



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

环境工程微生物学

(第2版)

主编 林海



冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press

普通高等教育“十一五”国家级规划教材
北京高等教育精品教材

环境工程微生物学

(第2版)

主 编 林 海
副主编 李天昕 周北海 邢 奕 董颖博

北 京
冶金工业出版社
2014

内 容 简 介

本书重点介绍了与环境保护特别是与环境污染治理工程密切相关的微生物知识。内容包括环境工程微生物学的发展历史和趋势,微生物微观结构和形态的观察手段、方法以及在环境污染治理工程中常见微生物的形态、结构和特征,微生物培养、驯化、诱变、分离的原理和研究方法以及其生长繁殖规律,微生物对有机污染物及难降解物质的降解原理。同时介绍了微生物的遗传和变异,微生物在给水和排水工程、大气污染治理、固体废物处理的应用原理和工程实例,以及最新的微生物脱硝、餐厨垃圾处理、生物修复以及矿业环境微生物的相关知识。

本书可作为高等学校环境工程、环境科学、生物技术、生态学、土木资源、给水排水、生物冶金等专业的教学用书,同时也可供相关专业企业工程技术人员阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

环境工程微生物学/林海主编. —2版. —北京:冶金工业出版社, 2014. 5

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

ISBN 978-7-5024-6484-4

I. ①环… II. ①林… III. ①环境生物学—微生物学—实验—高等学校—教材 IV. ①X172-33

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第074436号

出 版 人 谭学余

地 址 北京北河沿大街嵩祝院北巷39号, 邮编100009

电 话 (010)64027926 电子信箱 yjcbcs@cnmip.com.cn

责任编辑 于昕蕾 美术编辑 吕欣童 版式设计 孙跃红

责任校对 王永欣 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-6484-4

冶金工业出版社出版发行; 各地新华书店经销; 三河市双峰印刷装订有限公司印刷
2008年10月第1版, 2014年5月第2版, 2014年5月第1次印刷

787mm×1092mm 1/16; 25印张; 671千字; 387页

49.00元

冶金工业出版社投稿电话:(010)64027932 投稿邮箱:tougao@cnmip.com.cn

冶金工业出版社发行部 电话:(010)64044283 传真:(010)64027893

冶金书店 地址:北京东四西大街46号(100010) 电话:(010)65289081(兼传真)

(本书如有印装质量问题, 本社发行部负责退换)

第2版前言

本教材第1版于2011年获得了“北京高等教育精品教材”称号。第2版中删除了微生物的营养类型，同时对每章的要点、小结、思考题和名词术语进行了梳理。主要新增了如下内容：（1）强化了微生物的培养、分离和高效污染物降解菌种的开发知识；（2）重点突出了微生物在环境污染治理工程领域应用的研究和实际工程案例；（3）环境微生物菌种开发方面引入了最新的分子生物学研究方法和手段；（4）新增了餐厨垃圾的微生物处理原理和方法；微生物在矿业环境领域应用的方法和理论，如微生物增产煤层气、微生物处理含重金属矿业污水等。

本书在编写过程中得到了教育部本科教学工程、“环境工程”国家级特色专业建设（TS 12553）、北京市校外人才培养基地建设和北京科技大学教材建设项目经费的支持，在此表示感谢，同时感谢本书引用的参考文献的作者。

由于水平所限，书中不妥之处，恳请同行和读者批评指正。

作 者

2014年2月于北京

第1版前言

随着经济的发展和人们物质文化生活水平的提高,环境问题已越来越受到世人的关注,其中环境污染治理成为人们研究的重点。在目前的治理方法中,生物方法由于具有降解速度快、效率高、成本低等特点而被广泛采用,微生物在生物处理中担当着重要的角色。

本书在查阅国内外大量科技文献资料的基础上,立足于环保,重点介绍了与环境保护特别是污染治理密切相关的微生物知识,总结了作者多年教学和科研工作的实践经验,归纳了国内外近年来环境工程微生物学的研究成果。本书按照教学大纲要求,同时按照“步进式”思维模式编写,从微生物的基础理论知识逐渐过渡到微生物的实际应用,充分体现理论与实际相结合的特点。全书共分9章,第1章主要介绍了环境工程微生物学的发展历史和发展趋势;第2章主要介绍了微生物的微观结构、形态的观察方法和环境污染治理工程中常见微生物的形态、结构与特征;第3章主要论述了培养和分离微生物的原理、方法以及微生物的生长繁殖规律;第4章主要介绍了微生物如何代谢常见的有机污染物质;第5章主要介绍了微生物的遗传和变异,重点阐述了如何开发高效污染物降解菌种;第6章主要介绍了微生物在给水和排水工程中的应用原理和实例;第7章主要介绍了微生物在大气污染治理中的应用原理和实例,介绍了最新的微生物脱硝技术;第8章主要介绍了微生物在固体废物处理中的应用原理和实例;第9章介绍了生物修复的相关知识。

参加本书编写的人员有:林海(第1章、第3.1节~3.3节)、李天昕(第4.3节~4.5节、第6.1节~6.2节、第9章)、周北海(第2章、第6.3节、第8章)、邢奕(第4.1节~4.2节、第5.5节~5.7节、第7章)、吕绿洲(第3.4节~3.5节、第5.1节~5.4节)、陈月芳(编写各章要点及小结)。

全书由林海教授统稿。本书在编写过程中得到了研究生郭丽丽、杨柳、卢晓君、程琳、万静生、于昕蕾、贾小宇、刘璐、赵慧的大力帮助,在此表示感谢。同时感谢教育部高等教育司和北京科技大学为本书编写提供的经费支持。

由于水平所限,书中有不妥之处,恳请同行和读者批评指正。

编 者

2008年5月于北京

冶金工业出版社部分图书推荐

书 名	定价(元)
微生物应用技术	39.00
汞污染防治技术与对策	48.00
环境补偿制度	29.00
生物化学	36.00
有机化学(第2版)	36.00
环境工程微生物学实验指导	20.00
水污染控制工程(第3版)	49.00
沼气发酵检测技术	18.00
生物柴油检测技术	22.00
生物柴油科学与技术	38.00
走进工程环境监理——天蓝水清之路	36.00
可持续发展——低碳之路	39.00
温室效应——沮丧? 彷徨? 希望?	32.00
日常生活中的环境保护——我们的防护小策略	28.00
认识环境影响评价——起跑线上的保障	39.00
环境污染物毒害及防护——保护自己、优待环境	36.00
能源利用与环境保护——能源结构的思考	33.00
饮用水安全与人们的生活——保护生命之源	32.00
噪声与电磁辐射——隐形的危害	29.00
冶金企业安全生产与环境保护	29.00
现代采矿环境保护	32.00
金属矿山环境保护与安全	35.00
建筑环境工程设备基础	27.00

目 录

1 绪论	1
1.1 微生物的发现	1
1.2 微生物的定义、化学组成、分类及其特点	1
1.2.1 微生物的定义	1
1.2.2 微生物的化学组成	2
1.2.3 微生物的分类	3
1.2.4 微生物的特点	3
1.3 微生物在自然界物质循环中的作用与环保	4
1.3.1 碳素循环	4
1.3.2 氮素循环	5
1.3.3 硫素循环	5
1.3.4 磷素循环	6
1.4 环境工程微生物学的研究对象和任务	7
1.5 环境工程微生物学的发展历程和前沿热点	7
1.5.1 发展历程	7
1.5.2 前沿热点	9
小结	11
思考题	11
名词术语	11
2 微生物的形态结构及其与环境的关系	12
2.1 微生物形态结构的观察	13
2.1.1 显微镜	13
2.1.2 显微镜观察样品的制备	15
2.2 原核微生物	15
2.2.1 细菌	15
2.2.2 古细菌	23
2.2.3 放线菌	25
2.2.4 蓝细菌	26
2.2.5 其他原核微生物	27
2.3 真核微生物	28
2.3.1 原生动物	28
2.3.2 微型后生动物	32

2.3.3 真菌	34
2.3.4 藻类	37
2.4 病毒	40
2.4.1 病毒的特点和分类	41
2.4.2 病毒的大小、形态与结构	41
2.4.3 病毒的培养与增殖	42
小结	44
思考题	45
名词术语	45
3 微生物的培养和分离	46
3.1 营养物质的类型和水平	46
3.1.1 碳源质	46
3.1.2 氮源质	47
3.1.3 能源	48
3.1.4 无机盐	49
3.1.5 生长因子	50
3.1.6 水	51
3.2 微生物的培养基	52
3.2.1 培养基的定义和种类	52
3.2.2 培养基的配制原则和方法	56
3.2.3 微生物培养基的选择与优化	61
3.3 微生物培养方法	63
3.3.1 实验室液体培养基培养	63
3.3.2 实验室固体培养基培养	64
3.3.3 工程实际中微生物的培养方法	66
3.4 微生物的分离方法	67
3.4.1 固体培养基上的分离	68
3.4.2 液体培养基中的分离	71
3.5 微生物的生长	71
3.5.1 微生物生长的测试和表征	72
3.5.2 微生物的生长规律	74
小结	79
思考题	80
名词术语	80
4 微生物的遗传变异和菌种选育	81
4.1 基因对遗传性状的控制	81
4.1.1 遗传和变异的物质基础 DNA	81

4.1.2 DNA 的结构与复制	82
4.1.3 DNA 在微生物中的存在形态	85
4.2 基因突变	85
4.2.1 基因突变的类型及突变型的筛选	86
4.2.2 基因突变的分子基础	88
4.2.3 基因突变的特点	89
4.2.4 基因突变的机制	90
4.2.5 DNA 损伤和修复	94
4.3 菌种的选育	95
4.3.1 从自然界中获得新菌种	96
4.3.2 自发突变与定向培育	97
4.3.3 诱变育种	98
4.3.4 基因重组	104
4.4 基因工程	110
4.4.1 基因工程的发展历史及发展前沿	111
4.4.2 基因工程的主要过程	114
4.4.3 基因的提取及微生物群落结构	115
4.4.4 目的基因的制备与菌种鉴定	119
4.4.5 基因工程的应用	123
4.5 菌种保藏与灭菌	128
4.5.1 菌种保藏的原因	128
4.5.2 菌种保藏的原理	128
4.5.3 菌种保藏的常用方法	128
4.5.4 国内外菌种保藏机构	133
小结	136
思考题	137
名词术语	138
5 微生物的酶与新陈代谢	139
5.1 酶的分类和催化特点	139
5.1.1 酶的分类和命名	139
5.1.2 酶的催化特点	143
5.2 酶的组成和结构	144
5.2.1 酶的组成	144
5.2.2 酶的结构	145
5.3 酶活力及其影响因素	147
5.3.1 酶的活性	147
5.3.2 影响因素	149
5.4 酶的提取与固定化	150

5.4.1 酶的提取	150
5.4.2 酶的固定化	151
5.5 营养物质进入微生物细胞的过程	152
5.5.1 简单扩散	152
5.5.2 促进扩散	153
5.5.3 主动运输	154
5.5.4 基团移位	156
5.6 微生物的新陈代谢	159
5.6.1 微生物的能量代谢	159
5.6.2 微生物的合成代谢	164
5.6.3 微生物的分解代谢	172
5.7 微生物对污染物的降解转化	173
5.7.1 含碳化合物的降解转化	174
5.7.2 含氮化合物的降解转化	177
5.7.3 含硫化合物的降解转化	180
5.7.4 含磷化合物的降解转化	182
5.7.5 难降解物质的降解转化	184
5.7.6 微生物降解动力学	192
5.7.7 微生物降解转化的影响因素	195
小结	203
思考题	204
名词术语	204
6 微生物在水处理中的应用	205
6.1 基本处理方法	207
6.1.1 好氧处理	207
6.1.2 厌氧处理	211
6.1.3 兼氧处理	215
6.2 微生物在污水处理中的应用	215
6.2.1 活性污泥法	215
6.2.2 生物膜法	223
6.2.3 厌氧处理法	228
6.2.4 脱氮除磷	238
6.2.5 实际工程中微生物的培养与控制	248
6.2.6 微生物在重点污染行业废水处理中的工程应用	255
6.3 微生物在给水处理中的应用	267
6.3.1 给水工艺概况及特点	267
6.3.2 微污染水源水的生物处理	268
6.3.3 给水生物处理中的生物相	271

6.3.4 给水生物处理工程实例	277
小结	279
思考题	280
名词术语	280
7 微生物在大气污染治理中的应用	281
7.1 有机废气的微生物处理技术	281
7.1.1 有机废气的微生物处理原理	281
7.1.2 有机废气的微生物处理工艺	282
7.1.3 微生物在有机废气处理中的应用	287
7.2 硫氧化物微生物净化技术	288
7.2.1 煤炭微生物脱硫	288
7.2.2 微生物烟气脱硫技术	289
7.3 微生物烟气脱硝技术	290
7.3.1 微生物净化 NO_x 废气的原理	290
7.3.2 微生物净化 NO_x 废气工艺流程	291
7.3.3 微生物脱除 NO_x 技术的研究进展	291
小结	291
思考题	292
名词术语	292
8 微生物技术在固体废物处理中的应用	293
8.1 生活垃圾处理	293
8.1.1 生活垃圾堆肥	293
8.1.2 生活垃圾卫生填埋	296
8.2 餐厨垃圾处理	298
8.2.1 餐厨垃圾堆肥	298
8.2.2 餐厨垃圾饲料化	299
8.2.3 餐厨垃圾发酵产甲烷	300
8.2.4 餐厨垃圾厌氧产氢	301
8.2.5 餐厨垃圾产乳酸	301
8.2.6 餐厨垃圾产乙醇	302
8.2.7 餐厨垃圾制酶	303
8.3 剩余污泥处理	303
8.3.1 污泥发酵	304
8.3.2 污泥脱水	307
8.3.3 污泥生物制能	309
8.4 其他固体废物处理	309
8.4.1 工业固体废物	309

8.4.2 农业固体废物	311
8.5 实际工程案例模拟习题	314
小结	314
思考题	315
名词术语	316
9 微生物生态修复	317
9.1 概述	317
9.1.1 微生物修复的主要方法	318
9.1.2 微生物修复可利用的微生物种类	320
9.1.3 影响微生物修复的因素	321
9.2 原位微生物修复	324
9.2.1 原位修复概念	324
9.2.2 原位修复原理	324
9.2.3 影响原位修复的因素	326
9.2.4 原位修复的工程技术方法	330
9.3 异位微生物修复	332
9.3.1 异位微生物修复机理	332
9.3.2 影响异位微生物修复的环境条件	334
9.3.3 异位修复技术方法	338
9.4 微生物修复工程实例	343
9.4.1 原位微生物修复的应用实例	343
9.4.2 异位微生物修复的应用实例	346
9.5 微生物修复的应用前景	348
小结	350
思考题	351
名词术语	351
10 微生物在矿业环境领域中的应用	352
10.1 矿山固体废物资源化的微生物处理	352
10.1.1 金属矿的微生物浸出	353
10.1.2 非金属矿的微生物浸出	357
10.1.3 微生物浮选	360
10.2 微生物在煤矿脱硫和产能中的应用	366
10.2.1 煤矿微生物脱硫	366
10.2.2 微生物增产煤层气	369
10.3 有色矿山重金属离子废水的微生物处理	374
10.3.1 菌种的选育	375
10.3.2 微生物处理工艺	376

10.4 工程应用实例	376
10.4.1 微生物浸出技术处理矿山废石	376
10.4.2 微生物处理含重金属矿山废水	378
小结	379
思考题	380
名词术语	380
参考文献	381

1 绪 论

本章要点:

- (1) 微生物的发现历程;
 - (2) 微生物的定义、化学组成、分类及其特点;
 - (3) 在自然界碳、氮、磷、硫的循环中微生物所起的作用;
 - (4) 环境工程微生物学研究的内容、任务、发展历史和前沿热点。
-

1.1 微生物的发现

在人们真正看到微生物之前,实际上已经猜想或感觉到它们的存在,甚至人们已经在不知不觉中应用有益微生物为人类服务。公元前 6000 年,古巴比伦人就已掌握了酿酒技术;公元前 4000 年,古埃及人就能够利用微生物发酵面包;距今 4000 多年前的大禹时代,勤劳的中国人民已学会了用谷物酿酒、制酱;到了商代,人们已知道了利用贮存一定时间后的粪便肥田;2500 年前我国已经发明用鼻苗法种痘,用细菌浸出法开采铜。

真正看见并描述微生物的第一人是荷兰商人安东尼·列文虎克 (Antony van Leeuwenhoek, 1632~1723 年),他用自己制作的显微镜(放大倍数 50~300 倍)发现了微生物,并将这些微生物称为“wee animalcules”(微小动物)。列文虎克在当时观察的河水、雨水、牙垢中,观察到了形态呈球状、杆状、螺旋状等的许多微小生物,首次揭示了一个崭新的生物世界——微生物界。

1.2 微生物的定义、化学组成、分类及其特点

1.2.1 微生物的定义

微生物 (microorganism, microbe) 并不是一个分类学上的术语,它们主要是根据生物体的大小而被人为地划归到一起,传统定义为肉眼看不见的或看不清的、必须在电子显微镜或光学显微镜下才能看见的微小生物。它们是一些个体微小(直径小于约 0.1mm)、构造简单的低等生物,包括属于原核类的细菌、放线菌、支原体、衣原体、立克次氏体和蓝细菌(过去称蓝藻或蓝绿藻),属于真核类的真菌(酵母菌和霉菌)、原生动物和显微藻类,以及属于非细胞类的病毒、类病毒和朊病毒等。然而在微小世界里也不乏“形体高大”者。1997 年德国科学家 H. N. Schulz 等人在纳米比亚海岸海底沉积物中发现了一种大小一般为 100~300 μm ,最大可达 750 μm 的硫磺细菌,其以从外界吸收到体内的硝酸盐和硫化物进行能量代谢,菌体呈白色,像珍珠一样,科学家将其命名为纳米比亚硫磺珍珠菌 (Thiomargarita namibiensis),这是目前发现

的最大微生物，肉眼可见。目前世界上已知最小的微生物是支原体，过去也译成“霉形体”，它是一类介于细菌和病毒之间的单细胞微生物。它是地球上已知的能独立生活的最小微生物，大小约为 100nm。支原体一般都是寄生生物，其中最有名的当属肺炎支原体（*M. Pneumonia*），它能使哺乳动物特别是牛的呼吸器官发生严重病变。

1.2.2 微生物的化学组成

生态系统中的各种生物细胞都是由各种不同化学元素所组成的，微生物也不例外。根据微生物中各类化学元素量的不同，可将它们大体分为主要元素（macroelement）和微量元素（trace element）。主要元素包括碳、氢、氧、氮、磷、硫、钾、镁、钙、铁等，而前 6 种则约占菌细胞干重的 97%，如表 1-1 所示；微量元素则包括锌、锰、钠、氯、钼、硒、钴、铜、钨、镍、硼等。

表 1-1 微生物细胞中几种主要元素的质量分数

元 素	细菌（干重）/%	酵母菌（干重）/%	真菌（干重）/%
碳	约 50	约 50	约 48
氮	约 15	约 12	约 5
氢	约 8	约 7	约 7
氧	约 20	约 31	约 40
磷	约 3	—	—
硫	约 1	—	—

由表 1-1 也可看出细菌、酵母菌和真菌中 6 种主要元素的含量是有差别的，也就是说，微生物细胞的化学元素组成往往因微生物种类不同而有所不同。不仅如此，该元素组成也常会随菌龄以及培养条件的不同在一定范围内发生变化，如幼龄菌比老龄菌的含氮量高；在氮源丰富的培养基（medium）上生长的细胞也要比在氮源相对贫乏的培养基上生长的细胞含氮量高。

微生物细胞中的各化学元素主要以有机物、无机物和水形式存在。微生物化学组成因微生物的种类、生理状态和环境条件不同而不同，但通过对各种微生物细胞的化学组成和灰分的分析以及发酵产物中各种无机元素的分析，可大概看出微生物所需要的营养物质。表 1-2 列出了微生物细胞的化学组成和含量。

表 1-2 微生物细胞的化学组成和含量

（干重，%）

成 分	细 菌	酵 母 菌	霉 菌
水	75~85	70~80	85~90
蛋白质	50~80	32~75	14~52
核 酸	10~20	6~8	1~2
糖 类	12~28	27~63	7~40
脂 类	5~20	2~15	4~40
无机元素	2~30	4~7	6~12

众所周知，水是生命之源，是细胞维持正常生命活动必不可少的成分，一般要占细胞干重的 70%~90%。微生物细胞中的干物质主要由无机物和有机物组成，其中有机物主要包括蛋白

质、糖、脂、核酸、维生素以及它们的降解产物和一些代谢产物等物质。对细胞有机成分的分析通常有两种方式：一种是用化学方法直接抽提细胞内的有机成分，然后加以定性和定量的分析；另一种是先将细胞破碎，获得不同的亚显微结构再分析这些结构的化学成分。无机物是指在细胞中与有机物相结合或单独存在的无机盐（inorganic salt）等物质，约占细胞干重的3%~10%。无机物成分的分析一般是先将干细胞在高温炉（550℃）中焚烧成灰，所得到的灰分物质即为各种无机元素的氧化物，称为灰分（ash constituent），然后采用无机化学常规分析法即可定性定量地分析出灰分中各种无机元素的含量。

1.2.3 微生物的分类

100多年来人类对微生物的分类从两界系统经历了三界系统、四界系统、五界系统和六界系统。微生物在所有界级分类系统中，都占有最宽广的领域，占据了绝大多数的“席位”。若按1977年我国学者王大相等在魏泰克（R. H. Whittaker）主张五界系统（动物界、植物界、原生生物界、真菌界、原核生物界）的基础上再增加一个病毒界而形成的六界系统，那么微生物在该分类系统中应分别属于病毒界、原核生物界、真核原生生物界和真菌界。除病毒之外，微生物和其他生物分类一样，分为七个基本的分类等级或分类阶元，由上而下依次是：界（kingdom）、门（phylum）、纲（class）、目（order）、科（family）、属（genus）、种（species）。“种”是分类的最小单元。种内微生物间的差别很小，有时为了区分小差别可用株表示，但“株”不是分类单元。在分类中，若这些分类单元的等级不足以反映某些分类单元之间的差异时，也可以增加亚等级。本教材根据六界分类系统将环境工程微生物在生物学分类中的地位进行归纳，如图1-1所示。

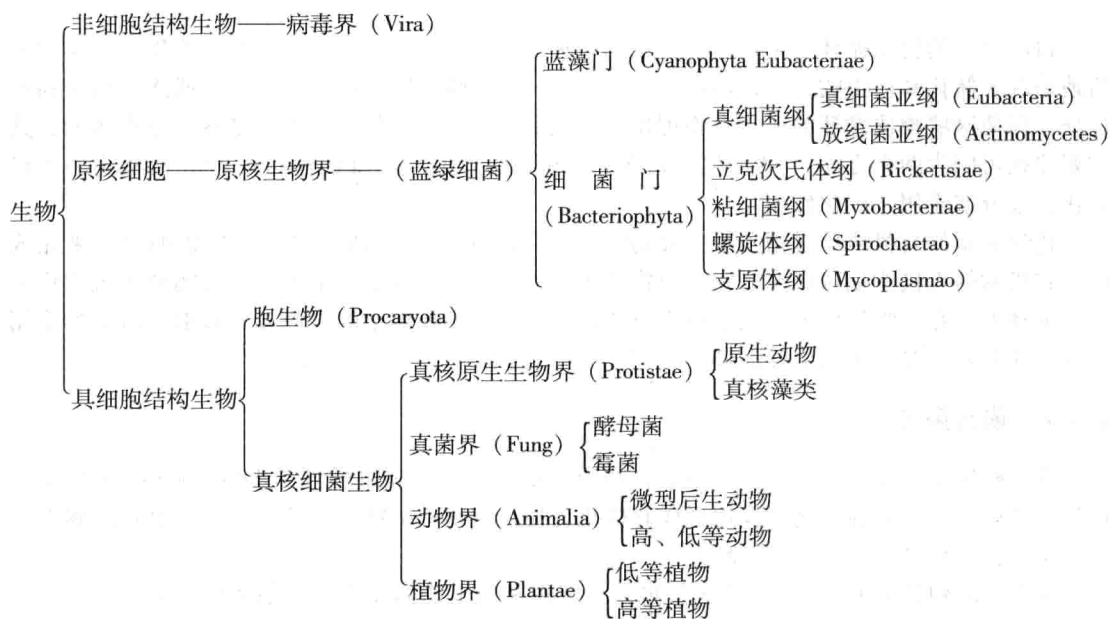


图 1-1 环境工程微生物的分类图

1.2.4 微生物的特点

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，具有许

多共同点:

(1) 个体极小、结构简单。微生物的个体极小,有微米(μm)级的,要通过光学显微镜才能看到。大多数病毒小于 $0.2\mu\text{m}$,是纳米(nm)级的,要通过电子显微镜才能看到。微生物大多都是单细胞生物,如细菌、原生动物、单细胞藻类、酵母菌等。霉菌是微生物结构最复杂的一类,是由多细胞简单排列构成的。

(2) 分布广、种类多。同一种微生物世界各地都有,无论是土壤、水体、空气、植物、动物和人体内,还是酷热的沙漠、寒冷的雪地、冰川、温泉、火山口、淤泥、污水、固体废物等,无处不在。微生物种类极其繁多,已发现的微生物达10万种以上,新种不断被发现。微生物的营养类型和代谢途径呈多样性,从无机营养到有机营养,其呼吸类型呈多样性,在有氧环境、缺氧环境,甚至是无氧环境均有能生活的种类。环境的多样性如极端的高温、低温、pH值和高盐度造就了微生物的种类繁多和数量庞大。

(3) 繁殖快、代谢能力强。大多数微生物以裂殖方式繁殖后代,在适宜的环境条件下,十几分钟至二十分钟就可繁殖一代。在物种竞争上取得优势,这是生存竞争的保证。微生物生长代谢快是基于其特有的生理基础,由于个体微小,单位体积的表面积相对很大,有利于细胞内外的物质交换,细胞内的代谢反应较快。

(4) 遗传稳定性差、容易发生变异。多数微生物为单细胞,结构简单,整个细胞直接与环境接触,易受环境因素影响,引起遗传物质DNA的改变而发生变异,正是因为其遗传保守性低,使得微生物菌种培育相对容易得多。

1.3 微生物在自然界物质循环中的作用与环保

自然界中的物质循环是指地球上存在的各种形式的化合物,通过生物的和非生物的作用不断地消耗、转化和产生的过程,包括氧、碳、氮、硫、磷、铁、锰及各种有毒或无毒污染物的循环。促使这些物质循环的作用有物理作用、化学作用和生物作用,生物是起主导作用的,其主要途径可归为两个方面:(1) 化学元素的有机质化,或生物合成作用;(2) 有机物的无机质化,或分解作用、矿化作用。

化学元素的有机质化过程主要是由绿色植物和自养型微生物(藻类、少数细菌)来完成的。有机物的无机质化过程有动物、植物及微生物的参与,其中微生物是有机物的无机质化的主要推动者,在生物作用中占据了极重要的地位。因此生物圈中的大部分元素都在微生物作用下以不同的速率参与生物地球循环。

1.3.1 碳素循环

碳是构成生物体的主要元素,占生命物质总量的25%。碳素循环(the carbon cycle)主要包括空气中二氧化碳通过光合作用形成有机化合物,以及有机物被分解释放出二氧化碳到大气中,这是自然界最基本的物质循环。

碳素循环包括 CO_2 的固定和 CO_2 的再生。植物和微生物如藻类、蓝细菌以及光合细菌,通过光合作用固定自然界中的 CO_2 ,进而转化成各种有机碳化合物。动物以植物为食物,经过生物氧化释放出 CO_2 ,动物、植物的尸体经微生物完全降解(即矿化作用)后,最终主要产物之一也是 CO_2 。地下埋藏的煤炭、石油等,经过人类的开发、利用,例如作为燃料,燃烧后也产生 CO_2 ,重新加入碳循环。通过这些生物和非生物过程产生的 CO_2 ,随后又被植物和光合微生物利用,开始新的碳素循环。自然界中的碳素循环见图1-2。