

248

**Environmental Microbiology**

**环境微生物学**

郑 平 主编

浙江大學出版社

## 图书在版编目 (CIP) 数据

环境微生物学 / 郑平主编. —杭州: 浙江大学出版社,  
2002.2  
ISBN 7-308-02907-7

I. 环... II. 郑... III. 环境科学: 微生物学  
IV. X172

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2001) 第 096452 号

**责任编辑** 杜玲玲  
**封面设计** 刘依群  
**出版发行** 浙江大学出版社  
(杭州浙大路 38 号 邮政编码 310027)  
(网址: <http://www.zjupress.com>)  
(E-mail: [zupress@mail.hz.zj.cn](mailto:zupress@mail.hz.zj.cn))  
**排 版** 浙江大学出版社电脑排版中心  
**印 刷** 浙江大学印刷厂  
**开 本** 787mm×1092mm 1/16  
**印 张** 12.25  
**字 数** 298 千  
**版 印 次** 2002 年 2 月第 1 版 2002 年 2 月第 1 次印刷  
**印 数** 0001—1100  
**书 号** ISBN 7-308-02907-7/X·009  
**定 价** 18.00 元

# 前 言

环境科学是一门综合性很强的大学科,涉及社会科学、自然科学和技术科学等广泛领域。在环境问题成为全球性重大问题时,微生物学工作者运用微生物学的理论和方法,来认识环境问题的实质并探寻解决环境问题的有效途径,于20世纪60年代末建立了环境微生物学这门新兴的边缘学科。至今,环境微生物学已渗透到环境科学的众多领域,成为认识和解决环境问题的锐利武器。了解和掌握环境微生物学的理论、方法和技术,将使环境工作者终生受益。

有关环境微生物学的专著和教材,国内外尚无统一的体系和结构。本书编者取各家所长,结合自己的教学与科研,对现有的环境微生物学成果进行了认真的筛选,编写了这本《环境微生物学》教材,以满足环境类专业本科生的教学之需。环境类专业通常不单独开设普通微生物学课,为了弥补这一不足,本书前八章介绍微生物学的基础知识。第九章介绍微生物对环境的污染与危害,包括病原微生物、水体富营养化以及代谢产物对环境的污染与危害,引进了微生物的风险评价。第十章介绍污染环境的微生物净化与修复,阐述了环境自净和生物修复的微生物学原理。第十一章介绍废水生物处理的微生物学原理,重点讨论微生物在有机废水好氧与厌氧生物处理以及生物脱氮除磷中的种种作用。第十二章介绍环境监测中的微生物学方法。

本书由郑平(第一、二、七、八章)、徐向阳(第十、十一章)、胡宝兰(第三、四、五、六章)、钟文辉(第九、十二章)编写,郑平负责统稿。俞秀娥副教授认真地审阅了教材的全稿,浙江大学教务部和浙江大学出版社对本教材的出版给予了热心的支持,在此深表感谢。由于编者的水平及时间有限,教材中疏漏和不足在所难免,恳请有关专家、老师、同学以及其他读者批评指正。

郑 平

2001年8月

# 目 录

第一章 绪论 .....	(1)
第一节 微生物与微生物学 .....	(1)
一、微生物 .....	(1)
二、微生物学 .....	(3)
第二节 环境科学与环境微生物学 .....	(3)
一、环境与环境科学 .....	(3)
二、环境微生物学 .....	(4)
复习思考题 .....	(6)
第二章 微生物的起源与进化 .....	(7)
第一节 微生物的起源与化学进化 .....	(7)
一、Oparin-Haldane 生命起源假说 .....	(7)
二、生命起源假说的实验证据 .....	(7)
第二节 微生物细胞的进化 .....	(8)
第三节 微生物细胞器的进化 .....	(9)
第四节 微生物生理的进化 .....	(10)
第五节 微生物进化的遗传基础 .....	(11)
第六节 大地女神假说 .....	(12)
复习思考题 .....	(13)
第三章 微生物的主要类群( I ) .....	(14)
第一节 病毒 .....	(14)
一、病毒的一般特征与分类 .....	(14)
二、病毒的化学组成和结构 .....	(15)
三、噬菌体 .....	(16)
四、亚病毒 .....	(19)
第二节 原核微生物 .....	(20)
一、细菌 .....	(20)
二、放线菌 .....	(29)
三、蓝细菌 .....	(32)
四、古菌 .....	(33)
复习思考题 .....	(34)

<b>第四章 微生物的主要类群(Ⅰ)</b> .....	(35)
<b>第一节 真菌</b> .....	(35)
一、真菌的细胞结构 .....	(35)
二、真菌的菌丝和菌丝体 .....	(36)
三、真菌的繁殖 .....	(37)
四、真菌的菌落特征 .....	(38)
五、真菌的分类 .....	(39)
<b>第二节 藻类</b> .....	(46)
一、藻类的形态与构造 .....	(46)
二、藻类的生理特征 .....	(46)
三、藻类的分类 .....	(47)
<b>第三节 原生动物</b> .....	(50)
一、原生动物的形态与构造 .....	(50)
二、原生动物的营养与繁殖 .....	(51)
三、原生动物的分类 .....	(51)
<b>第四节 微型后生动物</b> .....	(55)
一、轮虫 .....	(55)
二、线虫 .....	(56)
三、颤体虫 .....	(56)
<b>复习思考题</b> .....	(57)
<b>第五章 微生物的营养与代谢</b> .....	(58)
<b>第一节 微生物的营养物质</b> .....	(58)
一、能源 .....	(58)
二、碳源 .....	(58)
三、氮源 .....	(59)
四、无机盐 .....	(59)
五、生长因子 .....	(60)
六、水 .....	(60)
<b>第二节 微生物的营养类型</b> .....	(60)
一、光能自养型 .....	(60)
二、光能异养型 .....	(60)
三、化能自养型 .....	(61)
四、化能异养型 .....	(61)
<b>第三节 微生物的营养吸收</b> .....	(61)
一、简单扩散 .....	(61)
二、促进扩散 .....	(61)
三、主动运输 .....	(62)
四、基团转位 .....	(62)

第四节 培养基 .....	(63)
一、配制培养基的原则 .....	(63)
二、培养基的种类 .....	(63)
第五节 微生物的能量代谢 .....	(64)
一、呼吸 .....	(64)
二、厌氧呼吸 .....	(65)
三、发酵 .....	(65)
第六节 微生物的物质代谢 .....	(66)
一、糖酵解途径 .....	(66)
二、三羧酸循环 .....	(66)
第七节 微生物的代谢调控 .....	(68)
一、酶活性的调节 .....	(69)
二、酶合成的调节 .....	(70)
复习思考题 .....	(73)
<b>第六章 微生物的生长繁殖与遗传变异 .....</b>	<b>(74)</b>
第一节 微生物生长的测定 .....	(74)
一、总菌数的测定 .....	(74)
二、活菌数的测定 .....	(75)
三、霉菌生长的测定 .....	(75)
四、生长量的测定 .....	(76)
第二节 微生物的生长 .....	(76)
一、分批培养 .....	(76)
二、连续培养 .....	(79)
三、好氧培养 .....	(81)
四、厌氧培养 .....	(83)
第三节 微生物的遗传 .....	(84)
一、DNA 与基因 .....	(85)
二、DNA 的复制 .....	(85)
三、RNA 的合成 .....	(86)
四、蛋白质的合成 .....	(87)
第四节 微生物的变异 .....	(87)
一、非遗传型变异 .....	(87)
二、遗传型变异 .....	(87)
三、原核微生物的基因重组 .....	(88)
四、真核微生物的基因重组 .....	(89)
复习思考题 .....	(89)
<b>第七章 微生物的生态 .....</b>	<b>(90)</b>
第一节 非生物因素对微生物的影响 .....	(90)

一、最小因子定律和耐受性定律 .....	(90)
二、温度 .....	(90)
三、酸碱度 .....	(93)
四、水的可给性 .....	(93)
五、氧气 .....	(94)
第二节 种群内微生物的相互作用 .....	(96)
一、阿利规律 .....	(96)
二、正相互作用 .....	(96)
三、负相互作用 .....	(97)
第三节 种群间微生物的相互作用 .....	(97)
一、中立 .....	(97)
二、栖生 .....	(98)
三、互生 .....	(98)
四、共生 .....	(99)
五、竞争 .....	(99)
六、偏生 .....	(100)
七、捕食 .....	(100)
八、寄生 .....	(100)
第四节 微生物群落的形成与发展 .....	(101)
一、r 对策和 K 对策 .....	(101)
二、群落的形成与演替 .....	(101)
三、群落结构 .....	(102)
第五节 微生物的生态系统 .....	(102)
一、生态系统的组成 .....	(102)
二、食物链与营养级 .....	(103)
三、生态系统的能流与物流 .....	(103)
复习思考题 .....	(103)

<b>第八章 微生物与生物地球化学循环</b> .....	(104)
<b>第一节 碳素循环</b> .....	(104)
一、概述 .....	(104)
二、有机物质分解的一般途径 .....	(105)
三、纤维素的分解 .....	(106)
四、半纤维素和其他糖类化合物的分解 .....	(107)
五、脂肪的分解 .....	(108)
<b>第二节 氮素循环</b> .....	(108)
一、概述 .....	(108)
二、生物固氮 .....	(109)
三、氨的同化 .....	(111)
四、氨化作用 .....	(111)

五、硝化作用 .....	(112)
六、硝酸盐还原作用 .....	(114)
第三节 硫素循环 .....	(115)
一、概述 .....	(115)
二、硫的同化 .....	(116)
三、脱硫作用 .....	(116)
四、硫化作用 .....	(116)
五、硫酸盐还原作用 .....	(117)
第四节 磷素循环 .....	(118)
一、概述 .....	(118)
二、磷的同化 .....	(118)
三、有机磷化物的分解 .....	(119)
四、难溶磷化物的溶解 .....	(119)
五、磷酸盐的还原 .....	(120)
复习思考题 .....	(120)
<b>第九章 微生物对环境的污染与危害 .....</b>	<b>(121)</b>
第一节 环境中病原微生物的传播与危害 .....	(121)
一、大气微生物污染 .....	(121)
二、水体微生物污染 .....	(122)
三、土壤微生物污染 .....	(123)
第二节 水体富营养化 .....	(124)
一、水体富营养化的概念 .....	(124)
二、富营养化水体中的主要生物种群 .....	(124)
三、水体富营养化的形成和影响因素 .....	(125)
四、水体富营养化的评价 .....	(126)
五、水体富营养化的危害 .....	(126)
六、水体富营养化的防治 .....	(127)
第三节 微生物代谢产物的污染 .....	(127)
一、生物毒素 .....	(127)
二、气味代谢物 .....	(129)
三、酸性矿水 .....	(130)
四、甲基汞 .....	(130)
第四节 微生物的风险评价 .....	(131)
一、风险与风险评价的概念 .....	(131)
二、风险评价的基本内容 .....	(131)
三、微生物的风险评价 .....	(132)
复习思考题 .....	(135)
<b>第十章 污染环境的微生物净化与修复 .....</b>	<b>(136)</b>



第一节 有机污染物的微生物降解与转化·····	(136)
一、微生物降解的潜力·····	(136)
二、工程菌的构建·····	(137)
三、有机污染物的可生物降解性·····	(139)
四、几种典型有机污染物的微生物降解·····	(141)
第二节 污染环境的自净作用·····	(146)
一、污染水体的自净·····	(146)
二、污染土壤的自净·····	(147)
第三节 污染环境的生物修复·····	(149)
一、生物修复概述·····	(149)
二、生物修复的技术要点·····	(150)
三、生物修复工艺·····	(152)
复习思考题·····	(154)
<b>第十一章 废水生物处理的微生物学原理·····</b>	<b>(155)</b>
第一节 废水生物处理的作用与类型·····	(155)
一、废水生物处理的作用·····	(155)
二、废水生物处理的类型·····	(156)
第二节 废水好氧生物处理的微生物学原理·····	(157)
一、好氧活性污泥法·····	(157)
二、好氧生物膜法·····	(161)
第三节 废水厌氧生物处理的微生物学原理·····	(163)
一、厌氧生物处理的工艺条件·····	(164)
二、厌氧生物处理的特点·····	(164)
三、厌氧生物处理的发展·····	(164)
四、UASB 反应器·····	(165)
第四节 废水生物脱氮的微生物学原理·····	(167)
一、硝化作用·····	(168)
二、反硝化作用·····	(168)
三、废水生物脱氮工艺·····	(169)
四、A/O 生物脱氮工艺·····	(170)
第五节 废水生物除磷的微生物学原理·····	(170)
一、聚磷细菌及其过度摄磷作用·····	(170)
二、废水生物除磷工艺·····	(171)
复习思考题·····	(172)
<b>第十二章 环境监测中的微生物学方法·····</b>	<b>(173)</b>
第一节 水质的细菌学检测·····	(173)
一、细菌总数·····	(173)
二、腐生细菌数·····	(173)

三、粪便污染的指示菌 .....	(174)
第二节 空气的细菌学检测 .....	(176)
一、空气中细菌的检测方法 .....	(176)
二、空气中细菌的总数指标 .....	(177)
第三节 污染物毒性的细菌学检测 .....	(177)
一、污染物毒性检测(发光细菌检测法) .....	(177)
二、污染物致突变性检测(Ames 试验法) .....	(177)
第四节 应用 PCR 技术检测环境微生物 .....	(178)
一、PCR 技术 .....	(178)
二、应用 PCR 技术检测致病菌 .....	(180)
三、应用 PCR 技术检测基因工程菌 .....	(180)
复习思考题 .....	(181)
<b>参考文献</b> .....	(182)

# 第一章 绪 论

## 第一节 微生物与微生物学

### 一、微生物

#### (一) 微生物的定义

微生物(microorganism)不是分类学上的名词,它是一切肉眼看不见的或看不清楚的微小生物的总称。微生物包括非细胞型微生物和细胞型微生物,后者又包括原核型微生物和真核微生物。微生物种类繁多,形态各异,营养类型庞杂,但都表现为简单、低等的生命形态;在研究方法上,所采用的技术和设备也大致相同。微生物的主要类群如图 1-1 所示。

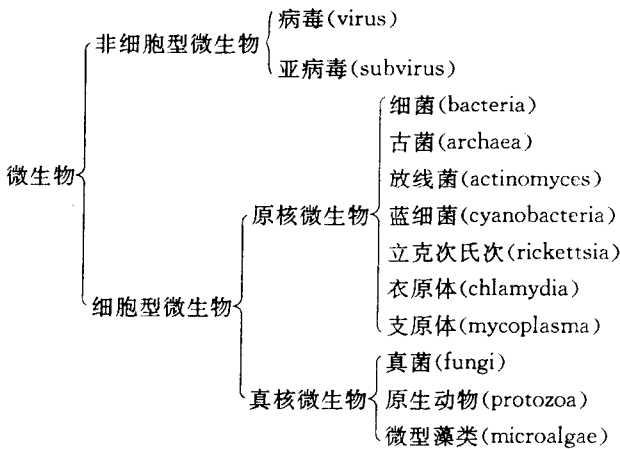


图 1-1 微生物的主要类群

#### (二) 微生物的特点

1. 个体微小、结构简单 微生物形体微小,必须借助于显微镜,甚至用电子显微镜把它们放大几十万倍才能看到。

测量微生物需用测微尺,细菌以微米( $\mu\text{m}$ )为计量单位;病毒比细菌还小,用纳米( $\text{nm}$ )为计量单位。在微生物世界,个体最小的是类病毒和朊病毒,它们大约是病毒大小的 1/100。

微生物结构简单,多数是单细胞生物,一个细胞就是一个生物个体。病毒没有细胞结构,由核酸和蛋白质组成;类病毒仅由核酸组成;朊病毒仅由蛋白质组成。

2. 代谢活跃、类型多样 微生物代谢活跃。由于个体小,相应的比表面积很大,能迅速地从环境中吸取各种营养物质,排出大量代谢产物。例如,乳酸杆菌每小时可产生相当于其体重 1 千至 1 万倍的代谢产物——乳酸。

微生物代谢类型多样,具体表现为:① 基质广泛。既能利用二氧化碳,也能利用各种有机物质作为碳源。② 能源谱宽。既能利用太阳能,也能利用各种化学能作为能源。③ 适应性强。既可在有氧环境下生长,也可在无氧环境下生长。④ 代谢产物多样。既可产生无机产物,也可产生有机产物;既可产生小分子有机产物,也可以产生大分子有机产物。

3. 繁殖迅速、容易变异 微生物具有极高的繁殖速度。在生长旺盛时,有些细菌每 20 分钟就能增殖一代,24 小时可增殖 72 代。如果没有其他条件限制,经过一昼夜 1 个细菌就可增至 4 万亿亿个。

微生物对环境条件敏感,容易发生变异。在外界条件出现剧烈变化时,多数个体死亡,少数个体可发生变异而适应新的环境。

4. 抗逆性强、休眠期长 微生物具有很强的抗逆性。例如,高温菌可在 265 个大气压(26.8 MPa)和 300℃ 的高压高温条件下生长;嗜酸菌可在 pH 0.5 的强酸性条件下生长;嗜盐菌则可在盐含量高达 23%~25% 的“死海”中生活。

在不利条件下,微生物容易进入休眠状态,有些种类可形成特殊的休眠体(如芽孢和分生孢子)。这些休眠体的休眠期很长。据报道,在休眠几百年甚至上千年后,有些芽孢仍有活力。

5. 种类繁多、数量巨大 如前所述,微生物种类繁多,包括细菌、古菌、放线菌、真菌、藻类和原生动动物等类群。每一类群又由相当可观的种组成,现已发现的真菌有 10 万多种,细菌达 2000 多种,放线菌 1500 多种。

微生物数量巨大。在温度和湿度适宜、营养丰富的土壤耕作层中,每克土壤的微生物含量高达数亿个。

6. 分布广泛、分类界级宽 微生物分布广泛。在自然界,不论是土壤、水体和空气,还是植物、动物和人体的内部或表面,都存在大量微生物。上至 8 万多米的高空,下至 3 千多米的油井,冷至南北极地,热至几百度的深海火山口内,都有微生物的踪迹,真可谓无孔不入,无所不在。

微生物的分类界级很宽。在反映生物系统发育的六界(动物界、植物界、真菌界、原生生物界、原核生物界和病毒界)分类系统中,微生物包括了除动物界和植物界以外的其他四界。

### (三)微生物的分类和命名

1. 微生物的分类 目前所知的微生物已超过 10 万种,而且,新种还在不断地被发现。为了识别和研究微生物,通常根据它们的生物学特性以及彼此之间的亲缘关系,将它们安排成一个条理清楚分类系统。

从大到小,这个分类系统的各级分类单位是界(kingdom)、门(phylum)、纲(class)、目(order)、科(family)、属(genus)、种(species)。其中,种是分类的基本单位。在两个分类单位之间,常加进次要分类单位,如亚门、亚纲、亚科、亚属、亚种、变种。

除上所述,人们还常用一些非分类学单位,如采用类群(group)和菌株(strain)来表示微生物在分类系统中的地位。类群是非正式地指定一组具有某些共同性状的微生物。菌株则表示任何一个独立分离的单细胞(或单个病毒粒子)繁殖而成的纯种群体及其后代。

2. 微生物的命名 每种微生物都有自己的名称,名称有俗名(common name)和学名(scientific name)两种。俗名指普通的、通俗的、地区性的名称,具有简明和大众化的优点;但往往涵义不确切,易于重复,使用范围受到限制。例如,俗名“绿脓杆菌”指的是“铜绿假单胞菌”(Pseudomonas aeruginosa)。

学名是一个菌种的科学名称,它是按照国际学术界的通用规则命名的。学名采用拉丁词或

拉丁化的词构成。在出版物中,学名应排成斜体(在书写或打字时,在学名之下应划一横线,以表示它是斜体)。根据双名法规则,学名通常由一个属名(第一个字母大写)加一个种名(第一个字母小写)构成。出现在分类学文献上的学名,在双名之后往往加上首次定名人(放在括号内)、现名定名人和现名定名年份。即

$$\text{学名} = \underbrace{\text{属名} + \text{种名}}_{\text{必要(斜体)}} + \underbrace{(\text{首次定名人}) + \text{现名定名人} + \text{现名定名年份}}_{\text{可省略(正体)}}$$

例如大肠埃希氏菌(简称大肠杆菌)的学名为 *Escherichia coli* (Migula) Castellani et Chalmers 1919。

在少数情况下,当某菌株为一个亚种[subspecies, 简写 subsp. (正体)]或变种[variety, 简写 var. (正体)]时,学名应按“三名法”构成。即

$$\text{学名} = \underbrace{\text{属名} + \text{种名}}_{\text{必要(斜体)}} + \underbrace{(\text{subsp. 或 var.})}_{\text{可省略(正体)}} + \underbrace{\text{亚种或变种名}}_{\text{必要(斜体)}}$$

例如苏云金芽孢杆菌蜡螟亚种的学名为 *Bacillus thuringiensis* subsp. *galleria*。

## 二、微生物学

微生物学是在分子、细胞或群体水平上研究微生物的形态构造、生理代谢、遗传变异、生态分布和分类进化等生命活动的基本规律,并将其应用于工业发酵、农业生产、医学卫生和生物工程等领域的科学。

微生物学的根本任务是发掘、利用或改善有益微生物,控制、消灭或改造有害微生物。

经过长期的发展,微生物学涌现了许多分支学科。依据研究的生命现象,可将微生物学划分为微生物形态学、微生物分类学、微生物生理学、微生物生物化学以及微生物遗传学等。依据微生物的生态环境,则可将微生物学划分为土壤微生物学、水体微生物学、海洋微生物学、环境微生物学和宇宙微生物学等。按照不同的标准,还可将微生物学划分为多个其他分支学科。环境微生物学是微生物学的重要分支学科之一。

## 第二节 环境科学与环境微生物学

### 一、环境与环境科学

从词意上说,“环境”泛指某一中心项(或叫主体)周围的空间及其空间中存在的事物。

不同学科对“环境”这一概念有不同的理解和认识。环境科学中的“环境”是指以人类为主体的外部世界,即人类赖以生存和发展的物质条件的综合体。人类环境包括自然环境和社会环境。按组成要素,可把整个自然环境(地球环境)区分为大气环境、水体环境、土壤环境和生态环境。有时形象地称它们为大气圈、水圈、岩石圈和居于三圈交界面上的生物圈。

大气、水体、土壤和生物圈都是地球长期演化形成的,具有特定的组成、结构和运行规律。这些性质构成了环境的质量要素。环境质量是环境对人类生存和发展适宜程度的标志,环境问题实质上是环境质量的变化问题。人类是环境的产物,必须依赖自然环境而生存和发展;同时人类又是环境的改造者,通过社会性生产活动来利用和改造环境,使其更适合人类的生存和发展。然而,人类活动也可使环境发生不利于人类的变化,影响人类的生产和生活,给人类带来灾难。在解决各种环境问题的过程中,环境科学应运而生。

环境科学是研究人类与环境之间相互关系的科学。在宏观上研究人类社会经济发展与环境之间的相互作用和影响;在微观上研究环境中的物质,尤其是污染物质在生物体内的迁移、转化和蓄积规律。重点研究与人们健康直接相关的生活环境和生产环境,因污染所致环境质量变化规律及其综合整治技术与方法。

环境科学综合性很强,涉及社会科学、自然科学和技术科学。仅依据所涉及的学科,即可将环境科学划分为多个分支学科,如环境社会学、环境法学、环境管理学、环境经济学、环境地理学、环境地质学、环境物理学、环境化学、环境生物学、环境医学、环境毒理学、环境工程学等。按不同标准,还可划分出众多其他分支学科。环境微生物学作为环境生物学的重要组成部分,在环境科学中扮演着极其重要的角色。

## 二、环境微生物学

### (一)环境微生物学的定义

如上所述,环境微生物学不仅是微生物学的一个分支,同时也是环境科学的一个分支。它是微生物学与环境科学相互渗透而产生的一门新兴的边缘学科。若下一个定义,可表述为:环境微生物学是研究微生物与环境之间的相互关系和作用规律,并将其应用于污染防治的科学。通俗地说,环境微生物学就是要利用微生物学的理论、方法和技术来探讨环境现象,解决环境问题。

虽然环境微生物学原理的应用可追溯到19世纪末城市污水生物处理的实践,但作为一门独立的学科,环境微生物学的发展历史并不长。20世纪60年代末,美国将《应用微生物学》杂志更名为《应用与环境微生物学》,可作为环境微生物学从其母体学科(微生物学)脱颖而出的标志。20世纪70年代以后,环境微生物学得到了飞速的发展。

环境微生物学之所以能在短期内异军突起并备受关注,主要是因为:①随着工农业生产的发展和人民生活水平的提高,污染物的种类和数量迅猛增加,给人类环境带来了巨大的冲击,而这些污染物的降解和转化主要依靠微生物的作用。②微生物中的病原菌、微生物生长所致的水体富营养化以及微生物转化形成的毒性产物,给人类环境带来了不少危害,迫切需要深入研究并加以有效控制。③分子生物学技术的发展一日千里,为检测和分析环境微生物创建了很好的工作平台,有力推动了环境微生物学的研究。

### (二)环境微生物学的研究内容

明确研究内容,有助于加深对环境微生物学的理解。根据本书编者的体会,环境微生物学应当包含如下内容。

1. 自然环境中的微生物背景 自然环境(大气、水体、土壤和生物圈)中的微生物背景状况,是环境微生物学研究的基础和出发点。地球上的一切生物都是在特定的环境中产生和发展的,经过长期的相互作用和相互适应,生物与环境间形成了和谐的关系。自然环境中的微生物背景,反映了微生物与环境间的动态平衡,因此可作为环境质量变化的基准。一些学者将这部分研究内容纳入“自然环境中的微生物生态学”,主要研究自然环境与微生物种群间的相互关系,以及微生物在生物地球化学循环中的各种作用。环境微生物学与微生物生态学的差别在于它们的研究目的不同。微生物生态学研究微生物之间以及微生物与微生物环境(以微生物为主体的外部世界,把人类看成环境的组成部分)之间的相互关系和相互作用,着重考虑微生物环境对微生物及其活动的影响;而环境微生物学则着重考虑微生物及其活动,通过改变人类环境(以人类为主体的外部世界,把微生物看成环境的组成部分)对人类生活和生产的影响。

2. 微生物对环境的污染与危害 微生物污染是指有害微生物(如病原菌)污染水体、大气、土壤和食品,影响生物产量和质量,危害人类健康的现象。水体、大气、土壤和食品中的有害微生物主要来源于生活污水、医院污水、屠宰污水、食品加工污水、未经无害化处理的垃圾和人畜粪便,以及大气中的飘浮物和气溶胶。这些有害微生物对人类和生物的危害程度主要取决于微生物的病原性、人类和生物的感受性以及环境条件三个因素。1993年,美国密尔沃基市发生了原生动物的(隐孢子虫, *Cryptosporidium*)所致的水介疾病的暴发流行,造成40多万人得病,100多人死亡。事后调查发现,这种致病菌竟然存在于经消毒处理的饮用水中。更令人担忧的是,最近研究发现有10%~50%的水介痢疾是由目前无法确认的致病菌引起的。饮用水中频繁检出新的病原菌,已引起公众的严重不安。

有害微生物污染食品,可产生毒素,使人食后中毒。例如,黄曲霉污染粮食(如玉米、花生、大豆、稻米、小麦、高粱、小米等),极易产生食物中毒。黄曲霉污染饲料,则可使鱼和哺乳动物诱发原发性肝癌。常见的污染食品并产生毒素的有害微生物有肉毒梭菌和葡萄球菌,诱发胃肠道急性炎症的致病菌有肠炎沙门氏菌、鼠伤寒沙门氏菌和猪霍乱沙门氏菌等。

污染源释放的营养物质(如氮、磷等)大量进入湖泊、河口、海湾等缓流水体,可引起藻类和浮游生物迅速繁殖,造成水体富营养化,导致环境质量的下降。这也是微生物污染的一种现象。

此外,微生物的转化作用可提高某些污染物的毒性。例如,在1953年日本发生的水俣病事件中,氮肥厂将含汞废水排入水体,无机汞在接纳水体的底泥中富集,通过微生物的作用,转化为毒性更大的甲基汞,甲基汞被鱼吸收后,当地居民因食用被甲基汞污染的鱼而患病,患者达数百人,死者达几十人。

研究有害微生物在环境中的生存方式和危害途径,并提出行之有效的防治措施,是环境微生物学的重要内容。

3. 微生物对“污染环境”的净化与修复 在生活和生产活动中,人类向环境排放大量含污染物的废水、废气和废渣,造成空气、水体、土壤的严重污染和生态环境的破坏,直接威胁着人类的健康和生物的安全。人们所熟知的1968年发生的日本米糠油事件,因多氯联苯(PCB)污染米糠油,致使1万多人受害,16人死亡。据估计,全世界已生产的和应用中的PCB超过100万吨,其中1/4至1/3进入人类环境,造成危害。多氯联苯之类有害污染物质进入环境,可对环境中微生物的种类、数量和活性产生重大影响。

反之,微生物对污染物也具有强大的适应和降解潜力。生物降解是指土壤、水体和废水处理系统中的微生物对天然的和合成的有机物的破坏或矿化作用。污染物的可生物降解性是评判其污染性质和程度的重要指标。有些污染物能够在较短的时间内通过微生物降解成为无害物质,对环境的影响较小;另一些污染物则难以被微生物降解,在环境中具有持久性,对人类和生物危害极大。

生物净化是指生物类群通过代谢作用(异化作用和同化作用)使环境中污染物的数量减少,浓度下降,毒性减轻,直至消失的过程。水体、空气和土壤的污染,只要不超过生态系统的负载能力,污染物就可以通过物理的、化学的和生物的作用得到净化,其中微生物起着十分重要的作用。随着人类社会的进步和生产力的发展,微生物净化的功能将在更大的规模上得到利用,并将发展成环境生物工程的重要组成部分。

由于多种原因,许多土壤、地面水、地下水遭受了有机物和无机物的污染,要净化这些“污染环境”,需投入巨大的资金。仅美国,用于清理和净化“污染环境”的费用就高达1万多亿美元。与传统的理化法修复相比,生物净化(修复)具有明显的经济优势。1989年,美国发生了有

史以来最为严重的油轮泄漏事故,Exxon Valdez 号油轮在威廉王子海湾泄漏原油 1100 万加仑。生物修复使该被原油污染的海湾得到逐渐净化。这是生物修复技术首次在净化“污染环境”上的大规模应用,意义深远。

生物净化现象在陆地、淡水和海洋生态系统中普遍存在,但净化能力有一定限度。环境微生物学的重要任务之一就是了解 and 掌握自然界生物净化的基本规律,并加以人工控制,以强化微生物的净化功能。

4. 微生物在污染控制工程中的应用 环境微生物学的研究,实际上是从水处理微生物学的研究和应用开始的。早在 19 世纪,人们就对水介病原菌进行研究,并通过对饮用水采取过滤和消毒等措施,大大降低了伤寒和霍乱的发病率。至今,由水体自净过程发展而来的废水生物处理,已在环境工程上广泛应用。对各种污水生物处理系统(人工环境)中的微生物状况的研究,不仅为污水生物处理技术的改进和提高打下了基础,也有力地推动了整个环境微生物学的发展。其中,对好氧活性污泥的研究和对厌氧颗粒污泥的研究,在废水生物处理上产生了重大的影响。随着人们环境保护意识的增强,在有机物达标排放的前提下,对脱氮除磷和微量有毒物质的处理也提出了更高的要求,迫切需要环境微生物学工作者加倍努力:① 针对特定的污染物,寻找和筛选高效的微生物菌群;② 采用现代基因工程技术将多种有益的特性基因重组成具有多功能、高降解能力的“超级菌株”;③ 探讨污染物与生物降解的关系,推动节能、高效、新型的生物处理技术的开发。

5. 微生物在环境监测与评价中的应用 一些微生物种群对环境质量变化或污染物的性状具有指标作用,可作为环境监测的指标和手段。微生物监测是利用微生物个体、种群或群落对环境污染或环境变化所产生的反应,阐明环境污染状况,从微生物学角度为环境质量的监测和评价提供依据。微生物评价,则是用微生物学方法评价环境质量的现状及其变化趋势。各种生物对环境因素的变化都有一定的适应范围和反应特点。微生物的适应范围越小,反应越典型,对环境因素变化的指示越有意义。

在环境微生物学中,涉及大量原位研究,需要建立新的技术和方法来揭示微生物在自然环境(如土壤和水体)中的行为。以核酸为基础的分子生物学技术,例如 PCR 技术、基因探针技术、基因克隆技术、报告基因技术、DNA 序列分析技术等,为环境微生物学工作者探索自然环境中的微生物秘密,提供了强有力的检测工具。

现代环境微生物学的研究内容远非局限于上述方面,它还包括众多其他方面,例如废物的资源化利用[如生产酒精、单细胞蛋白和能源(氢气和沼气)],微生物冶金,以及发掘具有环保、保健等商业价值的新的微生物资源和新的微生物产品等。

## 复习思考题

1. 何谓微生物? 微生物主要包括哪些类群?
2. 微生物有哪些特点?
3. 微生物的分类单位有哪些? 什么是基本分类单位?
4. 微生物是如何命名的? 举例说明。
5. 何谓环境、环境科学、环境微生物学?
6. 环境微生物学的主要研究内容有哪些?



## 第二章 微生物的起源与进化

根据放射性同位素计时技术测定,地球年龄大约已有 45 亿年。通过对古化石的考证,类似细菌的生物大约出现在 35 亿年前。可见,微生物与地球相伴度过了漫长的历史过程。

生物是地球演化的产物,它们依靠地球而生存和发展;生物也是地球的改造者,通过种种活动来改造地球,使其更适合自己的生存和发展。有人认为,生物之所以能够在地球上发生和发展,是因为地球的环境优于其他星球。但有证据表明,许多有利于生物生存和发展的条件并不存在于生物发生之前,而是形成于生物出现之后。对于现有地球环境的形成和维持,作为生物的先鋒,微生物作出了不可磨灭的巨大贡献。

### 第一节 微生物的起源与化学进化

#### 一、Oparin-Haldane 生命起源假说

原始地球呈熔化状态。物质从熔化状态冷却,逐渐形成由地核、地幔和地壳构成的地球。地球冷却时,二氧化碳、甲烷、氨、氮气、氢气、硫化氢、水蒸气等气体被挤压出地壳表面,形成地球周围的大气圈。水蒸气的冷凝还形成了地壳表层的水圈。地壳表面的水圈和大气圈与生命的起源密切相关。

据考证,生命起源以前,地球经历了大约 10 亿年的演变过程。当时的地球究竟是什么样的?生命又是怎样在地球上产生的?对于这两个问题,目前普遍接受俄罗斯科学家 Oparin 和英国科学家 Haldane 于 1925 年和 1930 年独立提出的生命起源假说。根据 Oparin-Haldane 生命起源假说,生命出现之前,地球周围的大气圈处于厌氧状态;由于原始大气中不存在氧气,没有臭氧层的遮护作用,太阳辐射中的紫外线直入地表;地表温度的昼夜、季节和区域性变化都远远大于现在。然而就是在如此恶劣的环境中,地球表面开始了生命的化学进化。通过各种能量(如太阳能、地热能、雷电能、放射性同位素衰变能等)的作用,小分子无机物质被转化成小分子有机物质,再由小分子有机物质聚合成大分子有机物质。其中,一些大分子有机物质具有原始催化活性,由此演变形成酶;另一些大分子有机物质具有聚集形成细胞膜状界面的趋势,可将液态物质包围在内,由此演变产生细胞。历经数百万年,化学进化最终导致了原始生命的诞生。

#### 二、生命起源假说的实验证据

在 20 世纪 50 年代,Oparin-Haldane 生命起源假说得到了实验证据的支持。Miller 和 Urey 等人模拟古地球环境,采用装有水和还原性混合气体的简单设备,通过加热、放电或紫外线照射,产生了许多有机物,其中包括组成生物所必需的氨基酸和核酸碱基。在 Miller 和 Urey 的实验中,首先由甲烷转化成甲醛和氰化氢,接着这些化合物结合产生尿素和甲酸,最后产生