



应用微藻 生物学

YINGYONG WEIZAO SHENGWUXUE

邓祥元 编著



海洋出版社

应用微藻生物学

邓祥元 编著



海洋出版社

2016年·北京

图书在版编目 (CIP) 数据

应用微藻生物学/邓祥元编著. —北京: 海洋出版社, 2016. 11
ISBN 978-7-5027-9615-0

I. ①应… II. ①邓… III. ①微藻-生物学 IV. ①Q949.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 270724 号

责任编辑: 江 波 王 溪

责任印制: 赵麟苏

海洋出版社 出版发行

<http://www.oceanpress.com.cn>

北京市海淀区大慧寺路 8 号 邮编: 100081

北京画中画印刷有限公司印刷 新华书店北京发行所经销

2016 年 11 月第 1 版 2016 年 11 月第 1 次印刷

开本: 787 mm×1092 mm 1/16 印张: 9.75

字数: 220 千字 定价: 38.00 元

发行部: 62132549 邮购部: 68038093 总编室: 62114335

海洋版图书印、装错误可随时退换

前 言

微藻是一类古老的低等植物，环境适应能力很强，可在淡水、海水和多种污水中生长，仅占用少量的土地资源。微藻细胞中含有多种价值高的营养成分和化工原料，细胞中的脂肪、蛋白质、色素和多糖等，现已在能源、环境、食品和医药卫生等领域得到广泛应用。在能源领域，微藻有望成为继粮食作物生物乙醇、纤维素生物乙醇和陆生作物生物柴油之后第三代生物质能源的原材料；在环境领域，微藻有大幅减排温室气体 CO_2 的潜力，并在处理生活和工业污水等方面有广阔的应用前景；在食品领域，微藻有潜力为人类提供大量单细胞蛋白质、植物油脂、类胡萝卜素类和 ω -3 长链不饱和脂肪酸等食品或食品添加剂；在医药卫生领域，从微藻生物资源中获得新的抗生素、抗癌和抗病毒药物等将是未来医药产品的重要来源。

微藻的培养和研究始于 18 世纪末，主要是栅藻和小球藻等淡水藻类，目的是作为研究植物生理学的实验材料。直到 1910 年，Allen 和 Nelson 才开始培养纯种硅藻以饲养各种无脊椎动物，开启了应用微藻生物学的相关研究工作。自 20 世纪 50 年代人们认识到微藻的开发价值和巨大经济潜力以来，应用微藻生物学迅速发展。据统计，全世界有关应用微藻生物学的专利在 1953—1980 年的 27 年间共 77 项，平均每年仅 2.85 项；在 1981—1993 年的十几年间应用微藻生物学的发展速度很快，专利数量达到了 194 项，平均每年 16.17 项；自 1995 年以来应用微藻生物学的发展在全世界范围内呈现出快速发展的势头，研究成果无论在数量还是在质量上都有了很大的进步，很多实验室的研究成果也逐步实现了产业化。尤其是近 5 年来，随着陆地能源、生物资源的日益紧张，世界各国政府、企业和相关研究者对应用微藻生物学给予了高度关注。

近年来，微藻生物技术的发展取得了令人瞩目的巨大成就，与此相对应，应用微藻生物学的相关研究工作也得到了普遍重视。为进一步促进应用微藻生物学的发展，满足应用微藻生物学的教学科研和产品开发生产的需要，本书以综述性文章为主，结合作者近几年在应用微藻生物学领域的相关研究工作，对国内外应用微藻生物学的基本内容和最新发展作了系统的阐述和总结。本书共分十章，第一章，绪论；第二章，微藻基础生物学；第三章，微藻生物活性物质及应用；第四章，应用微藻生物学的基本技术；第五章，微藻培养设备；第六章，微藻产品的下游处理技术；第七章，微藻生物能源的开发与利用；第八

章，微藻饵料的应用；第九章，微藻在环境修复中的应用；第十章，微藻在食品工业中的应用。

本书的出版将为我国微藻产业的快速发展起到积极的推进作用，同时也将为水生生物学、海洋生物学、生物技术、环境科学、生物工程、食品工程和制药工程等专业的本科生和研究生提供一本有价值的专业教材。此外，本书也可作为从事微藻产业的相关科研技术人员的工具书和参考书。

由于作者的水平和经验有限，书中难免存在不当、错误和遗漏之处，敬请广大读者及同行批评和指正。

作 者

2016 年 5 月

目 录

第一章 绪 论	(1)
一、应用微藻生物学的概念	(1)
二、应用微藻的特性	(1)
三、应用微藻生物学的发展简史	(2)
四、应用微藻生物学的学习方法	(4)
第二章 微藻基础生物学	(5)
第一节 微藻的生物学特性	(5)
一、微藻的形态特征	(5)
二、微藻的结构特征	(5)
三、微藻的生长与繁殖	(12)
第二节 微藻的营养需求	(16)
第三节 微藻的 CO ₂ 浓缩机制	(18)
一、微藻碳酸酐酶	(18)
二、无机碳利用形式	(19)
三、无机碳浓缩机制	(20)
第四节 微藻的光合作用	(20)
一、光的性质	(20)
二、光合色素	(21)
三、光合作用的光反应	(22)
四、光合作用的碳反应	(24)
五、光呼吸	(26)
六、微藻光合特性的监测技术	(26)
第五节 几种常见的经济微藻	(30)
一、绿藻门 (Chlorophyta)	(30)
二、硅藻门 (Bacillariophyta)	(32)
三、金藻门 (Chrysophyta)	(34)
四、蓝藻门 (Cyanophyta)	(35)
五、黄藻门 (Xanthophyceae)	(35)
第三章 微藻生物活性物质及应用	(36)
第一节 微藻生物活性物质	(36)
一、脂肪酸	(36)
二、微藻多糖	(37)

三、藻胆蛋白	(37)
四、微藻色素	(39)
五、微藻毒素	(39)
六、抗生素	(40)
七、维生素和矿物质	(40)
八、利用微藻生产生物活性物质的优缺点	(41)
第二节 微藻的应用	(42)
一、微藻的应用特点	(42)
二、微藻的应用领域	(42)
第四章 应用微藻生物学的基本技术	(46)
第一节 微藻的分离纯化与种质保存技术	(46)
一、微藻样品的采集	(46)
二、微藻的分离纯化	(47)
三、藻种种质的保存技术	(49)
第二节 微藻培养液及其制备	(52)
一、微藻培养液成分	(52)
二、微藻培养液的制备	(55)
第三节 微藻培养模式	(56)
一、批次培养	(56)
二、流加培养模式	(56)
三、半连续培养模式	(57)
四、连续培养模式	(58)
第四节 微藻培养的影响因素	(59)
一、光照对微藻生长的影响	(59)
二、温度对微藻生长的影响	(62)
三、盐度对微藻生长的影响	(62)
四、营养盐对微藻生长的影响	(63)
五、二氧化碳的供给对微藻生长的影响	(65)
第五章 微藻培养设备	(66)
第一节 光生物反应器	(66)
一、光生物反应器及其研究进展	(66)
二、光生物反应器的主要类型和特点	(67)
三、开放式与密闭式光生物反应器的主要优缺点	(75)
第二节 光生物反应器的设计与检测技术	(75)
一、光生物反应器的设计	(75)
二、光生物反应器中的检测技术	(77)
第六章 微藻产品的下游处理技术	(78)
第一节 微藻采收技术	(78)

一、传统的微藻采收方法	(78)
二、微藻采收新技术	(82)
第二节 微藻细胞破碎技术	(83)
一、细胞破碎技术概述	(83)
二、几种常用的细胞破碎技术	(84)
第三节 微藻生物活性物质的提取技术	(87)
一、微藻生物活性物质提取技术概述	(87)
二、常用提取方法	(87)
三、浓缩与干燥	(95)
第七章 微藻生物能源的开发与利用	(98)
第一节 微藻作为新生物能源原料的可行性	(98)
第二节 微藻生产生物燃料的研究进展	(100)
一、世界各国开发微藻生物能源的有关情况	(100)
二、我国微藻生物能源开发的有关情况	(102)
第三节 产油微藻	(103)
一、产油微藻种类	(103)
二、利用基因工程技术培育产油微藻	(104)
第四节 微藻生物质转化生物能源	(105)
一、物理转化途径	(105)
二、生物化学转化途径	(105)
三、热化学转化途径	(105)
第八章 微藻饵料的应用	(107)
第一节 饵料微藻的功能	(107)
一、饵料微藻的功能	(107)
二、决定饵料微藻功能的因素	(108)
第二节 饵料微藻的评价	(110)
一、常用饵料微藻的主要营养成分	(110)
二、常用饵料微藻氨基酸成分的营养评价	(111)
三、饵料微藻糖类的营养评价	(113)
四、饵料微藻脂肪酸的营养评价	(114)
五、饵料微藻的发展趋势	(114)
第九章 微藻在环境修复中的应用	(117)
第一节 微藻在污水处理中的应用	(117)
一、污水的主要组成	(117)
二、微藻处理污水的原理	(118)
三、利用微藻处理污水的优势	(118)
四、微藻在处理污水中的应用	(119)
五、利用微藻处理污水的常见应用类型	(120)

六、利用微藻处理污水的发展趋势	(122)
第二节 微藻在生物减排 CO ₂ 中的应用	(123)
一、微藻固定 CO ₂ 的机制	(123)
二、微藻减排 CO ₂ 的应用	(124)
三、微藻减排 CO ₂ 的应用实例	(127)
四、微藻减排 CO ₂ 的发展趋势	(128)
第十章 微藻在食品工业中的应用	(129)
第一节 微藻食品概述	(129)
一、微藻食品	(129)
二、微藻保健与功能食品	(130)
第二节 微藻在食品工业中的应用	(131)
一、螺旋藻在食品工业中的应用	(131)
二、小球藻在食品工业中的应用	(136)
第三节 微藻食品安全性评价	(140)
一、微藻食品的安全性	(140)
二、微藻食品的安全性保证措施	(141)
主要参考文献	(143)

第一章 绪 论

应用微藻生物学 (Applied microalgae biology) 是微藻生物学与理学、工学、农学、医学等深入结合并广泛应用的学科,也是科学技术现代化和工农业现代化的重要学科领域之一,是一门理论性和实践性很强的学科。

一、应用微藻生物学的概念

应用微藻生物学是以一定的直接或间接应用目标研究微藻及其相互作用和与环境相互作用的科学。实际上就是利用微藻与微藻生物学的基础知识和工程原理,通过生物技术手段为人类提供各类微藻生物制品和社会服务的综合性科学。在本质上,应用微藻生物学与现代农业生物技术有一定的相似性,即在现代农业生物技术的基础上,充分利用太阳能大量生产生物量,用作人类的有机资源。

应用微藻生物学涵盖以下五个方面的研究内容。

①微藻生物学的基础研究,主要包括新藻种(株)的筛选、分离和鉴定,微藻生长及生理生化特性,微藻培养条件优化,微藻生物活性物质的调查分析等。

②微藻大规模培养技术研究,主要包括各种新型高效光生物反应器的研制和微藻高密度培养技术工艺的建立。

③微藻产品开发及其应用研究,主要包括微藻在食品、药品、化妆品、能源、环境等领域的相关产品开发及应用。

④微藻采收技术的研究,主要包括采收方法的建立,采收工艺的优化及大规模应用等。

⑤微藻下游处理工艺的研究,主要包括新型分离介质和分离纯化工艺等研究内容。

二、应用微藻的特性

微藻 (Microalgae) 也称单细胞藻类,是指那些在显微镜下才能辨别其形态的微小藻类类群。地球上约有 3 万余种不同的微藻,占全球已知藻类的 70% 左右。它们个体微小,从几微米至几十微米,结构简单,单细胞或单细胞群体,绝大多数能够自养生活,广泛分布于淡、海水中。它们具有如下特性。

①一般而言,微藻可以被理解为是介于陆地微生物与植物细胞之间的一类单细胞生物,其主要异同点如表 1-1 所示。由于微藻细胞内具有叶绿素、藻胆蛋白等光合器官,是非常有效的光合作用生物系统,能高效地利用太阳能,并通过光合作用将 H_2O 、 CO_2 和无机盐转化为有机化合物,因其可以快速、高效地固定和利用 CO_2 ,是解决热电厂等各类工厂大量排放的 CO_2 、减少地球温室效应的有效途径之一。

表 1-1 微藻、植物细胞和微生物的比较

特性	微藻	微生物	植物细胞
大小	10~100 μm 或更长	2~10 μm	10~200 μm
细胞	单细胞	单细胞	常成团存在
营养方式	自养或异养（少数）	异养	自养
培养周期	5~10 天	2~4 天	15~30 天
生长速度	较快	快	慢
接种量	5%~10%	1%~5%	5%~20%
培养浓度	较高	高	较低
CO ₂	需要	不需要	需要
O ₂	不需要	高度需要/不需要	不需要
培养规模	容易放大	容易放大	不容易放大
对剪切力	相对不敏感/容忍	不敏感	敏感
培养技术要求	较低	高	高
代谢产物	种类多	较单一	较单一
投资	较低	高	高

②微藻一般是以简单的分裂式繁殖，细胞周期较短，易于进行大规模培养，由于微藻通常无复杂的生殖器官、缺少细胞壁，使整体生物量容易采取和直接利用。

③微藻具有很好的适应性，经过人工培育，它们可以用海水、咸水或半咸水进行大量培养；因此，是短缺淡水、土地贫瘠地区获得有效生物资源的重要途径。

④微藻细胞不仅富含蛋白质、脂肪和碳水化合物，某些种类微藻细胞在特定的环境条件下还可以大量合成和积累脂类化合物、微量元素和矿物质，是人类未来重要的食品及生物能源资源。

⑤微藻、尤其是海洋微藻，因其独特的生存环境使其能合成许多结构和生理功能独特的生物活性物质。特别是经过一定的诱导手段，微藻可以高浓度地合成这些具有商业化生产价值的化合物，是人类未来医药品、保健品和化工原料的希望。

三、应用微藻生物学的发展简史

微藻的培养和研究始于 18 世纪末，主要是栅藻和小球藻等淡水藻类，目的是作为研究植物生理学的试验材料。早在 100 多年以前科学家们就发现小球藻（*Chlorella* sp.）等一些特有的微藻具有快速生长繁殖的特性，有可能作为一种新的生物量资源被大量培养生产，为人类所利用。从此开启了应用微藻生物学的相关研究工作，其发展大致经历了一百多年的时间，大体上可分为四个发展阶段。

1. 微藻的认识与调查阶段（1850—1940 年）

最早注意到微藻细胞的是显微镜专家 Baily，他于 1841 年发现了微藻类的化石并对来源于淡水和海水的微藻类进行了较详细的考查，被誉为美国的第一位藻类学家。Durant 在

其 1850 年发表的著作和 Pieters 于 1867 年的一份科学报告中对各种藻类进行了较详细的报道和描述,并将这些藻类分为 25 个属。经过 30 多年的积累,在前人工作的基础上, Snow 于 1903 年将藻类扩展到 103 个属,并且成功地在实验室中进行了相关培养研究,使其成为第一个发展藻类培养技术的人。

在上述研究工作的基础上, West 等于 1916 出版了第一本藻类学专著《藻类》,该书全面总结了前几十年有关藻类学的知识,为以后的藻类研究奠定了良好的基础。此后《北美东海岸藻类》《美国淡水藻类》《藻类的结构和生产》和《新格兰海洋藻类》等几部专著分别对藻类资源的分布、藻类的品种、形态、分类、藻类与环境的关系、藻类与水生动物和人之间的相互关系、藻类的生活史和藻类在食物链中的作用与地位等多方面进行介绍,使人类对藻类有了比较全面的认识。

2. 应用微藻生物学的起步阶段 (1940—1980 年)

在此阶段对藻类的生理生化特性、藻类光合作用机理、藻类的培养条件、实用藻株的筛选与开发、藻类的大规模培养,藻类产品及藻类生物活性物质的开发以及藻类产品的应用和经济学评价等涉及应用微藻生物学的各个层面的有关问题进行了多方位、深层次研究,初步建立起来一个比较完整的微藻生物学的研究体系。

《从实验室到小型工厂的藻类培养》一书是此阶段的最重要代表著作。该书对微藻的生长条件、大规模培养技术、微藻的应用及各种有效成分的分析等方面进行了全面总结,为应用微藻生物学的发展起到了承前启后及指导性的作用。在产业化方面,此时期开发出了以开放式跑道池为主体的开放式培养系统,该培养系统尽管简陋,但由于该系统结构简单、建造容易、投资低以及整体技术相对简单,使其在许多国家和地区得到了推广和应用,实现了小球藻 (*Chlorella*)、螺旋藻 (*Spirulina*) 和盐藻 (*Dunaliella*) 等一些有应用价值微藻的大规模培养,从而加快了应用微藻生物学研究成果的产业化进程。

随着研究的深入以及一些微藻的大规模培养和应用方面的成功,使人类对应用微藻生物学的前途和其巨大的经济潜力给予了肯定,并引起了世界各国政府和学者的重视。1946—1959 年,美国、英国、日本、法国、捷克斯洛伐克、菲律宾和印度等国家分别成立了国家级藻类学会,国际藻类学会也于 1961 年宣布成立。上述国家的政府也加大了对该研究领域的经济资助,加快了应用微藻生物学的发展。

3. 应用微藻生物学的形成阶段 (1980—2000 年)

20 世纪 80 年代以来,应用微藻生物学十分重视基础研究与工程技术的结合,形成了自己的特色,进而形成了真正的体系。现代应用微藻生物学包含以下几方面内容:微藻基础研究,包括新藻种(株)的筛选和开发、微藻的生理生化特性、培养条件、微藻有效成分及各种活性物质的调查分析等内容;微藻产品开发及其应用研究;基因工程微藻研究;微藻大规模培养技术,包括各种新型高效光生物反应器的研制和微藻高密度培养技术;微藻生物量及其代谢产物的采收技术,其中包括新型分离介质和分离纯化工艺等研究内容等。

4. 应用微藻生物学的成熟与快速发展阶段 (2000 年至今)

进入 21 世纪以来,随着应用微藻生物学研究体系的日益成熟,与应用微藻生物学相

关的各类研究尤其是在微藻的应用与开发方面有了很大的发展，主要体现在以下几个方面：①建立起来了比较完整、成熟的应用微藻生物学研究体系；②基础研究日趋完善，多个国家的研究单位建立起了具有一定规模的微藻种子库，各类适合微藻大规模培养的光生物反应器和微藻高密度培养技术先后被开发出来，为微藻的进一步研究与开发奠定了坚实的基础；③一大批微藻保健食品、药品及具有实际应用潜力的微藻活性物质的应用与开发使微藻生物量走向市场成为现实；④转基因技术与应用微藻生物学的结合使转基因微藻和生物能源微藻的构建成为可能，为微藻的深度开发与利用指明了方向；⑤由于看到了微藻的实际贡献和其巨大的开发潜力，应用微藻生物学受到了国内外广大学者及政府有关部门的重视和支持，目前包括我国在内的各国政府、大型企业、科研单位纷纷投入大量的资金与人力，将微藻的大规模培养及其天然活性物质的分离提取等技术放在重要的地位，使应用微藻生物学成为当今世界的热点研究领域之一，给应用微藻生物学的发展带来了前所未有的机遇。

四、应用微藻生物学的学习方法

应用微藻生物学是一门理论性和实践性很强的学科。在学习过程中，不仅要进行微藻种类的识别，还要认真地了解微藻的生物学特性和用途，微藻的培养条件；同时还要利用工程学的理念和技术，学习微藻的高密度培养及相关产品开发等。总之，在学习过程中，要做到勤学、勤问、勤练习、勤思考、勤实践，不断积累，以达到开发利用微藻生物资源的目的。

第二章 微藻基础生物学

应用微藻生物学的研究对象是微藻，其最重要的基础工作是获得优质藻种，要获得优质藻种，对微藻基础生物学的研究尤为重要。首先，我们需更深入认知自然界中微藻物种的多样性，并从中获得有应用价值的物种，这就需要我们了解和掌握微藻的形态特征、结构特征及繁殖方式等基本的生物学特性。其次，由于微藻不同物种间生物学特性差异很大，所以要针对有潜力作为应用微藻开发的物种进一步进行基础生物学的相关研究。微藻基础生物学研究是认识、改造、开发和利用微藻资源的基本工作，本章主要从微藻的生物学特性、营养需求、光合作用机制等几个方面对微藻的基础生物学特点做一概述，并简要介绍几种常用经济微藻的生物学特性。

第一节 微藻的生物学特性

一、微藻的形态特征

1. 单细胞藻体 (unicellular thallus)

藻体由一个细胞组成，有或无鞭毛，游动或不游动，它们的个体大小、形态和结构有很大差异。细胞呈球形、椭圆形、卵圆形、多角形、三角形、圆筒形、纺锤形、杆形、弓形、新月形、囊状或片状等（图 2-1）。

2. 群体 (colony)

此类微藻的藻体由许多单细胞的个体聚集而成，群体或由细胞直接相连、或被胶质所包埋而成。能或不能游动，定形或不定形。定形群体是由一定数目的细胞组成的、具有一定形状和结构的群体，呈球形、列片状、扇状、链状或栅状等。不定形群体中的细胞数目不定，并且没有一定的形状（图 2-2）。

3. 多细胞藻体 (multicellular thallus)

此类微藻的藻体由许多细胞组成，细胞间有或无胞间连丝，根据多细胞体的形状，又将其分为丝状体、异丝体、膜状体等多种形态类型（图 2-3）。

二、微藻的结构特征

1. 细胞壁 (cell wall)

细胞壁为原生质体的分泌物，坚韧且具有一定形状，表面平滑或具有各种纹饰、突起、棘、刺等。大多数微藻种类都有细胞壁，少数种类没有细胞壁而有周质体，有些具有囊壳。细胞壁的主要作用是支持和保护细胞中的原生质体，同时可防止细胞吸涨而破裂。

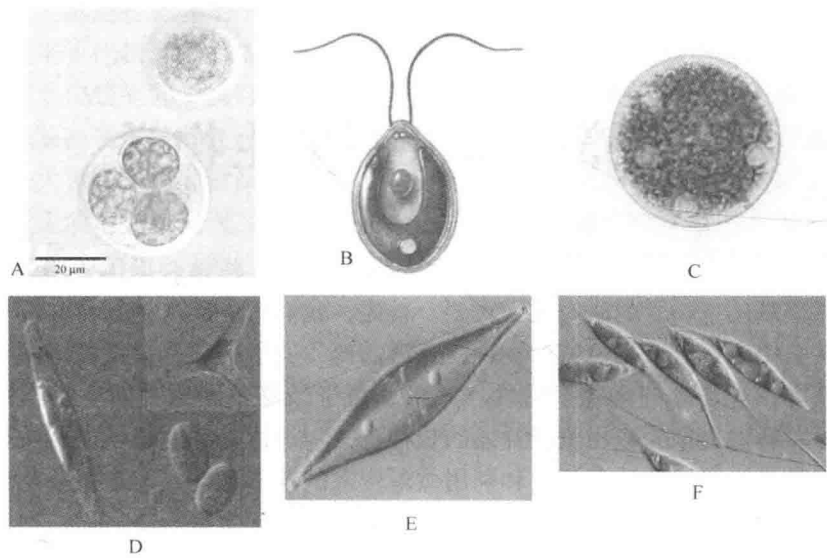


图 2-1 单细胞微藻类型

A. 小球藻细胞; B. 衣藻细胞; C. 雨生红球藻细胞;
D. 三角褐指藻细胞; E. 舟形藻细胞; F. 弓形藻细胞

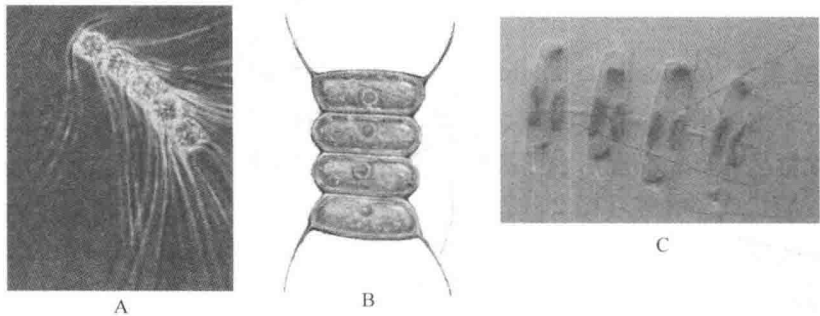


图 2-2 群体微藻类型

A. 角毛藻; B. 栅藻; C. 海链藻

细胞壁含有许多具有生理活性的蛋白质，参与许多生命活动过程，如微藻细胞的生长、物质的吸收、运输、分泌、细胞间的相互识别、细胞分化时的细胞壁分解等。

微藻的细胞壁通常由两种成分组成：一种是纤维组分，用来形成细胞壁骨架；另一种是无定形组分，形成一层内部包埋有纤维组分的基质。蓝藻细胞壁的主要成分为肽葡聚糖，与细菌类相同，均可被溶菌酶溶解。绝大多数蓝藻的细胞壁外均具有或厚或薄的胶质鞘，故蓝藻也称为粘藻。绿藻细胞壁主要成分是多糖，包括纤维素、果胶质和半纤维素。红藻和褐藻细胞壁由纤维素（内层）和藻胶（外层）内外两层构成，无定形黏液成分含量最高，其含有的多糖可用于商业开发。红藻细胞壁外层的胶质成分为琼胶、海萝胶和卡拉胶等；褐藻细胞壁外层含有几种不同的藻胶，主要是褐藻胶。硅藻含有二氧化硅的特化

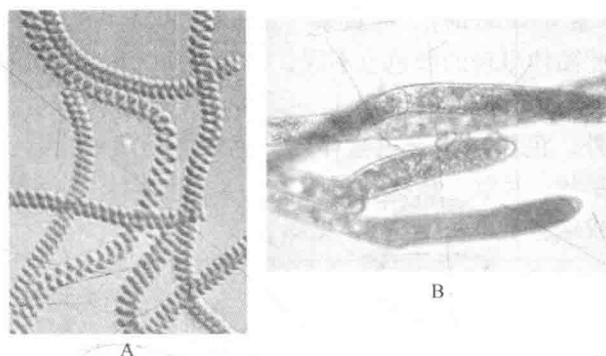


图 2-3 多细胞体微藻类型

A. 螺旋藻；B. 刚毛藻

细胞壁，通常被称为“壳壁”，是由两个半瓣、似培养皿那样套合而成的，主要成分是果胶质和硅酸，其中硅酸在壳壁上有规律地排列分布，成为硅藻分类的主要依据。金藻门中有细胞壁的物种的细胞壁主要由果胶质组成，其中有些物种还含有由钙质或硅质构成的、具有一定形状的“小片（球石粒）”，这种小片是金藻物种分类的重要依据。黄藻门中的很多物种的细胞壁是由两个似“H”形的半瓣紧密合成的，细胞壁的主要成分是果胶化合物，有的物种的细胞壁含有少量的硅质和纤维素，只有少数物种的细胞壁含有大量纤维素。甲藻门物种的细胞壁结构比较复杂，细胞以纵分裂繁殖后代的甲藻物种的细胞壁纵分成两瓣，以横裂繁殖后代的甲藻物种的细胞壁则横分成上下两部分，通常把甲藻的细胞壁也称为“壳壁”，壳壁的主要成分是纤维素，并由其构成具有一定形态的“甲片”，由于不同物种的甲片具有固定的形态、数量和细胞壁上有固定的排列顺序，因此，甲片的形态和在细胞壁上的排列顺序是甲藻分类的依据。

2. 细胞核 (nucleus)

真核微藻的细胞核由核被膜、染色质、核仁和核基质构成，是细胞内合成 DNA 和 RNA 的主要部位。核膜由内外两层膜构成，固定了核的形态并把核与细胞质分隔，核膜上有核膜孔，是核内外物质运输的通道，功能性 RNA 与特异蛋白质结合形成复合体，由此孔转输到细胞质。核仁是由微丝区和颗粒区组成的无被膜结构，功能是进行核糖体与 RNA (rRNA) 的合成与加工。真核细胞染色质的主要成分是 DNA 和蛋白质，也含有少量 RNA，组成了线状结构。甲藻门物种的细胞核结构较特殊，核特别大，染色质呈念珠状排列，故称其为甲藻核或中核。核液为无定形的基质，其中存在多种酶类、无机盐和水等，核仁和染色质也都悬浮其中，核液提供了细胞核进行各种功能活动的有利的内环境。

细胞在分裂期，染色质凝聚成染色体，分裂间期又解聚成染色质。但甲藻门和裸藻门的藻类在分裂间期染色体也不解聚消失，核膜在分裂期也不消失，表现为介于原核和真核之间的状态，常称之为中核或间核，所以在分裂间期也容易观察到。

3. 色素 (pigment) 和色素体 (chromoplast)

各门藻类几乎各具特殊的色素。色素成分的组成极其复杂，可分为四大类，即叶绿素

(chlorophyll)、胡萝卜素 (carotene)、叶黄素 (lutein) 和藻胆素 (phycobelin)。各门藻类因所含色素不同, 因此藻体呈现的颜色也不同, 如绿藻门为鲜绿色、金藻门呈金黄色、蓝藻门多为蓝绿色等。各门色素成分见表 2-1。

除蓝藻和原绿藻外, 色素均位于色素体内。色素体是藻类光合作用的场所, 形态多样, 有杯状、盘状、星状、片状、板状和螺旋带状等。色素体位于细胞中心 (称轴生) 或位于周边、靠近周质或细胞壁 (称周生), 见图 2-4。

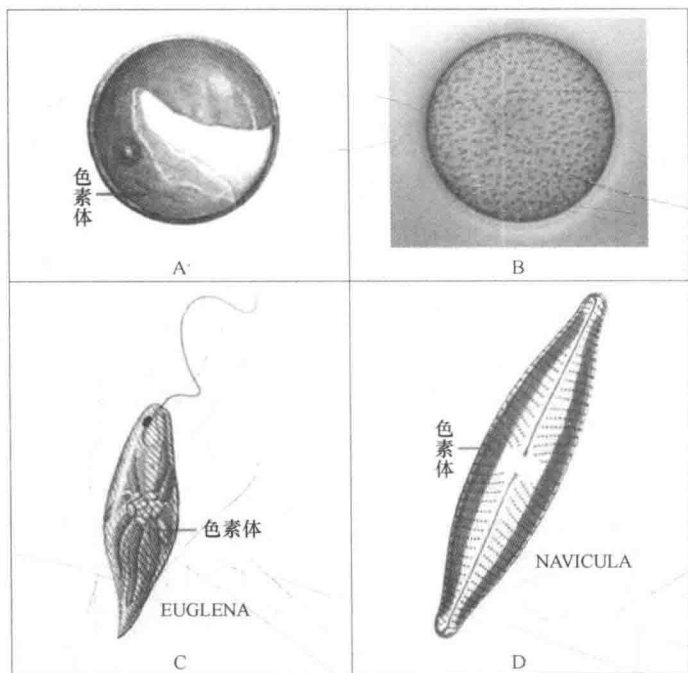


图 2-4 微藻色素体的类型

A. 杯状色素体; B. 盘状色素体; C. 星状色素体; D. 片状色素体

4. 蛋白核 (pyrenoid)

蛋白核是绿藻、隐藻等藻类中常有一种细胞器, 由蛋白质核心和淀粉鞘 (starch sheath) 组成, 有的则无鞘。蛋白核与淀粉的形成有关, 因而又称为淀粉核, 其构造、形状、数目以及存在于色素体或细胞质中的位置等因微藻种类而异。在绿藻类色素体上大多具有一个或多个蛋白核 (图 2-5)。

5. 同化产物

各门微藻由于光合作用色素的成分与比例各不相同, 所以光合作用的同化产物也有所不同。绿藻门、隐藻门和甲藻门的光合作用产物是淀粉, 由直链淀粉和支链淀粉组成。绿藻门产生的淀粉与高等植物一样, 遇碘呈蓝色反应, 以淀粉微粒形式存在于叶绿体内。在隐藻门中, 淀粉中直链淀粉含量特别高, 以微粒形式存在于叶绿体被膜与叶绿体内质网之间。在甲藻门中, 淀粉也存在于叶绿体以外的细胞质中, 但其结构尚不清楚。甲藻还贮藏油。有些绿藻在特殊环境下 (如氮限制条件) 的贮藏物质也以三酰甘油为主。蓝藻的贮藏