者批评指正。

范建华

2024年1月 于上海

# 目录 | Contents

<b>第 1 章 绪论</b>	1
1.1 微藻分类学特征与属性 .....	1
1.2 微藻生物产业的发展简史 .....	2
1.3 碳中和背景下的微藻生物技术的发展机遇与挑战 .....	4
1.3.1 碳中和背景下微藻生物技术的发展机遇 .....	4
1.3.2 微藻固碳产业面临的挑战 .....	5
参考文献 .....	6
<b>第 2 章 微藻基础生物学</b>	8
2.1 微藻的基本特征 .....	8
2.2 藻类系统发生与分类 .....	10
2.2.1 系统演化过程 .....	10
2.2.2 分类和繁殖 .....	11
2.3 全球分布与生态影响 .....	15
2.3.1 藻类对河流湖泊池塘等生态系统的影响 .....	15
2.3.2 微藻对海洋生态系统的影响 .....	16
参考文献 .....	17
<b>第 3 章 微藻的光合固碳属性</b>	18
3.1 CO <sub>2</sub> 浓缩机制 .....	19
3.2 固碳反应的关键酶 Rubisco .....	23
3.3 光合作用与叶绿体进化 .....	26

3.4	光合生理生化测定与分析 .....	30
	参考文献 .....	32
<b>第4章</b>	<b>微藻的生长与繁殖</b> .....	<b>34</b>
4.1	微藻种质资源采集与纯化 .....	34
4.1.1	国际主要藻类资源库的保藏和共享利用 .....	34
4.1.2	我国藻类资源保藏现状 .....	36
4.1.3	微藻样品的采集 .....	37
4.1.4	微藻的分离纯化 .....	38
4.2	微藻的营养模式 .....	40
4.2.1	光自养模式 .....	40
4.2.2	异养模式 .....	41
4.2.3	混合营养模式 .....	42
4.2.4	光异养培养 .....	44
4.3	常见培养模式与设备 .....	44
4.3.1	微藻培养模式 .....	44
4.3.2	培养设备——光生物反应器 .....	47
4.4	影响生长繁殖的关键因素 .....	53
4.4.1	培养基成分 .....	53
4.4.2	环境因子 .....	56
	参考文献 .....	59
<b>第5章</b>	<b>微藻基因编辑技术与合成生物学</b> .....	<b>61</b>
5.1	基因转移技术 .....	62
5.1.1	转化方法 .....	62
5.1.2	微藻基因编辑技术 .....	65
5.2	基因表达系统 .....	67
5.2.1	核转化系统 .....	67
5.2.2	叶绿体基因表达系统 .....	69
5.2.3	真核微藻生产与优化 .....	69
5.2.4	微藻基因表达系统的优势 .....	70
5.2.5	利用合成生物学生产藻类产品的商业附加值 .....	71

5.3	转基因株系的筛选方法 .....	72
5.3.1	核转化筛选方法 .....	72
5.3.2	叶绿体转化筛选方法 .....	74
5.4	基因编辑策略与工具 .....	75
5.4.1	启动子和终止子 .....	75
5.4.2	内含子促进表达 .....	76
5.4.3	密码子优化 .....	76
5.4.4	位置效应和基因沉默 .....	76
5.4.5	多基因共表达 .....	77
5.4.6	叶绿体和线粒体基因组转化 .....	78
5.5	合成重组蛋白 .....	78
5.5.1	微藻合成重组蛋白质类药物的优缺点 .....	79
5.5.2	真核微藻中的基因表达、翻译和翻译后修饰 .....	81
5.5.3	微藻表达重组蛋白的应用 .....	83
5.6	生产不饱和脂肪酸 .....	84
5.6.1	微藻脂质生物合成途径 .....	85
5.6.2	脂质代谢改造 .....	85
5.7	微藻重组疫苗 .....	92
5.7.1	重组微藻在人类疾病中的应用 .....	92
5.7.2	重组微藻疫苗预防水产养殖病害 .....	94
5.8	微藻靶向药物递送 .....	97
5.8.1	微藻机器人(Microalgae-based Robot)的特性 .....	98
5.8.2	微藻机器人的表面功能化与集成途径 .....	99
5.8.3	微藻靶向药物递送应用 .....	101
	参考文献 .....	104

## 第 6 章 微藻生物质下游处理技术 106

6.1	常见的微藻采收方法 .....	106
6.2	细胞破碎方法 .....	110
6.2.1	细胞破碎技术概述 .....	110
6.2.2	几种常用的细胞破碎技术 .....	111
6.3	活性物质提取技术 .....	113
6.3.1	微藻提取技术概述 .....	113

6.3.2 常用提取方法 .....	114
6.3.3 浓缩与干燥 .....	117
参考文献 .....	117

## 第7章 微藻生物转化与合成高价值产品 119

7.1 脂质与脂肪酸 .....	119
7.1.1 微藻脂质代谢途径 .....	120
7.1.2 微藻脂质提取方法 .....	121
7.1.3 微藻多不饱和脂肪酸含量提高 .....	123
7.1.4 多不饱和脂肪酸的应用 .....	124
7.2 微藻多糖 .....	125
7.2.1 微藻多糖的结构 .....	126
7.2.2 微藻多糖的生物活性及应用 .....	127
7.2.3 已被开发研究的几类微藻多糖 .....	128
7.2.4 多糖研究发展方向 .....	129
7.3 捕光色素蛋白复合体 .....	130
7.3.1 藻胆体 .....	130
7.3.2 岩藻黄素-叶绿素 a/c-蛋白复合体(FCP) .....	132
7.3.3 多甲藻黄素-叶绿素 a 蛋白复合物(PCP) .....	133
7.3.4 藻类天然荧光蛋白的应用 .....	134
7.4 色素 .....	138
7.4.1 叶绿素——小球藻 .....	139
7.4.2 藻蓝蛋白——螺旋藻 .....	139
7.4.3 藻红蛋白——紫球藻 .....	140
7.4.4 $\beta$ -胡萝卜素——杜氏盐藻 .....	140
7.4.5 虾青素——雨生红球藻 .....	141
7.4.6 岩藻黄素——硅藻、褐藻等 .....	142
7.5 植物基蛋白 .....	143
7.6 全细胞生物质——食品/饲料原料 .....	148
参考文献 .....	150

## 第 8 章 10 种常见的代表性经济微藻 152

8.1 蓝藻门螺旋藻 .....	152
8.2 绿藻门小球藻 .....	155
8.3 绿藻门雨生红球藻 .....	158
8.4 绿藻门莱茵衣藻 .....	159
8.5 裸藻门纤细裸藻 .....	162
8.6 硅藻门三角褐指藻 .....	164
8.7 红藻门紫球藻 .....	166
8.8 金藻门等鞭金藻 .....	168
8.9 真眼点藻纲微拟球藻 .....	170
8.10 沟鞭藻纲寇氏隐甲藻 .....	172
参考文献 .....	174

## 第 9 章 典型的微藻绿色低碳产品与应用 175

9.1 营养与健康食品 .....	175
9.2 生物与医药产品 .....	184
9.2.1 $\beta$ -胡萝卜素 .....	184
9.2.2 虾青素 .....	185
9.2.3 叶黄素 .....	186
9.2.4 多糖 .....	186
9.2.5 肽 .....	187
9.2.6 维生素 .....	187
9.2.7 藻胆蛋白 .....	188
9.3 饵料与饲料 .....	191
9.3.1 微藻饵料的营养功能成分 .....	192
9.3.2 微藻饵料的技术功能特性及优势 .....	195
9.3.3 微藻饵料与饲料的前景和挑战 .....	197
9.4 生物能源 .....	198
9.4.1 厌氧消化生产生物燃料 .....	199
9.4.2 光合产氢 .....	201
9.4.3 生产生物柴油 .....	202
9.4.4 微藻生物燃料的发展现状与未来 .....	203

9.5 节能减排与环境修复 .....	204
9.5.1 节能减排 .....	204
9.5.2 环境修复 .....	207
9.6 微藻肥与生态农业 .....	209
9.6.1 微生物肥的功能 .....	209
9.6.2 微藻作为生物肥的方式 .....	212
9.6.3 利用废水培养微藻作为生物肥 .....	213
9.7 微藻基生物材料 .....	213
9.7.1 有关生物基材料现行政策 .....	214
9.7.2 微藻生物材料的类型与应用 .....	214
9.7.3 微藻生物材料的机遇和挑战 .....	217
参考文献 .....	218

# 第 1 章

## 绪 论

### 1.1 微藻分类学特征与属性

微藻(Microalgae),顾名思义是指微小的藻类,为单细胞体或多细胞体,包括原核生物和真核生物。微藻不同于生活中常见的大型海藻,如石莼、马尾藻、龙须菜、紫菜等,这些大型海藻有的可达几米至上百米。微藻种类繁多,据不完全统计,有数万种之多,分布极为广泛,其主要生活在各类水体环境中,也有少数生活在土壤和岩石上,甚至在沙漠、温泉、冰川等环境中也有微藻的踪迹,因此从生活环境来说,微藻可以分为水生、气生和陆生三大生态类群。大部分微藻的直径为 $2\sim 50\ \mu\text{m}$ (如同灰尘悬浮微粒大小),通常情况下无法直接以肉眼辨识微藻,需要借助显微镜才能观察到单一细胞。与高等植物一样,单细胞微藻具有光合色素(均含有叶绿素 a,部分类群还含有叶绿素 b、叶绿素 c 或藻胆蛋白),可以进行光合作用,即利用阳光、二氧化碳和水合成生物物质并进行生长。微藻和同样具有光能合成能力的光合细菌不同,后者是在厌氧条件下进行不放氧光合作用的细菌类群。图 1-1 为微藻主要类别在地球生物圈中的归类。

随着生物信息的不断积累,微藻的分类也具有多样性,可以根据实际需要参考和归类。相关分类的主要依据包括:(1)形态和结构;(2)细胞核的构造和细胞壁的结构及化学成分;(3)色素体的结构及所含色素种类;(4)细胞中贮藏营养物质的类别;(5)鞭毛的有无和数目,以及结构类型和附着位置;(6)生殖方式等。由此可见,微藻不是传统意义上分类学的名词,它们是浮游植物的重要组成部分。微藻具有不同的大小、结构和形态。根据色素组成、特征产物的储存状况和超微结构特征的多样性,微藻可分为十几类。除了部分有鞭毛或纤毛等突起外,该群体具有圆形、椭圆形、圆柱形、梭形、三角形等各种各样的形态。从颜色外观上看,有蓝色、红色、绿色、黄色、褐色,等等。

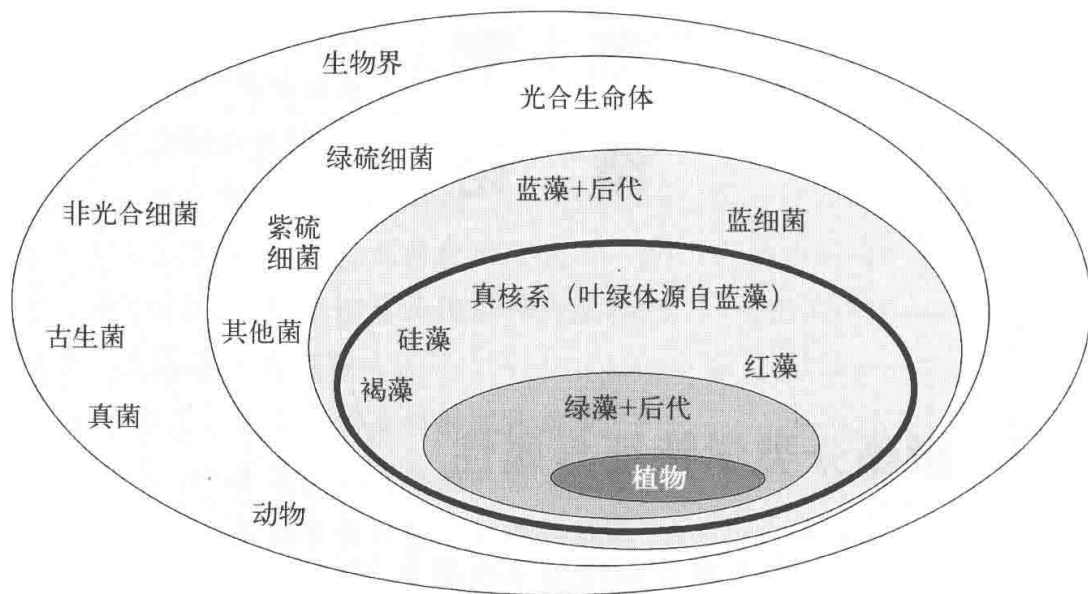


图 1-1 微藻在生物圈中的地位

目前普遍认为,微藻有超过五万个物种。常见的一些物种如发菜、螺旋藻、地木耳、葛仙米等也归属于其中。微藻细胞通常富含营养物质,某些种类的微藻在特定的环境中还可以积累两个以上的高附加值代谢产物,是人类未来重要的食品及生物质能源来源。除了初级代谢物(如蛋白质、碳水化合物、多不饱和脂肪酸和维生素)含量较高之外,微藻对健康的益处主要与其高价值的次级代谢物的存在相关。

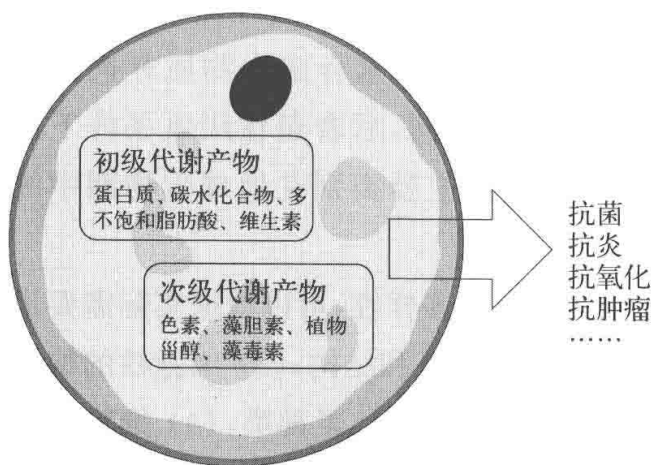


图 1-2 微藻活性物质及其健康价值

次级代谢物是植物中产生的非营养性化合物,可作为抵御环境胁迫的防御剂。针对微藻的研究表明,微藻中含有大量的多种次级代谢产物,例如色素(如酚类、类胡萝卜素等)、藻胆素、植物甾醇和藻毒素等(图 1-2)。需要强调的是,微藻代谢物由于其抗氧化、抗菌、抗肿瘤和抗炎能力而具有广泛的医学应用价值。

## 1.2 微藻生物产业的发展简史

微藻作为地球上最常见的生物资源,是绿色地球的启动者和奠基者,为生命

演化提供了氧气和食物。微藻资源的规模化开发利用的历史相对较短,可追溯到第二次世界大战时期,经过几十年发展目前尚处于起步阶段。目前已形成生产规模的微藻种类还不多,只有少数几种,其中包括商业化生产的各类营养健康制品,如螺旋藻、小球藻、盐生杜氏藻(简称盐藻)、雨生红球藻(简称红球藻)和隐甲藻等,还有几种水产饵料微藻,如微拟球藻、金藻以及硅藻中的三角褐指藻和角毛藻等。目前水产饵料微藻的制备工艺相对简单,产品主要为浓缩藻液,可作为水产育苗鲜活饵料或水生态调节剂,维持水产养殖业的健康发展。

在国际上已成功商业开发的微藻中,螺旋藻、小球藻、盐藻主要借助开放式跑道池技术发展起来。微藻的产业化大致起步于20世纪70—80年代,技术成本低廉、相对成熟,年产量总量基本较稳定地维持在 $1.5 \times 10^4 \sim 2.0 \times 10^4$ 吨藻粉的生产规模。就具体种类的微藻产量而言,螺旋藻(以钝顶螺旋藻为主)的总产量最大,占整个微藻总产量的6~7成;其次为小球藻(以蛋白核小球藻为代表),其产量占微藻总产量的1~1.5成;再次,为盐藻、红球藻等其他微藻种类。我国微藻资源开发在国际上占有重要地位,所生产的微藻量占全球微藻总产量的5~6成。其中,螺旋藻产量多年来一直在8000~10000吨内波动,仅此1项占国际微藻总产量的40%~50%。需要指出,目前我国微藻尚以藻粉生产和原料出口为主,产品的深加工、市场开拓和营销环节相对比较薄弱,微藻产值仅占国际微藻总产值的 $1/5 \sim 1/4$ 。

进入21世纪后,雨生红球藻在微藻产业中异军突起,成为微藻资源开发中的新生力量。该藻的产业化起步于20世纪80年代的中后期,美国Cyanotech公司率先在夏威夷利用开放式跑道池技术,探索商业化开发红球藻资源。经过国内外微藻业界十余年的工作积淀,红球藻资源的开发已获得突破。近年来,逐渐构建起以封闭式光生物反应器为主要特征,基于细胞周期调控的二步串联培养的红球藻资源开发模式,且已在美国、以色列、日本和我国等先后实现了该藻的产业化生产,不仅产量呈快速增长的趋势,其产品质量也取得了大幅度提升,藻粉中虾青素含量成倍增加。小球藻是我国开展规模化养殖最早的微藻种类,可追溯到20世纪50年代末和60年代初的困难时期,但受当时技术落后和生产条件等多种因素的限制,小球藻规模培养并未成功。随后日本、韩国、我国台湾地区等逐渐开始规模化生产。近年来,小球藻的国内养殖技术逐渐成熟,在传统的开放式跑道池的基础上,利用发酵罐进行高密度培养技术取得了突破,使我国大陆地区小球藻、裸藻、雨生红球藻等的年产量和品质迈上新的台阶,全部小球藻的年总产量已超过千吨,我国与日本成为国际上主要的小球藻生产国。

近年来,随着政府科技项目资助以及产业引导,微藻种质资源逐渐被人类广泛挖掘,现已被用于能源、食品、医药、美妆、农业、环境等多个细分领域。藻类细胞含有许多代谢物和生物活性成分,如多糖、蛋白质、脂质、色素,这些物质具有功能特性,除了开展学术研究外,在产业上也有多个应用,具体包括生产生物燃料(乙醇、柴油、沼气、氢气等),食品营养品(动物饲料、营养保健品等),药物(抗病毒药物、抗真菌药物、神经保护药物、皮肤抗衰老剂、紫外线保护剂等),肥料和土壤改良剂,以及化学原料(颜料、染料、着色剂、生物聚合物、生物塑料、纳米颗粒等),也可用于环境修复(碳捕获、去除营养物质、吸附重金属等)。

微藻在各领域中的应用日益广泛,微藻生物物质的高效大量获取势在必行。想要实现微藻的规模化培养,首先需要对微藻株系进行纯化和选育,明晰生物学属性;其次需要深入了解微藻的生长营养方式,设计合适的光生物反应器,探究影响微藻繁殖的各种因素。近年来,微藻已被广泛应用于水产养殖、营养保健品、药用化妆品、转基因药物、生物能源、环境净化、太空站等领域,产业需求越来越大。当前全球市场的趋势表明,消费者对天然、生物活性、营养和功能成分的需求推动了微藻基创新功能食品、化妆品和药品的持续开发。近年来,微藻在绿色生物打印、透气伤口敷料、微型机器人、靶向递送系统、仿生多功能治疗、艺术建筑等一些新兴领域也展露出很高的应用价值。除此之外,在全球可持续发展的背景下,微藻一方面可以固定空气中的  $\text{CO}_2$ ,缓解全球气候变暖,另一方面可以生产生物物质原料,符合绿色生物制造的可持续发展的理念。

## 1.3 碳中和背景下的微藻生物技术的发展机遇与挑战

### 1.3.1 碳中和背景下微藻生物技术的发展机遇

藻类在生态环境中非常重要。蓝藻是地球上最早的光合放氧生物,对地球表面的大气环境从无氧变为有氧起了巨大作用。地球刚形成时,大气中缺乏氧气,二氧化碳的含量是如今的 10~100 倍。在相当长时间内,蓝藻作为唯一利用大气中丰富的二氧化碳进行光合放氧的有机体,在地球上大量繁殖。在漫长的地球演化中,它们不断消耗二氧化碳,制造氧气,大气中的氧气逐渐积累,在紫外线作用下,一部分氧气可转变为臭氧。因此,大气层上空才会出现臭氧层,保护其他生命不被紫外线伤害,从而为地球上需氧生物的演化包括人类的进化和发展创造了必要条件。

微藻也是现今固碳的主要贡献者。据估算,藻类(包括大型海藻和微藻)每年可固定二氧化碳约  $9.5 \times 10^{10}$  吨,占全球净光合作用产量的 50% 左右。浮游藻类还是水中溶解氧的主要供应者,它启动了水域生态系统中的食物链,在水域生态系统的能量流动、物质循环和信息传递中起着至关重要的作用。

伴随着生物质能的发展与兴起,微藻因其高光合固碳效率和易于工业化放大的优势,被认为是最具潜力的下一代生物质提供者。微藻可以通过光合作用的二氧化碳浓缩机制有效地固定二氧化碳,并通过异养同化固定有机碳。微藻能利用污水污泥、农业或食品工业废水中的营养物质,将有机碳回收与微藻培养相结合。微藻可以把生物质转化为更环保的生物燃料、生物材料和生物肥料,以替代化石燃料、塑料和肥料,降低碳排放。此外,化石燃料燃烧产生的大量二氧化碳也是微藻“细胞工厂”的原料,可推动实现工业的绿色生产,源源不断生产高附加值的化学品和大宗生物质。

随着核工业的发展,含有放射性物质的废水产生量越来越大,须进行妥善处理与处置。微藻吸附技术是近年来放射性废水处理领域的研究热点,早在 2014 年,据相关报道,法国研究人员发现一种能够在极端条件下生存的耐辐射水藻,可能能够用来净化核设施产生的污水。在当前的严峻形势下,发现并筛选优势藻种,用其进行生物降解处理核污染水是有效的方法,有利于环境保护,成本也比较低廉。

### 1.3.2 微藻固碳产业面临的挑战

二氧化碳捕集、利用与封存技术(CCUS),是我国减少二氧化碳排放的重要战略技术。微藻在成为有竞争力的技术方面尚面临着重重挑战,包括藻类种质的选育,优势微藻规模化培养,绿色生物质的下游加工(预处理、采收和纯化)等,尤其是在量能以及封存技术上还无法体现其竞争优势。

在微藻种质选育方面,增强光合活性和提高捕光效率是提升微藻在碳中和领域的应用经济性的关键。微藻的优势藻种的选育需借助物理方法(渐进光照)、化学方法(化学诱变)和遗传方法(截短补光天线等)的实施,以提高捕光效率,提高生物炼制能力,同时通过合成生物学手段开发生长速率快及环境适应性强的新藻株。基因编辑技术可以快速、精确地对微藻进行遗传改造,使其获得目标产物的特性,比起物理方法和化学方法的选育,基因编辑技术更易于实现个性化定制(如获得不同长度的补光天线),有望得到更广泛的应用。预计未来会有更多尖端的基因组编辑技术出现在微藻生物技术领域。需要注意的是,为了避

免转基因光合微藻破坏自然生态系统的平衡,需要谨慎对待微藻的基因改造,亟须引入无抗筛选和标记技术。

在微藻规模化培养方面,传统的跑道池培养虽然因其操作简单、易于放大、运行成本较低而被广泛应用,但对光照的要求较高,这类规模培养中,CO<sub>2</sub> 的利用率低,整体传质效率较低。另外,开放式跑道池对于环境要求较高,占地面积大,染菌风险高,也会进一步增加分离纯化产物的成本。封闭式光合生物反应器的种类很多,有管状、板状、螺旋状等,可应用于微藻大规模培养、微藻生物活性物质的开发与生产等。近年来,封闭式光生物反应器的升级和兴起虽然能显著改善上述问题,但目前仍然存在固定投入及运行成本高的难题,设计规模化且低成本的光生物反应器对降低成本和促进产业化都至关重要。

除了培养,下游加工过程如采收、提取和纯化也是生产过程中耗费能量较多的环节。发展新型的采收、提取技术能显著改善碳排放。微藻的培养需要大量的能量进行生物质回收,这与几乎高达 30% 的高生产成本有关。微藻生物质收集和脱水的过程可以达到总生物质收获成本的 50%。在生物精炼概念中,对高附加值产品进行“吃干榨尽”式开发,可能会减少这种限制和依赖。苛刻的分离过程意味着高压和强溶剂,对于所需化合物的生产非常重要,因此,需要具有最小压力的温和技术,并且需要温和的溶剂,以便对其他馏分的影响较小。自絮凝技术的采收率可达到 90%,有望发展成为一种可行的方法。此外,微藻和产生生物絮凝剂的细菌共培养也被认为有利于采收。总体来说,微藻产业在生物固碳经济中可以占据一定的地位,在产业上需要考虑各种资源,比如土地、水、气、电、气候等,这些资源是否合理匹配对生产过程的经济性的高低至关重要。

## 参考文献

- [1] Levasseur W, Perré P, Pozzobon V. A review of high value-added molecules production by microalgae in light of the classification[J]. *Biotechnology Advances*, 2020, 41: 107545.
- [2] Orejuela-Escobar L, Gualle A, Ochoa-Herrera V, et al. Prospects of microalgae for biomaterial production and environmental applications at biorefineries[J]. *Sustainability*, 2021, 13(6): 3063.
- [3] 孙韬,张卫文,胡章立,等. 合成生物学助力碳中和: 新底盘、新策略与新技术[J]. *合成生物学*, 2022, 3(5): 821 - 824.