



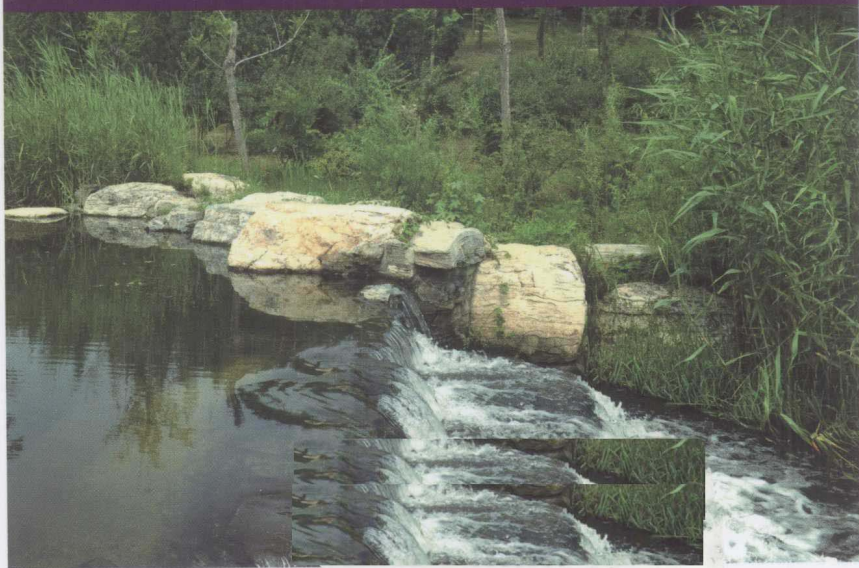
普通高等教育“十一五”国家级规划教材

环境工程微生物学

—— 原理与应用

第二版

王国惠 主编



Chemical Industry Press



化学工业出版社

2-43
2=2

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

环境工程微生物学

——原理与应用

第二版

王国惠 主编



化学工业出版社

·北京·

本书是普通高等教育“十一五”国家级规划教材。

全书共分为 16 章，主要内容包括：病毒；原核微生物；真核微生物；微生物的营养、代谢、繁殖及其控制、遗传变异和育种；微生物对环境污染物的降解及其在污染控制中的应用；环境微生物检测；生物修复技术；微生物新技术在环境治理中的应用；微生物的分类命名及保藏。

本书可作为高等院校环境工程、环境科学、给水排水、环境监测等专业师生的教材，也可供从事环境保护工作的研究人员、技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

环境工程微生物学——原理与应用/王国惠主编. —2 版.
北京：化学工业出版社，2010.7
普通高等教育“十一五”国家级规划教材
ISBN 978-7-122-08860-4

I. 环… II. 王… III. 环境生物学：微生物学-高等学校-教材 IV. X172

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 112706 号

责任编辑：张建茹

文字编辑：荣世芳

责任校对：周梦华

装帧设计：关 飞

出版发行：化学工业出版社（北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011）

印 刷：北京永鑫印刷有限责任公司

装 订：三河市前程装订厂

787mm×1092mm 1/16 印张 18½ 字数 470 千字 2010 年 9 月北京第 2 版第 1 次印刷

购书咨询：010-64518888（传真：010-64519686） 售后服务：010-64518899

网 址：<http://www.cip.com.cn>

凡购买本书，如有缺损质量问题，本社销售中心负责调换。

定 价：35.00 元

版权所有 违者必究

第二版前言

《环境工程微生物学》作为面向 21 世纪高等学校规划教材（第一版）出版至今已有 6 年（实际上，第一版的前身是 1998 出版的《环境工程微生物学原理及应用》），在这 6 年的时间里，《环境工程微生物学》已被全国很多高等院校选用，受到了广大读者的好评。2006 年该书被列入普通高等教育“十一五”国家级规划教材。

随着科学技术的迅猛发展，环境科学与环境工程取得了很大进步，学科之间的相互交叉与渗透极大地促进了环境工程微生物学的发展，其研究内容更加丰富、涉及面更广、理论研究更深入、技术手段更先进。为使本教材达到适应现代教学和环境生物技术发展的需要，及时反映该领域的新动态，编者总结了多年教学和科研实践经验，在广泛听取同仁们意见的基础上，对第一版进行了再加工、整理与调整，无论从结构上还是内容上都进行了一定的改动，特别是第 2 章、第 3 章和第 4 章变动较大，已将原来的第 2 章调整为第 3 章，将原来的第 3 章调整为第 4 章，将原来的第 4 章调整为第 2 章，这三章的内容全部进行了修改与更新。另外，本书只保留了理论内容，使其更加突出该学科的理论与技术方面的发展水平。

由于环境生物技术的迅速发展，微生物在污染控制工程中的作用与地位日趋突出，因此，对污染控制工程中的微生物的研究也越来越受到重视。为了适应环境工程微生物学科发展的要求，对环境工程微生物学实验所涉及的内容与方法必须进行相应的更新与补充，以反映时代的特征，为此，我们将原书中的实验部分单独编辑成《环境工程微生物学实验》与本书配套正式出版。

本教材的基本原则是正确处理好基础性、系统性、先进性与应用性之间的关系，本书具有下列特点。

- ① 信息量大，内容丰富，结构明晰，图文并茂。
- ② 主题突出，结构和内容完整，适用性广。
- ③ 注重新理论、新知识、新观点和新技术，其内容反映了现代环境工程微生物学的最新发展与技术水平，知识具有前瞻性。
- ④ 本教材不仅注重理论内容，而且强调实际应用，书中大量介绍了微生物在污染控制工程中的应用及现代环境微生物治理技术。
- ⑤ 该书语言流畅，表达清楚，通俗易懂，深入浅出，易教、易学、易懂，能较好地激发学生的学习兴趣，有利于教学效果的提高。

全书共分为 16 章，王国惠（中山大学）任主编，由王国惠、单爱琴、刘亚洁、羊依金、吴方同、陈秀华共同编写。王国惠执笔第 1 章、第 2 章、第 3 章、第 4 章、第 5 章、第 7 章、第 8 章、第 10 章、第 14 章，并负责全书的统稿工作；单爱琴执笔第 6 章和第 16 章；刘亚洁执笔第 9 章和第 15 章的第 6 节；羊依金执笔第 13 章和第 15 章；吴方同执笔第 12 章；陈秀华执笔第 11 章。本书在编写过程中参考了国内外许多优秀教材和文献，在此，向其作者谨致谢忱！

李冠宇、李春茂、王伟、胡书俊、李春雷、王辉、李兰、谢玉欣、王晓丽、万凤仙、王丹彤、冯加星、封觅、叶景清等在文稿录入、校对、绘图等方面做了大量的工作，在此一并表示诚挚的谢意！

由于编者水平与时间所限，不妥之处在所难免，敬请广大读者批评指正。

第一版前言

工业革命极大地推动了人类社会文明的发展,但同时也带来了严重的环境污染。水体、土壤、大气都遭到了不同程度的破坏;白色污染、农药危害、垃圾问题、资源短缺日趋明显。利用微生物控制环境污染、消除其危害,使资源得到再生是保证人类社会可持续发展的重要手段。

环境工程微生物学是环境工程、环境科学、给水排水、环境监测、环境管理等专业的技术基础课,可为水污染控制工程、大气污染控制工程、固体废物处理、环境监测等课程提供必需的微生物基本理论和实验技能,并为污染物生物处理提供新的思路和方法,为在各个方向上的理论创新和技术创新提供生物学知识。因此环境工程微生物学在相关专业中占有极其重要的地位。

近年来,环境微生物治理技术已得到迅猛发展,在污染控制方面取得了丰硕成果。但编者在多年教学与研究实践中体会到,环境工程领域的技术人员常因微生物知识的不足而影响污染控制技术的深入研究与发展。因此,本书以系统介绍环境工程微生物学基本理论、基本操作及工程应用为出发点,着重讨论微生物的类群、形态结构、微生物的营养、生理代谢与调控、遗传变异、微生物对物质的转化规律等;在实际应用方面,不仅讲述微生物与常规污染控制工程的结合,同时介绍现代微生物技术及其在环境治理中的应用;实验技能方面,除基本实验操作外,还介绍了污染高效降解菌的分离、筛选及降解实验。其主要目的是使读者全面掌握微生物学的基本知识和基本实验技能,深入了解环境工程微生物学原理和微生物在环境工程中的应用,树立理论联系实际的基本思想,加强实践能力,增强创新能力,认识环境工程微生物发展的最新动态及趋势,掌握现代生物技术中与环境治理有关的新理论、新方法和新技术。本书内容丰富、全面、翔实、图文并茂,有一定的深度和广度。

全书共分为16章。王国惠任主编,单爱琴任副主编。王国惠执笔第1章、第5章、第7章、第8章、第10章、第14章及实验部分,并负责全书统稿工作。单爱琴执笔第6章和第16章,鲁梅芳执笔第2章和第3章,刘亚洁执笔第9章和第15章的第6节,黄晓丹执笔第4章,羊依金执笔第13章和第15章,吴方同执笔第12章,陈秀华执笔第11章。在本书编写大纲的确定、编、审、校整个过程中,所有成员密切配合、通力协作、严肃认真、一丝不苟。本书是全体人员集体智慧的结晶。

本书在编写过程中参考了国内外许多优秀教材和其它文献,在此,向其作者谨致谢忱!

万凤仙、李冠宇在文稿录入、校对、绘图等方面做了大量的工作,在此一并表示诚挚的谢意!

由于编者水平所限,疏漏之处难以避免,敬请广大同仁、读者批评指正。

王国惠
2005.5

目 录

第 1 章 绪论	1		
1.1 微生物的概念	1	现状	2
1.2 微生物学的研究内容	1	1.6.1 废水生物处理研究进展	2
1.3 人类对微生物的认识及研究	1	1.6.2 废气的生物治理研究进展	3
1.4 环境工程微生物学的概念	2	1.6.3 固体废物的生物治理研究 进展	3
1.5 环境工程微生物学的研究内容和 任务	2	1.7 环境工程微生物学所涉及的学科	5
1.6 环境工程微生物学的发展及研究		思考题	5
第 2 章 非细胞微生物——病毒	6		
2.1 (真) 病毒	6	2.2.3 朊病毒	14
2.1.1 病毒的概念	6	2.3 噬菌体 (phage)	14
2.1.2 病毒的特点	6	2.3.1 烈性噬菌体	15
2.1.3 病毒的大小与形态	6	2.3.2 温和噬菌体	18
2.1.4 病毒的结构	7	2.4 环境因素对病毒存活的影响	19
2.1.5 病毒的化学组成	10	2.4.1 物理因素	19
2.1.6 病毒的类群	13	2.4.2 化学因素	19
2.2 亚病毒	14	2.4.3 抗生素和抗病毒药物	20
2.2.1 类病毒	14	2.5 污水处理过程中病毒的去除	20
2.2.2 拟病毒	14	思考题	20
第 3 章 原核微生物	21		
3.1 细菌	21	3.3.2 蓝细菌的细胞结构	42
3.1.1 细菌细胞的大小	21	3.3.3 蓝细菌的存在方式	43
3.1.2 细菌细胞的形态	21	3.3.4 蓝细菌的繁殖	43
3.1.3 细菌的细胞构造	25	3.4 古细菌	44
3.1.4 细菌的繁殖方式	35	3.4.1 古细菌的主要类型	44
3.1.5 细菌的群体特征	35	3.4.2 古细菌的特征	44
3.2 放线菌 (Actinomycetes)	37	3.4.3 古细菌的细胞结构	45
3.2.1 放线菌的形态与结构	37	3.5 鞘细菌	45
3.2.2 放线菌的繁殖方式	38	3.5.1 丝状铁细菌	46
3.2.3 放线菌的培养特征	40	3.5.2 丝状硫细菌	47
3.3 蓝细菌 (Cyanobacteria)	41	思考题	47
3.3.1 蓝细菌的大小及形态	42		
第 4 章 真核微生物	48		
4.1 真菌	49	4.2.2 环境工程中主要的微型藻	60
4.1.1 酵母菌 (Yeasts)	49	4.2.3 原生动物	62
4.1.2 霉菌 (Mould, Mold)	53	4.2.4 微型后生动物	66
4.2 微型藻类	59	思考题	68
4.2.1 微型藻类的一般特征	59		
第 5 章 微生物的营养	69		

5.1 微生物的营养及类型	69	5.2.3 培养基的类型及应用	77
5.1.1 微生物细胞的化学组成	69	5.3 营养物质的吸收	81
5.1.2 营养物质及其生理功能	69	5.3.1 单纯扩散 (diffusion)	81
5.1.3 微生物的营养类型	72	5.3.2 促进扩散 (facilitated diffusion)	81
5.2 培养基	74	5.3.3 主动运输 (active transport)	82
5.2.1 培养基的概念	74	思考题	84
5.2.2 配制培养基的原则	74		
第6章 微生物的代谢	85		
6.1 代谢概述	85	6.3.4 脂肪的分解代谢	107
6.2 微生物的酶及酶促反应	86	6.3.5 蛋白质的分解	109
6.2.1 酶的组成	86	6.3.6 自养微生物的生物氧化	110
6.2.2 酶的结构与功能	86	6.4 微生物的合成代谢	113
6.2.3 酶促反应的特点	91	6.4.1 自养微生物的生物合成	113
6.2.4 酶的种类	91	6.4.2 异养微生物的生物合成	115
6.2.5 酶促反应动力学	92	6.5 微生物的代谢调控	115
6.3 微生物的分解代谢	98	6.5.1 酶活性的调节——控制反应 速率	115
6.3.1 生物氧化概述	98	6.5.2 酶合成的调节——控制反应方向	116
6.3.2 异常微生物的生物氧化	99	思考题	116
6.3.3 微生物的呼吸类型	105		
第7章 微生物的生长繁殖及其控制	118		
7.1 细菌的群体生长	118	7.4 微生物纯培养物的分离及生长的 测定	121
7.1.1 细菌的群体生长规律——生长 曲线	118	7.4.1 纯培养物的分离	122
7.1.2 微生物生长曲线在废水生物处理 中的指导作用	119	7.4.2 微生物生长的测定	122
7.1.3 不同废水生物处理法生长曲线的 特点及意义	120	7.5 环境因素对微生物生长的影响	123
7.2 基质浓度与微生物比生长速率的 关系	120	7.5.1 温度	123
7.3 研究微生物生长的培养方法	121	7.5.2 pH 值	125
7.3.1 微生物的分批培养 (bath culture of microorganisms)	121	7.5.3 氧化还原电位 (E_h)	126
7.3.2 微生物的连续培养 (continuous culture of microorganisms)	121	7.5.4 溶解氧 (DO)	126
		7.5.5 重金属及其化合物	127
		7.6 微生物生长的控制	127
		7.6.1 物理方法的控制	127
		7.6.2 化学方法的控制	130
		思考题	133
第8章 微生物的遗传变异和育种	134		
8.1 遗传变异的物质基础	134	8.3.1 DNA 的突变	142
8.1.1 遗传变异的物质基础	134	8.3.2 诱变与育种	143
8.1.2 DNA 的结构与复制	135	8.4 基因重组	145
8.1.3 DNA 的变性、复性与杂交	136	8.4.1 基因工程工具酶	146
8.1.4 转录	137	8.4.2 基因工程载体	147
8.1.5 翻译	138	8.4.3 目的基因的获得	148
8.2 质粒结构及类型	140	8.4.4 DNA 分子的体外连接	149
8.2.1 质粒的分子结构	140	8.4.5 重组 DNA 导入宿主菌	149
8.2.2 质粒的主要类型	140	8.4.6 重组体的筛选	149
8.3 DNA 的突变和诱变育种	142	8.4.7 基因工程在环境工程中的	

应用	150	8.5.4 融合重组的测定	153
8.5 微生物细胞融合育种	151	8.5.5 利用细胞融合技术构建环境 工程菌	154
8.5.1 细胞融合	151	思考题	154
8.5.2 微生物原生质体及其制备	152		
8.5.3 细胞融合的方法	153		
第9章 微生物的生态	155		
9.1 微生物生态学	155	9.4.1 微生物群落演替的概念	166
9.1.1 什么是微生物生态学	155	9.4.2 演替的类型	166
9.1.2 微生物生态学的任务	155	9.4.3 微生物群落发展和演替	167
9.1.3 微生物在生态系统中的作用	155	9.5 微生物在环境物质循环中的作用	167
9.2 自然环境中的微生物	156	9.5.1 碳素循环 (the carbon cycle)	168
9.2.1 土壤环境中的微生物	156	9.5.2 氮素循环 (the nitrogen cycle)	173
9.2.2 水环境中的微生物	158	9.5.3 硫素循环 (the sulphur cycle)	177
9.2.3 空气中的微生物	159	9.5.4 磷素循环 (the phosphorus cycle)	178
9.2.4 极端环境中的微生物	160	9.5.5 铁素循环 (the iron cycle)	179
9.3 微生物与微生物之间的关系	163	9.5.6 锰素循环 (the manganese cycle)	180
9.3.1 互生 (syntrophism)	164	思考题	180
9.3.2 共生 (symbiosis)	164		
9.3.3 寄生 (parasitism)	165		
9.3.4 拮抗 (antagonism)	165		
9.4 微生物群落的发展和演替	166		
第10章 微生物对环境污染物的降解与转化	182		
10.1 微生物对环境污染物的降解能力及 影响因素	182	因素	183
10.1.1 微生物对环境污染物的适应能力 及巨大的降解潜力	182	10.2 微生物对污染物的降解	185
10.1.2 微生物降解污染物的影响		10.2.1 无毒污染物的降解	185
		10.2.2 有毒有机污染物的降解	185
		思考题	199
第11章 环境微生物检测	200		
11.1 空气中微生物的检测与控制	200	11.5 生物传感器	208
11.1.1 空气中微生物的检测方法	200	11.5.1 生物传感器的定义与分类	208
11.1.2 空气微生物污染的控制	201	11.5.2 生物传感器基本结构和工作 原理	208
11.2 水的微生物检测及控制	202	11.5.3 生物传感器在环境检测中的 应用	209
11.2.1 水质的细菌学检测	202	11.6 PCR 技术在环境检测中的应用	211
11.2.2 水质指示微生物——大肠菌群 (coliform group, 简称 coliform)	202	11.6.1 PCR 反应原理	211
		11.6.2 PCR 反应条件	212
11.2.3 水微生物污染的控制	203	11.6.3 PCR 技术用于环境微生物检测的 方法	213
11.3 发光细菌的微毒检测	203	11.6.4 PCR 在环境微生物检测中的 应用	213
11.3.1 发光细菌检测的原理	204	11.6.5 小结与展望	214
11.3.2 发光细菌法检测的操作	204	11.7 用于环境保护的工程菌的安全性 问题	214
11.3.3 发光细菌法的应用	204	11.7.1 用于环境保护的基因工程菌的	
11.4 污染物致突变性检测 (Ames 试验)	205		
11.4.1 Ames 试验的原理和方法	205		
11.4.2 Ames 试验的应用	207		

构建	214	11.7.3 展望	215
11.7.2 基因工程菌存在的问题	215	思考题	215
第 12 章 微生物在水污染控制中的应用	216		
12.1 废水好氧生物处理中的微生物学		12.2.1 概述	229
原理	216	12.2.2 废水厌氧降解机理	229
12.1.1 概述	216	12.2.3 废水厌氧生物处理工艺	231
12.1.2 活性污泥法	216	12.3 水体的富营养化和氮磷的去除	232
12.1.3 生物膜法	222	12.3.1 水体的富营养化概述	232
12.1.4 其它生物处理法	227	12.3.2 生物脱氮	233
12.2 废水厌氧生物处理中的微生物学		12.3.3 生物除磷	236
原理	229	思考题	239
第 13 章 微生物在固体废物和大气污染治理中的应用	240		
13.1 固体废物的生物处理	240	13.2 废气的生物处理	245
13.1.1 堆肥法	241	13.2.1 废气生物处理微生物学	246
13.1.2 卫生填埋法	244	13.2.2 废气生物处理方法	246
13.1.3 厌氧发酵	245	思考题	249
第 14 章 生物修复技术	250		
14.1 概述	250	14.2.2 影响生物修复的环境因素	253
14.1.1 基本概念	250	14.3 污染土壤的生物修复	254
14.1.2 应用生物修复技术应具备的条件	250	14.3.1 原位生物处理	254
14.1.3 理论及技术来源	250	14.3.2 异位生物修复	256
14.1.4 生物修复技术的重点研究方向	251	14.4 地下水的生物修复	257
14.1.5 生物修复技术的特点	251	14.4.1 原位生物处理	258
14.2 生物修复技术的原理	251	14.4.2 异位修复技术	258
14.2.1 在生物修复技术中应用的微生物	251	14.4.3 物理拦阻	258
		14.5 海洋石油污染的生物修复	258
		思考题	259
第 15 章 微生物新技术在环境治理中的应用	260		
15.1 固定化技术(固定化酶和固定化细胞)	260	15.2.2 单细胞蛋白的生产	263
15.1.1 固定化细胞与酶的特点	260	15.3 污染预防微生物技术	264
15.1.2 固定化酶与固定化细胞在环境工程中的应用	261	15.3.1 燃煤脱硫	264
15.2 废物资源化技术	261	15.3.2 微生物湿法冶金技术	266
15.2.1 可生物降解塑料 PHAs	262	15.4 微生物絮凝剂	269
		15.5 微生物吸附剂	270
		思考题	271
第 16 章 微生物的分类命名与保藏	272		
16.1 微生物的分类与命名	272	16.2.2 真菌的分类系统——Ainsworth 等人的菌物分类系统	282
16.1.1 微生物的分类单位	272	16.3 菌种保藏	283
16.1.2 微生物的命名原则	273	16.3.1 菌种保藏的原理	283
16.1.3 微生物的分类鉴定依据	273	16.3.2 菌种保藏的常用方法	284
16.2 微生物分类检索系统	279	思考题	285
16.2.1 原核微生物的分类系统——Bergey 氏原核生物分类系统	281		
参考文献	286		

第 1 章 绪 论

内容提要：本章主要讨论微生物的概念，微生物学的研究内容，人类对微生物的认识与研究，环境工程微生物学的概念，研究内容和任务，环境工程微生物学的发展及研究现状等。

1.1 微生物的概念

微生物 (microbe, microorganism) 是指形体微小、结构简单、肉眼不可见的低等的生命体。主要包括无细胞结构且不能独立生活的病毒；属原核细胞的细菌（真细菌和古细菌）、放线菌、蓝细菌（蓝藻）、支原体、衣原体及立克次氏体；属真核细胞的真菌、单细胞藻类及原生动物等。

1.2 微生物学的研究内容

微生物学是研究微生物的形态特征、细胞的结构和组成、生理生化反应、代谢调控、生长繁殖、遗传变异、微生物的分类及微生物生态等生命活动规律及其应用的科学。

1.3 人类对微生物的认识及研究

在古代，人们就开始利用有益微生物为人类服务。比如，公元前 6 千年，古巴比伦人已掌握了酿酒技术；公元前 4 千年，古埃及人就能够利用微生物发酵面包；距今 4 千多年前的尧舜时代，勤劳的中国人民已学会了用谷物酿酒、制酱；到了商代，人们已知道了利用经过贮存一定时间后的粪便肥田，春秋战国时期，粪便肥田已极为普遍。大约在公元 6 世纪，在农业方面，人们就提出了种过谷物的土地十分肥沃，庄稼可以实行轮作，实际上他们已开始利用固氮菌的作用，但因技术落后，古代人还无法证实微生物的存在。直到 17 世纪末叶，荷兰人安东·列文虎克 (Antony van Leeuwenhoek) 研制成了能放大 200—300 倍的显微镜，并借助此显微镜检查了牙垢、污水、粪便等，观察到了形态呈球状、杆状、螺旋状等的许多微小生物。随着显微镜的发展，人们开始了微生物形态学方面的研究，对所观察到的许多细菌进行形态学描述。19 世纪中叶，法国学者巴斯德 (Pasteur, 1822—1895) 通过多年的研究证明酒、醋等的发酵过程是由微生物引起的，而且不同发酵微生物的种类不同。他认为酸败是由有害微生物所造成的，并提出了科学消毒法，后来被称为巴斯德消毒法，广泛应用于食品生产的消毒。他还通过对流行病的研究证明传染病是由病原体所引起，同时提出接种疫苗可预防传染病。

继巴斯德之后，德国科学家柯赫 (Hock, 1843—1910) 培养、分离出霍乱弧菌、结核杆菌、炭疽杆菌等病原菌，建立了一套研究微生物的技术方法，如接种、培养、分离和染色等，大大地推动了微生物学的发展。这两位科学家的工作使人们真正开始了对微生物的了解，并为进一步研究和利用微生物打下了良好的基础。

进入 20 世纪以来，微生物学由于应用了生物学、化学、生物化学、生物物理学等学科的最新理论与技术，特别是由于电子显微镜的发明，同位素示踪原子的运用，其理论和技术

方面都取得了巨大的成就。

近代微生物学的研究已深入到了分子水平,微生物已成为研究基因工程的重要对象和实验手段,微生物对整个生命科学由整体或细胞研究水平进入分子水平起到了关键性的作用,特别是对分子遗传学和分子生物学的影响最大,它大大地推动了其它生物工程的发展。综观微生物的发展史,可以毫不夸张地说,微生物学是一门对人类贡献最大的学科。

1.4 环境工程微生物学的概念

环境工程微生物学是一门在对微生物进行一般性研究的基础上,着重研究自然环境和污染环境中微生物的特点、作用规律及微生物在环境工程中应用的学科。

1.5 环境工程微生物学的研究内容和任务

环境工程微生物学研究自然环境中微生物对不同物质转化的作用与机理,进而考察微生物对环境质量的影响;研究微生物对污染物质的降解与转化,修复、改善环境的作用和规律。由于微生物代谢类型的多样性,对各种污染物能较快地适应,只要能找到合适的微生物,提供适宜的条件,几乎全部有机污染物均可被微生物降解成无机物。因此,环境工程微生物学是研究利用微生物开展废水及有机固体废物等的处理原理及现代生物工程技术在污染控制工程中的应用。

人类生活与生产过程中排出的大量废物中夹杂有大量的病原微生物,在一定条件下造成空气、水体、土壤等环境的严重污染,甚至引起疾病流行。另外,有些细菌,像铁细菌、硫细菌能引起混凝土管道和金属管道的腐蚀;有些藻类可引起湖泊“水华”现象等。因此,环境工程微生物学是研究由于微生物对于环境的污染与破坏,从而引起环境质量下降的作用和规律的科学。

利用微生物作为环境监测的指标和手段是环境工程微生物学的另一任务,如细菌总数的测定、大肠菌群的测定等。

环境工程微生物学是环境工程等相关专业非常重要的一门专业基础课。通过该课程的学习,可为环境工程及相关专业的学生打下牢固的微生物学理论基础。本课程既介绍各类主要微生物的形态、结构、种类、营养与生理、生长规律及代谢调控机理、微生物生态及遗传变异等,又在了解微生物学原理的基础上研究微生物在环境工程中的应用。

1.6 环境工程微生物学的发展及研究现状

微生物在整个生态系统中扮演着重要的角色,是物质的主要分解者,在自然界物质和能量转化中占有特殊的地位,发挥着不可替代的作用。污染控制工程中的生物处理法主要指的是利用微生物的作用,将污染物分解转化成无机物的手段和技术,这一降解过程主要是靠微生物细胞分泌的各种酶所催化的反应完成的。废水、废气与固体废物的生物处理是微生物在污染控制中重要的应用。环境工程微生物学伴随着这三方面的应用而产生并不断地发展和完善。

1.6.1 废水生物处理研究进展

早在18世纪,许多地方的人们通过沟渠将生活污水引入大田进行农田灌溉,这便是原

始的土地污水处理系统。从本质上讲,污水中的有机物在天然条件下被土中的微生物所分解,转化成 N、P 等无机物,被植物吸收利用。

19 世纪末,人们开始对污水进行专门的处理,将污水通过装有碎石等填料的柱子,经过一段时间后,污水变清,得到净化。通过观察发现,碎石上产生了一层膜状物,正是膜中的微生物将污水中的有机物加以分解,转化为二氧化碳、水和微生物细胞物质,这就是较早的生物膜法。生物膜法是使微生物依附在固体表面呈膜状生长,并与污水接触实现有机污染物的降解的方法。由于生物载体上可形成稳定的生态系统,微生物种类多且微生物浓度高,故具有较高的耐冲击负荷能力和很强的环境适应能力,容积负荷增高,处理能力增大。

20 世纪初,活性污泥法问世,1914 年英国建立了第一座活性污泥污水处理厂。自开始至今,活性污泥法的研究经过了近 100 年的发展历程,随着活性污泥法的广泛应用,对其污泥颗粒的形成、结构、性质,其生物类群、净化机理、污泥膨胀等进行了深入研究并促使其工艺不断改进与完善。

随着水体的日益恶化及废水处理标准的逐步提高,人们开发出了各种新型高效的废水生物处理技术,膜生物反应器就是其中的代表。膜生物反应器是一种将污水的生物处理和膜过滤技术相结合的高效废水生物处理技术。该技术是生物技术与膜分离技术相结合的产物。采用膜组件取代常规二级生化处理工艺中的二沉池、砂滤、消毒等单元,通过超滤膜将曝气池出水直接进行过滤,活性污泥混合液中的悬浮固体可以完全被截流并回流到反应器中。因此使污泥龄延长,并将微生物回流到反应器中,污泥负荷降低,污泥浓度得到提高,出水水质稳定、可靠,无需进行消毒处理。此工艺操作简单,管理方便,无污泥流失,不受污泥膨胀的影响,克服了普通工艺流程的缺陷,具有广阔的应用前景。

1.6.2 废气的生物治理研究进展

随着人们生活水平的提高,现代工业和农业的迅速发展,进入大气的有毒有害气体日益增多,严重地破坏环境,并对人类健康造成很大危害。废气的生物处理是利用微生物新陈代谢过程中需要营养物质这一特点,把废气中的有害物质转化成少害甚至无害的物质。微生物对各类污染物均有较强、较快的适应性,并可将其作为代谢底物降解、转化。同常规的空气污染控制技术相比,微生物方法具有效果好、无二次污染、投资及运行费用低、安全性好、易于管理等多种优点而广泛应用于大气污染治理中。

采用生物方法解决空气污染问题还要追溯到 20 世纪 50 年代中期,最初主要用来消除空气的臭味。美国于 1957 年获得了利用微生物技术成功治理空气污染的专利。直到 20 世纪 80 年代,日本、德国及荷兰等国家才正式开始废气的生物处理。20 世纪 90 年代,欧洲 500 多座生物滤池投入运行。目前,在美国的芝加哥和纽约都分别建造了生物废气处理厂,而荷兰、德国、日本等国家利用生物方法已成功地处理了化学工业、轻工业所造成的大气污染。

废气生物净化技术的主要处理工艺有生物过滤法、生物吸收法、生物滴滤法。目前废气处理的微生物学研究工作主要有以下几个方面:高效降解菌的驯化、分离筛选,通过投菌法以加速废气污染物的降解,提高降解效果;生物挂膜填料的选择,选择微生物易于挂膜的填料,使挂膜速度快,驯化时间短,抗冲击负荷能力强,挂膜量大,降解效果好;微生物的固定化。

1.6.3 固体废物的生物治理研究进展

随着城市人口的急剧增加及人们物质生活水平的提高,垃圾产生量与日俱增,种类纷乱

复杂,危害日趋严重,已成为当今城市的一大公害。

自 20 世纪 60 年代以来,国内外就城市生活垃圾的处理进行了大量深入的研究。世界各国普遍采用的方法主要包括堆肥法、填埋法、焚烧法。堆肥法占地面积大,投资大,且易对周围环境造成二次污染;填埋法虽投资和运行成本较低,但常常因管理不善,污水横流,臭气冲天,蚊蝇孳生,繁殖成群,使填埋场周围环境恶劣,甚而对土壤、地表水、大气造成极为严重的二次污染,直接影响人们的生活质量;焚烧法一次性投资大,需喷油助燃,运行成本高。近年来,日本、美国等在利用微生物学原理进行有机垃圾的生化处理方面已取得突破性进展,应用微生物技术处理以有机垃圾为主的生活垃圾,其工艺技术先进、可靠、简便,使垃圾处理达到资源化、减量化、无害化的要求。通过对垃圾资源化的回收利用,可以取得较好的经济效益和投资回报,真正做到经济效益、环境效益、社会效益的统一,对推动社会的可持续发展具有重大意义。

近年来,随着中国畜禽养殖业的迅猛发展,大量畜禽粪便的产生可对环境造成严重污染。家畜禽粪便是一种含不同有机物的复杂体系,主要成分为可溶性有机物、蛋白质、脂肪、纤维素、半纤维素和木质素等。20 世纪 80 年代初期,日本等发达国家利用生物技术,以家畜禽粪便为原料加入矿质肥和多种“酶”后制成了多种优质有机肥。随着生物技术的不断发展,特别是微生物接种剂技术的发展,促进了传统有机肥制备技术与生物技术的有机结合。目前,已形成了功能强大的发酵菌群,大大缩短了发酵周期,同时再向发酵好的物料中加入固氮、解磷、解钾功能的复合微生物菌剂,制成生物有机固体颗粒肥料,这种肥料可广泛应用于蔬菜、果树和花卉等高附加值作物,并可提高作物的产量和品质。

剩余污泥的堆肥化处理已成为目前研究的热点。缩短发酵时间、快速腐熟、提高肥效等都与微生物行为有关。有人研究了堆肥制作中的生物变化特征、堆肥化处理的微生物学机理、堆肥条件、堆肥产品的农田试验等。

微生物学的研究大大地推动了污染控制工程的发展,特别是当代生物技术的快速发展对解决日趋严重的环境问题提供了技术保障,且已取得显著成效。概括起来有以下几个方面。

(1) 高效降解菌的筛选 由于大量人工合成的化合物排入环境,对生态系统造成了严重的破坏。因这类物质有毒,且难降解,因此,人们从自然环境中,特别是从污染环境中筛选并驯化出高效降解菌,以加速其分解,在这方面已做了大量的工作,涉及范围极广,如表面活性剂、染料、酚类化合物、纤维素、木素、农药、除草剂、石油烃等。

(2) 降解酶的研究 从 20 世纪 70 年代开始,人们不仅进行一般的筛选工作,而且也开展了降解代谢途径及降解酶系的研究。研究者将降解酶进行分离与纯化,并进一步了解其降解特性。随着分子生物学的发展,对降解酶的研究已进入到了分子水平,不仅对很多降解酶的蛋白质组成、分子量的大小及影响酶活性的因子等都有了清楚的了解,同时对其基因的大小、碱基的组成也进行了透彻的研究。

(3) 微生物育种 微生物育种手段包括诱变育种、基因工程和原生质体融合等。其中诱变育种带有很大的随机性,并且筛选工作量大,其成功率较低,所以在污染物高效降解工程菌的选育中应用很少。目前的育种方法以基因工程技术和原生质体融合技术为主,它们定向较为准确,效率高。

所谓基因工程菌就是采用基因工程技术手段,将多种微生物的降解基因组装到一个细胞中,使该菌株集多种微生物的降解性能于一身。因此,基因工程菌既具有混合菌的功能,又拥有纯培养菌株的特点。适应性强、生长繁殖迅速、生理代谢稳定、易于调控、降解效率高,底物范围广、絮凝性好,比自然环境中的降解性微生物更具竞争力。美国通过天然质粒的转移构建了第一个基因工程菌,在一株降解脂肪烃的假单胞菌中,构建了一株可以同时降解四种烃类的新菌株。瑞士的 Kulla 分离到两株细菌,将它们具降解偶氮染料的两种质粒,

应用质粒转移技术获得了具两种质粒可同时降解两种染料的脱色工程菌。目前,国内外科研人员把 PCR 技术用于基因工程菌的构建,并已取得显著成绩。

原生质体融合技术即利用微生物细胞共生或互生作用的机理,将多个细胞的优点集中到同一个细胞中。由于原生质体融合技术具有致育性限制小,遗传物质能完整,传递、育种效率高,定向性好等优点,从 20 世纪 80 年代起,这一技术被广泛用于污染控制工程,并取得了十分喜人的研究成果。

(4) 固定化技术的应用 固定化技术是生物工程领域中的一项新技术。近 20 多年来,许多国家将固定化技术用于废水处理研究,并已投入实际应用。如将筛选到的高效降解菌、高效降解酶及工程降解菌加以固定,即可组成一个快速高效的连续处理系统,以处理其它方法难以处理的废水,这一新技术在处理工业废水及各种难降解污染物方面已取得重大成就。固定化细胞技术与传统处理方法相比,具有稳定、高效、泥量小及固液分离效果好等优势,此项技术在污染控制中具有广阔的前景。由于废水组分复杂且经常变化,利用单一的固定化酶,很难收到好的处理效果。因此,要用多种单一的固定化酶组合处理,才能使有机物完全无机化和稳定化,如德国将九种降解对硫磷农药的酶共价组合固定在多孔玻璃珠、硅胶珠上,制成酶柱处理硫磷废水获得 95% 以上的处理效果,连续工作 70d 酶的活性没有变化,说明多种酶的作用大于单一酶的作用。日本用固定化 α -淀粉酶处理淀粉废水和造纸废水。美国用固定化酚氧化酶处理含酚废水,固定化酶活性达到游离细胞的 90%。由于一个微生物本身就是多酶体系的载体,因此如果把对多种污染物降解能力强的微生物固定在一个载体上,那么这一固定化微生物对提高废水的处理效果无疑也是有益的。

中国从 20 世纪 80 年代起,在废水生物处理方面进行了固定化酶及固定化微生物处理废水的研究,如含氰废水、印染废水的脱色及含酚废水、洗涤废水的固定化微生物处理。

(5) 生物修复技术 生物修复是近年来发展起来的一项生物治理技术,特别是 20 世纪 90 年代以来,这项技术越来越受到人们的关注,一些发达国家利用该技术已成功地消除了土壤、地下水、地表水、污泥、工业废水及大气中污染物的毒性,或降低了污染物对人类健康和生态系统的风险。中国也正在加紧开发运用这项技术。

此外,利用生理生化和分子遗传学指标反映环境污染状况,已成为污染生物监测的重要手段。

1.7 环境工程微生物学所涉及的学科

污染控制微生物工程将涉及环境科学、微生物学、环境工程学等诸多学科,在有关基础理论的阐述及工程实施中还会涉及生物化学、遗传学、环境地学、环境毒理学、环境监测与评价、生态学、水力学、气象学、土壤学等众多领域。

思 考 题

- 1-1 什么叫微生物?微生物分属于哪些生物?
- 1-2 环境工程微生物学的研究内容和任务是什么?
- 1-3 废水、废气、固体垃圾生物处理研究进展如何?

第 2 章 非细胞微生物——病毒

内容提要：本章介绍了病毒的主要特点；病毒的大小、形态和组成；病毒在细胞内的一般增殖过程；噬菌体的种类及检测方法；影响病毒在环境中存活的因素，污水中病毒去除方法等。

2.1 （真）病毒

2.1.1 病毒的概念

病毒是一类超显微的非细胞生物，结构简单，只含有一种类型的核酸，是只能在活的、敏感细胞内以复制方式增殖的非细胞型微生物，在离体条件下，它们以无生命的化学大分子状态存在。

2.1.2 病毒的特点

病毒的种类繁多，但作为一类独特生物，有其共同特点。

(1) **体积微小** 病毒比细菌还小，其直径为 $10\sim 300\text{nm}$ ，通常用光学显微镜无法看到病毒，需要用电子显微镜观察。病毒一般能通过细菌滤器。

(2) **非细胞结构** 病毒没有细胞结构。其基本结构为一个由蛋白质将核酸包裹起来的粒子，故单个病毒又被称为病毒粒子。

(3) **病毒的化学组成比较简单** 其基本成分为核酸和蛋白质。一个病毒粒子只含一种核酸，即仅含 DNA 或 RNA 中的一种，至今从未在一个病毒粒子中发现两种核酸。

(4) **严格活细胞内寄生** 病毒缺乏独立的代谢能力。所有的细胞都有完整的酶系，如果提供充分的养分就能独立生存，而病毒粒子中只含有必需的极少的酶，没有酶系。病毒在宿主细胞内自我复制所需要的原料、大多数酶、核糖体以及细胞器等均由宿主细胞提供。

病毒有细胞内和细胞外两种存在方式。在活的宿主细胞内，病毒为专性寄生，能自我复制；但在细胞外，病毒却呈现出无代谢的颗粒状态，没有丝毫生命特征。

(5) **以复制方式繁殖** 病毒的繁殖方式独特，只能在活细胞内利用宿主细胞的代谢系统通过自身核酸的复制而繁殖。

(6) **特殊的抵抗力** 与其它微生物相比，病毒表现出特殊的抵抗力。病毒对绝大多数抗生素不敏感，这是人类病毒病比细菌病更难治疗的主要原因。病毒对物理化学因素敏感，热、射线、化学消毒剂等都易使病毒失活，这与病毒体积极小、其化学成分特别是核酸易受外界影响而变性有关。

2.1.3 病毒的大小与形态

2.1.3.1 病毒的大小

病毒的测量单位是 nm（纳米）。多数单个病毒粒子的直径在 100 nm 左右，即把 10 万个左右的病毒粒子排列起来才可能用眼睛勉强看到，绝大多数病毒必须用电子显微镜才能见到。病毒的大小相差很大，最大的病毒是痘病毒，其体积为 $(300\sim 450)\text{nm}\times(170\sim 260)\text{nm}$ ；最小的病毒为菜豆畸矮病毒，其直径只有 $9\sim 11\text{nm}$ 。大多数杆状植物病毒长 $110\sim$

900nm, 宽 10~25nm; 球状动物病毒的直径多数在 40~150nm 之间, 不少球状植物病毒的直径约 30nm。在细菌病毒中, 蝌蚪状噬菌体的头部 47~110nm, 尾部 (15~170)nm×(10~25)nm, 球状噬菌体的直径为 24~30nm; 丝(杆)状噬菌体约为 6nm×800nm。一些典型病毒的大小见表 2-1。

表 2-1 病毒的大小

类 型	病 毒 名 称	大小或直径/nm
最细的病毒	大肠杆菌的 ϕ 1 噬菌体	5×800
最小的病毒	口蹄疫病毒	21
	乙型肝炎病毒	18
	苜蓿花叶病毒	16.5
	玉米条纹病毒	8~12
	烟草坏死病毒	16
	菜豆矮缩病毒	9~
最长的病毒	柑橘衰退病毒	2000
	甜菜黄花病毒	1250×10
	铜绿假单胞菌噬菌体	1300×10
最大的病毒	虫痘病毒	450
	牛痘苗病毒	300×250×100

2.1.3.2 病毒的形状

单个成熟有感染性的病毒颗粒称为病毒粒子 (virion) 或称病毒体。病毒粒子的形态多样, 有砖状、子弹状、球状、蝌蚪状、杆状、卵圆状和丝状等 (图 2-1)。病毒主要形态为杆状、球状 (或近似球状) 和蝌蚪状。很多植物病毒为杆状, 其中不少呈直杆状, 如苜蓿花叶病毒、烟草花叶病毒等; 有的呈稍弯曲的杆状, 如马铃薯 X 病毒等; 而甜菜黄化病毒则呈很长很长的弯曲丝状; 有的植物病毒呈球状, 如豇豆花叶病毒、花椰菜花叶病毒及黄瓜花叶病毒等。有的昆虫病毒, 如家蚕核型多角体病毒也呈杆状。动物病毒大多为球状, 如口蹄疫病毒、脊髓灰质炎病毒和腺病毒等; 有的动物病毒如痘病毒呈砖形或卵圆形; 有少数动植物病毒, 如狂犬病毒、水泡性口膜炎病毒及植物弹状病毒则呈子弹状。细菌病毒有的呈蝌蚪状, 如 λ 噬菌体和 T 偶数噬菌体等; 有的呈球状, 如 ϕ X174、 ϕ 2、Q β 、MS2 等; 有的呈丝状, 如 fd、f1 和 M13 等。

病毒的大小与形状见图 2-1。

2.1.4 病毒的结构

2.1.4.1 病毒的基本结构

病毒核酸位于病毒粒子中心 (core), 构成病毒的核心或基因组, 核酸的外面包裹的蛋白质部分称为衣壳 (capsid) 或壳体。衣壳由很多被称为衣壳粒的蛋白质亚单位以高度重复的方式排列而成。核心和衣壳组成了病毒的基本结构——核衣壳。只有核衣壳这一基本结构的病毒称裸露病毒, 如烟草花叶病毒。很多动物病毒 (如流感病毒和疱疹病毒等) 和少数细菌病毒 (如 ϕ 6 噬菌体) 的核衣壳外包着一层由脂质或脂蛋白组成的包膜, 包膜上还可有刺突, 这些具有较复杂结构的病毒称为包膜病毒。病毒的结构见图 2-2。

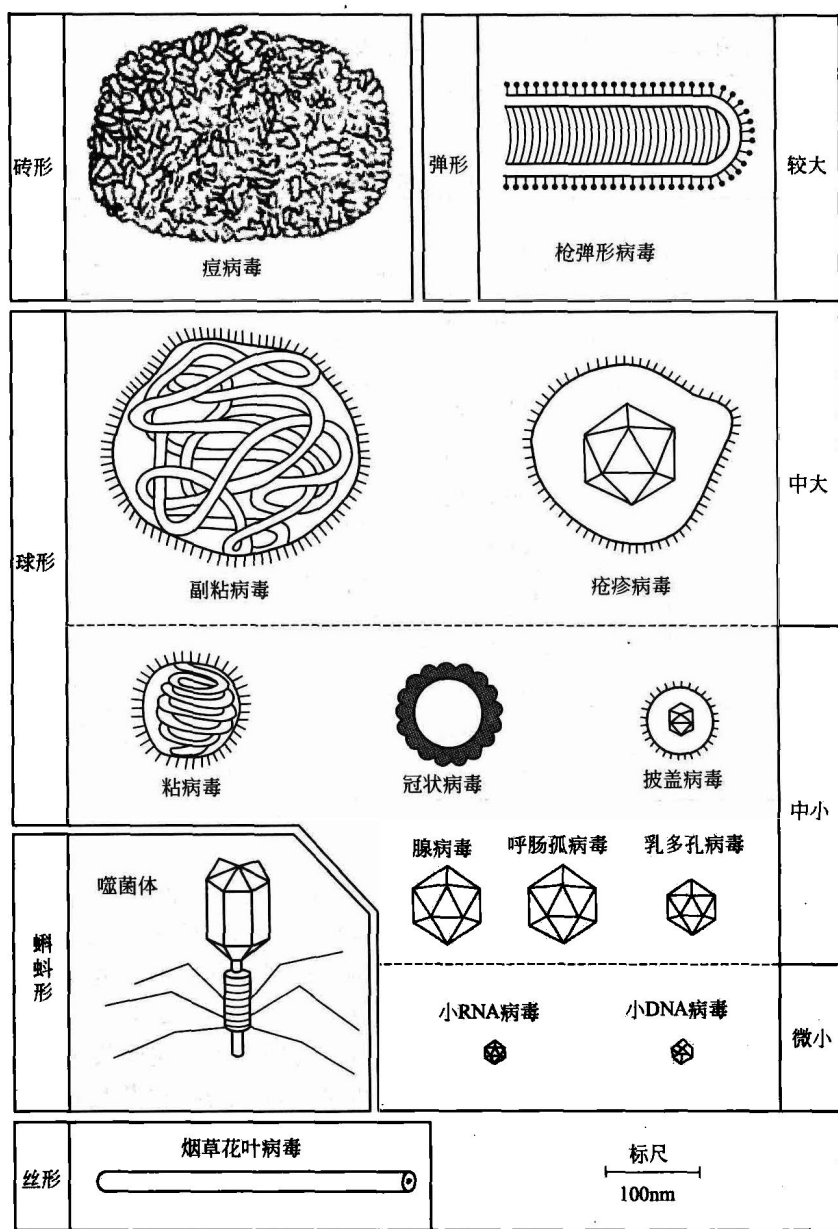


图 2-1 病毒的大小与形状

2.1.4.2 病毒壳体的对称性

病毒衣壳的衣壳粒排列具有高度对称性，病毒粒形状可分为三种：二十面体对称（球状病毒）、螺旋对称（杆状病毒）及复合结构（蝌蚪状病毒）。二十面体对称与螺旋对称是病毒两种基本的对称类型。由二十面体对称与螺旋对称共同组合而成的结构称为复合对称结构。二十面体对称、螺旋对称与复合对称结构分别相当于杆状、球状和蝌蚪状。

(1) 二十面体对称型病毒 二十面体对称病毒的典型代表是腺病毒（图 2-3 与图 2-4）。腺病毒没有包膜，核酸为线状双链 DNA。

腺病毒看似“球状”，直径 70~80nm，但实际上它是由 20 个等边三角形组成的二十面体（图 2-3）。腺病毒有 12 个角、20 个面和 30 条棱。腺病毒由 252 个球状衣壳粒沿着 3 根