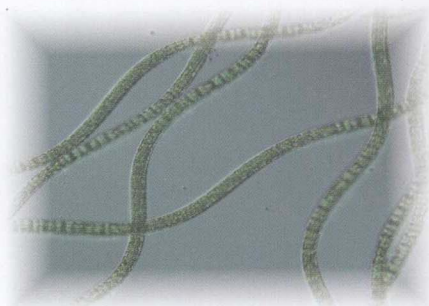


“十一五”国家重点图书出版规划项目



应用生物技术大系

Comprehensive Series of Applied Biotechnology



# 微藻培养指南： 生物技术与应用藻类学

〔英〕A. 里士曼 主编  
黄和 高振 宋萍 译

Handbook of Microalgal Culture:  
Biotechnology and Applied Phycology



科学出版社



“十一五”国家重点图书出版规划项目

应用生物技术大系

# 微藻培养指南：生物技术与应用藻类学

Handbook of Microalgal Culture: Biotechnology and Applied Phycology

[英] A. 里士曼 主编

黄 和 高 振 宋 萍 译



科学出版社

北京

图字：01-2012-0365 号

## 内 容 简 介

全书共分四个部分：第一部分详细介绍微藻生物培养的营养条件和环境因素；第二部分深入阐述微藻的大规模培养技术和理论；第三部分介绍经济微藻在食品行业（生产多不饱和脂肪酸）、养殖业（产物粗藻粉用于饲养动物）、种植业（将固氮蓝绿藻悬液接种到稻田中用作生物肥料）、医药行业（从藻细胞中提取药用活性物质）、生物质能源开发（制备生物柴油）和环保行业（水污染修复、水体净化）等多个领域的应用；第四部分展望微藻生物前沿技术，如基因工程技术、重组蛋白平台化技术、活性化学物质采收技术、异养生产技术、基因传递系统构建技术、海产品开发技术等。

本书适合理、工、农、林、医各类高等院校和职业院校生物科学方向本科生、研究生学习使用，也可供其他生物科技人员查阅参考。

Copyright © 2004 by Blackwell Science Ltd, a Blackwell Publishing company  
All Rights Reserved. This translation published under license. Authorized translation from the English language edition, entitled *Handbook of Microalgal Culture: Biotechnology and Applied Phycology*, ISBN 978-0-632-05953-9, by Amos Richmond, Published by John Wiley & Sons. No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of the original copyrights holder.

### 图书在版编目(CIP)数据

微藻培养指南：生物技术与应用藻类学/（英）里士曼（Richmond, A）主编；黄和，高振，宋萍译。—北京：科学出版社，2014.7

（应用生物技术大系）

书名原文：Handbook of microalgal culture: biotechnology and applied phycology  
“十一五”国家重点图书出版规划项目

ISBN 978-7-03-040945-4

I. ①微… II. ①里… ②黄… ③高… ④宋… III. ①微藻—生物工程—指南  
IV. ①Q949.2-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 120974 号

责任编辑：李 悦 / 责任校对：韩 杨  
责任印制：赵德静 / 封面设计：耕者设计工作室

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码：100717

<http://www.sciencep.com>

骏 志 印 刷 厂 印 刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2014 年 7 月第 一 版 开本：787×1092 1/16

2014 年 7 月第一次印刷 印张：27

字数：606 000

定价：138.00 元

（如有印装质量问题，我社负责调换）

# 前 言

## 工艺现状简介

距上一部《微藻培养手册》(CRC 出版社, 1986 年) 出版至今已 15 载有余。在当时, 认为微藻是解决全球营养需求农产品的观点明显没有现实依据。强光下的光合效率要远低于其理论潜力, 实际产率低, 这也是微藻生物质生产成本高昂的主要原因。因此, 从经济角度来看, 在户外培养光自养细胞生物明显不如传统商品(如谷物、大豆)的生产。从现阶段培养光自养微藻的经验来看, 那些想利用混合开放式跑道池来大规模培养微藻以减少全球 CO<sub>2</sub> 排放的计划是不现实的, 尤其是微藻生产的维护成本和长远的预期生产效率都是基于毫无根据的假设得出的。然而, 想利用高效的光生物反应器集中培养微藻以减少局部(如发电厂)的碳氮排放是有经济前景的, 因为这可以为那些污染企业赢得环境信用并提供有效的环境保护措施, 实际上, 这些也都是受国家法律鼓励的, 因为国家法律在某些特定时期会对减少燃烧废气排放提出非常严格的要求。

将藻类系统单纯地用来产生工业能源, 如氢气或者甲烷(与耦合废弃物降解产生化学能的细菌-藻类系统不同), 这一伟大构想是不现实的。从技术上来讲, 捕获风能的风车以及利用太阳能的光电系统, 更有希望实现经济效益的选择, 而不是专注产氢且效率极低的微藻培养。

无论如何, “海水营养对浮游植物生长的影响”这样独特的宏伟计划非常值得研究。由于缺少植物生长所需条件, 地球上部分海陆领域的生产力非常低。海洋面积广阔但稀缺一些矿物质(例如氮元素和铁元素), 十分贫瘠, 因此无法满足植物的生长需求。通过增加小规模正确的生长限制成分可以很容易提高这些荒凉海洋的生产力, 且有实验迹象表明这种想法是可行的。世界上某些地区人口的不断增加要求当地大量提高粮食产量, 而海洋被视为陆地的延伸, 近年来人类广泛接受的为了粮食生产对自然环境的偏激处理使其日益贫瘠。有人担心这样会对环境造成无法预知的恶果, 因此这些方案自然地受到了强烈的批评。尽管如此, 在海洋中增加少量限制生长的营养对二氧化碳固定以及渔业生产非常有益。这项计划非常可靠的一面在于它基于一定的现实, 即海洋营养可以快速恢复, 或者一旦给环境带来了不利影响可全部立即终止。

可使微藻大规模生产的一项开发源于一个事实, 即异养微藻的生产比光合自养微藻的生产相比有更大的经济优势。因此, 现阶段将严格控制自养的营养级物种(如紫球藻, *Porphyridium cruentum*) 转化成为异养营养级生产者替代物的成功尝试被视为微藻生物技术的一座里程碑。可以想象, 一旦高效的营养转换在实际使用中可以被很容易地实现, 则许多光合自养微藻将以同样简单高效的模式进行商业化种植。通过这种方式, 细菌、酵母和真菌可进行商业化生产。的确, 如果不考虑对光源的需求, 微藻的生长可以被精确地控制, 成千上万升大型培养器皿所装的细胞密度比开放式跑道的最佳状态高 2 个数

量级，与光合自养细胞相比，生产成本可减少一个数量级。

目前来说，开展商业化微藻培养所做的最重要的努力是使用异养微藻作为一条新的、完整的生产线补给动物和水产养殖的饲料，甚至是人类营养的供给。到目前为止，第一条生产线由美国的 MARTEK 开发，涉及长链多不饱和脂肪酸（PUFAs），主要为十二碳六烯酸（DHA）。接下来可能会是给畜牧业提供饲料的生产设施，尤其是水产养殖生产设备。值得注意的是，第一台真正进行大规模工业化生产的微藻 700000L 管式光反应器（分为约 20 亚基）是由生产绿藻作为家禽食品添加剂的德国 IGV 有限公司设计并运行的，该反应器基于营养学的混合营养模式。

在商业化微藻培养中，这种严格的光合自养生产模式将会被逐步淘汰吗？尽管一些微藻物种中的营养转换即将造成冲击，在一定程度上破坏光养生产。但是光合自养微藻对于一些特定用途来说，仍将得到广泛应用，尤其在水产养殖、生物活性化合物、可持续发展环境的水清理以及淡水供应中最为突出。营养药品通常被视为保健食品，且最终可作为人类必需的食物。

由于在许多水产养殖物种养殖周期的关键阶段，大多数的人工替代饲料不如活的微藻饲料，全世界对于微藻需求的日益增加将与水产养殖的预期增长齐头并进。目前，大多数水产养殖企业生产（虽然成功案例有限）的微藻自产自销。既然微藻的培养可以直接用于动物的喂养，从而消除收割和加工环节的必然性，这种实际规模较小的现场生产更具有经济意义。（高价）出售冷冻膏或者高浓缩冷藏培养的集中微藻设施目前只占据水产养殖对活微藻需求的一小部分。一旦建立起异养生产，廉价的微藻饲料被大规模使用，几乎可以肯定，这将极大地推动水产养殖中微藻的集中生产。然而，通过改进大规模种植的实用诀窍，在现场生产的微藻将大量减少，以期在许多孵化场可立即进行光合自养微藻的生产，当地的成本将至少在一定程度上保持其原有的水平。

废水处理是另一项重要任务，其中光合自养微藻表现十分突出。使用光合自养微藻来吸收通过细菌作用处理释放的氧化矿物，转而丰富水中的氧气，促进有氧环境且减少病原体，具有良好的现实意义并且能够在合适地点得到有效利用。在这个基本主题下，从以土地为主体的综合系统之中我们可以看到一个有趣而又富有前景的变化：微藻和细菌在其中起到清洁水产养殖废弃物的作用，转而成为食草动物和滤食性动物的饲料。这些系统与环境紧密结合，且很可能在世界各地得到普及。

自从 20 世纪 50 年代开始商业化大规模微藻养殖以来，产品开发的主流已经转型为健康保健食品市场。考虑到全球财富的不断增长以及西方世界对于素食饮食模式的推崇，我们充分相信这个趋势会持续下去。从小球藻(*Chlorella*)、螺旋藻(*Spirulina*)、节旋藻(*Arthrospira*)和杜氏藻(*Dunaliella*)中采集的药丸及粉末，正被一个极有前景的新成员所丰富，即雨生红球藻(*Haematococcus pluvialis*)。虾青素最初用来制造类胡萝卜素，抗  $\alpha$ -葡萄糖杆菌溶血素黄嘌呤为鱼和虾染色，后来人们发现它是一种优质抗氧化剂，因为其具有抗衰老的潜力。所以目前初期生产指标集中于普通保健品市场。

考虑到这一趋势，作者认为微藻产业将所有的重点都集中在健康食品等类似产品上是一个严重的错误。这是一个利润丰厚的市场，但是这个市场天生狭窄并且无法引起对微藻的大量需求。这种营销重点因为生产成本低，抑制了潜在的需求，可能与阻碍工业大规模微藻培养的发展一样应受责备。这是一种错误的方法，因为它忽略了一个事实，

当正确加工几种微藻[如螺旋藻、小球藻、杜氏藻,以及其他品种如栅藻(*Scenedesmus*)]时,它们会有一种吸引人或开胃的味道,因此可以融入多重人类食物,不断扩大对微藻的需求。因此如果与食品工业联系更为密切,使用食物技术方法去创造无数可能的新食物,我相信微藻工业将获益良多。几乎所有的食物种类,如果添加适当处理的微藻,不仅补充了营养价值,而且也给这些食物增加了新颖、独特、迷人的味道,如意大利面、饼干、马铃薯、玉米片、汤粉及调味料和各类乳制品,甚至各式糖果、冰激凌,它们是一些非常容易实现的例子。

人们花了很多精力去寻找具有治疗潜力的新化合物,体现在不同种类的微藻来说则是那些具有抗菌、抗真菌和抗癌作用的微藻。的确,最近几年报道了很多具有广阔应用前景的新型化学品,其中最主要的是极具营养价值和药用价值的类胡萝卜素、新多糖和自由基清除剂,以及蓝藻细菌、海洋微藻多样性中所具有的大批独特化学物质。考虑到这些可能会丰富制药工厂的未开发资源,可以这样预测:对光合自养微藻这个“金矿”的探索很快就会到来。但是,只有替代来源(也就是一种昂贵的异养生产模式或者说是活性物质的化学合成)不会显现出更加经济更具吸引力的立场,用光和自养培养来生产生物活性物质的前景才能得以显露。

尽管并没有取得实质性进展,但光生物反应器的设计仍然是近年来许多研究的主题。通过减少生产成本的手段,该领域中极具价值的改进无疑会增强化学光合自养的经济基础。目前管状设计似乎变得普及,尽管人们仍对它是否能够代表严格光合自养生产的最优设计存有疑惑。小管径不能与较高的细胞密度相适应,因为后者严格强制快速涡流。在没有氧气积累的情况下,平板反应堆(没有齿槽)可以很容易按照比例增加,它极大地减少光路及所要求的高速涡流,从而帮助高细胞密度培养。由于非常适合利用强光,平板反应堆为显著增加细胞群大规模生产带来了希望。一旦如此,较高细胞密度的生理机能发展(强制规定必须有效利用强光)将得到充分的理解,以便预防或控制生长抑制作用。该生长抑制作用在超高细胞密度的培养中有所表现,阻碍了现阶段此类培养的工业用途。

值得一提的是,考虑到投资以及运行成本,选用反应堆的类型对细胞团和细胞产品生产方面产生了深远影响。未来大多数光合自养模式取决于能否成功大幅度减少这些费用。一定程度上,在开放式槽或者跑道中进行大规模生产所涉及的相对简单、价格不高的技术具有一定的优势,在许多孵化厂和商业生产工厂中经常可以看到类似的实例。可是,绝大部分微藻在开放式系统中不能长期保持以进行连续单一的微藻培养,而且还可能不适合作为广泛使用的人类食物。

本书反映了全世界近五十年来的大规模培养微藻所见证的成功与失败,一些权威人士在各自的相关领域也对此作出了贡献。在这个阶段,处理大规模微藻生产各个方面取得的成就与活跃在五六十年代的先驱者们所取得的光辉成就相比,似乎有些黯然失色。先驱者们有着伟大洞察力,为户外大规模生产光和自养微藻规定了基本生理原则。

因此,那时设想将每平方米(地面)每天可产约为70克的干细胞团作为一个开放体系的实际目标,且该目标可以轻易达到或者超过,对此人们不免有些惊讶。富含蛋白质的细胞团每天的产量代表每公顷年产量约为250吨,是任何农产品产量的好几倍。事实上,这种期望转变成为了一个坚定的前提,积极地将户外大规模培养微藻作为在人口迅

速增长时避免粮食不足的方式。今天看来，这种展望无疑只是个梦想。

那么，早期先行者是完全错误的吗？这个问题实则很难回答。因为目前看来接近于纯粹幻想的东西，将来会有实现的可能性。基因工程的研究方法发挥了其专长，它可以作为高效的营养转换以及通过利用微藻混合由蚊子幼虫携带的致命细菌毒素来治疗疟疾，但是该研究方法只是微藻培养方面未来广阔前景的一个预兆。在不久的将来，我们将会看到有很大改进、快速增长且能力显著提高的微藻种类利用强光进行有效的光合作用，并且光合自养微藻的培养将变成一种经济替代品，为地球上一些炎热干旱的地区提供食品及饲料。

Amos Richmond

本古里安大学布劳斯坦沙漠研究所

塞代博克校区

## 致 谢

本书编写工作持续两年之久。无论这本书价值意义如何，首先参与编撰此书的人员都作出了非常高水平的专业努力，在此向他们致以诚挚谢意。

非常感谢 Mario R. Tredici 教授、Sammy Boussiba 教授，以及胡强（音译）博士在该书编写初期提出的宝贵建议。特别鸣谢 Yair Zarmi 教授对本书第 8 章“大量光合自养培养光利用”这一复杂问题上许多卓有成效的讨论，尤其是他对本章第 8 节（8.8）作出的贡献。

此书是我休假期间在马诺阿夏威夷大学海洋生物产品工程中心做访问学者时所编写的。非常感谢夏威夷大学时任海洋生化工程（MarBEC）主任、热诚好客的查尔斯博士，也感谢该中心全体行政人员所提供的热心帮助。该书出版之际，我在瓦赫宁根大学访问，感谢 Rene Wijffels 博士团队的支持。

Shoshana Dann 女士负责本书格式统一设置方面的很多技术编辑工作且改进了一些章节的语用问题。这项工作繁杂琐碎，在此表示感谢。很荣幸能够获得 Ilana Saller 女士的悉心协助，非常感谢她在筹备出版该书时对本书耐心真诚的润色。

最后衷心感谢我的妻子 Dahlia，她的耐心与鼓励使我可以全心全意投入到本书的编写工作中。

Amos Richmond



## 原书编著者名单

- Prof. Aharon Abeliovich** Department of Biotechnology Engineering, Ben-Gurion University of the Negev, POB 653, 84105 Beer Sheva, Israel
- Prof. Shoshana Arad** Institute of Applied Biology, Ben-Gurion University of the Negev, POB 653, 84105 Beersheva, Israel
- Dr Wolfgang Becker** Medical Clinic, University of Tuebingen, Tuebingen, Germany
- Prof. Ami Ben-Amotz** National Institute of Oceanography, Israel Oceanographic and Limnological Research, POB 8030, Tel Shikmona, 31080 Haifa, Israel
- Dr John R. Benemann** 343 Caravelle Drive, Walnut Creek, CA 94598, USA
- Dr Bi Yonghong** Department of Phycology, Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430080, China
- Dr Susan Blackburn** CSIRO Microalgae Research Center, CSIRO Marine Research GPO Box 1538, Hobart, Tasmania 7001, Australia
- Prof. Sammy Boussiba** Blaustein Institute for Desert Research, Ben-Gurion University of the Negev, Sede Boker Campus, 84990 Midreshet Ben-Gurion, Israel
- Dr G.R. Cysewski** Cyanotech Corporation, 73-4460 Queen Kaahumanu, #102, Kailua-Kona, HI 96740, USA
- Dr F.G. Ación Fernández** Departamento de Ingeniería Química Facultad de Ciencias Experimentales, Universidad de Almería, E-04120 Almería, Spain
- Prof. E. Molina Grima** Departamento de Ingeniería Química Facultad de Ciencias Experimentales, Universidad de Almería, E- 04120 Almería, Spain
- Prof. Johan U. Grobbelaar** Botany and Genetics, University of the Free State, POB 339, 9300 Bloemfontein, South Africa

- Dr Han Danxiang** Department of Phycology, Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430080, China
- Dr Moti Harel** Director of AquaNutrition, Advanced Bio-Nutrition Corp., 6430-C Dobbin Road, Columbia, MD 21045, USA
- Prof. Hu Zhengyu** Department of Phycology, Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430080, China
- Prof. Hiroaki Iwamoto** 3-33-3 Matsubara, Setagaya-ku, Tokyo 156-0043, Japan
- Prof. Ian S.F. Jones** Ocean Technology Group, JO5, University of Sydney, Sydney, NSW 2006, Australia
- Dr Drora Kaplan** Blaustein Institute for Desert Research, Ben-Gurion University of the Negev, Sede Boker Campus, 84990 Midreshet Ben-Gurion, Israel
- Dr Michal Koblížek** Institute of Microbiology, Academy of Sciences, Opatovický Mlýn 37981, Trebon, Czech Republic
- Dr R. Todd Lorenz** Cyanotech Corporation, 73-4460 Queen Kaahumanu, #102, Kailua-Kona, HI 96740, USA
- Dr Jiří Masojídek** Institute of Microbiology, Academy of Sciences, Opatovický Mlýn 37981, Trebon, Czech Republic
- Dr A. Robles Medina** Departamento de Ingeniería Química Facultad de Ciencias Experimentales, Universidad de Almería, E-04120 Almería, Spain
- Prof. Arnaud Muller-Feuga** Production et Biotechnologie des Algues, IFREMER, Center de Nantes, BP 21,105, 44311 Nantes cedex 03, France
- Prof. Allen R. Place** University of Maryland Biotechnology Institute, Center of Marine Biotechnology, 701 E. Pratt st., Baltimore, MD 21202, USA
- Dr Qiang Hu** School of Life Sciences, POB 874501, Arizona State University, Tempe, AZ 85287-4501, USA
- Prof. Qingfang He** Department of Applied Science, University of Arkansas at Little Rock, ETAS 575, 2801 S. University Avenue, Little Rock, AR 72204-1099, USA

- Dr Graziella Chini Zittelli** Istituto per lo Studio degli Ecosistemi, P. le delle  
Cascine 28, 50144 Firenze, Italy
- Mr Oded Zmora** University of Maryland Biotechnology Institute,  
Center of Marine Biotechnology (COMB),  
Baltimore, MD 21202, USA, and National Cen-  
ter for Mariculture, POB 1212, Eilat 8812, Israel

# 目 录

前言

致谢

|   |    |
|---|----|
| <b>1 微藻细胞</b> .....                     | 1  |
| 1.1 微藻在应用藻类学中是什么意思? .....               | 1  |
| 1.2 微藻结构和形态学特征 .....                    | 1  |
| 1.3 超微结构和细胞分裂 .....                     | 4  |
| 1.4 细胞生长和发育 .....                       | 6  |
| 1.5 微藻系统分类学 .....                       | 6  |
| 参考文献 .....                              | 12 |
| <b>2 微藻的光合作用</b> .....                  | 14 |
| 2.1 光合作用过程 .....                        | 14 |
| 2.2 光的性质 .....                          | 15 |
| 2.3 光合色素 .....                          | 16 |
| 2.4 光合作用的光反应 .....                      | 18 |
| 2.5 光合作用暗反应 .....                       | 22 |
| 2.6 光适应 (Falkowski & Raven, 1997) ..... | 24 |
| 2.7 选择使用在微藻生物技术中的监测技术 .....             | 24 |
| 2.8 藻类生产力的理论极限 .....                    | 27 |
| 参考文献 .....                              | 28 |
| <b>3 基本培养技术</b> .....                   | 30 |
| 3.1 微藻的分离 .....                         | 30 |
| 3.2 微藻生物活性分子筛选 .....                    | 31 |
| 3.3 藻株的维护和保存 .....                      | 32 |
| 3.4 生长因素的测量 .....                       | 32 |
| 3.5 培养形式 .....                          | 36 |
| 参考文献 .....                              | 41 |
| <b>4 环境应力生理学</b> .....                  | 43 |
| 4.1 引言 .....                            | 43 |
| 4.2 光照与光合作用速率 .....                     | 43 |
| 4.3 盐度应力 .....                          | 54 |
| 4.4 总结评述 .....                          | 56 |
| 4.5 总结 .....                            | 56 |
| 参考文献 .....                              | 57 |
| <b>5 环境因素对细胞成分的影响</b> .....             | 62 |
| 5.1 引言 .....                            | 62 |

|          |                       |            |
|----------|-----------------------|------------|
| 5.2      | 环境因子                  | 62         |
| 5.3      | 营养因子                  | 63         |
| 5.4      | 盐度                    | 65         |
| 5.5      | 物理化学的协同作用对于细胞组分的影响    | 65         |
| 5.6      | 利用生物技术手段控制细胞组分        | 66         |
|          | 参考文献                  | 67         |
| <b>6</b> | <b>藻类营养：矿物营养</b>      | <b>70</b>  |
| 6.1      | 营养方式                  | 70         |
| 6.2      | 营养需求                  | 71         |
| 6.3      | 藻类生长营养培养基的配方          | 76         |
| 6.4      | 氮和磷的摄取                | 76         |
| 6.5      | 有限资源（营养物）的竞争          | 79         |
| 6.6      | 养分比例                  | 80         |
| 6.7      | 影响养分吸收的物理因素           | 81         |
|          | 参考文献                  | 82         |
| <b>7</b> | <b>藻类营养：异养的碳营养</b>    | <b>84</b>  |
| 7.1      | 有机 C 培养基的吸收           | 84         |
| 7.2      | 生长和生产率                | 85         |
| 7.3      | 养殖系统和生产成本             | 86         |
| 7.4      | 混合营养                  | 86         |
|          | 参考文献                  | 88         |
| <b>8</b> | <b>微藻大规模培养的生物学原理</b>  | <b>91</b>  |
| 8.1      | 光照：生长以及生产能力主要影响因素     | 91         |
| 8.2      | 细胞浓度：细胞光体系培养中的显著影响因素  | 93         |
| 8.3      | 光能自养型搅拌混合培养           | 98         |
| 8.4      | 光照和黑暗（L-D）循环频率        | 101        |
| 8.5      | 光程：光合培养中生长和产能的决定性因素   | 102        |
| 8.6      | 超高密度细胞培养              | 103        |
| 8.7      | 光程作用于培养菌生产率的光合作用的反应时间 | 109        |
| 8.8      | 平均光照强度                | 112        |
| 8.9      | 用于光合生产力的阳光和强光照的有效利用   | 113        |
| 8.10     | 大规模培养中的光合效率（见第 2 章）   | 119        |
| 8.11     | 大规模培养的维持              | 123        |
|          | 参考文献                  | 127        |
| <b>9</b> | <b>微藻大规模生产：光生物反应器</b> | <b>132</b> |
| 9.1      | 简介                    | 132        |
| 9.2      | 开放式池塘                 | 132        |
| 9.3      | 光生物反应器                | 135        |
| 9.4      | 商业化 PBR               | 145        |

|           |                                  |            |
|-----------|----------------------------------|------------|
| 9.5       | PBR 设计标准                         | 149        |
| 9.6       | PBR 的生产率                         | 151        |
| 9.7       | PBR 和开放式反应池比较                    | 153        |
| 9.8       | PBR 的放大                          | 153        |
| 9.9       | 总结和展望                            | 154        |
|           | 参考文献                             | 155        |
| <b>10</b> | <b>细胞团及产物的下游处理</b>               | <b>159</b> |
| 10.1      | 引言                               | 159        |
| 10.2      | 获取过程                             | 159        |
| 10.3      | 脱水                               | 167        |
| 10.4      | 细胞破碎                             | 170        |
| 10.5      | 产品分离                             | 172        |
| 10.6      | 产品纯化                             | 174        |
| 10.7      | 成本考虑：个案研究分析                      | 175        |
| 10.8      | 结束语                              | 180        |
| 10.9      | 术语                               | 181        |
|           | 参考文献                             | 184        |
| <b>11</b> | <b>微藻细胞团及其副产物的工业生产——大量工业类小球藻</b> | <b>188</b> |
| 11.1      | 引言                               | 188        |
| 11.2      | 工业背景                             | 188        |
| 11.3      | 营养收益                             | 189        |
| 11.4      | 兼养生产                             | 189        |
| 11.5      | 异养产品（参见第 20 章和第 31 章）            | 191        |
|           | 参考文献                             | 193        |
| <b>12</b> | <b>微藻细胞团及其副产物的工业生产——大量工业类螺旋藻</b> | <b>195</b> |
| 12.1      | 引言                               | 195        |
| 12.2      | 主要形态、细胞结构和分类特征                   | 195        |
| 12.3      | 生理学、生物化学和基因特征                    | 196        |
| 12.4      | 世界上工业生产                          | 197        |
| 12.5      | 节旋藻生物量及其衍生生物制品                   | 198        |
| 12.6      | 水华束丝藻                            | 199        |
|           | 参考文献                             | 200        |
| <b>13</b> | <b>微藻细胞团及其副产物的工业生产——主要的工业品种</b>  | <b>202</b> |
| 13.1      | 生物学和盐度耐受力                        | 202        |
| 13.2      | $\beta$ -胡萝卜素                    | 203        |
| 13.3      | 杜氏藻的 $\beta$ -胡萝卜素生物合成           | 204        |
| 13.4      | 番茄红素生产的生物技术                      | 205        |
| 13.5      | 杜氏藻市场产品                          | 206        |
| 13.6      | 商业生产者                            | 206        |

|   |            |
|---|------------|
| 参考文献  | 206        |
| <b>14 微藻细胞团及其副产物的工业生产——高潜能物质：红球藻属</b>           | <b>208</b> |
| 14.1 简介   | 208        |
| 14.2 虾青素的化学成分                                   | 208        |
| 14.3 工业应用                                       | 209        |
| 14.4 生产技术                                       | 210        |
| 14.5 总结   | 213        |
| 参考文献  | 213        |
| <b>15 微藻细胞团及其副产物的工业生产——高潜能物质：紫球藻属</b>           | <b>215</b> |
| 15.1 红藻多糖：概要                                    | 215        |
| 15.2 环境对多糖生产的影响                                 | 216        |
| 15.3 固定碳的分离                                     | 216        |
| 15.4 细胞壁多糖的功能                                   | 217        |
| 15.5 紫球藻户外培养的基本生理反应                             | 217        |
| 15.6 环境对细胞组成以及多不饱和脂肪酸的影响                        | 218        |
| 15.7 紫球藻的户外大规模生产                                | 218        |
| 参考文献  | 219        |
| <b>16 微藻细胞团及其副产物的工业生产——高潜能物质：在封闭的环境下大规模培养微藻</b> | <b>222</b> |
| 16.1 概述   | 222        |
| 16.2 室内培养体系                                     | 222        |
| 16.3 室外培养光生物反应器                                 | 223        |
| 16.4 结束语  | 224        |
| 参考文献  | 225        |
| <b>17 微藻细胞团及其高潜能副产物的工业生产：念珠藻</b>                | <b>227</b> |
| 17.1 形态   | 227        |
| 17.2 生长环境                                       | 227        |
| 17.3 影响因素                                       | 228        |
| 17.4 生殖与发展                                      | 229        |
| 17.5 化学组成                                       | 229        |
| 17.6 培养   | 231        |
| 参考文献  | 231        |
| <b>18 人类和动物营养学中的微藻</b>                          | <b>233</b> |
| 18.1 引言   | 233        |
| 18.2 藻类的化学成分                                    | 233        |
| 18.3 毒理学方面                                      | 240        |
| 18.4 藻类消化过程的影响                                  | 242        |
| 18.5 新陈代谢研究                                     | 243        |
| 18.6 毒理学  | 243        |

|                               |            |
|-------------------------------|------------|
| 18.7 藻类的动物饲料用途                | 246        |
| 18.8 藻类的治疗作用                  | 248        |
| 18.9 藻类的降胆固醇功能                | 255        |
| 18.10 营养质量标准                  | 256        |
| 参考文献                          | 258        |
| <b>19 用于水产养殖的微藻：全球现状及未来趋势</b> | <b>262</b> |
| 19.1 介绍—水产养殖—快速发展计划           | 262        |
| 19.2 过滤性软体动物                  | 263        |
| 19.3 虾类                       | 265        |
| 19.4 鱼类                       | 266        |
| 19.5 精炼水产养殖的产品                | 267        |
| 19.6 未来发展                     | 268        |
| 参考文献                          | 269        |
| <b>20 用于水产养殖的微藻：微藻产物</b>      | <b>271</b> |
| 20.1 在可控的密闭体系中培养微藻            | 271        |
| 20.2 在开放式培养体系中生产微藻            | 275        |
| 20.3 水产养殖与微藻培养的一体化            | 279        |
| <b>21 用于水产养殖的微藻：微藻营养价值</b>    | <b>283</b> |
| 21.1 引言                       | 283        |
| 21.2 微藻的化学成分及营养价值             | 285        |
| 21.3 虾青素                      | 286        |
| 21.4 加工微藻的制备                  | 288        |
| 参考文献                          | 290        |
| <b>22 固氮蓝藻菌作为生物肥料在稻田的应用</b>   | <b>292</b> |
| 22.1 自生的蓝藻细菌                  | 292        |
| 22.2 共生藻：满江红                  | 296        |
| 22.3 结论                       | 299        |
| 参考文献                          | 299        |
| <b>23 使用微藻生产氢和甲烷</b>          | <b>301</b> |
| 23.1 背景                       | 301        |
| 23.2 光合作用效率                   | 301        |
| 23.3 微藻的氢代谢                   | 303        |
| 23.4 直接生物光解                   | 304        |
| 23.5 间接生物光解过程                 | 305        |
| 23.6 利用微藻发酵生产氢气和甲烷            | 306        |
| 23.7 结论                       | 307        |
| 23.8 综述                       | 308        |
| 参考文献                          | 309        |



|   |     |
|---|-----|
| <b>24 水污染和微藻的生物修复：富营养化和水中毒</b> .....        | 312 |
| 24.1 富营养化过程 .....                           | 312 |
| 24.2 营养物对富营养化影响 .....                       | 312 |
| 24.3 藻类水华的毒性作用 .....                        | 313 |
| 24.4 控制富营养化 .....                           | 317 |
| 24.5 毒素产生藻类的潜在用途 .....                      | 318 |
| 参考文献 .....                                  | 318 |
| <b>25 水污染和微藻的生物修复：水净化——废水氧化池中的微藻</b> .....  | 321 |
| 25.1 引言 .....                               | 321 |
| 25.2 稳定池管理原则 .....                          | 321 |
| 25.3 集约化养殖废物 .....                          | 324 |
| 25.4 工业废水 .....                             | 324 |
| 25.5 总结 .....                               | 326 |
| 参考文献 .....                                  | 326 |
| <b>26 水污染和微藻的生物修复：微藻对重金属的吸收和吸附</b> .....    | 328 |
| 26.1 引言 .....                               | 328 |
| 26.2 微藻和重金属的关系 .....                        | 328 |
| 26.3 金属解毒 .....                             | 330 |
| 26.4 微藻在重金属生物修复方面的潜在应用 .....                | 331 |
| 参考文献 .....                                  | 332 |
| <b>27 能够引起水污染和生物修复的微藻：微藻对饮用水水质的影响</b> ..... | 335 |
| 27.1 引言 .....                               | 335 |
| 27.2 微藻对水质净化的作用 .....                       | 335 |
| 27.3 微藻对水质的负面影响 .....                       | 336 |
| 27.4 通过退田还湖从藻类中重获生态效益 .....                 | 337 |
| 参考文献 .....                                  | 338 |
| <b>28 蓝藻目的基因修饰：新生物技术的应用</b> .....           | 339 |
| 28.1 引言 .....                               | 339 |
| 28.2 序列信息 .....                             | 340 |
| 28.3 转化 .....                               | 341 |
| 28.4 代谢的灵活性 .....                           | 342 |
| 28.5 突变体的使用 .....                           | 343 |
| 28.6 生物技术方向的重要性 .....                       | 346 |
| 参考文献 .....                                  | 347 |
| <b>29 作为重组蛋白平台的微藻</b> .....                 | 350 |
| 29.1 引言 .....                               | 350 |
| 29.2 藻类转化 .....                             | 350 |
| 29.3 营养型工程 .....                            | 352 |
| 29.4 表达水平优化 .....                           | 352 |