

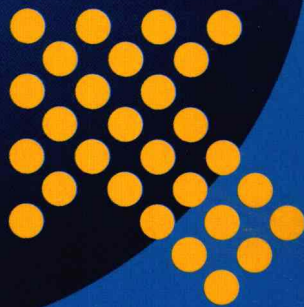
21世纪高等学校规划教材



SHUICHULI SHENGWUXUE

水处理生物学

朱伟萍 张 晶 主 编
史乐君 曹文平 副主编



中国电力出版社
<http://jc.cepp.com.cn>

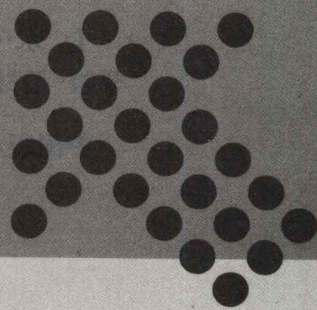
21世纪高等学校规划教材



SHUICHULI SHENGWUXUE

水处理生物学

主 编 朱伟萍 张 晶
副主编 史乐君 曹文平
编 写 帖靖玺 陈 栋 李 君
主 审 张 奎



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

内 容 提 要

本书为 21 世纪高等学校规划教材, 全书分为水处理生物学基础, 生物的生理、生化, 生物治理水体三篇, 主要内容包括原核微生物、古菌、真核微生物、非细胞结构的超微生物、大型水生植物和水生动物、微生物的生理、微生物的生长和变异、微生物的生态系统、微生物对污染物的分解与转化、污水的生物处理、水生植物系统的水质净化作用及其应用、水生动物的水质净化等。本书注重微生物学基本理论的系统性、完整性和实用性, 并结合水处理技术和生态修复的最新成果, 体现了本学科当前的发展方向, 内容丰富, 理论与实践结合紧密, 图文并茂。

本书可作为普通高等院校给水排水工程、环境工程、环境科学等专业的教材, 也可作为生物工程、水利工程等相关专业的参考书, 还可供相关工程技术人员参考使用。

图书在版编目 (CIP) 数据

水处理生物学/朱伟萍, 张晶主编. —北京: 中国电力出版社, 2008

21 世纪高等学校规划教材

ISBN 978 - 7 - 5083 - 7668 - 4

I. 水… II. ①朱…②张… III. 水处理: 生物处理-高等学校-教材 IV. TU991.2 X703.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 102133 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://jc.cepp.com.cn>)

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2008 年 8 月第一版 2008 年 8 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 16.5 印张 402 千字

定价 26.00 元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签, 加热后中心图案消失
本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

前 言

《水处理生物学》课程是高等学校给水排水工程专业新课程体系的主干课程之一，是给水排水工程专业的必修课。为了适应研究型、教学研究型和教学型等不同类型高校对《水处理生物学》课程的要求，编者对水生生物和水生（湿生）植物在水处理、自然水体水质净化与污染控制以及水生生态修复工程中的应用等内容进行了大量的补充和更新。

本书内容丰富，理论与实践结合紧密，图文并茂。全书分为三篇，包括微生物学基础、微生物生理、生化和微生物治理水体。重点研究水体污染及水体、水质净化技术中涉及的生物学问题，主要介绍了水处理中微生物、水生植物、水生动物的形态及细胞结构和生物的生理生化等特点；详细叙述了微生物对污染物的分解与转化作用，生物在污水治理中的应用、生物对污染物的吸收与浓缩、利用水生动物进行水质生物监测和生态评价、废水处理及水质净化时水生动物的作用、水生动物污水处理技术的实验研究及应用情况、水生植物净化作用和水体修复生态工程技术等，并结合水处理技术和水质修复技术的发展现状，反映了当前的最新技术和最新材料。

本书的编写人员长期在高校从事水处理微生物学、给水排水工程的教学与研究。全书共分十二章，具体的编写分工如下：绪论、第三章由朱伟萍（平顶山工学院）编写，第一、四章由李君（开封大学）编写，第二、九章由帖靖玺（华北水利水电学院）编写，第五、十章由史乐君（平顶山工学院）编写，第六章由张晶（辽宁石油化工大学）编写，第七、八章由陈栋（华北水利水电学院）编写，第十一、十二章由曹文平（平顶山工学院）编写。本书由朱伟萍、张晶主编，史乐君、曹文平副主编，平顶山工学院张奎教授审阅了全书。

本书既注重学生对水处理生物学基础知识的系统学习和把握，又强调了水处理生物学工程技术的应用，使基础理论与实际应用前后呼应，紧密结合，具有一定的广度和深度，可供给水排水工程、环境工程、环境科学、微生物学等专业的师生及从事水资源利用与保护的科技人员和管理人员学习、参考。

编者在编写本书的过程中，参考了大量的教材、专著和相关资料，在文中难以一一注明，在此对这些著作的作者表示感谢。

由于编者水平有限，书中难免存在缺点和错误，恳请专家和读者批评指正。

编 者

2008年6月

目 录

| | |
|-------------------------|---|
| 前言 | |
| 绪论 | 1 |
| 第一节 水体污染面临的问题与水处理生物学的兴起 | 1 |
| 第二节 水处理生物学的研究对象与任务 | 4 |
| 第三节 水处理生物学的发展 | 6 |

第一篇 水处理生物学基础

| | |
|-----------------|----|
| 第一章 原核微生物 | 10 |
| 第一节 细菌 | 10 |
| 第二节 放线菌 | 27 |
| 第三节 蓝细菌 | 30 |
| 第四节 其他原核微生物 | 31 |
| 第二章 古菌 | 34 |
| 第三章 真核微生物 | 40 |
| 第一节 真菌 | 40 |
| 第二节 酵母菌 | 49 |
| 第三节 霉菌 | 51 |
| 第四节 藻类 | 54 |
| 第五节 原生动物 | 58 |
| 第六节 后生动物 | 63 |
| 第七节 底栖动物 | 66 |
| 第四章 非细胞结构的超微生物 | 69 |
| 第一节 病毒 | 69 |
| 第二节 噬菌体 | 75 |
| 第三节 亚病毒 | 76 |
| 第五章 大型水生植物和水生动物 | 77 |
| 第一节 大型水生植物 | 77 |
| 第二节 常见的大型水生植物 | 78 |
| 第三节 水生动物 | 84 |

第二篇 生物的生理、生化

| | |
|------------|----|
| 第六章 微生物的生理 | 85 |
|------------|----|

| | | |
|------------|------------------------|------------|
| 第一节 | 微生物的营养与营养类型 | 85 |
| 第二节 | 生物催化剂 | 95 |
| 第三节 | 微生物的代谢 | 104 |
| 第四节 | 环境因素对微生物生长的影响 | 117 |
| 第七章 | 微生物的生长和变异 | 126 |
| 第一节 | 微生物的生长及其特征 | 126 |
| 第二节 | 微生物的遗传 | 131 |
| 第三节 | 微生物的变异 | 135 |
| 第四节 | 遗传工程 | 137 |
| 第五节 | 微生物的驯化与保藏 | 138 |
| 第八章 | 微生物的生态系统 | 147 |
| 第一节 | 水生生态系统的基本概念及特征 | 147 |
| 第二节 | 微生物在各生态系统中的分布 | 156 |
| 第三节 | 微生物之间的相互关系 | 162 |

第三篇 生物治理水体

| | | |
|-------------|--------------------------------|------------|
| 第九章 | 微生物对污染物的分解与转化 | 166 |
| 第一节 | 微生物对有机物的分解作用 | 166 |
| 第二节 | 有机物的微生物降解性 | 170 |
| 第三节 | 微生物对不含氮有机物的分解作用 | 175 |
| 第四节 | 微生物对含氮有机物的转化作用 | 184 |
| 第五节 | 微生物对无机物的转化作用 | 188 |
| 第六节 | 微生物对重金属的转化作用 | 192 |
| 第十章 | 污水的生物处理 | 196 |
| 第一节 | 污水生物处理的原理 | 196 |
| 第二节 | 好氧生物处理 | 198 |
| 第三节 | 厌氧生物处理 | 219 |
| 第四节 | 水体的富营养化与生物脱氮除磷技术 | 226 |
| 第五节 | 其他无机污染物废水的生物处理 | 231 |
| 第十一章 | 水生植物系统的水质净化作用及其应用 | 234 |
| 第一节 | 水生植物系统的水质净化作用和机理 | 234 |
| 第二节 | 水处理与水体修复生态工程技术 | 238 |
| 第十二章 | 水生动物的水质净化 | 251 |
| 第一节 | 水生动物污水处理技术原理 | 251 |
| 第二节 | 利用水生动物进行水质生物监测和生态评价 | 252 |
| 第三节 | 废水处理及水质净化时水生动物的作用 | 253 |
| 第四节 | 水生动物污水处理技术的实验研究及应用情况 | 254 |
| 参考文献 | | 255 |

绪 论

第一节 水体污染面临的问题与水处理生物学的兴起

一、水体污染面临的问题

水体污染,数千年前已经存在,不过由于其量甚微,范围很小,没有引起人类的重视。对水污染而言,产业革命前的水体污染,通过水体的自净就足以将这部分污染物降解消除,恢复水体水质。但随着人类社会的发展和科学的进步,特别是现代化工业的出现和城市化进程的加速,人类的物质生活条件大大改善,城市污水的成分和性质也发生了变化,排放的污染物不仅数量远远超过自然水体自身具有的自净容量,而且大多数是难降解污染物,如重金属、放射性核素与多氯联苯、硝基苯、农药、洗涤剂,造成了日益严重的水体污染,已成为严峻的社会问题和环境问题。

(一) 水体污染日益加剧

1. 污水数量不断增加

20世纪90年代,水污染不再是局部的,而是跨国度、遍布于整个流域的流域性水污染问题。其中最典型的就是莱茵河。莱茵河是一条国际河流,位于欧洲的中部,其源头位于瑞士中东部的阿尔卑斯山中部,河流从那里开始,流经奥地利、瑞士和法国边境,通过鲁尔工业区,最后到达荷兰,流入北海,全长1335km,其流域面积为22.4万km²,是500万人的家园。每天直接供生活用水500万m³,工业生产用水300万m³和冷却水量2100万m³。

莱茵河在Der Spiegel中被描述成“欧洲的主要阴沟”。该河每年输送2900t的铬、1400t的铜、11200t的锌、217t的砷、63t的汞、1000万t的氯和大于240万t难处理的有机污染物进入海中。由于该河流经多个国家,污染的控制十分艰难。

英国的泰晤士河是英国伦敦的主要河流,在19世纪初期,随着蒸汽机的广泛应用,泰晤士河两岸工厂林立,工厂生产的污水昼夜不停地排入河中。1856年,泰晤士河中的银鱼已灭绝;英国的“爱丽丝公主”号游船在泰晤士河上沉没,落水者虽然逃生,但多数伤残。经研究发现在伤残的640人中,大部分受到了污水的毒害。1961年泰晤士河治理委员会,对泰晤士河的污染情况和污染源进行了调查,调查结果表明:79%的污水来自工业废水和居民生活污水。

近年来,我国水体污染日趋严重。全国每年的排放污水高达400亿t,除70%的工业废水和不到10%的生活污水经处理排放外,其余污水未经处理直接排入江河湖海,致使水质严重恶化。污水中化学需氧量、重金属、砷、氰化物、挥发酚等呈上升趋势,全国9.5万km河川有20%受到污染,0.5万km受到严重污染。清江变浊,浊水变臭,鱼虾绝迹。我国七大水系,普遍存在水质恶化问题。1995年做的水质评价表明,在所研究的地区的大多数河段均被划分为V类或者更差,水质较十年前的IV类进一步恶化。在这些河段的河水已经根本不适合做任何用途。根据2000年淮河流域水环境监测中心的月报和中国环境状况的年报,流域内整个水质状况总体上没有得到改善,而且一些河段的水质仍在下降。根

据 2001 年中国环境状况公报, 与 2000 年相比, 长江和珠江水质持平; 黄河、松花江、淮河、海河和辽河水质都有所下降, 而且一些河流的水量大减少。同时突发污染事故数量增加, 水体污染造成经济损失增大。如 2005 年 11 月 13 日松花江上游吉林石化公司双苯厂爆炸, 硝基苯和苯等化学污染物进入松花江, 水源水质被污染, 导致重大的污染事故, 哈尔滨市停水 4 天。2006 年 1 月 6 日, 由于湖南省株洲市霞湾港清淤治理工程施工不当且未采取适当防范措施, 造成湘江株洲霞湾港至长沙江段发生严重水污染事故, 导致湘潭、长沙两市水厂取水水源的水质受到不同程度污染。

2. 水环境状况恶化

不仅世界上河流污染严重, 湖泊污染也遍及全球。世界水委会秘书长秀明太田在第三次世界水资源讨论会上说: 湖泊是最容易受到破坏的生态系统, 而且难以恢复。工业化国家污染最严重的是湖泊, 哪怕是不太深的湖泊, 特别是那些接近农业活动频繁的地区的湖泊, 因为每天都有大量的杀虫剂和化学物质流入。工业化国家遭受严重污染的湖泊有: 美国奥基乔比湖、俄罗斯的贝加尔湖、日本的琵琶湖等。在不发达的国家中, 水质恶化的湖泊和水系有: 巴西的亚马逊河流域、乍得的湖泊、非洲的维多利亚湖泊、还有印度的一些湖泊。太湖、巢湖和滇池是我国最有代表性的城市或被城市包围的湖泊, 均受到了严重点源和非点源的污染。据 2001 年调查统计, 太湖全部水质均为 V 类, 高锰酸钾指数为 5.38mg/L, TP 0.097mg/L, TN 2.19mg/L, 叶绿素 a 0.03mg/L, 营养状态指数为 60.93, 属中度富营养状态。巢湖的全湖水水质为劣 V 类, 高锰酸钾指数为 5.21mg/L, TP 0.19mg/L, TN 2.58mg/L, 叶绿素 a 0.0065mg/L, 营养状态指数为 58.31, 属中度富营养状态。滇池, 其草海污染严重, 高锰酸钾指数为 12.40mg/L, TP 1.23mg/L, TN 13.45mg/L, 叶绿素 a 0.221mg/L, 营养状态指数为 82.24, 属严重富营养状态。其外海, 高锰酸钾指数为 7.57mg/L, TP 0.21mg/L, TN 2.121mg/L, 叶绿素 a 0.070mg/L, 营养状态指数为 66.12, 属中度富营养状态。2001 年我国海域赤潮发生次数增多, 发生时间提前, 共发生赤潮 77 次, 累计面积 15000km², 比上年增加 49 次, 增加面积约为 5000km²。1996 年和 2003 年, 洱海两度暴发蓝藻, 水质降到 IV 类。

世界湖泊的主要威胁是: 有机物质积累过多、水体富营养化使藻类过度繁殖、化学污染、酸雨以及人类过多的使用杀虫剂。以康斯坦斯 (Constance) 湖为例, 1960 年~1980 年水中的磷酸盐的浓度从 5 μ g/L 增加到 70 μ g/L, 增长了 13 倍。20 世纪末每年从湖泊和水库中取水约 3800 亿 m³, 是 19 世纪的 6 倍。

目前, 水体污染已呈现出从支流向干流延伸, 从城市向农村蔓延, 从地表向地下渗透, 从陆地向海洋发展的趋势。我国地表水资源污染严重, 地下水资源污染也不容乐观。全国 118 个城市, 64% 的城市地下水受到严重污染, 33% 的城市地下水受到轻度污染。海河流域地下水资源量为 271.6 亿 m³, 受污染的为 171.5 亿 m³, 占总量的 63.2%。

3. 水环境污染的复合化

区域性和复合性是水环境污染的基本特性, 各大污染水体中有多种介质共存, 不同水体及其污染物间相互影响和作用, 具有突出的复合污染特性。复合污染对水环境生态和健康安全都存在极大的隐患, 新的污染不断出现。

各类污染物排放到受纳水体时, 其来源可分为两类: 点源污染和面源污染。所谓点源污染是指生活废水和工业污水可以通过一定的管道或渠道从一个单一的排放口排入受纳水体;

而面源污染是指城镇和农业径流从多个排放点排入受纳水体，这些污水从地表漫流或沿着自然的排放口流入最近的水体。

美国在 20 世纪 80 年代提出流域环境保护的概念，强调流域生态系统的整理治理。对地下水、地表水、湿地、水生态系统进行统筹规划、设计、实施和保护。它强调以流域水生态完整性为保护目标。但目前我国水环境管理仍然以区域污染控制为主，缺乏利于层面上的有效管理策略和方法。

在水环境污染中点源污染和面源污染总是共存的，对两者的研究和控制也是有联系的，面源污染是发达国家在点源污染得到很好的控制后突显出来的，它们一个很重要的区别是，从理论上讲，后者随着经济和技术的进步可以控制在人们期望的水平上，而面源污染无法通过单纯的技术解决，即从某个意义上讲无法按人们的预期控制。

水环境污染问题产生的根源在于经济增长方式粗放，企业单纯追求经济效益，忽视环境效益和生态效益，从而造成污染物排放量日趋增加，以 2005 年为例，工业和城镇生活废水排放量达到了 524 亿 t，COD 和氨氮排放量分别达到 1414.2 万 t 和 149.8 万 t，重点流域的污染物排放量明显超过其环境容量。

伴随着化肥农药的不断增长、矿山的开发及乡村养殖业等迅猛发展，面源污染对水体污染的贡献日益增加，已经成为我国水体氮、磷污染的主要因素，据调查，太湖、滇池和巢湖中约 50% 的 TN 和 TP 来自农业面源污染。

4. 水资源储量的不断减少

在水资源的质量不断下降的同时，水资源的数量也在不断地减少，其原因是多方面的和复杂的。首先是淡水资源的过量开采。在 20 世纪的 100 年中，人口增长了 3 倍，而用水量却增加了 6 倍。人们在生活中的主要用水有以下几方面：饮用、做饭、洗浴、洗衣和清洁，仅占总水量的一小部分，但人类数量将进一步扩大和生活质量的提高，其用水量也将持续增加；全世界工业用水估计为 350km^3 （1995 年），是生活用水的 2 倍；最大的淡水资源用户是农业，用水灌溉来增产粮食和其他农作物，1995 年的用水量达到 2500km^3 。其次，由于世界热带雨林和森林的过度采伐和火灾，破坏了许多江河流域的植被和生态系统，水土流失造成许多河流含沙量增大，泥沙淤积严重，加上其他温室效应和臭氧层破坏等因素，导致全球气候异常，近年来降水量显著减少，使一些江河和湖泊水量急剧减少。1997 年，黄河下游断流 220 天是世界上许多断流河流的一个典型例子。20 世纪 80 年代，山东平均每年因泥沙淤积的损失库容高达两亿 m^3 ，这种现象加剧了缺水问题。由于水资源的匮乏，污水能回用有效地缓解了水资源缺乏问题，促进了污水作为再生水资源的回收与再用，以及雨水的收集、净化和利用，以实现水循环。从缓解保护和新增水资源量方面看，污水回用对生态环境用水具有实际意义。

（二）水污染的危害

由于水源水质的恶化，处理成本增加，致使生活、工业和农业用水的供水成本增加；处理成本的增加和水质恶化限制了经济的发展，如过去采用干净的河水生产啤酒、纸浆和造纸、白酒以及化肥等的生产厂，由于河水水质变坏，为了达到用水水质的要求，不得不采用深度处理，由于使生产成本大幅度增加，限制了新的工业在该地区投资；同时黑色和带有恶臭的河水，还限制了旅游和与水有关的活动项目的开发。

许多干流和支流的沿岸城市和农村都依靠河水作为日常用水，如饮用水、洗衣服、餐具

和洗澡等，而恶化的水质增加了水源性疾病的风险度。来自工业的含有有毒物质的废水或区域未经处理的含高浓度的 COD 和 BOD 以及其他污染物的废水将导致与水有关的疾病发生，并进而增加医疗保健费用。

水污染造成了生态系统的退化和沿河以及地表水体的生物多样性的减少，如某些鱼类和植物品种正在减少或者灭绝。这些污水沿河道进入海洋，破坏了海洋的生态环境，海水养殖业也受到了威胁。水污染除了造成鱼类死亡、影响产量外，还会使鱼类和水生物发生变异。此外，在鱼类和水生物体内还发现了有害物质的积累，使它们的使用价值大大降低，影响了水产品的质量。

污染的水灌溉农田降低农作物的产量和质量。污水中的有毒有害物质污染了农田土壤，造成农作物枯萎死亡，使农民受到极大的损失。尽管不少地区也有获得农作物丰收的现象，但是在作物丰收的背后，掩盖的是作物受到污染的危机。研究表明，在一些污水灌溉区生长的蔬菜或粮食作物中，可以检出痕量有机物，包括有毒有害的农药、重金属、内干扰分泌物（环境激素）等，它们必将危及消费者的健康。

二、水处理生物学的兴起

我国 20 世纪 70 年代开始，对水体污染和防治进行了深入研究，开发出多种水处理技术和方法。水处理生物学是环境科学中水处理技术和水污染控制技术的分支，也是环境微生物学的分支，可以说，水处理生物学是由水处理技术与环境微生物学相结合孕育而成的一门新型交叉边缘学科。

水是人类最宝贵的自然资源，地球上一切生命都在水中诞生，一切生物皆离不开水。水既是人体组成的基础物质，又是新陈代谢的主要介质。因此，我们既要保护好水资源，又要对污染的水体进行处理利用，去除污水中的各种污染物，达到无害化的目的。污水处理有物理、化学和生物等多种方法，其中生物处理法占有很重要的地位。生物处理法的基本原理就是利用各种生物的分解作用，对水体中的污染物进行降解和转化，使之矿化且使水中的重金属得以适当转化。另外，在受污染水体的生物修复技术中，生物起着极为重要的作用。由于生物处理法具有高效、经济等优点，被普遍采用，则形成了环境生物技术，而且近些年以来，由于水处理技术、生态修复技术和多学科交叉及融合的发展，大型水生植物、水生动物和禽类等也广泛地应用于水处理中，基于以上等原因和该学科的更好发展，水处理生物学也由此而诞生。

第二节 水处理生物学的研究对象与任务

一、水处理生物学的研究对象与任务

水处理生物学主要研究水处理工程和环境水体水质净化过程（即水中污染物的迁移、分解与转化过程）中所涉及的生物学问题，特别是微生物问题，是一门由普通生物学、环境微生物学和水质工程学相结合，为了满足水处理和环境水体水质净化工程的需要而发展起来的一门边缘学科。水处理生物学在学科体系上属于应用（微）生物学的范畴，在研究对象和内容上与环境微生物学有一定的交叉。

“生物学”（Biology）涉及的研究对象和内容广泛而又庞杂，“水处理生物学”研究的对象则主要集中在与水中的污染物迁移、分解及转化过程密切相关的微生物、微型水生动物、

水生（湿生）植物和水生动物等，特别是应用于水处理工程实践中生物研究的重点。虽然鱼类等大型水生生物在地表水体水质净化与保持中扮演重要的角色（如在富营养水体中放养适宜和适量的鱼类，可有助于水华的控制），但在水处理工程中的应用将受到很大的限制，不是水处理生物学研究的重点。值得提出的是，鱼类是生物毒性试验中常用的水生生物种类，在水质安全评价中起着重要的作用。

“水处理生物学”的主要研究内容包括：

- (1) 与水处理工程和环境水体水质净化相关的生物种类的形态、生理特性及生态；
- (2) 水中生物种类间的相互作用；
- (3) 生物与水中污染物的相互作用关系；
- (4) 水中污染物的生物分解与转化机理；
- (5) 生物在水体净化和水处理中的作用机理和规律；
- (6) 水中有害生物的控制方法；
- (7) 水处理生物学的研究方法等。

“水处理生物学”课程的主要任务是使学生掌握与水处理相关的生物学基本知识，掌握微生物、水生植物、水生动物等在水体净化和水处理中的作用机理和规律，学习水中微生物的检验方法等。

二、与水处理相关的主要生物种类

根据生物自身的大小、形态和生理特性，结合水处理工程实际和习惯，与水处理工程相关的生物种类可分为微生物、小型水生动物和大型水生植物等。下面简单介绍这些生物的基本特点。

1. 水中常见的微生物及特点

微生物（microorganism/microbe）是肉眼看不见或看不清楚的微小生物的总称。不是生物分类学上的概念。微生物具有个体微小、结构简单、进化地位低等特点。

在生物学中，藻类属于植物学的范畴，原生动物和后生动物属于无脊椎动物范畴。一些个体较大的藻类、原生动物和后生动物，严格的讲，不属于微生物的范畴。在本书，基于水处理工程实践的实际，将藻类、原生动物和微型后生动物列入微生物的范畴。

微生物除具有个体非常微小的特点外，还具有以下特点：

(1) 种类多。由于微生物的种类繁多，因而对营养物质的要求也不同。它们可以分别利用自然界中的各种有机物和无机物作为营养，将各种有机物分解成无机物（所谓无机化或矿化），或将各种无机物质转化，在污染物的分解过程中起着重要的作用。

(2) 分布广。微生物个体小而轻，可随着灰尘四处飞扬，因此广泛分布于土壤、水和空气等自然环境中。土壤中含有丰富的微生物所需要的营养物质，所以土壤中微生物的种类和数量很多。

(3) 繁殖快。大多数微生物在几十分钟内可繁殖一代，即由一个分裂为两个。如果条件适宜，经过 10h 就可繁殖为数亿个。

(4) 易变异。这一特点使微生物较能适应外界环境条件的变化。

微生物的生理特性以及上面列举的特点，是污水生物处理法的依据。污水在处理构筑物中与微生物充分接触时，能作为养料物质（污染物）被微生物利用、转化，从而使污水水质得到改善。当然在处理后的污水排入水体之前，还必须除去其中的微生物，因为微生物本身

也是一种有机杂质。

在各类微生物中，细菌与水处理的关系最密切。细菌的形态结构和生理特性以及它们在水处理过程中所起的作用等是本教材讨论的重点。

细菌等微生物的命名，与动物和植物的命名一样，都采用林奈（Linnaeus）双命名法，即一种微生物的名称有两个拉丁文单词组成，第一个是属名，用拉丁文单词表示，词首字母大写，它描述微生物的主要特征；第二个是种名，用拉丁文形容词表示，词首字母不大写，它描述微生物的次要特征。有时候在前面所述的 2 个单词之后还会有一个单词，这个单词往往是说明微生物的命名人。如果微生物只鉴定到属，对具体地位还不能确定，则可以用 sp.（单数）或 spp.（复数）来表示。举例如下：

Escherichia coli 大肠杆菌

Bacillus subtilis 枯草芽孢杆菌

Bacillus sp.（一种）芽孢杆菌

Staphylococcus aureus 金黄色葡萄球菌

Saccharomyces cerevisiae Hansen 汉逊氏啤酒酵母

2. 常见的小型水生生物

小型动物多指 1~2mm 以下的后生动物，它们与水处理过程，特别是环境水体水质净化过程有密切的关系，具有重要的生态功能。

底栖小型动物寿命较长，迁移能力有限，且包括敏感种和耐污种，故常称为“水下哨兵”，能长期监测有机污染物的慢性排放。底栖生物链是水体生态环境健康的标志之一，底栖生物对水体内源污染控制极其重要。近年来，底栖生物在水体生物修复中的作用得到了较多关注。

3. 常见的水生（湿生）植物

大型水生植物（macrophyte）是除微型藻类以外的所有水生植物类群。根据它们的生活类型，水生植物作为水生生态系统的重要组成部分，具有重要的环境生态功能。对于水体，特别是浅水水体，大型水生植物的存在具有维持水生生态系统健康、控制水体富营养化、改善水环境质量的作用。

随着水环境的加剧，为了寻找高效的水污染控制技术，从 20 世纪 70 年代，大型水生植物开始受到人们的关注，随着研究的不断深入，逐渐发展出了多种以大型水生植物为主体的水处理和水体修复的生态工程技术，如漂浮植物系统和人工湿地等。

第三节 水处理生物学的发展

一、微生物学的发展过程

人类对微生物的利用甚早。人类在日常生活和生产实践中，已经觉察到微生物的生命活动及其所发生的作用，但由于在思想方法上长期停留在“实践—实践—实践”的基础上，因此只能长期处于低水平的应用阶段。利用微生物进行酿酒的历史，早在公元前 3 世纪，在《吕氏春秋》里就有“仪狄作酒禹饮而甘之”之说。在公元 6 世纪，后魏贾思勰所著的《齐民要术》一书中就详细记载了制曲和酿酒的技术。在古希腊留下来的石刻上，记有酿酒的操作过程。

1676年荷兰人列文虎克用自制的简单显微镜（可放大160~260倍）观察牙垢、雨水、井水和植物浸液后，发现其中有许多运动着的“微小动物”，并用文字和图画科学地记载了人类最早看见的“微小动物”——细菌的不同形态（球状、杆状和螺旋状等）。过了不久，意大利植物学家米凯利也用简单的显微镜观察了真菌的形态。不过，在这一时期，人们对微生物的研究仅停留在形态描述的低级水平上，而对它们的生理活动及其与人类实践活动的关系却未加研究，因此，微生物学作为一门学科在当时还未形成。

1861年法国科学家巴斯德根据曲颈瓶试验彻底推翻生命的自然发生说并建立胚种学说（germtheory）起，微生物学的研究进入生理学阶段，直至1897年的一段时间。微生物生理学的研究为现代微生物学奠定了基础。他论证酒和醋的酿造以及一些物质的腐败都是由一定种类的微生物引起的发酵过程，并不是发酵或腐败产生微生物；他认为发酵是微生物在没有空气的环境中的呼吸作用，而酒的变质则是有害微生物生长的结果；他进一步证明不同微生物种类各有独特的代谢机能，各自需要不同的生活条件并引起不同的作用；他提出了防止酒变质的加热灭菌法，后来被人称为巴斯德灭菌法，使用这一方法可使新生产的葡萄酒和啤酒长期保存。

他在自己的工作中，自发地遵循着一条唯物主义的认识论——从实践出发，通过研究总结概括出一般规律，并进一步以它来指导实践，从而使他的研究工作取得了前所未有的巨大成就。他从“酒病”（1857年）的实际出发，研究了一系列的实际问题，即“腐败病”（指曲颈瓶实验中的肉汤变质，1861年）、蚕病（蚕微粒子病，1865年）、禽病（鸡霍乱，1879年）、兽病（牛、羊的炭疽病，1881年）和人病（狂犬病，1885年）。在其研究工作中，发现各种传染病都有其共同原因——活的小生物，从而使人类对传染病本质的认识提高到一个崭新的水平上。在这种理论指导下，他提出了一系列行之有效的解决问题的方法。例如，发明了巴斯德消毒法来防治“酒病”，用消毒灭菌法来防治“腐败病”，用检出并淘汰病蛾的方法来防治蚕病，发明用接种减毒菌苗的办法来预防鸡霍乱和牛、羊的炭疽病，以及用狂犬兔化疫苗来防治人类的狂犬病，创立了病原微生物是传染病因的正确理论，和应用菌苗接种预防传染病的方法。巴斯德在微生物学各方面的科学研究成果，促进了医学、发酵工业和农业的发展。

在微生物学的发展过程中，按照研究内容和目的的不同，相继建立了许多分支学科：研究微生物基本性状的有关基础理论的有微生物形态学、微生物分类学、微生物生理学、微生物遗传学和微生物生态学；研究微生物各个类群的有细菌学、真菌学、藻类学、原生动物学、病毒学等；研究在实践中应用微生物的有医学微生物学、工业微生物学、农业微生物学、食品微生物学、乳品微生物学、石油微生物学、土壤微生物学、水的微生物学、饲料微生物学、环境微生物学、免疫学等。人们不断加强对微生物的研究，已形成许多微生物学的分支学科。例如有普通微生物学、微生物生理学、微生物生态学、微生物遗传学；有病毒学、细菌学、真菌学；还有土壤微生物学、海洋微生物学；再有医学微生物学、工业微生物学、农业微生物学、环境微生物学、石油微生物学等。由于微生物学各分支学科的相互配合、互相促进，特别是相关的细胞生物学、生物化学、遗传学及分子生物学间的相互渗透，同时物理、化学、计算机技术及材料科学的发展，使其在基础理论研究和实际应用两方面都有了迅速的发展。

二、水处理生物学的发展方向

水处理生物学在水处理技术和环境生态治理中，在保护水资源和生态平衡等方面具有举足轻重的作用。微生物有其容易发生变异的特点，随着新污染物的产生和数量的增加，微生物数量和种类可随之增加，呈现出多样性。

随着微生物学中各个分支学科相互渗透，尤其是分子生物学、分子遗传学的发展，促进了微生物学的发展，也促进了微生物应用技术的进步，推动了水处理生物学在各个领域的应用和发展。例如：固定化细胞技术、生物强化技术、微生物絮凝剂技术等。

固定化微生物技术是从 20 世纪 60 年代末直接从固定化酶技术发展起来的，通过物理或化学的手段，将游离的微生物固定在限定的空间区域使其保持活性，并可反复利用的一项技术。利用固定化微生物技术，可将选择性地筛选出的优势菌种加以固定，构成一种高效、快速、能连续处理的废水处理系统，可以有效地减少二次污染。固定化微生物技术具有细胞密度高、反应速度快、稳定性强、耐毒害能力强、微生物流失少、产物分离容易和剩余污泥少等优点。这些突出优点使其在废水处理中受到重视，特别是在处理重金属废水时效果良好，且已表现出了巨大的潜力，成为近年来国内外学者研究的热点。

目前絮凝剂主要有无机絮凝剂、人工合成有机高分子絮凝剂和天然高分子絮凝剂三大类。虽然前两类絮凝剂在絮凝活性方面及经济方面有许多优点，但是它们在安全性和对环境造成的二次污染方面的缺陷，是其自身难以克服的。已有研究表明饮用铝盐浓度较高的饮用水的人，患老年痴呆症的较多。聚丙烯酰胺等人工合成有机高分子絮凝剂本身无毒性，但是合成它们的单体往往具有强烈的神经毒性和“三致效应”（致畸、致癌、致突变）。因此这些絮凝剂的应用受到很大的限制。由于絮凝剂使用范围广、用量大，它的质量直接关系到生产工艺的改进、人类的健康问题和环境保护，因此开发高效、安全、无毒、无二次污染的絮凝剂迫在眉睫。微生物絮凝剂就是在这种情况下应运而生的。微生物絮凝剂是一种天然生物高分子絮凝剂，它对人体无害，可以被生物降解。它是一类由微生物产生的有絮凝活性的代谢产物，有糖蛋白、粘多糖、蛋白质、纤维素和 DNA 等。微生物絮凝剂具有两大特点：一是不存在二次污染，使用安全、方便、应用条件粗放、絮凝效果好；二是来源广，能产生絮凝剂的微生物种类多，生长快，易于采取生物工程手段实现产业化，价格低廉。因此，微生物絮凝剂的开发和应用引起人们关注，应用前景极为广阔。美国、日本、英国、法国、德国、前苏联、芬兰、葡萄牙、以色列、韩国、伊朗和中国等十几个国家对微生物絮凝剂进行了大量的研究，取得了一些初步的研究成果，为微生物絮凝剂的工业应用展示了良好的前景。

自然环境或生物处理体系中，微生物通过自身的生命活动降解污染物，将有害物质分解为稳定无害的小分子物质，如 CO_2 和 H_2O 。随着工业的发展，一些有毒有害物质的排放会对环境微生物产生一定的毒害作用，使得生物降解体系中缺乏足够的微生物降解相应的污染物，或抑制具有降解复杂污染物性能的微生物生长，需要很长一段时间才能通过酶的诱导、遗传物质转移等方式使微生物逐渐适应。有效微生物的数量和浓度是生物处理的决定性影响因素。因此，生物强化技术受到人们的青睐。生物强化技术是向传统的生物处理系统中引入具有特定功能的微生物，提高有效微生物的浓度，增强对难降解污染物的降解能力，提高其降解速率，并改善原有生物处理体系对目标污染物的去除效能。将生物强化技术融入到传统的生物修复，并结合现代分子生物学技术和分析化学提供的新方法、手段进行监测、评价，已成为土壤、地下水等生物修复发展的一种趋势。在废水生物处理技术中，由于某些污染物

的复杂性、难降解性及对微生物体系的抑制性，用常规的处理方法很难有效去除，向生物反应器中投加特种微生物的生物强化技术成为有效的辅助手段。

近些年来，大型水生植物和水生动物也广泛应用于水体生态修复过程中，在消除水体的富营养化、抑制藻类生长、防治有机污染和去除重金属污染等方面取得了良好的效果。如：生态浮床技术、氧化塘技术和人工湿的技术等。这些技术利用生物多样性、生物共存机制和食物链原理来达到水体修复等目的。其净化机理是：利用植物对氮、磷等营养物的吸收作用，以及根系附着微生物对污染物的降解作用，达到水体净化、有效控制水体的富营养化等目的。

随着客观实践的需要及科学技术的进步，水处理生物学必将不断丰富与发展。对于水处理生物学的科学定义、研究任务和内容仍在不断充实和完善之中。

第一篇 水处理生物学基础

第一章 原核微生物

微生物除病毒不具细胞结构，为非细胞结构，其余都具有细胞结构。而具有细胞结构的微生物，有些属原核生物，称原核微生物，有些属真核生物，称真核微生物。这两类微生物在细胞结构上，特别在细胞核上有显著的区别。真核微生物的细胞核有核膜、核仁，染色体位于核内；原核微生物的细胞核无核膜、核仁，其遗传物质——脱氧核糖核酸（DNA）不组成典型的染色体。

第一节 细菌

细菌是自然界分布最广、数量最大的一群微生物，与人类关系极为密切，在工业、农业和医药方面被广泛利用。但少数细菌对人类有害，会导致人和动物、植物发生病害，引起食物变质腐败等。

细菌为单细胞原核微生物，大多形体微小，其细胞结构在原核生物中具有代表性。

一、细菌的基本形态和大小

（一）细菌的形态

细菌的形态，因种类不同而不同，其基本形态有球状、杆状和螺旋状三种，分别被称为球菌、杆菌和螺旋菌。

1. 球菌

球菌呈球形或近似球形。根据球菌分裂的方向及分裂后细胞排列的状态不同，又可分为六种。其分裂沿一个平面进行，分裂后的细胞分散而单独存在的，叫单球菌，如尿素微球菌；分裂后的细胞两两成对排列的，叫双球菌，如肺炎球菌；分裂后细胞排成链状的称链球菌，如乳链球菌；细胞分裂按两个相互垂直的平面分裂，分裂后每四个细胞联在一起呈田字形，称为四联球菌，如四联微球菌；按三个互相垂直的平面进行分裂，分裂后每八个细胞在一起叠成一立方体，称为八叠球菌，如尿素八叠球菌；若分裂面不规则，分裂后多个新细胞不规则聚集似一串葡萄，称为葡萄球菌，如金黄色葡萄球菌。但无论哪种类型排列的球菌培养物或制片中，都能看到有游离的单个菌体存在。球菌分裂后产生的新细胞的排列方式，在分类鉴定上有重要意义。如图 1-1、图 1-2 所示。

2. 杆菌

杆菌在细菌中种类最多，而且工农业生产中应用的细菌大多是杆菌，例如用来生产淀粉酶与蛋白酶的枯草杆菌、生产谷氨酸的北京棒状杆菌。在农业上用作杀虫剂的苏云金杆菌以及用作细菌肥料的根瘤菌都是杆菌。当然，杆菌中也有不少是致病菌，如伤寒沙门氏菌、痢

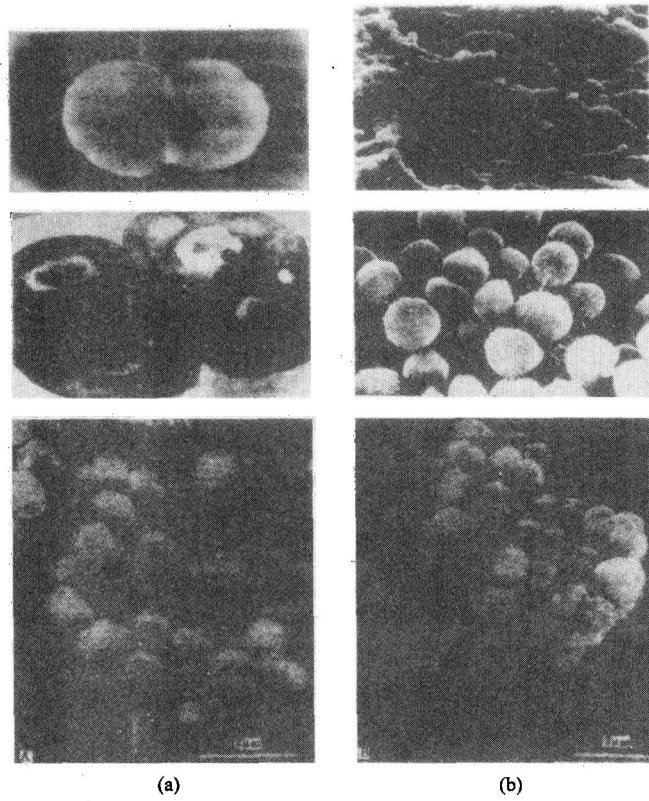


图 1-1 球状细菌扫描电镜图像

(a) ×15000; (b) ×75000

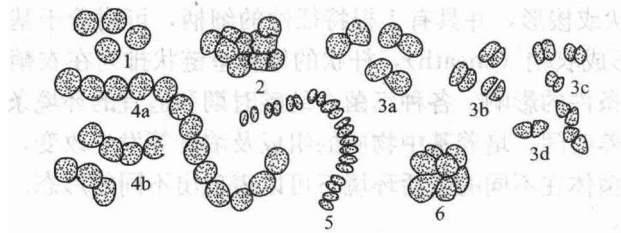


图 1-2 球菌形态结构

1—单球菌；2—葡萄球菌；3—双球菌；4、5—链球菌；6—八叠球菌

疾志贺氏菌等。各种杆菌在其长和宽的比例上有显著差别。如短杆菌较粗短，有的近似球菌；长杆菌较细长，多呈圆柱状，有的甚至成丝状。杆菌的形状也依种的不同而有差异，有的菌体很直，有的稍弯曲。大多数杆菌菌体分散存在，但也有的排列成栅状、链状或八字形。杆菌的形状与排列也有一定的分类鉴定意义。如图 1-3 所示。

3. 螺旋菌

菌体弯曲呈螺旋状的细菌，通称为螺旋菌。其中又可根据其弯曲程度和螺旋的次数，分为弧菌和螺旋菌。一般，弯曲不足一周而呈弓形或逗号形的叫弧菌，如霍乱弧菌，弯曲超过一圈而呈螺旋状的叫螺旋菌，如减少螺菌。螺旋体的形状与螺旋菌很相似，但不是细菌，它是介于细菌与原生动物之间的单细胞原核生物。螺旋菌的形态如图 1-4 所示。