



“十二五”高等学校专业教材建设工程

# 水处理生物学

SHUI CHULI SHENGWU XUE

赵丽红 孟多 高艳娇 主编



东北大学出版社  
Northeastern University Press



“十二五”高等学校专业教材建设工程

# 水处理生物学

赵丽红 孟多 高艳娇 主编

东北大学出版社

· 沈 阳 ·

© 赵丽红 孟多 高艳娇 2015

### 图书在版编目 (CIP) 数据

水处理生物学/赵丽红, 孟多, 高艳娇主编. —沈阳: 东北大学出版社, 2015. 10  
ISBN 978-7-5517-1135-7

I. ① 水… II. ① 赵… ② 孟… ③ 高… III. ① 水处理—生物处理  
IV. ① TU991.2 ② X703.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 257350 号

### 内容简介

本书主要介绍了微生物的形态、结构、生理特性、生长繁殖和遗传变异等基本理论知识, 介绍了微生物在物质循环中的作用、废水生物处理的微生物学原理、生物修复和饮用水生物处理原理及微生物实验技术等内容, 反映了国内外最新研究成果。同时, 各章配有复习题, 以便于学习和理解。

本书既可作为高等院校给排水科学与工程、环境科学、环境工程等学科本科生和研究生的教材, 又可供科研人员、技术人员和相关的工程设计人员参考使用。

---

出版者: 东北大学出版社

地址: 沈阳市和平区文化路3号巷11号

邮编: 110004

电话: 024—83687331 (市场部) 83680267 (社务室)

传真: 024—83680180 (市场部) 83680265 (社务室)

E-mail: neuph@neupress.com http://www.neupress.com

印刷者: 沈阳市第二市政建设工程公司印刷厂

发行者: 东北大学出版社

幅面尺寸: 185mm × 260mm

印 张: 14.25

字 数: 356 千字

出版时间: 2015 年 10 月第 1 版

印刷时间: 2015 年 10 月第 1 次印刷

责任编辑: 王兆元

责任校对: 叶 子

封面设计: 刘江旸

责任出版: 唐敏志

---

ISBN 978-7-5517-1135-7

定 价: 27.00 元

## ◎ 前 言

本书由辽宁工业大学教材出版基金资助出版。

本书根据高等学校给排水科学与工程专业指导委员会专业规范和水处理生物学课程教学基本要求，以及给排水科学与工程技术的新发展和积累的教学经验，在总结分析大量国内外文献资料、研究报告的基础上，参考了大量的教材、专著和相关资料，结合实际工程和科研工作中所积累的经验，经过不断修改和完善编写而成，基本适用于不断发展的水处理生物学技术的研究和应用。

本书内容丰富、全面、详细，重点介绍了微生物的形态、结构、生理特性、生长繁殖和遗传变异等基本理论知识，还介绍了微生物在物质循环中的作用、废水生物处理的微生物学原理、生物修复和饮用水生物处理原理及微生物实验技术等内容。

本书的编写人员均为高等学校从事水处理生物学、给排水科学与工程等课程教学的教师，教学经验与实践经验丰富。本书编写分工如下：赵丽红编写第4章至第11章，孟多编写第1章至第3章，高艳娇编写第12章至第15章，全书由赵丽红统稿。

本书在编写过程中得到了多方面的大力支持，在此对尹文利、王乐乐、黄润竹和陈威等一并表示感谢。

由于编者水平有限，书中不当甚至错漏之处在所难免，敬请各位读者提出宝贵意见。（作者 E-mail: zhaolh05@163.com）

编 者

2015年9月

## ◎ 目 录

<b>第1章 绪 论</b> .....	<b>1</b>
1.1 水处理生物学研究对象与任务 .....	1
1.2 水处理生物学在水处理工程中的应用 .....	2
1.3 与水处理相关的生物概述 .....	2
<b>第2章 原核微生物</b> .....	<b>6</b>
2.1 细 菌 .....	6
2.2 放线菌 .....	17
2.3 蓝细菌 .....	21
2.4 丝状细菌 .....	23
2.5 光合细菌 .....	25
2.6 支原体、立克次氏体和衣原体 .....	27
<b>第3章 古 菌</b> .....	<b>30</b>
3.1 古菌的特点 .....	30
3.2 古菌的分类 .....	31
<b>第4章 真核微生物</b> .....	<b>33</b>
4.1 真核微生物概述 .....	33
4.2 真 菌 .....	38
4.3 藻 类 .....	43
4.4 原生动物 .....	45
4.5 后生动物 .....	49

<b>第5章 病毒</b> .....	<b>51</b>
5.1 病毒的基本特征及分类.....	51
5.2 病毒的形态结构.....	52
5.3 病毒的繁殖.....	53
<b>第6章 微生物的生理特性</b> .....	<b>55</b>
6.1 微生物的营养.....	55
6.2 微生物的酶.....	61
6.3 微生物的代谢.....	68
<b>第7章 微生物的生长繁殖</b> .....	<b>76</b>
7.1 微生物的生长及其特性.....	76
7.2 环境因素对微生物生长的影响.....	84
7.3 微生物的驯化与保藏.....	88
<b>第8章 微生物的遗传和变异</b> .....	<b>92</b>
8.1 微生物的遗传.....	92
8.2 微生物的变异.....	101
8.3 遗传工程.....	105
<b>第9章 微生物的生态</b> .....	<b>110</b>
9.1 生态系统.....	110
9.2 微生物在环境中的分布.....	113
9.3 微生物之间的相互作用.....	118
<b>第10章 大型水生植物</b> .....	<b>121</b>
10.1 大型水生植物的特征.....	121
10.2 大型水生植物的分类.....	122
<b>第11章 微生物在物质循环中的作用</b> .....	<b>127</b>
11.1 碳循环.....	127
11.2 氮循环.....	131

11.3	磷循环	135
11.4	硫循环	136
11.5	铁、锰的循环	138
<b>第12章</b>	<b>废水生物处理的微生物学原理</b>	<b>140</b>
12.1	好氧生物处理	140
12.2	厌氧生物处理	147
12.3	生物脱氮除磷	150
12.4	含硫废水的生物处理	156
12.5	含金属离子废水的生物处理	157
<b>第13章</b>	<b>水生植物的水质净化作用与生物修复技术</b>	<b>160</b>
13.1	大型水生植物和浮游藻类的水质净化功能	160
13.2	生物修复技术	161
<b>第14章</b>	<b>饮用水生物处理原理</b>	<b>164</b>
14.1	水的卫生生物学	164
14.2	水中有害生物的控制	175
<b>第15章</b>	<b>水处理生物学基础实验</b>	<b>185</b>
实验一	显微镜的使用及微生物形态的观察	185
实验二	微生物的染色	188
实验三	微生物细胞的计数	191
实验四	培养基的制备和灭菌	192
实验五	微生物的纯种分离、培养及接种技术	196
实验六	纯培养菌种的菌体、菌落形态观察	200
实验七	大肠菌群生理生化特性检测	201
实验八	生活饮用水中细菌总数测定	209
<b>附 录</b>		<b>212</b>
附录1	常用染色液的配制	212
附录2	几种常用的染色方法	214

---

附录3 实验用各种培养基的配制 .....	215
附录4 各种溶质的渗透压 .....	218
<b>参考文献 .....</b>	<b>219</b>



# 第1章 绪论

## 1.1 水处理生物学研究对象与任务

### 1.1.1 水处理生物学的研究对象

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、普通微生物学、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的需要而发展起来的一门边缘性学科。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、微型水生动物和水生/湿生植物，特别是应用于水处理工程实践的生物种类。细菌等原核微生物在水处理工程中通常起着关键的作用，是水处理生物学的重点。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，因其不是水处理生物学的重点，故此本教材不涉及这方面的内容。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。

### 1.1.2 水处理生物学的研究任务

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。

该课程的具体任务就是充分利用有益微生物资源为人类造福，防止、控制和消除微生物的有害活动，化害为利。利用微生物实现污水的净化，将污染物转化为有用的资源，

变“废”为宝，生产出能源和肥料等；加速污染水体环境尽快恢复到清洁的状态，防治水体中病原微生物的污染。

## 1.2 水处理生物学在水处理工程中的应用

### 1.2.1 在给水处理工程中的应用

水是生命之源，是国民经济发展和人类生存的一个基本条件。在 5.1 亿  $\text{km}^2$  的地球总表面积中，71% 被水覆盖，因此人们把地球称为“水球”。但是这些水中的 97.3% 是海水，淡水仅占地球总水量的 2.7%，而淡水中能够被人类开采利用的只有 0.2%。随着人类活动的加剧和工业化进程的加快，环境污染也日趋严重，目前出现了全球性的水资源危机。特别是在人口稠密的大城市，用于生活的饮用水和工业生产用水的水量日益增大，水的供需之间矛盾越来越突出。联合国大会从 1993 年开始，将每年的 3 月 22 日定为世界水日，足可见水资源危机的严重性。在我国，许多大城市都普遍存在水资源短缺和供水不足的问题，加之水污染的严重性，更使水资源危机加深；同时，也使给水的净化面临很大的困难。评价给水水质的一个重要内容就是水的卫生细菌学标准，这也是水处理生物学中的一项重要内容。水是病原微生物主要的传播媒介，如伤寒、痢疾、霍乱和腹泻等疾病，就是由于水中存在的细菌性病原体引起的。所以，给水工作者都应具备水的卫生细菌学知识，了解水中病原微生物的生长及传播规律，进而掌握消毒和杀菌的方法，以保证饮水卫生，防止疾病蔓延。水中往往存在致突变污染物，这些物质可以利用微生物检测出来。另外，藻类大量滋生时会堵塞给水厂的滤池，并会使水中带有异味或增加水的色度、浊度等，因此，在给水处理工程中应尽可能除去这些微生物，以提供符合标准的生活饮用水和工业生产用水。同时，也可利用工程菌形成固定化生物活性炭，来消除水中的微量有机物；利用微生物生产生物絮凝剂，取代无机和有机絮凝剂，以进一步提高饮用水水质。

### 1.2.2 在排水工程中的应用

排水工程主要是对废水进行处理，去除废水中的各种污染物，达到无害化的目的。废水处理有物理、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是利用各种微生物的分解作用，对废水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。生物处理法具有高效、经济等优点，因此被普遍采用。

生物处理法主要包括活性污泥法、生物膜法（生物转盘、生物滤池、接触氧化）、自然处理法（氧化塘等）、厌氧消化法等。在实际处理中，可以根据被处理的废水性质以及各种处理法的特点来选择较为适宜的组合适处理工艺。另外，在受污染水体的生物修复技术中，微生物起着极为重要的作用。

## 1.3 与水处理相关的生物概述

### 1.3.1 生物的分类和命名

自然界中生物种类繁多，截至目前，地球上记载的生物达多 200 多万种，这些生物个体大小相差悬殊，小到几个纳米，大到数十米，以致体重以吨计。如此众多的生物，需

要进行科学的分类。

生物学家以客观存在的生物属性为依据，将生物分门别类。根据生物之间相同（或相异）的程度以及亲缘关系的远近，可将生物划分为：界（kingdom）、门（division）、纲（class）、目（order）、科（family）、属（genus）、种（species）。其中，种是最基本的分类单位。种内微生物之间的差异很小，有时为了区别小的差异可用株来表示，但“株”并非分类学单位。具有完全或极多相同特点的有机体构成同种；性质相似、相互有关的各种组成属；相近似的属合并为科；近似的科合并为目；近似的目归为纲；综合各纲成为门，由此构成一个完整的分类系统。这样一个分类方案使我们有可能把生物界极其纷杂的事实加以组织，并有系统地阐述各大类群中的小类群之间的关系。另外，在两个主要分类单位之间，可以添加“亚门”“亚纲”“亚目”“亚科”“亚属”等次要分类单位。在种以下还可以分为变种（或亚种）、型、株等。

关于生物的分类，目前国际上还没有统一的认识。1866年，Haeckel提出三界系统：原生生物界、植物界和动物界；1938年Copeland又提出四界系统：原核生物界、原始有核界、后生植物界和后生动物界；1969年Whittaker提出了五界系统：原核生物界、原生生物界、植物界、真菌界和动物界；1977年我国学者王大耜等在Whittaker五界系统的基础上，提出增加一个病毒界，成为六界分类系统。本教材不深究这些分类方法，主要根据水处理工程的实际需要和习惯，对有关生物种类进行阐述。

关于物种的命名，目前都采用瑞典博物学家林奈（Linnaeus，1707—1778）创立的双命名法。双名法规定，每种生物的学名由两个拉丁词组成，前一词为该种的所在属的属名，常用名词（斜体），第一个字母大写，由微生物的构造、形状或科学家名字而来，用以描述微生物的主要特征；第二个词为种名，常用形容词（斜体），第一个字母小写，为微生物的色素、形状、来源、病名或科学家的名字等，用以描述微生物的次要特征。双名后面可附定名人的姓氏或其缩写（正体）。如：

金黄色葡萄球菌（*Staphylococcus aureus*）

巴斯德酵母（*Saccharomyces pastori*）

枯草芽孢杆菌（*Bacillus subtilis*）

汉逊氏啤酒酵母（*Saccharomyces cerevisiae* Hansen）

另外，大家熟知的学名，其属名可以缩写，如大肠杆菌 *Escherichia coli* 可以缩写为 *E. coli*，但属名第一个字母应用记号，即用实心圆点。再有，如果微生物只鉴定到属，对具体的种地位还不能肯定，则可以用 sp.（单数）或 spp.（复数）来表示。例如，*Pseudomonas* sp. 表明是假单胞菌属的某一种细菌，具体种名不知。

### 1.3.2 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，与水处理工程有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

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。

水处理工程中常见的微生物如下。



在上述微生物中，大部分是单细胞生物。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，严格地讲，不属于微生物的范畴。本书基于水处理工程实践的实际，将微藻、原生动物和微型后生动物列入微生物的范畴。

## 2. 常见的小型水生动物

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，底栖生物对水体污染源控制极其重要。近年来，底栖生物在污染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，水生植物可分为挺水植物、漂浮植物、浮叶根生植物和沉水植物四大类型。

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，大型水生植被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。

随着水环境污染的加剧，为了寻找高效低耗的水污染控制技术，从 20 世纪 70 年代开始，大型水生植物受到人们的关注，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。

### 1.3.3 微生物的特点

微生物种类庞杂，形态结构差异很大，它们具有以下特点。

#### 1. 个体微小，分布广泛

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。

## 2. 种类繁多，代谢旺盛

由于微生物种类繁多，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），或将各种无机物合成复杂的碳水化合物、蛋白质等有机物。所以，微生物在自然界的物质转化和污染物的分解过程中起着重要的作用。由于微生物个体微小，与高等生物相比，具有极大的表面积和体积之比，所以，能够迅速和周围环境进行物质交换，代谢十分旺盛。

## 3. 繁殖快速，易于培养

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。

大多数微生物都能在常温常压下，利用简单的营养物质生长繁殖，这就使我们容易培养微生物，特别是获得纯种微生物，有利于微生物的研究和利用。但对于病毒、其他病原微生物和极端微生物的培养较困难，需要探讨新的方法。

## 4. 容易变异，利于应用

微生物繁殖后，其子代与亲代在形态、生理等性状上常有差异，这些差异又能稳定地遗传下去，这一特性为变异。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，能作为养料的物质（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到的作用等是本教材讨论的重点。

## 思考题

1. 水处理生物学的研究对象是什么？
2. 水中常见的微生物种类有哪些？
3. 微生物有哪些基本特征？为什么？
4. 微生物命名常用的双名法的主要规定是什么？
5. 水中小型动物和水生植物在水体水质净化中各起什么样的作用？

## 第2章 原核微生物

### 2.1 细菌

#### 2.1.1 细菌的形态与大小

细菌是原核细胞生物，因而是最简单的微生物细胞。本质上它们由包裹在固定性结构或细胞包被中的细胞原生质所组成，其大小一般只有几微米。细菌是地球上所发现的最常见、分布最广的微生物之一。例如，在1g土壤或一滴水里甚至可含有高达 $10^{10}$ 个。

细菌的形态大致上可分为球状、杆状和螺旋状（弧菌及螺菌）3种，仅少数为其他形状，如丝状、三角形、方形和圆盘形等。球状、杆状和螺旋状是细菌的基本形态（图2-1）。

球菌（*coccus*），细胞个体形状为球形，其直径约为 $0.5 \sim 2.0 \mu\text{m}$ 。球菌根据分裂后细胞排列方式的不同进行分类。细胞分裂后，新个体分散而单独存在，是单球菌，如尿素微球菌（*Micrococcus ureae*）。两个细胞成对排列，是双球菌，如肺炎双球菌（*Diplococcus pneumoniae*）。经两次分裂形成的四个细胞联在一起呈田字形，是四联球菌，如四联微球菌（*Micrococcus tetragenus*）。多个细胞排成链状，是链球菌，如乳链球菌（*Streptococcus lactis*）。细胞沿着三个互相垂直的方向进行分裂，分裂后的8个细胞叠在一起呈魔方状，是八叠球菌，如尿素八叠球菌（*Sarcina ureae*）。细胞无定向分裂，形成的新个体排列成葡萄串状，是葡萄球菌，如金黄色葡萄球菌（*Staphylococcus aureus*）。

杆菌（*bacillus*）常呈短杆（球杆）状，大小以宽度 $\times$ 长度表示，一般为 $(0.5 \sim 1.0) \mu\text{m} \times (1.0 \sim 5.0) \mu\text{m}$ 。分为单杆菌、双杆菌、链杆菌等。菌体两端形态各异，如钝圆、平截或略尖等。各种杆菌的长度与直径比例差异很大，有的粗短，有的细长。杆菌是细菌中种类最多的，如大肠杆菌（*Escherichia coli*）、枯草芽孢杆菌（*Bacillus subtilis*）等。

螺旋菌（*spirilla*）宽度常在 $0.5 \sim 5 \mu\text{m}$ 之间，长度则因种类的不同而有很大差异（约 $5 \sim 15 \mu\text{m}$ ）。只有一个弯曲的螺旋状细菌称为弧菌，如霍乱弧菌、纤维弧菌等。

以上3种形态是细菌的基本形态。各种细菌在其初生时期或适宜的生活条件下，呈现它的典型形态。这些形态特征是鉴别菌种的依据之一。自然界中，以杆菌最为常见，球菌

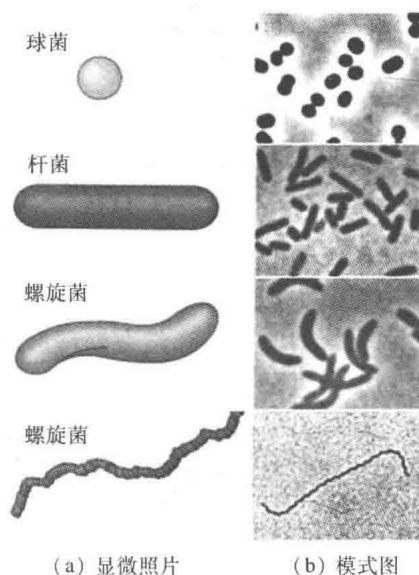
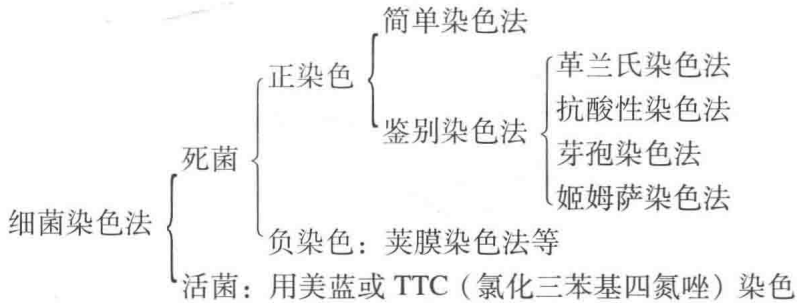


图2-1 细菌的各种形态

次之，螺旋菌最少。

由于细菌个体极其微小，所以要观察细菌的形状，必须要有一架可以放大一千倍或倍数更高的显微镜。而细菌本身是无色半透明的，即使放在显微镜下，看起来还是比较模糊，不容易看清楚。为了清楚地观察细菌，发展了多种细菌染色方法，使它们在显微镜下看起来轮廓很清楚。染色方法很多，这里仅列出一些主要类型。在这些染色法中，尤以革兰氏染色法（Gram stain）最为重要，其方法原理及意义将在细胞壁构造部分介绍。



## 2.1.2 细菌的细胞结构

### 1. 基本结构

细菌虽然微小，但是它们的内部构造却相当复杂。细菌细胞的构造模式见图 2-2。其中把一般细菌都有的构造称为一般构造或基本结构，而把部分细菌具有的或一般细菌在特殊环境下才有的构造称为特殊构造或特殊结构。

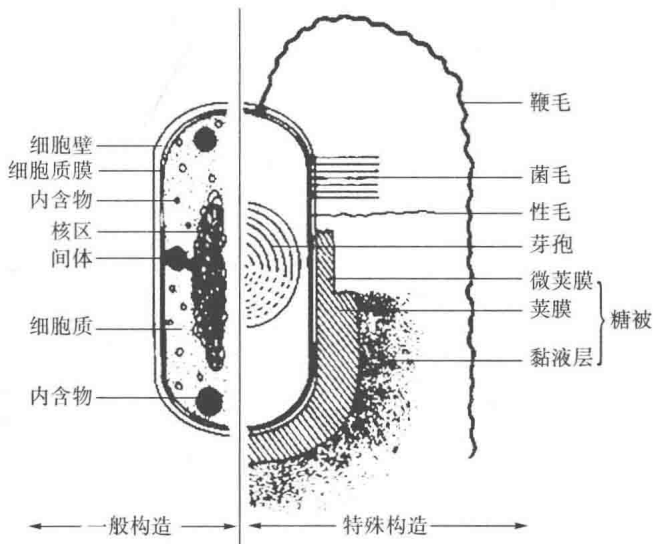


图 2-2 细菌细胞构造模式图

细菌的基本结构包括细胞壁和原生质体两部分。原生质体位于细胞壁内，包括细胞膜（细胞质膜）、细胞质、核质和内含物。特殊结构包括糖被、鞭毛和芽孢。

#### (1) 细胞壁 (cell wall)

细胞壁是包在原生质体外面、厚约 10 ~ 80nm 的略有弹性和韧性的网状结构，具有很高的韧性和强度。主要由肽聚糖构成，有固定细胞外形和保护细胞等多种生理功能。其质量占总细胞干重的 10% ~ 25%。细胞壁是细胞中重要的结构单元，也是细菌分类最重要的



依据之一。

1884年,丹麦病理学家 Hans Christian Gram 提出了一个经验染色法,即革兰氏(Gram, 简称为 G)染色法。其主要步骤是:结晶紫初染,碘液媒染,然后酒精脱色,最后用蕃红或沙黄复染。用这种方法染色的细菌,通过镜检可以将它们分为两大类:凡能够固定结晶紫与碘的复合物而不被酒精脱色者,仍呈蓝紫色,称为革兰氏阳性( $G^+$ )细菌;凡能被酒精脱色,经复染着色,菌体呈红色,称为革兰氏阴性( $G^-$ )细菌。研究表明革兰氏染色的反应结果主要与细菌细胞壁有关。这两类细菌在细胞壁结构和组成上有着显著差异(图 2-3)。

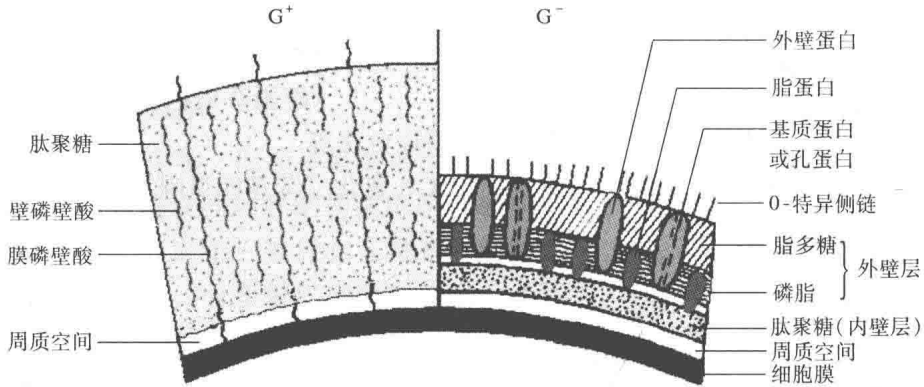


图 2-3 革兰氏阳性菌和革兰氏阴性菌细胞壁的比较

构成细胞壁的主要成分是肽聚糖、脂类和蛋白质。肽聚糖实质上是互相连接起来的有机大分子(图 2-4)。肽聚糖是由 N-乙酰葡萄糖胺和 N-乙酰胞壁酸这 2 个双糖单位以及少量氨基酸短肽链聚合而成的一个大分子复合体,形成多层网状结构。N-乙酰胞壁酸又连接 4 个氨基酸互连起来的短肽,短肽之间又由 5 个氨基酸组成的肽链相连即所谓的“肽桥”。在短肽中除了生物体普遍具有的 L-型氨基酸外,还含有特征性的 D-型氨基酸。这样组织起来的网状大分子层层叠加至几十层就构成完整的细菌细胞壁。

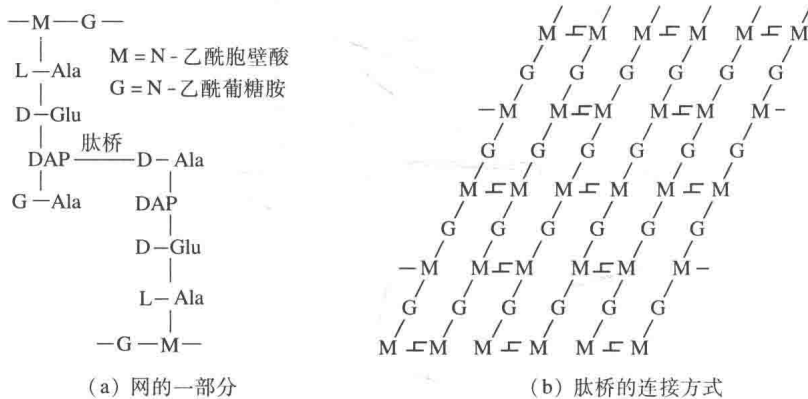


图 2-4 革兰氏阴性细菌——大肠杆菌的肽聚糖

革兰氏阳性细菌的细胞壁较厚,约为 20~80nm,单层,其组分比较均匀一致,主要由肽聚糖组成,还有一定数量的磷壁酸,脂类组分很少(图 2-5)。革兰氏阴性细菌的细胞壁与此不同。它的整个细胞壁可分为两层:细胞壁外层和内层。外层主要由脂多糖和脂蛋



白组成,较厚(8~10nm),脂类在整个细胞壁中占有的比例很高,可达40%以上。这是与革兰氏阳性细胞明显不同的一个特征。内层的主要结构组分是肽聚糖,但是较薄,只有2~3nm,肽聚糖的结构模式与革兰氏阳性细菌相同。由于 $G^+$ 和 $G^-$ 细菌的细胞壁之间存在着很大差异,因而染色过程中的反应也不同。

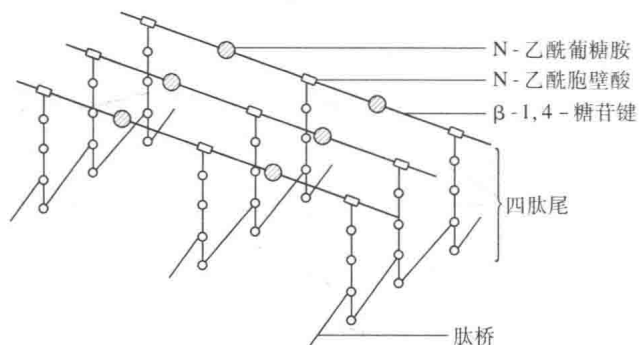


图 2-5 革兰氏阳性细菌肽聚糖的立体结构(片段)

关于革兰氏染色的机理,有许多种解释,还有待于进一步研究。一般解释为:通过初染和媒染后,在细菌细胞的细胞壁及膜上结合了不溶于水的结晶紫与碘的大分子复合物。革兰氏阳性菌细胞壁较厚、肽聚糖含量较高和分子交联度较紧密,故在酒精脱色时,肽聚糖网孔会因脱水而发生明显收缩,再加上它含脂类很少,酒精处理也不能在胞壁上溶出大的空洞或缝隙,因此,结晶紫与碘复合物仍阻留在细胞壁内,使其呈现蓝紫色。与此相反,革兰氏阴性菌的细胞壁较薄、肽聚糖位于内层且含量低和交联松散,与酒精反应后其肽聚糖不易收缩,加上它的脂类含量高且位于外层,所以酒精作用时细胞壁上就会出现较大的空洞或缝隙,这样,结晶紫和碘的复合物就很容易被溶出细胞壁,脱去了原来初染的颜色。当蕃红或沙黄复染时,细胞就会带上复染染料的红色。

不管是 $G^+$ 菌还是 $G^-$ 菌,其细胞壁中均含有或多或少的肽聚糖及D-型氨基酸,这是它们的最大特征,这类细菌又叫真细菌。绝大部分细菌都属于真细菌。除了这一共同特征外, $G^+$ 和 $G^-$ 细菌细胞壁的其他异同详见表2-1。

表 2-1 革兰氏阳性细菌与阴性细菌细胞壁结构与组成的比较

比较项目	革兰氏阳性细菌 $G^+$	革兰氏阴性细菌 $G^-$	
		内壁层(肽聚糖层)	外壁层(外膜)
厚度(nm)	20~80	2~3	8~10
肽聚糖结构	多层,网状结构紧密	网状结构疏松	
壁与膜的关系	不紧密	紧密	
肽聚糖含量	占干重的40%~90%	5%~10%	无
磷壁酸	有或无	无	无
脂多糖	1%~4%	无	11%~22%
脂蛋白	无	有或无	有
对青霉素敏感性	强	弱	
对溶菌酶敏感性	强	弱	