

水处理微生物学

基础与技术应用

刘永军 编著

2

中国建筑工业出版社

水处理微生物学基础与技术应用

刘永军 编著

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

水处理微生物学基础与技术应用/刘永军编著. —北京:
中国建筑工业出版社, 2010
ISBN 978-7-112-11966-0

I. 水… II. 刘… III. 水处理: 生物处理 IV. TU991.2
X703.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 053990 号

本书分为水处理微生物学基础、水处理工艺与过程的微生物学原理及技术应用和水处理微生物实验技术三大部分。在系统介绍水处理微生物基础知识的同时, 突出了微生物技术在水处理中的应用, 将微生物学基础知识、微生物技术与水处理密切地结合起来, 同时详细介绍了分子生物学新技术、新方法及其在水处理微生物研究中的应用。

本书内容的广度和深度不仅适用于高校给水排水工程专业本科生以及市政与环境工程专业研究生的教学用书, 同时可供供水厂、污水厂相关工程技术人员以及从事环境微生物研究的工作人员参考。

* * *

责任编辑: 石枫华
责任设计: 张 虹
责任校对: 兰曼利 刘 钰

水处理微生物学基础与技术应用

刘永军 编著

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京西郊百万庄)

各地新华书店、建筑书店经销

北京红光制版公司制版

世界知识印刷厂印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 16 $\frac{3}{4}$ 字数: 408 千字

2010 年 5 月第一版 2010 年 5 月第一次印刷

定价: 48.00 元

ISBN 978-7-112-11966-0

(19233)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

前 言

水处理微生物学是给水排水工程专业本科生以及市政与环境工程专业研究生的一门重要专业基础课程；水处理微生物学与水处理工程有密切的关系，它是一门理论与实践密切结合的学科。本书从水处理专业读者的实际需求出发，讲解水处理微生物学基础与技术应用。

在编写过程中，力求有针对性地将内容深度和广度控制在水处理专业相关读者需要掌握的范围之内，对与水处理相关的微生物学基础理论以及技术方法作了比较详细的阐述，没有完全从微生物学专业要求的角度去编写，以便适合给水排水专业学生和专业读者学习、参考。

本书强调微生物基础知识以及微生物技术与水处理过程的关系，突出了微生物技术在水处理工艺和过程中的应用，使读者能够很好地理解微生物生命现象与水处理过程的关系，并将微生物知识和微生物技术应用到水处理工程实践中。

近 20 年来微生物学发展非常迅速，新技术、新方法不断涌现，特别是分子生物学技术的发展更是另人瞩目。针对目前本科生毕业有相当一部分学生又要继续攻读研究生的现状，从科研和实际工作需求的角度，本书适当补充了分子生物学实验技术等内容，使读者能够适时了解并掌握水处理微生物学的最新发展动态和技术应用情况。

本书由刘永军主编，王晓昌教授主审。全书分为 3 篇，共 12 章。第一篇为水处理微生物学基础，包括：水处理微生物学的研究对象和任务，微生物的营养与代谢，微生物的生长与水微生物生态，微生物的遗传变异与基因工程；第二篇为水处理工艺与过程的微生物学原理及技术应用，包括：典型水处理工艺与过程的微生物学原理，生物相的观察与应用，水处理运行管理中微生物技术的应用，水的卫生细菌学及水中微生物的控制；第三篇为水处理微生物实验技术，包括：微生物观察与分析，微生物菌种分离与培养，微生物检测，微生物分子生物学检测技术。在本书的编写过程中，还得到高羽飞教授、马美玲、左丽丽、吕英俊等的支持和帮助，在此一并表示感谢。

因编者水平所限，书中不足之处，敬请读者批评指正以便修正。

目 录

第一篇 水处理微生物学基础

第 1 章 水处理微生物学的研究对象和任务	3
1.1 微生物的定义、分类和命名	3
1.2 水中常见微生物的类型及特点	6
1.3 水处理微生物学的任务	36
第 2 章 微生物的营养与代谢	38
2.1 微生物的营养	38
2.2 微生物的代谢	44
2.3 微生物的代谢调节	63
第 3 章 微生物的生长与水微生物生态	68
3.1 微生物的生长	68
3.2 水生微生物生态系统	83
第 4 章 微生物的遗传变异与基因工程	93
4.1 微生物的遗传与变异	93
4.2 基因工程原理及其在水处理中的应用	99

第二篇 水处理工艺与过程的微生物学原理及技术应用

第 5 章 典型水处理工艺与过程的微生物学原理	107
5.1 好氧生物处理原理与过程	107
5.2 厌氧生物处理原理与过程	119
5.3 废水的生物脱氮除磷原理与过程	137
第 6 章 生物相的观察与应用	153
6.1 活性污泥的生物学监测	153
6.2 活性污泥的生物相观察与控制	156
6.3 活性污泥中原生动物的特征与作用	162
6.4 给水生物预处理工艺中生物相的变迁与作用	167
第 7 章 水处理运行管理中微生物技术的应用	172
7.1 污水处理厂的启动与微生物培养驯化	172
7.2 微型生物指示与污水厂运行评价	187

7.3	丝状菌污泥膨胀的成因与控制措施	193
第8章	水的卫生细菌学及水中微生物的控制	198
8.1	水的卫生细菌学	198
8.2	水中微生物的控制	204
8.3	饮用水的生物稳定性	210

第三篇 水处理微生物实验技术

第9章	微生物观察与分析	217
9.1	显微镜的使用及微生物形态观察	217
9.2	细菌单染色与革兰氏染色	221
9.3	微生物常用染色方法及染色液的配制	222
9.4	细菌荧光显微计数法	225
第10章	微生物菌种分离与培养	227
10.1	培养基的配制与灭菌方法	227
10.2	微生物的分离与纯化	229
10.3	水微生物分离培养常用培养基	231
第11章	微生物检测	235
11.1	细菌总数 CFU 检测法	235
11.2	大肠菌群 MPN 检测法	236
11.3	可同化有机碳 (AOC) 的测定方法	239
11.4	生物可降解溶解性有机碳 (BDOC) 的测定方法	241
第12章	微生物分子生物学检测技术	243
12.1	聚合酶链式反应技术 (PCR)	243
12.2	变性梯度凝胶电泳技术 (DGGE)	252
12.3	荧光原位杂交技术 (FISH)	255
参考文献	259

第一篇

水处理微生物学基础

第 1 章 水处理微生物学的研究对象和任务

1.1 微生物的定义、分类和命名

1.1.1 微生物的定义

微生物是所有形体微小，用肉眼无法看到，需借助显微镜才能看见的单细胞或个体结构简单或多细胞或无细胞结构的低等生物统称。因此，“微生物”不是分类学上的概念，而是一切微小生物的总称。

按照微生物有无细胞结构，微生物可分为非细胞结构的微生物（如病毒、类病毒、拟病毒等）和细胞结构的微生物。具有细胞结构的微生物，又可以根据细胞的特点，分为原核微生物和真核微生物两大类。

原核微生物是具有原核细胞的生物，原核细胞是一类比较原始的细胞，其细胞核发育不完善，只是 DNA 链高度折叠形成的一个核区，仅有核质，没有核膜，没有定形的细胞核，称为拟核或似核。原核细胞没有特异的细胞器，只有由细胞质膜内陷形成的不规则的泡沫结构体系，如间体和光合作用层片及其他内褶。原核细胞不进行有丝分裂。原核微生物包括各类细菌、放线菌、蓝细菌、黏细菌、立克次氏体、支原体、衣原体和螺旋体等。

真核微生物是具有真核细胞的生物，真核细胞有发育完善的细胞核，有核膜将细胞核和细胞质分开，核内有核仁和染色质。真核细胞有高度分化的细胞器，如线粒体、中心体、高尔基体、内质网、溶酶体和叶绿体等，担负着细胞的各种功能。真核细胞能进行有丝分裂。真核微生物包括各类真核藻类、真菌（酵母菌、霉菌等）、原生动物以及微型后生动物等。

1.1.2 微生物的特点

1. 个体小、种类繁多

微生物是一类个体十分微小的生物。衡量微生物大小，一般用的度量单位是微米（ μm ）。一般细菌的大小为零点几到几微米，需要借助光学显微镜才能进行观察，而病毒则更小了（ $<0.2\mu\text{m}$ ），需用电子显微镜才能看得见，要用纳米（ nm ）来衡量。

微生物的种类数目是十分惊人的。有人估计，目前人们所了解的微生物总数，至多不超过生活在自然界中的微生物总数的 10%。由于近年来分离培养方法的改进，不断有新的微生物种类被发现并报道。

2. 分布广、代谢类型多样

在地球上，微生物的分布可谓是无所不在，空气、土壤、水体等，到处都有微生物存在；甚至在一些极端的场合（如高温、高毒、低温）下，高等生物无法生存，仍然会有微生物可以适应而生存下来，如温泉中。由于土壤中的各种条件最适合微生物生长，所以其中微生物的数量和种类最多。由于微生物的种类繁多，其营养要求和代谢途径各不相同，所以，微生物能对自然界中多种有机物和无机物发生作用，利用它们作为营养物质。凡在自然界存在的有机物，不管其结构如何复杂，都会在特定环境中被某种微生物利用、分解，有时一种微生物的分解能力是有限的，但在同一生境中会有多种微生物同时存在，共同代谢有机物的能力就会十分强大。例如假单胞菌属的一些种，可以分解 90 种以上的有

机物并将其作为碳源和能源进行代谢；有些微生物还能利用有毒物质如酚、氰化物等作为营养物。微生物这种对物质分解转化的能力，是其他任何生物都无法比拟的。因此，微生物在自然界的物质循环和转化中起着重要作用。

3. 繁殖快、代谢强度大

在适宜的环境条件下，大多数微生物能在 10~20min 内完成一代的繁殖，例如大肠杆菌 *E. coli*，其繁殖一代的世代时间为 17~20min。对于以二分裂法方式进行繁殖的细菌，其数量的增加速度是十分惊人的，如大肠杆菌在一昼夜可从一个个体增加到 4.7×10^{21} 个个体，经 48h 后可产生 2.2×10^{43} 个新个体。当然由于种种限制，这种几何级数的增殖速度最多也只能维持几个小时。有些微生物（如放线菌、霉菌）以产生孢子的方式进行繁殖，一个个体可以产生成千上万个孢子，每个孢子从理论上讲都是一个未来的个体，这种繁殖的潜力更加惊人。微生物的这种特性也使得它的培养十分容易，因此，微生物成为生产、科研的理想材料。

由于微生物形体微小，表面积大，有利于细胞吸收营养物质和加强新陈代谢，因此，微生物具有很强的代谢能力。这一特性使微生物可以在短时间内迅速利用环境中的营养物质，也可以在环境治理中迅速降解污染物质。

4. 数量多

由于微生物营养谱极广，生长繁殖速度快，代谢强度大，因此，在自然界的各种环境中，微生物存在的数量是极多的。其中土壤是微生物最多的环境之一，在 1g 土壤中，细菌数量可达数亿个，放线菌孢子达数千万个，霉菌有数百万个，酵母菌有数十万个；正常情况下，生活在人体肠道内的细菌总数有约 10^6 亿个；在每 1mL 生活污水中含有数亿个细菌及其他种类的微生物。

5. 易变异

由于微生物的结构比较简单，多为单细胞或接近于单细胞，且通常都是单倍体，加上其繁殖快、数量多，并且微生物与外界环境直接接触，这使得微生物具有容易受到外界的影响而发生变异的特点。一些物理、化学因素，如紫外线、某些化学物质等，很容易使微生物出现变异，即使变异的概率很低（如 $10^{-10} \sim 10^{-5}$ ），也会在短时间内出现大量变异的后代。所以当环境条件变化时，微生物会发生变异，其中适应并存活下来的微生物就会是一些在生理和形态结构上发生适应性变化的个体。

微生物容易变异，既是优点——能使微生物容易适应外界环境的变化——同时又是缺点，会造成微生物特性的退化和消失。现代工业生产大量以前在自然界并不存在的物质，它们进入环境后，开始很难被微生物降解，但由于微生物的适应性，现在人们已发现了越来越多的能分解利用上述物质的微生物种类。同时利用微生物容易变异的特点，人们不断开发选育出新的微生物种类。在微生物药品、制剂等生产中大量微生物被广泛应用。在污水处理中，也可以通过微生物的驯化和选育，提高对污染物降解的效率。当然，由于微生物的变异，也会给人们带来诸如菌种退化、致病菌出现抗药性等不利的影 响。通过了解和掌握上述微生物的主要特点，可以在生产实践中更有效地利用微生物为人类服务。

1.1.3 微生物的分类

自然界中各种生物的种类繁多，生物学家以客观存在的生物属性为依据，将生物分门别类。生物分类的目的有两个：一是认识、研究和利用生物。地球上生存的生物数量是巨

大的。据估计，动物约有 150 万种，如果包括亚种在内，可能超过 200 万种；植物约有 40 万种；至于微生物的种类就更多了。这样多的生物，如果没有科学的分类法，对其认识将陷于杂乱无章的境地，无法进行调查研究，更说不上充分利用生物资源和防治有害生物了。生物分类的另一个目的是了解生物进化发展史，研究生物之间的亲缘关系。按照达尔文的进化理论，生物是进化的，各种生物之间存在亲缘关系，通过了解生物之间的进化关系，可以为研究诸如生命起源等重大问题，提供科学依据。

在对各种生物进行细致观察的基础上，通过比较研究，找出它们的共同点和不同点，并将有许多共同点的类归并成一个种类，根据它们的差异分成若干不同的种类，如此分门别类、顺序排列，形成分类系统。研究这种分类的学科就是分类学。在生物学上，对生物的分类采用按其生物属性和亲缘关系有次序地分门别类排列成一个系统，系统中有 7 个等级：界、门、纲、目、科、属、种。每一种生物，包括微生物，都可在这个系统中找到相应的位置。其中种 (species) 是分类的基本单位。

在微生物分类鉴定中，目前国际上有 3 个影响较大和比较全面的分类系统，即美国细菌学家协会出版的《伯杰细菌鉴定手册》、前苏联克拉西里尼科夫著的《细菌和放线菌的鉴定》和法国普雷沃著的《细菌分类学》。伯杰分类系统在 3 个分类系统中是最有权威性的，而且是当前国际上普遍采用的细菌分类系统。该手册经过几十年不断地发展，逐渐成为一个国际性手册，它反映了细菌分类学的发展变化趋势。

生物的分类中，大家比较熟悉的一般是所谓的二界学说，即把生物分为动物界和植物界两个界，这种分法已有很长的历史。其中的动物是指细胞无细胞壁，不进行光合作用，能运动的生物；植物是指细胞有细胞壁，进行光合作用，不能运动的生物。

但是随着微生物的发现，使人们认识到传统的二界学说已难以对生物进行合理的分类（在传统分类中一部分微生物被列入植物界，如细菌、真菌等，另有一部分被列入动物界，如原生动物等）。在 19 世纪，细胞学说被提出，人们认为所有的生物都是由细胞组成的；而在 20 世纪 30 年代，电子显微镜的发明又使人们认识了病毒的非细胞结构。因此，生物的分类也随着人类认识的进步而不断地在改进。1969 年，魏塔克提出“五界学说”，为较多的人所接受，即原核生物界、真核原生生物界、真菌界、动物界、植物界。中国学者提出了“六界学说”，在上述五界的基础上再增加一个病毒界。

随着分子生物学的发展，到 20 世纪 70 年代，沃斯 (Woese) 等人在研究了 60 多种不同细菌的 16Sr RNA 序列后，发现了一群序列独特的细菌——甲烷细菌，这是地球上最古老的生命形式，与细菌在同一进化分支上，称为古细菌 (Archae bacteria)。1990 年，Woese 等人正式提出了生命系统是由细菌 (Bacteria) 域、古菌 (Archaea) 域和真核生物 (Eukarya) 域所构成的三域说 (three domains proposal)。

1.1.4 微生物的命名

为避免混乱并便于工作、学术交流，有必要给每一种生物制定统一使用的科学名称，即学名 (scientific name)。为此，国际上建立了生物命名法规，如国际植物命名法规、国际动物命名法规、国际栽培植物命名法规、国际细菌命名法规等。

目前在国际上对生物进行命名采用的统一命名法是“双名法”。其基本原则是由林奈确定的。林奈 (Linnaeus, 1707~1778) 是瑞典生物学家，他在 1753 年发表的《自然系统》一书中首次提出了双名法 (binomial nomenclature)，并且为生物学家们所认可。由

此，林奈被称为近代生物分类法的鼻祖。

一个生物的名称（学名）由两个拉丁字（或拉丁化形式的字）表示，第一个字是属名，为名词，主格单数，第一个字母要大写；第二个字是种名，为形容词或名词，第一个字母不用大写；出现在分类学文献上的学名，往往还要再加上首次命名人的姓氏（外加括号）、现名命名人的姓氏和现名命名年份，但有时往往忽略这三项：

学名 = 属名 + 种名 + (首次命名人) + 现名命名人 + 命名年份

学名在印刷时，应当用斜体字，手写时下加横线。需要注意的是，其他的分类阶元，如门、纲、目、科等的名称，首字母要大写，但不需印成斜体字。

例如，大肠埃希氏杆菌（大肠杆菌），其学名为 *Escherichia coli* (Migula) Castellani et Chalmers 1919，简称 *E. coli*；枯草芽孢杆菌（枯草杆菌）的学名为 *Bacillus subtilis* (Ehrenberg) Cohn 1872。

属名被缩写，一般发生在该属名十分常见（如 *Escherichia* 属），或是在文章的前面已经出现过该属名的情况下。如果某细菌只被鉴定到属，没鉴定到种，则该细菌的名称只有属名，没有种名，这时可以用 *sp.* 或 *spp.* 代替种名表达。*sp.* 或 *spp.* 为种（speciess）的缩写，如 *Bacillus sp.* (*spp.*) 表示该细菌为芽孢杆菌属中的某一个种。

变种或亚种的命名由所谓的三名法构成，即：

学名 = 属名 + 种名 + var. 或 subsp. + 变种或亚种的名称

例如，苏云金芽孢杆菌蜡螟亚种的表达方式 *Bacillus thuringiensis* subsp. *galleria*，椭圆酿酒酵母（或酿酒酵母椭圆变种）的表达方式为 *Saccharomyces cerevisiae* var. *elliipsoideus*。

1.2 水中常见微生物的类型及特点

1.2.1 原核微生物类群与形态结构

微生物类群庞杂，种类繁多，包括细胞型和非细胞型两类。凡具有细胞形态的微生物称为细胞型微生物。按其细胞结构又可分为原核微生物和真核微生物。原核微生物包括细菌、放线菌、蓝细菌、黏细菌、古细菌、衣原体、支原体、立克次氏体、螺旋体、鞘细菌等，其中细菌是本章介绍的重点。

1. 细菌

细菌（bacteria）是微生物的一大类群，在自然界分布广、种类多，与人类生产和生活的关系也十分密切，是微生物学的主要研究对象。由于细菌的细胞结构在原核生物中具有代表性，而且研究得较为深入，在水处理微生物学中是主要的研究对象，故作为本章重点。

(1) 细菌的形态和大小

细菌属于原核生物，为单细胞，即一个细胞就是一个个体。细菌的个体（也就是细胞）基本形态有 3 种：球状、杆状和螺旋状。

1) 球状

细胞个体形状为球形，直径约 0.5~2.0 μm ，称为球菌，见图 1-1。各类球菌又可以根据其分裂后排列方式的不同，分为：

①单球菌：细胞分散而独立存在，如脲微球菌（*Micrococcus ureae*）；

②双球菌：2个细胞连在一起，如脑膜炎双球菌 (*Neisseria meningitides*)；

③四联球菌：4个细胞连在一起呈田字形，如四联微球菌 (*Micrococcus tetragenus*)；

④八叠球菌：8个细胞叠在一起成立方体，如甲烷八叠球菌 (*Sarcina methanica*)；

⑤链球菌：细胞排列成一链条状，如乳链球菌 (*Streptococcus lactis*)；

⑥葡萄球菌：细胞不规则地排成一串，如金黄色葡萄球菌 (*Staphylococcus aureus*)。

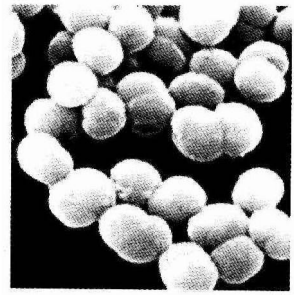


图 1-1 球状细菌扫描电子显微镜照片

2) 杆状

细胞个体形状为杆状，其大小为 $(0.5\sim 1)\mu\text{m}\times(1\sim 5)\mu\text{m}$ ，称为杆菌，见图 1-2。杆菌中细胞长宽比较大的为长杆菌，如枯草杆菌 (*Bacillus subtilis*)；细胞长宽比较小的为短杆菌，如大肠杆菌 (*Escherichia coli*)。另外，多个杆菌联成一长串，称为链杆菌；末端膨大成棒状的称为棒杆菌。

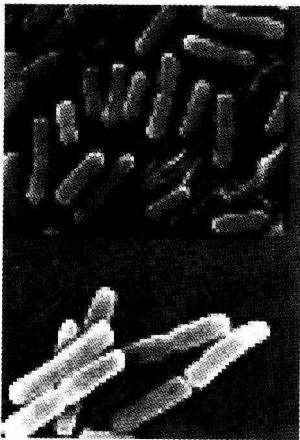


图 1-2 杆状细菌

3) 螺旋状

细胞个体形状呈螺旋卷曲状，见图 1-3。其大小约为 $(0.25\sim 1.70)\mu\text{m}\times(2.00\sim 60.00)\mu\text{m}$ 。螺旋菌中螺旋的数目和螺距随菌的不同而不同，其中螺纹不满一圈的称为弧菌，如霍乱弧菌 (*Vibrio cholerae*)；螺纹在一圈以上的称为螺菌，如紫硫螺旋菌 (*Thiospirillum violaceum*) 和红螺菌属 (*Rhodospirillum*)。还有一种比螺旋菌弯曲得更多、更长的细菌体，称为螺旋体。另外，人们在环境中经常可以看到一种被称为丝状菌的细菌，在水体、潮湿土壤及活性污泥中都可以看到这种形状的细菌。在有的教材上将其列为第四种细菌形态。

所谓丝状菌，其实是由柱状或椭圆状的细菌细胞一个一个连接而成的，外面有透明的硬质化的黏性物质包裹（称为鞘）。所以它实际上是一种细菌的群体形态，故从严格意义上来说，不应把它列为细菌的个体形态，但从实际应用的角度，这种分法也具有价值。环境中常见的丝状菌有浮游球衣菌 (*Sphaerotilus natans*)、发硫菌属 (*Thiothrix*)、贝日阿托氏菌属 (*Beggiatoa*)、亮发菌属 (*Lucothrix*) 等。

在正常情况下，细菌的个体形态和大小是相对稳定的，故它也是细菌分类时的重要依据。但是，环境条件的变化，如营养条件、温度、pH、培养时间等，会引起细菌个体形态的改变或畸形；不同种类和菌龄的细菌个体，在个体发育过程中，细菌的大小会有变化，刚分裂的新细菌小，随菌龄，细菌逐渐变大，而老龄

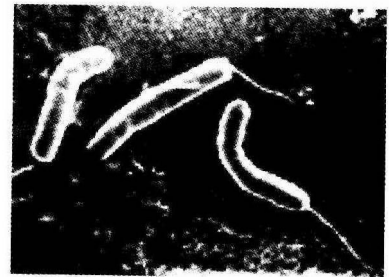


图 1-3 弧状细菌

细菌又变小；另外，有的细菌种是多形态的，即在其生命不同阶段，会有不同的个体形态出现，如黏细菌在生命的某一阶段会出现无细胞壁的营养细胞和子实体。

(2) 细菌的细胞结构

细菌是单细胞的原核微生物，但所谓“麻雀虽小，五脏俱全”，其内部结构相当复杂，各种结构保证了细菌作为一个独立个体能完成其生长繁殖等生命活动的各项功能。细菌的细胞结构可分为一般结构和特殊结构：所有的细菌均有的结构（称为一般结构或基本结构）有细胞壁、细胞质膜、细胞质、内含物及细胞核物质等；而有的结构是某些种类的细菌所特有的（称为特殊结构），如芽孢、荚膜、鞭毛、黏液层、菌胶团、衣鞘等，特殊结构常常是细菌分类鉴定的重要依据。细菌细胞结构的模式图见图 1-4。

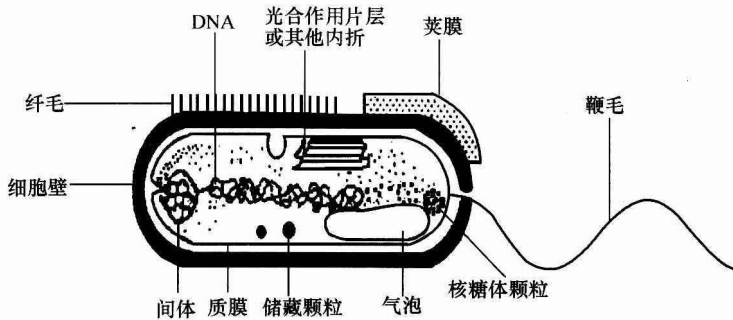


图 1-4 细菌细胞结构模式图

1) 细菌的一般结构

从细菌细胞最外层开始，由外向内，依次有下列的细胞一般结构。

① 细胞壁 (cell wall)

细胞壁是在细胞最外面的、坚韧而略带弹性的薄膜，它约占菌体的 10%~25%。

细胞壁的化学组成和结构：细胞壁的化学组成，主要有肽聚糖、蛋白质和脂肪，另外还可能会有磷壁酸、脂多糖等。在所有的细菌中，只有胶膜醋酸菌 (*Acetobacter xylinum*) 和产醋酸杆菌 (*A. acetigenum*) 例外，它们的细胞壁是由纤维素构成的。

按细胞壁组成的不同，可把细菌分成两大类：革兰氏阳性菌 (G^+) 和革兰氏阴性菌 (G^-)。革兰氏阳性菌和革兰氏阴性菌的划分是通过革兰氏染色试验来确定的，这种染色方法是由丹麦科学家 Gram 在 1884 年建立的。

细菌细胞壁的生理功能：

- A. 保护原生质体免受渗透压引起的破裂作用；
- B. 保持和固定细胞形态；
- C. 为鞭毛提供支点，使鞭毛运动；
- D. 细胞壁的多孔结构可起到分子筛的作用，可以阻挡某些分子进入。

② 原生质体 (Protoplast)

位于细胞壁以内的所有结构，统称为原生质体，包括细胞质膜、细胞质及其内含物、细胞核物质。

细胞质膜 (质膜) 是在细胞壁和细胞质之间，紧贴在细胞壁内侧的一层柔软而富有弹性的薄膜，厚度约 7~8nm。它是一层半透性膜，其质量占菌体的 10%。

细胞质膜的化学组成：细胞质膜主要由蛋白质（60%~70%）、脂类（30%~40%）和多糖（约2%）组成。蛋白质与膜的透性及酶的活性有关。脂类是磷脂，由磷酸、甘油、脂肪酸和胆碱组成。

细胞质膜的结构：在电子显微镜下，可以看到细胞质膜的双层结构，上下两层致密的着色层，中间夹一个不着色的层（区域）。对此，目前人们公认的解释是磷脂分子构成膜的基本骨架，上下两层磷脂分子层平行排列，具有极性的磷脂分子亲水基朝向膜的内、外表面的水相，疏水基（由脂肪酰基团组成）在中间。蛋白质镶嵌在磷脂层中或膜表面，有的由外侧伸入膜的中部，有的穿透膜的两层磷脂分子，膜表面的蛋白质还带有多糖。有的蛋白质在膜上位置是不固定的，可以转动和扩散，因此，细胞质膜是一个流动镶嵌的功能区域。细胞质膜还可以内陷成层状、管状或囊状的膜内褶系统，位于细胞质的表面或深部，常见的有中间体。细胞质膜的结构模式见图 1-5。

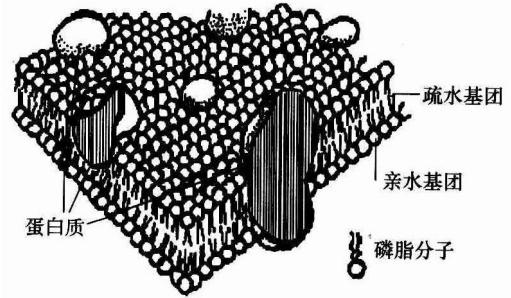


图 1-5 细胞质膜的结构模式图

细胞质膜的作用：

- A. 控制细胞内外物质的交换（吸收营养和排泄废物等），膜的半透性以及膜上存在的与渗透有关的酶，可以选择性决定物质进出细胞；
- B. 细胞壁合成的场所，膜上有合成细胞壁和形成横隔膜所需要的酶；
- C. 进行物质和能量代谢，膜上有许多重要的酶，如渗透酶、呼吸酶及 ATP 合成酶等；
- D. 膜内陷形成的中间体上有呼吸电子传递需要的酶系，具有类似高等生物线粒体的功能，它还与染色体的分离和细胞分裂有关，为 DNA 提供附着点；
- E. 与细菌运动有关，鞭毛基粒位于细胞膜上，是鞭毛附着的部位。

③细胞质 (cytoplasm) 及其内含物

细胞质是位于细胞膜以内，除核物质以外的无色透明的黏稠胶体物质，又称原生质。细胞质由蛋白质、核酸、多糖、脂类、无机盐、水等物质组成。细胞质内含有各种酶系统，是细菌细胞进行新陈代谢的场所。

内含物是细胞质内存在的各种颗粒和结构，它们担负着重要的生理功能。常见的细胞质内含物有以下几种：

- A. 核糖体 (ribosome) ——核糖体是分散在细菌细胞质中的亚微颗粒，以游离状态或多聚核糖体状态存在，是合成蛋白质的场所。它由 60% 的 RNA (rRNA) 和 40% 的蛋白质组成。
- B. 内含颗粒 (inclusive granule) ——成熟细菌细胞，在营养过剩时，细胞质内可形成各种储藏颗粒。如异染粒、聚 β -羟基丁酸 (PHB)、硫粒、淀粉粒等。内含颗粒的产生与菌种有关，也与环境条件有着十分密切的关系。当营养缺乏时，它们又可被分解利用。
- C. 气泡 (gas vacuole) ——在一些光合细菌和水生细菌的细胞质中含有气泡，呈圆柱形或纺锤形，由许多气泡囊组成。气泡的主要功能是调节浮力。在含盐量高的水中生活

的专性好氧盐杆菌属 (*Halobacterium*) 体内含气泡量较多, 细菌借助气泡浮到水面吸收氧气。

④核物质

细菌是原核生物, 没有定形的细胞核 (无核仁、核膜), 但具有遗传物质 DNA (脱氧核糖核酸), 即核物质, 它又称为拟核 (nucleoid), 亦称细菌染色体。

在细菌中, DNA 纤维存在于核区, 由环状双链的 DNA 分子高度折叠缠绕而成。如 *E. coli* 的菌体长度仅 $1\sim 2\mu\text{m}$, 而其 DNA 分子总长可达 1.1mm 。由于细菌 DNA 含有磷酸基, 带有很强的负电荷, 用特异性的富尔根 (Fulegen) 染色法染色后, 细菌 DNA 可在光学显微镜下看见, 呈球状、棒状或哑铃状。

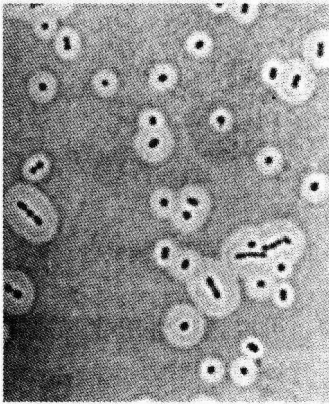


图 1-6 细菌荚膜

2) 细菌的特殊结构

①荚膜 (capsule)

一些种类的细菌能分泌一种黏性物质于细胞壁的表面, 完全包围并封住细胞壁, 使细菌和外界环境有明显的边缘, 这层黏性物质称为荚膜。如图 1-6 所示。碳氮比高和强的通气条件有利于好氧细菌形成荚膜。细菌荚膜可以很厚 ($\geq 0.2\mu\text{m}$), 称为大荚膜 (macrocapsule); 也可以很薄 ($< 0.2\mu\text{m}$), 称为微荚膜 (microcapsule)。荚膜是细菌分类的依据之一。

荚膜的含水量在 $90\%\sim 98\%$, 主要化学成分是多糖、多肽、脂类或脂类蛋白复合体。如在巨大芽孢杆菌中, 荚膜有多糖组成的网状结构, 其间镶嵌以 D-谷氨酸组成的

多肽。

荚膜对染料的亲和力很低, 不易被着色, 在实验中可用负染色法 (亦称衬托法) 进行染色。即把细菌样品制成涂片后, 先对菌体进行染色, 然后用墨汁将背景涂黑, 在菌体和黑色背景之间的透明区就是荚膜。

荚膜的功能有:

- A. 保护功能, 荚膜的存在有利于细菌对干燥的抵抗, 也有利于防止细菌被吞噬和噬菌体的侵染;
- B. 当营养缺乏时, 荚膜可以成为细菌的外碳源 (或氮源) 和能量的来源;
- C. 在废水处理中, 荚膜能吸附废水中的有机物、无机固体物及胶体物, 把它们吸附在细胞表面, 有利于对其的吸收降解;
- D. 荚膜是分类鉴定的依据之一。

此外, 还有以下几个与荚膜有关的细菌细胞结构和由细菌组成的群体结构 (菌胶团):

a. 黏液层 (slime layer)。有些细菌不产荚膜, 其细胞表面分泌的黏性多糖物质疏松地附着在细胞壁表面, 与周围环境无明显的边缘, 称为黏液层。在废水生物处理中, 黏液层具有吸附作用, 并很容易因冲刷和搅动而进入水中, 成为其他生物的有机物来源。

b. 菌胶团 (zoogloea)。当多个细菌个体排列在一起时, 其荚膜互相融合, 形成公共荚膜包藏的具有一定形状的细菌集团, 称为菌胶团 (图 1-7)。在活性污泥中常能见到多种形态的菌胶团, 如球形、椭圆形、蘑菇形、分支状、垂丝状及不规则状。菌胶团的形成对

于水处理有十分重要的意义，它是废水生物处理中常见的由细菌组成的群体结构。

c. 衣鞘 (sheath)。在一些水生细菌中，如球衣菌属、纤发菌属、发硫菌属、亮发菌属、泉发菌属等，多个细菌呈丝状排列，表面的黏性物质硬化，形成丝状菌，这个在外面包围的结构就是衣鞘。

②芽孢 (spore)

某些细菌在其生活史的某一阶段或遇到不良环境条件时，会在其细菌体内形成一个圆形、椭圆形或圆柱形的内生孢子，称为芽孢。能产生芽孢的细菌种类包括好氧的芽孢杆菌属 (*Bacillus*) 和厌氧的梭状芽孢杆菌属 (*Clostridium*)、一个属的球菌 (芽孢八叠球菌属 *Sporosarcina*) 和一个属的弧菌 (芽孢弧菌属 *Sporovibrio*)。芽孢的位置因种而异，有的是在菌体中间 (如枯草芽孢杆菌)，有的是在菌体的一端 (如破伤风杆菌)。芽孢的位置、形状、大小等也是菌种鉴别的依据，见图 1-8。

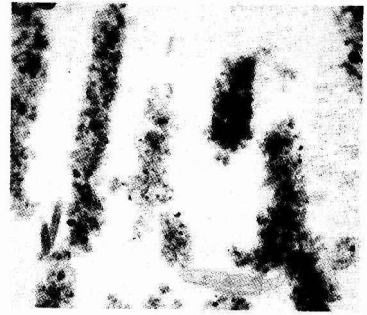


图 1-7 菌胶团

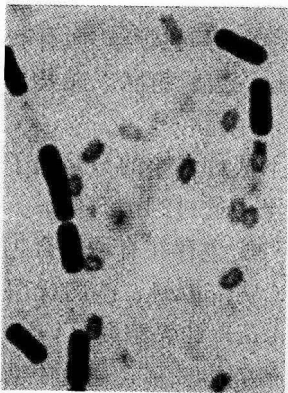


图 1-8 细菌的芽孢

③鞭毛 (flagella)

鞭毛是从细菌细胞膜上的鞭毛基粒长出、并穿过细胞壁伸向体外的一条纤细而呈波浪弯曲的丝状物。

绝大多数能运动的细菌具有鞭毛，鞭毛是细菌的运动胞器。鞭毛的旋转、摆动使细菌可以迅速运动。一般幼龄菌活动活跃，而老龄菌鞭毛会脱落而失去活动能力。有鞭毛的细菌能运动，但并不是能运动的细菌都有鞭毛，有的细菌能借助其他方式运动，如滑行细菌 (贝日阿托氏菌、透明颤菌、黏细菌等)。有的细菌的鞭毛是单根的，也有多根的，可以是一端单生的或者两端单生的；也可以是成束的，一端丛生的或者是两端丛生；也有的是周生的。鞭毛的着生位置、数量、排列方式等都与细菌的鉴定有关，它是细菌种的特征，

见图 1-9。

(3) 细菌的繁殖

接种到新鲜培养基里的细菌细胞，从周围环境中选择性地吸收营养物质，随之发生一连串的生化合成反应，把进入细胞的营养物质转变成新的细胞物质——DNA、RNA、蛋白质、酶及其他大分子。细胞物质和细胞体积的增加，新的细胞壁物质的合成，使菌体开始了繁殖过程，最后形成 2 个新的细胞。

裂殖是细菌最普遍、最主要的繁殖方式，通常表现为横分裂。杆菌和螺旋菌在分裂前先延长菌体，然后垂直于长轴分裂。如果分裂发生在菌体中腰部与菌体长轴垂直处，分裂后形成的 2 个子细胞大小基本相等，称为同型分裂 (homotypic division)。大多数细菌繁殖属此类型。也有少数种类的细菌，分裂偏于一端，分裂后形成的 2 个子细胞大小不等，称为异型分裂 (heterotypic division)。这种情况，偶尔出现



图 1-9 细菌的鞭毛