

21 世纪高等院校教材·环境类

# 环境微生物技术

杨柳燕 肖琳 主编

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书在阐述微生物基本知识的基础上,广泛论述了环境微生物技术的基本内容和最新成就。主要包括微生物的类群、生理生化和生态,微生物在环境中的作用及微生物的监测技术,微生物对污染物的降解转化的机制、微生物的处理技术及微生物修复技术、微生物技术在环境可持续发展中的作用,从生态系统的各级水平反映微生物技术在环境中的运用。

本书可作为大中专学校环境科学与工程、生物工程专业的教材,也可供相关领域中广大科研管理人员阅读、参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

---

环境微生物技术/杨柳燕,肖琳主编. —北京:科学出版社,2003  
(21世纪高等院校教材)

ISBN 7-03-011228-8

I. 环… II. ①杨…②肖… III. 环境科学:微生物学-高等学校-教材 IV. X172

中国版本图书馆CIP数据核字(2003)第015304号

---

策划编辑:谢灵玲/文案编辑:彭克里 吴慧涵/责任校对:钟洋  
责任印制:安春生/封面设计:王浩 陈敬

科学出版社出版 各地新华书店经销

\*

2003年8月第一版 开本:B5(720×1000)

2004年5月第二次印刷 印张:28

印数:3 001—5 500 字数:534 000

**定价:42.00元**

(如有印装质量问题,我社负责调换〈路通〉)

# 编写者名单

主 编 杨柳燕 肖 琳

编写人员(按姓氏笔画为序)

史小丽 杨柳燕 肖 琳 吴 剑

周 治 顾宇飞 蒋丽娟

# 序 言

在《环境微生物技术》一书出版之际，我作为本书的第一位读者，感到由衷的高兴。21世纪是生物学的世纪，环境微生物学作为生物学的一个分支学科，将发挥不可替代的重要作用。环境微生物学的学科方向和任务在于从理论高度对微生物在保护环境与修复环境方面的作用和机制做出回答与评述；环境微生物技术则是从方法学的角度纵论运用微生物治理污染、修复环境的技术和方法。环境微生物技术是环境微生物学内涵的延伸和技术的支撑，无论是从单一的污染物处理，到污染物资源化综合利用；还是从以微生物生态学手段调控，到以分子生物学技术探索环境治理途径等各个层面环境微生物技术，对环境保护和人类经济社会的可持续发展都发挥着重要作用。

该书从微生物技术基础知识开始，论述了环境微生物的检测技术、污染物微生物处理技术（包括对有机污染物和无机污染物处理技术），被污染环境的微生物修复技术，尤其论述了代表现代微生物技术水平的清洁生产技术和污染物资源化技术等内容，是该书的特色所在。

《环境微生物技术》一书系统地介绍了环境微生物技术在环境保护各个领域中的应用，内容丰富，取材新颖，论述清晰，力求全面反映环境微生物技术的最新进展。该书从分子、个体、群体和生态系统等层次全面反映了当代环境微生物技术的内涵，同时也融入了作者在这一领域的多年研究成果与教学结晶。对于从事环境微生物技术教学和科研的工作者来说，该书是一本有启迪性的参考书，同时，对从事与环境保护有关领域的广大管理者来说，也有所裨益。

顾宗濂

# 前 言

微生物——一类通常人们看不见，但又同人类及其居住环境息息相关的生物，在人们的生活中显示出越来越重要的作用。在自然生态系统中，物质和能量的循环都离不开微生物，它们既是生产者，也是消费者。通过分解环境中的各种有机物，其中包括人类活动所产生的废弃物和有机污染物，它们不仅维持了自身的生存，同时也维持了自然生态系统的相对平衡，“清洁”人类的居住环境。

人类利用微生物已有几千年的历史，利用微生物处理由人类产生的各种污染物也有一百多年的历史，随着生物技术的不断发展和人们对环境质量的日益重视，环境微生物技术应运而生。人们利用微生物处理环境中的污染物，保护我们的环境；还利用微生物检测环境的质量，分析污染物对人类可能产生的危害。

《环境微生物技术》一书包括微生物技术基础和在环境保护中的应用这两个方面的内容，同时也论述了微生物技术在环境保护方面的最新成就。微生物技术基础主要包括微生物的类群、生理生化和生态，以及微生物在环境中的作用等内容。此外，还增加了新的研究成果，如新的分类方法和微生物在物质循环中作用的新途径。微生物技术在环境保护方面的应用有两个，一是微生物环境监测技术；二是微生物污染治理和污染物资源化技术。即包括微生物对污染物的降解转化的机理，微生物处理技术及微生物修复技术，微生物在环境可持续发展中的作用。总之，努力从生态系统的各级水平反映微生物技术在环境保护中的应用。

《环境微生物技术》一书共分 12 章，力求反映现代最新的理论和技术研究成果，同时兼具实用性，使之既适合作为大中专学校环境科学和工程、生物工程专业的教材，也适合作为相关专业的学生、科研人员和技术管理人员的参考用书。

在本书的编写过程中，由于编者水平和编写时间的限制，难免有遗漏和错误之处，希望广大读者和同行批评指正，以利于以后进一步修改提高。

杨柳燕

于墨尔本大学

# 目 录

序言

前言

第一章 绪 论 .....	( 1 )
第一节 环境微生物技术定义和内容 .....	( 1 )
一、微生物技术 .....	( 1 )
二、环境微生物技术 .....	( 1 )
三、环境微生物技术的研究内容 .....	( 2 )
第二节 环境微生物技术的发展历程 .....	( 3 )
一、废水处理微生物技术的发展历程 .....	( 3 )
二、固体废物微生物处理的发展历程 .....	( 5 )
三、环境微生物检测技术 .....	( 7 )
四、现代环境微生物技术 .....	( 7 )
第三节 对环境微生物技术发展的展望 .....	( 8 )
一、微生物的特点决定环境微生物技术发展空间 .....	( 8 )
二、分子水平的环境微生物技术 .....	( 9 )
三、宏观生态系统的环境微生物技术 .....	( 9 )
参考文献 .....	( 10 )
第二章 微生物学基础 .....	( 11 )
第一节 微生物主要类群 .....	( 11 )
一、原核微生物 .....	( 11 )
二、真核微生物 .....	( 23 )
三、非细胞型微生物 .....	( 30 )
第二节 微生物的培养和生长 .....	( 32 )
一、微生物的营养 .....	( 32 )
二、微生物的生长 .....	( 36 )
第三节 微生物的代谢和遗传 .....	( 44 )
一、微生物的代谢 .....	( 44 )
二、微生物的遗传 .....	( 54 )
参考文献 .....	( 63 )
第三章 环境中微生物的行为和作用 .....	( 64 )
第一节 微生物在环境中的存在 .....	( 64 )

---

一、水体中的微生物 .....	( 65 )
二、土壤中的微生物 .....	( 67 )
三、空气中的微生物 .....	( 68 )
四、极端环境中的微生物 .....	( 69 )
第二节 微生物与生物环境之间的关系 .....	( 73 )
一、共生 .....	( 73 )
二、互生 .....	( 77 )
三、寄生 .....	( 77 )
四、拮抗 .....	( 79 )
五、捕食 .....	( 80 )
第三节 微生物在生物地球化学循环中的作用 .....	( 80 )
一、碳素循环 .....	( 80 )
二、氮素循环 .....	( 83 )
三、硫素循环 .....	( 87 )
四、磷素循环 .....	( 89 )
第四节 微生物对环境的污染和危害 .....	( 91 )
一、病原性微生物 .....	( 91 )
二、微生物代谢产物对环境的污染 .....	( 93 )
三、工农业生产过程中的微生物污染和危害 .....	( 96 )
参考文献 .....	( 98 )
<b>第四章 环境检测微生物技术 .....</b>	<b>( 99 )</b>
第一节 分子水平的微生物检测技术 .....	( 99 )
一、DNA 扩增技术 .....	( 100 )
二、微生物酶检测技术 .....	( 104 )
三、金属硫蛋白的检测技术 .....	( 108 )
四、核酸和蛋白加合物的检测技术 .....	( 109 )
第二节 细胞水平的微生物检测技术 .....	( 111 )
一、发光细菌检测技术 .....	( 111 )
二、沙门氏菌回复突变试验 .....	( 116 )
三、污染物定量结构与微生物毒性的关系 .....	( 118 )
第三节 微宇宙的微生物检测技术 .....	( 124 )
一、污染物对微生物群落的影响检测技术 .....	( 124 )
二、土壤微生物的呼吸率试验 .....	( 127 )
三、污染物对微生物代谢的影响试验 .....	( 129 )
第四节 环境质量的微生物监测技术 .....	( 132 )

一、水质的细菌学检验技术 .....	( 132 )
二、微生物群落监测法 .....	( 135 )
三、微生物传感器 .....	( 139 )
参考文献 .....	( 142 )
<b>第五章 环境微生物控制技术 .....</b>	<b>( 143 )</b>
第一节 废水处理过程中的微生物控制技术 .....	( 143 )
一、化学品消毒杀菌技术 .....	( 143 )
二、紫外线消毒方法 .....	( 151 )
三、原生动物控制废水处理过程中的微生物 .....	( 154 )
第二节 水体富营养化的控制技术 .....	( 156 )
一、湖泊富营养化的原理及现状 .....	( 156 )
二、水体富营养化的控制技术 .....	( 157 )
第三节 水体中的微生物控制技术 .....	( 161 )
一、饮用水的消毒技术 .....	( 161 )
二、工业循环水的微生物控制技术 .....	( 165 )
参考文献 .....	( 170 )
<b>第六章 微生物对污染物的降解和转化过程 .....</b>	<b>( 172 )</b>
第一节 微生物对天然污染物的降解转化 .....	( 172 )
一、微生物对糖类物质的降解和转化 .....	( 172 )
二、微生物对脂类物质的转化 .....	( 176 )
三、蛋白质的转化 .....	( 178 )
四、石油类物质的降解 .....	( 179 )
第二节 人工合成有机化合物的微生物降解 .....	( 182 )
一、农药的降解 .....	( 182 )
二、多氯联苯与二噁英的降解 .....	( 187 )
三、去垢剂的降解 .....	( 191 )
四、染料的降解 .....	( 191 )
五、污染物定量结构与微生物降解活性的关系 .....	( 194 )
第三节 微生物降解动力学 .....	( 199 )
一、基本模型 .....	( 199 )
二、活性污泥反应动力学 .....	( 202 )
三、有毒有害物质存在时的反应动力学 .....	( 203 )
第四节 金属的微生物转化 .....	( 205 )
一、汞的微生物转化 .....	( 205 )
二、砷的微生物转化 .....	( 207 )



---

三、硒的微生物转化 .....	( 209 )
四、其他金属的微生物转化 .....	( 210 )
参考文献 .....	( 211 )
<b>第七章 水体中有机污染物的微生物处理技术 .....</b>	<b>( 213 )</b>
<b>第一节 水体有机污染物的好氧微生物处理技术 .....</b>	<b>( 214 )</b>
一、活性污泥法 .....	( 214 )
二、生物膜法 .....	( 221 )
三、水源水微污染物的微生物处理技术 .....	( 229 )
四、利用酵母处理含酚废水技术 .....	( 232 )
<b>第二节 水体有机污染物的厌氧微生物处理技术 .....</b>	<b>( 234 )</b>
一、厌氧处理的基本原理 .....	( 235 )
二、厌氧处理的主要方法 .....	( 235 )
三、影响有机污染物厌氧处理效果的因素 .....	( 238 )
<b>第三节 水中有机污染物的联合处理技术 .....</b>	<b>( 240 )</b>
一、水解-好氧处理工艺 .....	( 240 )
二、间歇式活性污泥法 .....	( 246 )
三、光合细菌法 .....	( 246 )
<b>第四节 水中污染物的微生物生态处理技术 .....</b>	<b>( 247 )</b>
一、水体中有机污染物的微生物自净作用 .....	( 248 )
二、氧化塘 .....	( 249 )
三、人工湿地处理系统 .....	( 253 )
四、土地处理系统 .....	( 254 )
参考文献 .....	( 256 )
<b>第八章 固体和气体有机污染物的微生物处理技术 .....</b>	<b>( 257 )</b>
<b>第一节 固体有机废物的堆肥处理技术 .....</b>	<b>( 259 )</b>
一、好氧堆肥 .....	( 259 )
二、厌氧堆肥 .....	( 269 )
三、堆肥过程中难降解有机污染物的生物降解 .....	( 270 )
<b>第二节 固体有机废物的卫生填埋处理技术 .....</b>	<b>( 272 )</b>
一、基本原理 .....	( 272 )
二、卫生填埋过程 .....	( 274 )
三、渗滤液的处理 .....	( 275 )
四、填埋场气体处理 .....	( 278 )
<b>第三节 气体有机污染物的微生物处理技术 .....</b>	<b>( 279 )</b>
一、基本原理 .....	( 280 )

二、处理方法 .....	( 281 )
三、影响因素 .....	( 285 )
参考文献 .....	( 287 )
<b>第九章 微生物处理无机污染物技术 .....</b>	<b>( 288 )</b>
第一节 水体中无机污染物的微生物处理技术 .....	( 288 )
一、微生物脱氮的技术 .....	( 288 )
二、微生物除磷的技术 .....	( 296 )
三、微生物处理重金属技术 .....	( 306 )
第二节 固体和气体无机污染物的微生物处理技术 .....	( 311 )
一、煤的脱硫技术 .....	( 311 )
二、氨去除技术 .....	( 317 )
三、含硫气体微生物去除技术 .....	( 320 )
四、二氧化碳控制技术 .....	( 322 )
参考文献 .....	( 324 )
<b>第十章 污染环境的微生物修复技术 .....</b>	<b>( 325 )</b>
第一节 微生物修复的基本原理 .....	( 325 )
一、基本概念 .....	( 325 )
二、微生物修复的影响因素 .....	( 326 )
三、微生物修复的一般过程 .....	( 333 )
第二节 有机污染环境的微生物修复技术 .....	( 335 )
一、地表水有机污染的微生物修复 .....	( 335 )
二、地下水有机污染的微生物修复 .....	( 338 )
三、土壤中有有机污染的微生物修复 .....	( 342 )
四、多环芳烃污染的微生物修复 .....	( 345 )
第三节 无机污染环境的微生物修复技术 .....	( 348 )
一、地表水氮污染的修复技术 .....	( 348 )
二、地下水氮污染的修复技术 .....	( 352 )
三、微生物对土壤中金属污染修复 .....	( 357 )
参考文献 .....	( 361 )
<b>第十一章 现代微生物技术在环境保护中的应用 .....</b>	<b>( 362 )</b>
第一节 基因工程与环境保护 .....	( 362 )
一、降解性质粒 .....	( 363 )
二、构建基因工程菌降解污染物 .....	( 367 )
三、转基因植物防治虫害 .....	( 369 )
第二节 细胞工程与环境保护 .....	( 372 )

一、基本概念 .....	( 372 )
二、细胞融合构建环境工程菌 .....	( 375 )
三、固定化微生物处理污染物的研究 .....	( 377 )
第三节 酶工程与环境保护 .....	( 383 )
一、基本概念 .....	( 383 )
二、酶处理有机污染物的研究 .....	( 384 )
三、固定化酶处理污染物技术 .....	( 385 )
第四节 发酵工程与环境保护 .....	( 387 )
一、基本概念 .....	( 387 )
二、固体发酵 .....	( 388 )
三、有机废物生产蛋白饲料 .....	( 389 )
参考文献 .....	( 391 )
<b>第十二章 微生物与可持续发展</b> .....	( 393 )
第一节 微生物的清洁生产技术 .....	( 393 )
一、微生物冶金 .....	( 394 )
二、微生物采油 .....	( 396 )
三、微生物生产化学品 .....	( 397 )
第二节 微生物作为环境友好材料 .....	( 406 )
一、微生物絮凝剂 .....	( 406 )
二、微生物肥料 .....	( 410 )
三、微生物农药 .....	( 413 )
四、微生物表面活性剂 .....	( 417 )
第三节 微生物的废物资源化技术 .....	( 420 )
一、废物生产单细胞蛋白 .....	( 421 )
二、纤维素微生物分解的资源化 .....	( 422 )
三、有机废弃物产乙醇技术 .....	( 423 )
第四节 微生物的废物能源化技术 .....	( 425 )
一、固体有机废物的发酵产甲烷技术 .....	( 425 )
二、有机污染物的厌氧产氢技术 .....	( 426 )
三、光合细菌的产氢技术 .....	( 427 )
参考文献 .....	( 428 )
<b>索 引</b> .....	( 430 )

# 第一章 绪 论

## 第一节 环境微生物技术定义和内容

自古以来，人们就进行酿酒、制醋、酱菜、堆肥等活动，但是却不知道微生物的存在。18世纪以后，随着人们对微生物的认识不断加深，微生物在各行各业中得到了广泛的研究和应用，形成了很多微生物学的分支学科，环境微生物技术就是其中一个。

### 一、微生物技术

以前，人们主要利用微生物来生产生物产品，微生物技术（microbial technology）常常被混同于生物技术或生物工程。生物技术不仅包括微生物技术，而且包括以植物或动物为生物材料的技术，因此，其内容更加广泛和丰富，微生物技术只是生物技术中的一个分支。随着分子生物学的发展，特别是基因工程技术的广泛运用，越来越多的微生物基因被转入到植物或动物的细胞内，或动植物的基因被转入到微生物的细胞内，生物技术开始走向新的高度，微生物技术也将出现新的辉煌。微生物技术同人类的生活密切相关，采用微生物发酵技术可以进行乙醇、丙酮、丁醇、甘油和各种有机酸及蛋白质、油脂的工业生产；利用微生物作为生物农药可以防治害虫；把微生物的杀虫基因导入棉花植株中得到的转基因抗虫棉对棉铃虫有显著抗性；微生物还可用于环保、采油等领域，或者作为重要的生物材料，组建遗传工程菌，生产药品、生化制剂等。因此，微生物技术的确在人类生产和生活中发挥重要的作用。

### 二、环境微生物技术

环境微生物技术（environmental microbial technology）是微生物技术中的一部分，它是利用微生物来提高环境质量的技术，其内容不仅包括防止污染物进入环境、修复被污染的环境和使废物资源化，还包括环境质量的微生物监测和控制技术。因此，环境微生物技术对日益发展的经济社会来说是一门非常重要的技术学科。

环境微生物技术以环境微生物学（environmental microbiology）为基础，并

与其他学科相互交叉、相互渗透。对环境微生物技术的学习和研究可使我们获得利用微生物来保护我们生存环境的技术和方法，推动生物圈的可持续发展，同时也可使我们开发新的微生物资源从而造福人类。

环境微生物技术和环境微生物学既有联系又有区别，它们都是研究与环境有关的微生物行为，环境微生物学侧重于原理和方法学等基础研究，而环境微生物技术侧重于与环境 and 微生物有关的技术方法的探索和应用。

环境微生物学是研究人类生存环境与微生物之间相互关系与作用规律的科学，是 20 世纪 60 年代后期兴起的一门新兴学科。环境微生物学的主要研究内容与任务有以下几个方面（王家玲 1985）：

（1）自然环境中的微生物生态学研究。环境微生物学研究自然环境中的微生物群落、结构、功能与动态；研究不同环境中微生物对物质循环和能量流动的作用与机理，进而探索其对环境质量的影响。包括这一部分内容在内的环境微生物学可称为广义的环境微生物学。

（2）污染环境中的微生物生态学研究。这部分内容也有人称为“污染微生物学”，它研究污染环境 with 微生物群落之间的相互关系，包括污染物对微生物的影响和微生物对污染物质的降解、转化的影响等。

（3）污染物生物处理中的微生物学原理和方法研究。环境微生物研究污染物生物处理过程的微生物群落组成、结构和功能，污染物降解转化的机制研究，高效降解菌种的分离筛选和各种处理新技术的基础研究。

（4）环境监测与评价的微生物学方法和原理研究。包括常规的污染水体微生物学监测方法，以微生物作为生物材料检测污染物毒性和环境质量状况等。

### 三、环境微生物技术的研究内容

随着人们对环境中微生物了解的不断深入和生物技术的飞速发展，环境微生物技术的研究范围越来越广，它并不局限于环境污染的末端处理，而是深入到人们生活和生产的各个过程中，其主要的研究内容有以下几个方面：

（1）微生物处理污染物方法研究。环境微生物技术的研究，实际上是从研究污水生物处理开始的。以活性污泥法为中心的各种污水处理工程的研究和应用，曾经有力地推动了整个环境微生物技术的发展。筛选高效的降解菌来处理污染物，运用遗传工程手段培育“超级细菌”，以及各种高效低耗的新处理技术的研究、开发，必将使环境微生物技术的内容不断得到丰富、充实和发展（马文漪和杨柳燕 1998）。

（2）利用微生物实现清洁生产和废物资源化。利用微生物发酵替代重污染的化工生产，用酶制剂替代化学催化剂实现绿色化学，利用微生物基因技术提高植

物抗虫能力而减少化学农药的使用, 不仅提高生产效率, 而且减少环境污染。对已有的污染物进行资源化, 如堆肥、高浓度有机废水产甲烷等, 从而提高资源的利用率, 减轻环境污染。

(3) 环境中微生物污染的控制。有些微生物会对环境或人类产生危害, 需要开发各种控制技术, 如利用有益微生物防止有害微生物的技术、紫外线杀菌技术和化学杀菌剂等。在我国, 控制由蓝细菌或微型藻类引起的水体富营养化也是其中的一个方面。

(4) 利用微生物进行环境监测与评价。细菌总数的测定, 大肠菌群和粪链球菌等的监测, 都是水体污染程度监测的常用微生物学监测方法。后来出现了利用微生物快速监测环境致突变物和致癌物的多种方法。现在利用分子生物学的方法, 只对细胞的某一部分进行检测, 如分子杂交、免疫分析等等, 利用微生物技术不仅可以评价与人类活动有关的环境质量的优劣, 也可以评价污染物的毒性和生物降解性, 从环境保护的角度出发, 为化学品的开发和使用提供依据。

## 第二节 环境微生物技术的发展历程

环境微生物技术是在其他学科中孕育、发展并不断相互渗透, 最后汇集而成的一门交叉技术学科。环境微生物技术分别来自于建筑工程中水处理技术、环境医学中的病原性微生物控制和检测技术、生物化工工程中的发酵技术、微生物学中的菌株筛选分析技术和现代分子生物学技术。各个学科从不同的角度研究环境微生物技术, 不断丰富其内容, 推动了环境微生物技术的发展, 因此, 在不同的时期都有其不同的特征, 下面简要地介绍一下该技术的发展过程。

### 一、废水处理微生物技术的发展历程

#### 1. 活性污泥法处理废水

生活污水的生物处理是环境微生物技术发展中的一个重要的标志。活性污泥法于1914年首先在英国被应用。在20世纪20年代, 我国上海建立了第一座活性污泥法的污水处理厂。在该法出现的初期, 由于受到各种技术条件的限制, 使其应用和推广工作进展缓慢。随着对微生物反应和净化机制研究的深入, 该法在生产应用中的不断改进和完善, 使它得到了迅速发展, 相继出现了多种工艺流程, 使其应用范围逐渐扩大, 处理效果不断提高, 工艺设计和运行管理更加科学。主要包括渐减曝气法、纯氧曝气法、深井曝气法、两段活性污泥法、粉末炭-活性污泥法、加压曝气法等工艺; 目前, 活性污泥法正在朝着快速、高效、低耗等方面发展, 如序批式活性污泥法等。

## 2. 好氧生物膜法处理废水

好氧生物膜法与活性污泥法是同时发展起来的一种微生物处理技术。第一个生物膜法处理设施（生物滤池）于 1893 年在英国试验成功，1900 年后开始付诸污水处理实践，并迅速在欧洲和北美得到广泛应用。早期的生物滤池（普通生物滤池）虽然处理污水效果较好，但其负荷低，占地面积大，易堵塞，应用受到了限制。后来人们对其进行了改进，如将处理后的水回流等，从而提高了水力负荷和生物需氧量（ $BOD_5$ ）负荷，这就是高负荷生物滤池。20 世纪 50 年代，在德国建造了塔式生物滤池，这种滤池高度大，具有通风良好、净化效能高、占地面积小等优点，其水力负荷和有机物负荷比高负荷生物滤池分别高 2~10 倍和 2~3 倍。生物转盘出现于 20 世纪 60 年代，由于它具有净化功能好、效果稳定、能耗低等优点，因此在一段时间内得到了广泛应用，在构造形式、计算理论等方面均得到了较大发展。在我国，20 世纪 60~70 年代，塔式生物滤池和生物转盘在印染、食品等行业的废水处理中也得到广泛运用。20 世纪 70 年代初期，一些国家将化工领域中的流化床技术应用于污水生物处理中，出现了生物流化床。生物流化床主要有两相流化床和三相流化床。多年来的研究和运行结果表明，生物流化床具有  $BOD_5$  容积负荷大、处理效率高、占地面积小、投资省等特点，其缺点是运行不够稳定，操作困难。现在，人们不断开发新的载体来克服其缺点。

从 20 世纪 80 年代开始，我国废水好氧生物处理的主流工艺是生物接触氧化法，它从生物滤池演化而来，具有处理负荷高，耐冲击能力强等特点。随着各种新型填料的出现，生物接触氧化法的处理效果不断提高，运行管理也越来越方便。

## 3. 厌氧法处理废水

厌氧生物处理法的应用已有一百多年历史，但同好氧法相比，存在着处理时间长、出水水质差、对低浓度有机废水处理效率低等缺点，从而使其应用受到限制，发展缓慢。从 20 世纪 70 年代起，出现了世界性能源紧张，促使污水处理向节能和实现能源化方向发展。厌氧处理最大的特点是既节能又产能，因此，厌氧生物处理法引起了人们的关注，其理论研究和实际应用都取得了很大的进展，出现了新的厌氧处理工艺或设备，如上流式厌氧污泥床、上流式厌氧滤池、厌氧接触法、厌氧流化床及两相厌氧消化工艺等，具有能耗小、剩余污泥量少、生成的污泥稳定和对高浓度有机污水处理效率高等优点。特别是上流式厌氧污泥床的广泛使用，推动了厌氧方法处理高浓度废水技术的发展，现已成为污水处理的主要方法之一。

从 20 世纪 90 年代，把厌氧处理和好氧处理有机结合在一起，如厌氧-好氧

工艺、水解—好氧处理工艺和序批式活性污泥法也得到广泛应用，这些工艺处理废水能力强，出水水质好，剩余污泥少，还能达到脱氮除磷的目的。

#### 4. 微生物脱氮除磷

1930年发现在生物滤池的深处存在着氮浓度下降的现象，并试验证明在生物滤池和曝气池中均可存在硝化作用和反硝化作用。1960年以后，微生物脱氮方面的研究进展很快。1970年以后便出现了3种用于去除BOD<sub>5</sub>和氮的生物脱氮系统：去碳、硝化、反硝化各自分开的三级生物脱氮系统；去碳、硝化同时进行，沉淀后再进行反硝化的二级生物脱氮系统及去碳、硝化、反硝化相结合的单级生物脱氮系统。这3种系统都需要在硝化阶段投加碱，在反硝化阶段投加有机物，这使生物脱氮系统的运行费用较高。为改进这些缺点，20世纪80年代前后，又产生了将反硝化设备放置在处理系统最前面的前置反硝化微生物脱氮法，又称缺氧—好氧生物脱氮法，是目前最广泛采用的脱氮工艺，同时还出现各种类型的微生物脱氮方法，如氧化沟法、Bardenpho工艺和Dephanox工艺等，并且脱氮同除磷渐渐结合在一起。

1955年，首次发现活性污泥可以吸收超过微生物正常生长所需的磷量。1965年，发现磷的过量吸收与微生物代谢密切相关。1967年，发现在二沉池污泥浓缩池中，处于厌氧态的污泥释放磷，致使浓缩池上清液的含磷量很高，将其撇出加石灰沉淀，然后将释放出磷后的污泥再回流到曝气池，以使之在好氧态下再摄取磷，这就形成了历史上最早生物除磷工艺，即Phostrip工艺。此外，在某些高负荷的传统活性污泥厂中也曾观察到去磷效果特别高，如San Antonio的Rillings Road污水处理厂等。这些厂中都具有传统的长而窄的推流式曝气池，随着污泥向前推进，溶解氧浓度逐渐增加。20世纪70年代初，Arizona大学的一个研究组从城市污水厂的活性污泥中分离了微生物，并对它做了吸磷试验，发现了其中假单胞菌—黄单胞菌群去磷能力高，而埃希氏菌—气单胞菌群去磷能力低，在后一类菌的污水基质中添加葡萄糖可诱导提高吸磷量。这个试验第一次探索了污泥中积磷细菌，为揭示微生物除磷的机制奠定了基础。随后发现污水处理中，磷和硝酸根的含量之间存在明显的关系。从而使微生物脱氮除磷技术得到迅速发展，各国学者根据厌氧、缺氧、好氧等池子的大小、排列、数量增减及混合液循环和回流方式的变化，推出了一系列生物除磷工艺或同时能除磷又能脱氮的工艺。现在使用最为广泛的是厌氧—缺氧—好氧工艺来处理废水。

## 二、固体废物微生物处理的发展历程

有机废物堆肥具有悠久的历史，早在几个世纪以前，农村中就将秸秆、落



叶、野草和动物粪便等堆积一起，使其发酵制成肥料。但是，真正对堆肥技术进行科学的探讨则始于 20 世纪初。1920 年，英国人埃·霍华德在印度把落叶、垃圾、动物及人的粪尿在土坑内堆成约 1.5m 高的土堆，隔数月翻堆一两次，共进行为期 6 个月的厌氧发酵，此法称为印多尔法。为了促进堆肥的好氧发酵，贝盖洛尔改进了印多尔法，他将固体废物和人粪肥分层交替堆积，并使翻堆由一两次改为多次翻堆，这就是贝盖洛尔法。上述方法在印度、德国、英国、美国、新西兰、澳大利亚、非洲等地都被广泛采用。与此同时，在意大利和法国还广泛采用落叶、垃圾、动物及人的粪便等先在密封系统进行厌氧发酵，再送入空气进行好氧发酵的堆肥化方法。后来，维迪尔和博达斯对该方法进行了改进。维迪尔将发酵渗滤液循环使用，充分供给空气以缩短腐熟时间；博达斯在堆肥中插入管子，使堆中充分通风，不用厌氧发酵，将发酵时间缩短 20d。

1932 年，荷兰 VAW 公司建立了改良印多尔法的范曼奈法工艺堆肥厂。其工艺是将未经破碎的垃圾用水调节湿度后，在室外堆积 4~8 个月（厌氧分解），然后破碎、分选。

1933 年，在丹麦出现了达诺堆肥工艺系统。这是一种运用回转窑发酵筒进行好氧发酵的方法，特点是发酵周期短，一般只需 3~4d。达诺法在西欧、日本都得到了广泛应用。与此同时，德国还开发了巴登法。该方法是先将垃圾中不能堆肥的无机物除去，然后与下水系统消化污泥一起露天堆置发酵 4~6 个月，最后再分选、破碎。

1940 年，在美国曾使用机械化的发酵槽，发酵周期缩短至 1~3 个月，这就是尼普·托马斯法。该方法采用多段竖炉发酵仓，通过接种特种细菌而使堆肥时间大大缩短。该方法由于显著的优越性而取得了专利。托马斯法的问世，促进快速堆肥的迅速发展。此后，美国又相继研制出了采用密闭发酵槽进行堆肥的福列萨法和箱型间歇堆肥等新工艺。

日本是在 20 世纪 50 年代开始对城市生活垃圾进行堆肥化处理研究的。到了 60 年代，日本已建成堆肥厂 30 多座，其中有 20 多家堆肥厂采用了达诺堆肥系统。70 年代初，由于城市生活垃圾成分逐渐多样化，大量的无机物和高分子有机物进入城市垃圾收集系统，给堆肥化生产带来了困难并严重影响了堆肥产品的质量，使日本的许多堆肥厂陆续停产关闭。到 1976 年，能运转的设施数目降到 8 个，堆肥法处理垃圾的数量仅占全国垃圾总量的 0.23%。到了 20 世纪 80 年代，土地资源紧张，垃圾填埋场地难于寻找，化肥大量使用使土壤耕作能力下降导致有机肥的需求增加；另外由于垃圾焚烧产生的二次污染严重，加上城市生活垃圾的分选破碎技术有了较高的发展，从而使日本逐渐认识到堆肥的价值，目前，日本的堆肥厂已恢复到 24 个。

填埋是固体废弃物处理的传统方法，早在公元前 3 000~1 000 年古希腊米诺

文明时期，古希腊就曾把垃圾分层覆土，埋入大坑中，这种原始的填埋方法比垃圾随意倾倒、露天堆放有了进步，但这种填埋会造成对水源和大气的污染。因此人们对传统的填埋方法进行不断改进和完善，出现了卫生填埋法。

卫生填埋处置法具有成本低廉、适用范围广、无二次污染、环保效果显著和处置彻底等优点。因此，此法得到世界各国的普遍采用。除极少数国家主要采用焚烧处置外，其他国家的一半以上的垃圾均采用了卫生填埋。我国现在也以卫生填埋为主，但是，我国土地资源有限，因此，将来可能要提高堆肥和焚烧处置的比例。

### 三、环境微生物检测技术

环境微生物检测方法最早是检测水体中的大肠菌群来反映水体被病原性微生物污染的状况，后来利用微生物来检测污染物的毒性也得到了大力发展，特别是20世纪70年代以来，又出现了利用微生物快速监测环境致突变物和致癌物的多种方法，Ames试验就是其中的一种。现在，利用微生物群落进行环境质量的监测，可以通过计数微生物的数量和种类来反映环境质量的优劣。

目前，利用分子生物学技术检测环境微生物得到广泛应用，如基因探针技术现已被用于环境微生物的检测，聚合酶链式反应（PCR）技术以其高敏感、高特异、简便快速而有益于环境微生物监测，英国已研制成功了用于水中常见致病微生物检测的DNA芯片，免疫检测技术如酶标法的建立和单克隆抗体技术的产生在提高疾病诊断水平的同时也使环境污染检测跃上了新的台阶。这些技术及由此产生的衍生方法已被广泛用于环境中致病菌、寄生虫、生物毒素等的检测，同时在环境中残留农药（包括各种杀虫剂、除草剂）的检测方面也发挥了很大作用。

生物传感器技术是当今备受世界关注的综合高技术领域。目前用于这一领域的传感器包括用于生物需氧量检测的BOD生物传感器和测定有机磷农药、除草剂、亚硫酸根离子、微生物等的生物传感器，用于微生物检测和环境污染物毒性效应评价的DNA传感器也成为研究开发的重点课题（马文漪和杨柳燕 1998）。

### 四、现代环境微生物技术

随着科学技术的发展，环境微生物技术的研究也不断深入和拓展，不再只局限于污染物的处理，而是已经转入到防止污染物产生方面。

1) 以基因技术在环境保护中的应用为代表，标志着现代环境微生物技术的到来。从筛选高效微生物菌株用于特殊污染物的处理，到利用细胞融合技术得到多质粒“超级菌”，再到采用基因工程技术构建环境工程菌，人们已经从利用微

生物发展到改造微生物来为人类服务。

2) 利用微生物进行污染环境的生物修复丰富了现在环境微生物技术的内容, 在 20 世纪 80 年代末, 大量的被污染环境需要修复, 利用微生物修复环境是一种有效的方法。较为成功的应用是 Exxon Valdez 号油轮在 1989 年 3 月 24 号触礁, 泄漏的原油污染了海水与附近海岸后, 采用微生物修复方法得到有效处理, 这是有史以来进行的最大规模的野外生物修复。以后, 各种微生物修复方法得到开发和应用, 如生物充气法、地下水循环法等。美国和欧洲等国已经对大量的污染土壤和地下水进行了修复 (Rittmann and McCarty 2001)。

3) 利用微生物处理污染物的范围不断扩大, 微生物不仅用来处理有机废水和固体废物, 而且还用来处理废气和水体中的重金属。用生物法处理空气中的污染物可以追溯到 20 世纪 50 年代中期, 最先是用于处理空气中低浓度的臭味物质。1959 年在德国的一个污水处理厂建立了一个填充土壤的生物过滤床, 用于控制污水输送管散发的臭味。60 年代人们开始采用生物过滤法处理气体污染物, 德国和美国首先开始对此方法进行深入研究。利用微生物处理废气直到 20 世纪 70 年代后才引起各国重视。从 80 年代起, 德国和荷兰大量采用生物过滤法控制工业生产过程中的挥发性有机物和有害气体。迄今, 德国和荷兰有 500 多座大规模的废气生物过滤处理装置。我国利用微生物处理重金属废水也已经取得成功。到了 20 世纪 90 年代初, 利用硫酸盐还原菌还原并吸附废水中的重金属, 并使出水达标排放。

4) 利用微生物实现废物资源化和能源化取得了不少成就, 如废水产氢、产乙醇和产甲烷等等。利用高浓度有机废水生产单细胞蛋白已经工业化, 大量的微生物农药、微生物肥料也得到了广泛应用。

### 第三节 对环境微生物技术发展的展望

#### 一、微生物的特点决定环境微生物技术发展空间

微生物的种类多样, 不仅包括原核生物类的细菌、放线菌、蓝细菌, 而且还有真核微生物类的酵母菌、霉菌、原生动物的非细胞型的病毒、亚病毒, 同时微生物生长的环境类型多样, 代谢类型多样, 这些特点决定了微生物是一个资源宝库, 在环境保护上具有巨大的开发潜力。

现在, 由于我们对微生物的分析方法还不完善, 世界上大多数微生物还没有被人们所认识, 据估算我们知道的土壤微生物种类只有实际存在种类的 1/10, 我们对极端环境条件下的微生物的研究才刚刚开始, 更何况微生物还有非常快的进化速率呢。因此, 很多微生物及其功能还不被我们了解, 就更谈不上利用了,

这就决定了环境微生物技术具有巨大的发展前景。因为我们还不清楚环境中的微生物是哪些，又是怎么发生作用的，所以用现在的目光去预测环境微生物技术的未来难免失之偏颇，因此，仅略作展望来表明作者对环境微生物技术发展的希望。

环境微生物技术一是随着分子生物学的进展向微观的方向发展，二是对微生物生态系统的研究向宏观方向发展。

## 二、分子水平的环境微生物技术

分子生物学的发展给环境微生物技术带来了新的机遇，通过基因工程技术，对微生物的基因进行定向改造，或把微生物的基因转入其他生物中，使其他生物获得新的性状，从而达到保护环境的目的。

1) 环境微生物的分子检测技术。研究各种快速的病原微生物检测技术，包括核酸检测技术和分子免疫技术，基因芯片也是一个发展方向。利用酶、核酸等大分子作为生物标记物来研究污染物生物毒性的机制，将推动环境微生物技术的研究更为深入。近年来随着免疫芯片技术的突破，有望在几年内开发出实用的检测污染物芯片。

2) 高效基因工程菌的构建技术。在自然界中，微生物之间通过各种途径进行基因的交换或发生突变，使微生物获得新的性状，人们可以利用基因工程技术加快微生物自然进化的速率来提高适应新环境的能力。将来有这样的可能，人类在生产一种化学品的时候，就对其在环境中的降解转化进行了大量的研究，并设计好其降解转化的有关酶系和有关的微生物，省略了自然界中依靠微生物自然进化而产生降解转化该化学品酶系的过程，防止其在环境中积累而产生危害。在研究环境基因工程菌的同时，另一个研究的重点要分析其在自然界中生存的能力，即同土著微生物的竞争能力，使环境基因工程菌在一定的条件下处于竞争优势，有利于对污染物的降解。

3) 微生物基因转移到动植物细胞内，使动植物具有抗虫、抗病和降解转化各种污染物的能力，达到保护环境的目的。如果能把微生物固定氮、分解磷的基因转移到植物中，对农业生产将是革命性的贡献，同时，降低对地表水和地下水的营养盐污染。

## 三、宏观生态系统的环境微生物技术

在自然界中，微生物常常混杂在一起，通过群落的功能起到净化环境的作用。研究微生物群落中微生物的相互作用，并加以利用也将大力促进环境微生物

技术的发展。同时，在一定的群落中常常有优势菌存在，通过对优势菌的研究，不仅能为分子水平研究环境微生物提供生物材料，而且能提高常规生物处理的效率。

1) 新型反应器的研究。开发新型反应器，有效提高微生物降解转化污染物的能力。对微生物群落功能的研究，开发如反刍动物胃一样的反应器，将纤维素转化为蛋白质等物质，作为饲料加以利用实现资源化。这对于人口众多的中国而言，在缓解耕地和生态环境保护之间的矛盾有着非常重要的意义。开发高效传氧的反应器，如膜反应器，实现供氧、分离和反应的一体化。一旦解决了流化床生物反应器的载体问题，相信在不久的将来，它会成为废水生物处理的主流技术。

2) 高效降解菌的筛选利用技术。筛选具有高效分解各种污染物的菌株，为快速降解或转化污染物服务，如黏菌分解纤维素技术。同时，难降解有机物的共代谢降解技术的研究、污染环境生物修复技术的研究和不同功能微生物的系统集成技术也将成为未来研究的重点。

3) 为了可持续发展，清洁生产也是环境微生物技术中的重要内容，利用微生物和酶进行化学品的生产来替代污染严重的化学生产过程，利用微生物获得能源，利用微生物进行造纸和漂白等，都将大有前途 (Wainwright 1999)。

4) 极端环境微生物的研究是一个很有前途的研究方向，它能提供常规条件下不存在的一些生物学性状，如酶在高温下的高活性等，使污染物能在高温条件下就能得到有效降解，从而应用于酒糟等废物的处理。

总之，环境微生物技术同其他学科共同发展，共同提高，具有巨大发展潜力。

(杨柳燕)

E-mail: yangly@nju.edu.cn

### 参 考 文 献

马文漪和杨柳燕. 1998. 环境微生物工程. 南京: 南京大学出版社  
王家玲. 1985. 环境微生物学. 北京: 高等教育出版社  
Rittmann B E and McCarty P L. 2001. Environmental Biotechnology: Principles and Applications. Boston; McGraw-Hill  
Wainwright M. 1999. An introduction to environmental biotechnology. Boston; Kluwer Academic Publishers

## 第二章 微生物学基础

通常人们把一切肉眼看不见或看不清楚的微小生物称为微生物 (microbe, microorganism), 因此, 它不是生物分类学上的专门名词, 而是一些个体微小, 构造简单的低等生物的总称。原核生物类的真细菌、古生菌, 真核生物类的真菌 (酵母、霉菌等)、原生动物和单细胞藻类等, 非细胞型生物类的病毒和亚病毒都是微生物学研究的范围。

微生物的类型多样, 但是它们有一定的共性, 因此, 把它们放在一起研究。它们的 5 大共性为: 体积小, 比表面积大; 对营养物质吸收多, 转化快; 生长旺盛, 繁殖速度快; 对环境适应能力强, 易发生变异; 分布广泛, 种类繁多。为了更好掌握环境微生物技术, 了解一些微生物学基础知识是很有必要的。本章就微生物的主要类群、生理和生化进行简要的叙述。

### 第一节 微生物主要类群

在生物学发展史上, 生物分类工作随着研究的不断深入而得到提高, 从最早的二界系统 (动物界和植物界)、三界系统 (动物界、植物界和原生生物界) 到五界系统 (原核生物界, 指细菌和蓝细菌; 原生生物界, 指大部分藻类与原生动物; 真菌界, 指酵母和霉菌; 植物界; 动物界)。后来学者建议分为六界: 病毒界、原核生物界、真核原生生物界、真菌界、植物界和动物界。近年来, 由于对极端环境中微生物研究的不断深入, 人们开始把生物分成三大域, 即真细菌 (eubacteria)、古生菌 (archaea) 和真核生物 (eukarya), 古生菌主要指极端嗜盐菌、极端嗜酸嗜热菌和产甲烷菌等。

#### 一、原核微生物

##### (一) 细菌

细菌 (bacterium) 是有别于古生菌的在系统发育中相关的一类单细胞原核生物 (prokaryote), 现称为真细菌。细菌细胞微小透明, 在光学显微镜下很难看清楚, 通常用适当的染料染色, 以增加标本与背景间折光率的差异, 然后再观察。活体细胞则可用相差显微镜直接观察。

### 1. 细菌细胞的形态和大小

尽管细菌种类繁多，形态千差万别，但其主要形态分为球状、杆状和螺旋状3种，分别称为球菌（coccus）、杆菌（rod）和螺旋菌（spirillum）（图 2.1）。另外还有柄细菌和鞘细菌等。

球菌的细胞呈球形或椭圆形，分裂后产生的新细胞常保持一定的空间排列方式（图 2.1A），在分类鉴定上有着重要意义。球菌包括单球菌、双球菌、链球菌、四联球菌、八叠球菌和葡萄球菌等。它们的代表种分别为尿素微球菌（*Micrococcus ureae*）、肺炎双球菌（*Diplococcus pneumoniae*）、溶血链球菌（*Streptococcus hemolyticus*）、四联微球菌（*Micrococcus tetragenus*）、尿素叠球菌（*Sarcina ureae*）和金黄色葡萄球菌（*Staphylococcus aureus*）。

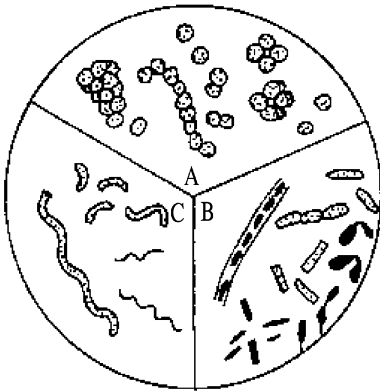


图 2.1 细菌的形态

杆菌的细胞呈杆状或圆柱状，其形态较球菌复杂。菌体直或稍弯，粗短或细长。末端钝圆、尖、膨大或平截状。如炭疽芽孢杆菌（*Bacillus anthracis*）的两端截平，鼠疫巴斯德氏菌（*Pasteurella pestis*）的两端略尖。杆菌细胞常沿一个平面分裂，菌体单个分散存在，或以短链状、长链状、栅栏状、“八”字形、丝状等方式排列（图 2.1B）。在一般情况下，以上排列方式并非形态学特征，而是生长阶段或培养条件等原因造成的。因此，对大多数杆菌来说，其细胞排列方式在分类鉴定中作用不大。

细胞呈弯曲杆状的细菌统称为螺旋菌。螺旋菌细胞壁坚韧，菌体较硬，常以单细胞分散存在，如紫硫螺旋菌（*Thiospirillum violaceum*）。虽然细菌细胞呈螺旋形，但如果菌体只有一个弯曲，且程度不足一圈，则称为弧菌（图 2.1C），如霍乱弧菌（*Vibrio cholerae*）。

柄细菌的细胞有特征性的细柄，后有固着器，可附着在基质上，如柄杆菌属（*Caulobacter*）。鞘细菌是指许多细胞共处在一个共同的鞘内，并作直线排列的细菌。鞘细菌借助固着器着生在固体物质上或自由生活，如球衣菌属（*Sphaerotilus*）。

细菌的大小可用显微镜测微尺测量，也可通过投影或照相制成图片后按放大倍数测算。测量细菌大小常以微米（ $\mu\text{m}$ ）为单位。球菌的大小（直径）一般为

0.5~2 $\mu\text{m}$ ；杆菌宽 0.5~1 $\mu\text{m}$ ，长 1~5 $\mu\text{m}$ ；螺旋菌宽 0.25~1.7 $\mu\text{m}$ ，其长度（菌体两端间的距离）为 2~60 $\mu\text{m}$ 。菌体大小除了与菌龄和培养条件等有关外，还与染色方法有关。幼龄菌的长度一般比老龄菌长，但菌体宽度相对恒定。培养基渗透压增高时细胞变小，另外在进行显微镜观察时常需要染色，染色前对菌体的干燥固定使测得的菌体大小比活菌体小。若采用负染色法，使背景着色，衬托菌体，则测量的结果比活菌体大。因此，细菌大小常常用平均值或代表性的数值来表示，同时还注明所用的测定方法和培养条件。

## 2. 细菌细胞的结构

细菌细胞是典型的原核细胞，其结构可分为两部分：一是不变部分或基本部分，如细胞壁、细胞膜、细胞质、拟核和核糖体，为全部细菌细胞所共有；二是可变部分或特殊部分，如鞭毛、糖被、芽孢和气泡等，这些结构在部分细菌中存在，与某些特定的功能有关（图 2.2）。

(1) 细胞壁 (cell wall)。细胞壁位于菌体外表面，较坚韧而富有弹性，占细胞干重的 10%~25%。其主要功能为：固定细胞外形；协助鞭毛运动；保护细胞免受外力损伤；有助于正常细胞分裂；阻拦大分子物质进入细胞；使细胞具有一定抗原性、致病性及对噬菌体的敏感性等。

通过染色可发现不同细菌细胞壁的结构和化学组成是不同的。革兰氏染色是一种最基本的细菌鉴别染色法，细菌经革兰氏染色后，可分为革兰氏阳性（Gram-positive,  $G^+$ ）和革兰氏阴性（Gram-negative,  $G^-$ ）两大类。 $G^+$  细菌细胞壁的化学组成以肽聚糖（peptidoglycan）为主，这是真细菌所特有成分。75%的肽聚糖亚单位纵横交错连接，形成致密的网格结构。除肽聚糖外，大多数  $G^+$  细菌的细胞壁中还含有磷壁酸（teichoic acid），使细胞壁表面形成一定的负电荷。

$G^-$  细菌的细胞壁分为内壁层和外壁层。内壁层紧贴细胞膜，由肽聚糖组成，仅 30%的肽聚糖亚单位彼此交织联结，网状结构比较疏松。外壁层可再分为内、中、外 3 层，内层为脂蛋白层，中间为磷脂层，最外层为脂多糖层。脂多糖是  $G^-$  细菌细胞外壁层的主要成分，也是病原菌内毒素的主要成分，它由核心多糖、O 抗原多糖侧链和类脂 3 部分组成。 $G^+$  和  $G^-$  细菌细胞壁的结构和化学组成的比较见表 2.1。

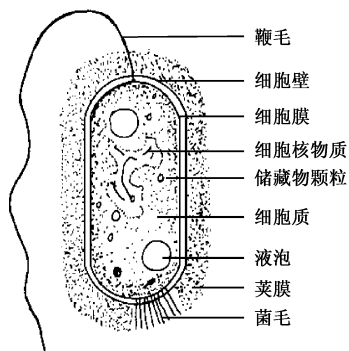


图 2.2 细菌细胞结构的模式图



表 2.1 G<sup>+</sup> 和 G<sup>-</sup> 菌细胞壁的结构和组成（占细胞壁干重的比例）比较

性 质		G <sup>+</sup> 细菌	G <sup>-</sup> 细菌	
			内壁层	外壁层
结构	厚度/nm	20~80	2~3	8
	层次 肽聚糖结构 与细胞膜关系	单层 多层, 75%亚单位交连, 网格紧密坚固 不紧密	多层 单层, 30%亚单位交连, 网格较疏松  紧密	
组成	肽聚糖	占细胞壁干重的 40%~90%	5%~10%	无
	磷酸	有或无	无	无
	多糖	有	无	无
	蛋白质	有或无	无	有
	脂多糖	1%~4%	无	11%~22%
	脂蛋白	无	有或无	有
对青霉素反应		敏感	不够敏感	

(2) 细胞膜 (cell membrane)。又称细胞质膜 (cytoplasmic membrane) 或质膜 (plasma membrane)，是紧贴在细胞壁内侧的一层柔软而富有弹性的半透性膜，它的重量占菌体总重的 10%。细胞膜上有丰富的酶系，是细菌重要的代谢活动中心。细胞膜的化学组成主要是磷脂、蛋白质和多糖，它们的数量和种类随菌体生理状态而变化。

细胞膜主要功能表现在：控制细胞内、外物质（营养物质和代谢产物）的运输、交换；具屏蔽作用，维持细胞内正常渗透压；是合成细胞壁各种组分（肽聚糖、磷酸）和荚膜等大分子物质的场所；是进行氧化磷酸化或光合磷酸化的产能基地；是许多酶（ATP 合成酶、呼吸酶等）和电子传递链组分的所在部位；细胞膜还是鞭毛的着生点并提供其运动所需的能量。

(3) 拟核 (nucleoid)。又称核质体 (nuclear body)，是原核生物所特有的原始细胞核。细菌的拟核是一个大型环状的双链脱氧核糖核酸 (DNA) 分子，长度为 0.25~3.0mm，卷曲折叠于核区。拟核是负载细菌遗传信息的主要物质基础。

(4) 细胞质 (cytoplasm) 及其内含物 (inclusion body)。细胞质与拟核皆由原生质体分化而来，在拟核与细胞膜之间是以蛋白质为主体的细胞质。细胞质无色透明，呈黏液状，其主要化学组分为水、蛋白质、脂类、核酸，并有少量糖和无机盐。细胞质中含有核糖体、气泡、质粒和其他颗粒状内含物。

核糖体 (ribosome) 是由约 60% 的 RNA 和 40% 的蛋白质组成的以核蛋白形式存在的颗粒状结构。高速离心时，原核生物核糖体沉降系数均为 70S，由一个 30S 亚基和一个 50S 亚基组成。亚基在适当条件下解离为 RNA 和蛋白质分子。

核糖体是蛋白质合成的场所。

气泡 (gas vacuole) 是许多进行营光合作用、无鞭毛水生细菌细胞内含有的充满气体的小泡囊。气泡由厚仅 2nm 的蛋白质膜所包围, 数量很多, 具有调节细胞比重使其飘浮在合适水层中的作用。

其他内含物包括异染颗粒 (metachromatic granule)、聚  $\beta$ -羟基丁酸 (poly- $\beta$ -hydroxybutyric acid, PHB)、糖原 (glycogen)、硫粒 (sulfur granule)、藻青素、磁小体、羧酶体和伴胞晶体等。异染颗粒是偏磷酸盐的聚合物, 用甲苯胺或甲烯蓝染成紫红色。它是磷源和能源性储藏物, 并有降低渗透压的功能。聚  $\beta$ -羟基丁酸颗粒是  $\beta$ -羟基丁酸的多聚体, 不溶于水, 易被脂溶性染料着色, 光学显微镜下可见。它是碳源和能量的储藏物, 并可直接或间接用做还原力。近年来, 在一些细菌细胞中又发现了类似于 PHB 的聚羟链烷酸 (polyhydroxyalkanoate, PHA)。糖原是碳源和能源的储藏物, 遇碘呈红褐色, 可在光学显微镜下看到。硫粒是生活在含  $H_2S$  环境中的硫磺细菌细胞内积累的折光性很强的含硫颗粒, 是硫素储藏物质, 也是某些化能自养型硫细菌储存的能源物质。

(5) 糖被 (glycocalyx)。是某些细菌在新陈代谢过程中形成的, 分泌于细胞壁外的一层厚度不定的黏液状物质。糖被的有无、厚薄除了与菌株的遗传特性有关外, 还与环境条件密切相关。糖被有时用负染色法可以在光学显微镜下看见。按糖被覆盖细胞壁的厚度及形状, 可把糖被分为以下几种: 具有一定外形, 相对稳定地附着于细胞壁外 (图 2.2), 厚约 200nm, 称为荚膜 (capsule) 或大荚膜; 厚度小于 200nm, 称为微荚膜; 无明显边缘, 疏松地向周围环境扩散的, 称为黏液层 (slime layer); 若黏液层局限于细胞一端, 就称为黏接物, 可使细胞特异性地附着在物体表面; 各菌体外面的荚膜物质互相融合, 连为一体, 组成共同的荚膜, 多个菌体包埋其中, 即成为菌胶团 (zoogloea)。

糖被的化学组成因菌种而异, 主要是多糖, 有的也含有多肽、蛋白质、脂及由它们组成的复合物——脂多糖、脂蛋白等。糖被的主要功能为: 可以保护细胞免受干燥的影响; 作为细胞外碳源和能源性储藏物质; 能够增强某些病原菌的致病能力; 堆积某些代谢产物; 通过糖被或有关构造可使菌体附着于适当物质表面。

(6) 鞭毛和菌毛。鞭毛 (flagellum) 是某些细菌长在体表的细长、弯曲的丝状物 (图 2.2)。鞭毛的化学成分主要是蛋白质, 约占 99% 以上, 以及碳水化合物、类脂和矿物质, 总量不超过 1%。鞭毛长度往往超过菌体若干倍, 但直径很细, 一般为 10~20nm, 只有在电镜下才能直接观察到。经特殊染色, 使媒染剂与染料的复合物附着并沉积在鞭毛上, 加粗其直径, 则可用普通光学显微镜观察到。细菌鞭毛数目从一根到几十根, 具有运动的功能。鞭毛的着生方式多样, 有一端单生、两端单生、一端丛生、两端丛生和周生等。

菌毛 (fimbria 或 pilus) 是长在细菌体表的一种纤细 (直径 7~9nm)、中空、短直、数量较多 (250~300 根) 的蛋白质附属物 (图 2.2), 主要见于  $G^-$  细菌, 少数  $G^+$  细菌也有。菌毛有很多类型, 具不同功能, 主要与吸附有关, 与运动无关。有一种性状介于鞭毛与上述普通菌毛之间的特殊菌毛称为性菌毛, 每一个细胞有 1~4 根, 其功能是在不同性别的菌株间传递 DNA 片段, 有的性菌毛还是 RNA 噬菌体的特殊吸附位点。

(7) 芽孢 (spore)。芽孢是某些细菌生长到一定时期, 细胞质浓缩凝集, 逐步形成的一个圆形、椭圆形或圆柱形的抗逆性休眠体。芽孢壁厚而致密, 折光性强, 不易着色, 通透性差, 含水量低, 酶含量少, 代谢活力低, 对高温、干燥、辐射、酸、碱和有机溶剂等杀菌因子具有极强的抵抗能力。能否形成芽孢, 以及芽孢的形状、大小及其在细胞内的位置, 是细菌种的特征, 在分类鉴定上有一定意义。能形成芽孢的细菌种类不多, 最主要的是芽孢杆菌属 (*Bacillus*) 和梭菌属 (*Clostridium*) 中的一些细菌。此外, 芽孢八叠球菌属 (*Sporosarcina*)、脱硫肠状菌属 (*Desulfotomaculum*, 杆状) 和少数弧菌属 (*Vibrio*) 的细菌也能形成芽孢。芽孢在适宜的条件下萌发, 形成新菌体。由于一个细菌细胞只能形成一个芽孢, 一个芽孢也只能产生一个营养体, 因此芽孢不是细菌的繁殖形式。

### 3. 细菌的繁殖

裂殖是细菌最普遍、最主要的繁殖方式。球菌的分裂方式与其细胞排列密切相关。杆菌和螺旋菌在分裂前先延长菌体, 然后垂直于长轴分裂。分裂后两个子细胞大小基本相等, 称为同型分裂。若分裂后两个子细胞大小不等, 则称为异型分裂, 此种情况是当细菌生长于陈旧培养基上时偶尔会出现。少数细菌进行出芽繁殖。还有一些细菌能进行有性接合, 通过性菌毛传递遗传物质, 但频率很低。

### 4. 细菌的培养特征

细菌的培养特征多种多样, 包括在固体培养基、半固体培养基、明胶培养基和液体培养基中的培养特征。来源于一个或少数几个细胞的细菌生长在固体培养基上, 形成肉眼可见的微生物群体, 称为菌落 (colony)。菌落特征与组成菌落的细胞结构和生长行为 (好气性、运动性、培养条件、培养时间等) 有关, 各种微生物在一定条件下形成的菌落特征具有一定的稳定性和专一性, 这是衡量菌种纯度, 辨认和鉴定菌种的重要依据。

细菌在液体培养基中生长, 使培养基混浊, 混浊情况因细菌对  $O_2$  要求不同而有别: 兼性厌氧菌使培养液均匀混浊, 需氧菌仅使培养液上部混浊, 厌氧菌仅使培养液下部混浊。有的细菌在培养液表面形成菌环、菌膜或在底部产生絮状沉淀, 有的则可产生气泡、色素。

## (二) 古 生 菌

在过去很长时间里,虽然人们对产甲烷菌和嗜热细菌进行了大量的研究,但多只集中在它们的产甲烷和嗜热特性上,一直把它们归入真细菌的范畴。直到20世纪70年代,由于分子生物学的发展,特别是16S rDNA序列分析方法的不断完善,发现产甲烷菌、嗜热菌等极端环境微生物既不同于一般的细菌,也不同于真核生物,才把它们从细菌中划分出来,称为古生菌,其余的细菌称为真细菌。古生菌有其特殊的形态结构、生理生化功能和生态环境,在第三章第一节极端环境微生物中还要进行阐述。

### 1. 古生菌的形态

古生菌的形态和真细菌类似,也是多种多样的,菌株有 $G^+$ 和 $G^-$ 。细胞形态有球状、螺旋状、叶状、八叠球状、短杆状、长杆状、盘状、丝状和不规则状。古生菌有的是单细胞,有的是多细胞集合体。它们的直径为 $0.1\sim 15\mu\text{m}$ ,一些丝状古生菌能长到 $200\mu\text{m}$ 长。

### 2. 古生菌的细胞结构和化学组成

古生菌的细胞结构和化学组成同真细菌和真核生物有所不同(表2.2), $G^+$ 古生菌的细胞壁只有均匀薄薄的一层,由各种复杂的聚合体组成,如一些产甲烷的古生菌细胞壁中含有假胞壁质(pseudomurein)。 $G^-$ 古生菌细胞壁远没有 $G^-$ 真细菌细胞壁那样复杂,它们通常只是一个由蛋白质或糖蛋白组成的表层。

表 2.2 真细菌、古生菌和真核生物的特征比较 (Prescott et al. 1999)

特 征	细菌 (真细菌)	古生菌 (古细菌)	真核生物
有核仁、核膜的细胞核	无	无	有
共价闭合环形的 DNA	有	有	无
复杂内膜细胞器	无	无	有
细胞壁含肽聚糖 (胞壁酸)	有	无	无
膜脂特征	酯键脂、直链脂肪酸	醚键脂、支链烃	酯键脂、直链脂肪酸
起动 tRNA 携带的氨基酸	甲酰甲硫氨酸	甲硫氨酸	甲硫氨酸
多顺反子 mRNA	有	有	无
mRNA 剪接、加帽、加尾	无	无	有

续表

特 征	细菌 (真细菌)	古生菌 (古细菌)	真核生物
核糖体			
大小	70S	70S	80S
延伸因子 2 与白喉杆菌毒素反应	无	有	有
对氯霉素和卡那霉素敏感性	敏感	不敏感	不敏感
对茴香霉素敏感性	不敏感	敏感	敏感
依赖 DNA 的 RNA 聚合酶	单一类型、含 4 个亚基	有数种、复杂、含 8~12 个亚基	有 3 种、复杂、含 12~14 个亚基
聚合酶 II 型启动子	无	有	有
代谢			
有产甲烷的种类	无	有	无
有固氮的种类	有	有	无
有以叶绿素为基础的光合生物	有	无	有
有化能自养的种类	有	有	无
有储存聚 $\beta$ -羟基丁酸颗粒的种类	有	有	无
在细胞中含气泡的种类	有	有	无

### 3. 代谢和繁殖

古生菌的代谢类型多种多样，有异养型，也有自养型，少数还是光能自养型。古生菌细胞内没有 6-磷酸果糖酶，因此不通过 EMP 途径分解葡萄糖，极端嗜盐古生菌和极端嗜热古生菌利用一个 ED 途径的变型来分解利用葡萄糖。古生菌的繁殖方式有二分裂、出芽生殖、断片繁殖等。

### 4. 古生菌的主要类群

古生菌对氧气的要求有好氧、兼性厌氧和严格厌氧。在《伯杰氏系统细菌学手册》(第一版)中，将古生菌分为 5 大群，它们分别为产甲烷古生菌 (methanogenic archaeobacteria)、古生硫酸还原菌 (archaeobacterial sulfate reducer)、极端嗜盐菌 (extremely halophilic archaeobacteria)、无细胞壁古生菌 (cell wall-less archaeobacteria) 和极端嗜热硫代谢菌 (extremely thermophilic so-metabolizer)。在《伯杰氏系统细菌学手册》(第二版)中将古生菌分两个界，分别为嗜泉古生菌界 (*Crenarchaeota*) 和广古生菌界 (*Euryarchaeota*)。嗜泉古生菌界包

括热变形菌 (thermoproteale)、硫化叶菌 (sulfolobale) 和嗜压菌 (barophile), 如热变形菌属 (*Thermoproteus*)、硫化叶菌属 (*Sulfolobus*)。广古生菌界包括产甲烷菌 (methanogen)、盐杆菌 (halobacteria)、热原体 (thermoplasm) 和热球菌 (thermococci), 它们分别如甲烷杆菌属 (*Methanobacterium*), 盐杆菌属 (*Halobacterium*)、盐球菌属 (*Halococcus*), 热原体属 (*Thermoplasma*) 和古生球菌属 (*Archaeoglobus*)、热球菌属 (*Thermococcus*)。

### (三) 放 线 菌

放线菌 (actinomycete) 是一类呈菌丝状生长的原核生物, 它们在细胞结构等许多方面与细菌类似, 可以说, 放线菌是一类具有丝状分枝的细菌。

#### 1. 放线菌的形态和结构

放线菌的细胞呈丝状分枝, 由菌丝 (hyphae) 组成菌丝体 (mycelium)。菌丝宽度与普通杆菌差不多 ( $<1\mu\text{m}$ )。在营养生长阶段, 菌丝内无隔, 为单细胞。细胞内有为数众多的核质体。放线菌的菌丝按形态和功能分为基内菌丝 (subsurface hyphae)、气生菌丝 (aerial hyphae) 和孢子丝 (conidiophore hyphae) 3类。

基内菌丝又称一级菌丝, 生长于培养基内, 具有吸收和排泄代谢废物的功能。基内菌丝无色或产生各种不同的水溶性或脂溶性色素, 水溶性色素使培养基和菌丝呈现一样的颜色。气生菌丝或称二级菌丝, 由基内菌丝向空间伸长而成, 比基内菌丝粗, 直形或弯曲状分枝, 有的产生色素。孢子丝也称繁殖菌丝, 由成熟的气生菌丝分化而成。孢子丝通过横割分裂, 产生单个、双个或成串的分生孢子 (conidiophore)。孢子呈球形、椭圆形、杆状、瓜子状等, 表面光滑或带刺和毛, 呈各种不同颜色, 因种而异。

#### 2. 放线菌的繁殖

放线菌主要由孢子丝以横割分裂方式形成分生孢子进行繁殖。放线菌也可借菌丝断裂的片段形成新菌体, 此种繁殖方式常存在于液体培养基中。

#### 3. 放线菌的培养特征

放线菌在固体培养基上的菌落一般呈圆形, 光滑平整或有许多皱褶。因其紧密、坚实, 用针不易挑取。孢子形成后, 菌落表面呈粉末状。放线菌菌落的底部 (基内菌丝) 和表面 (气生菌丝、孢子丝) 常呈不同颜色。在液体培养基内静置培养放线菌, 会在容器内壁液面处形成斑状或膜状培养物, 或沉降于底部而不使培养基混浊。若是震荡培养, 则往往形成由短菌丝体所构成的球状颗粒。