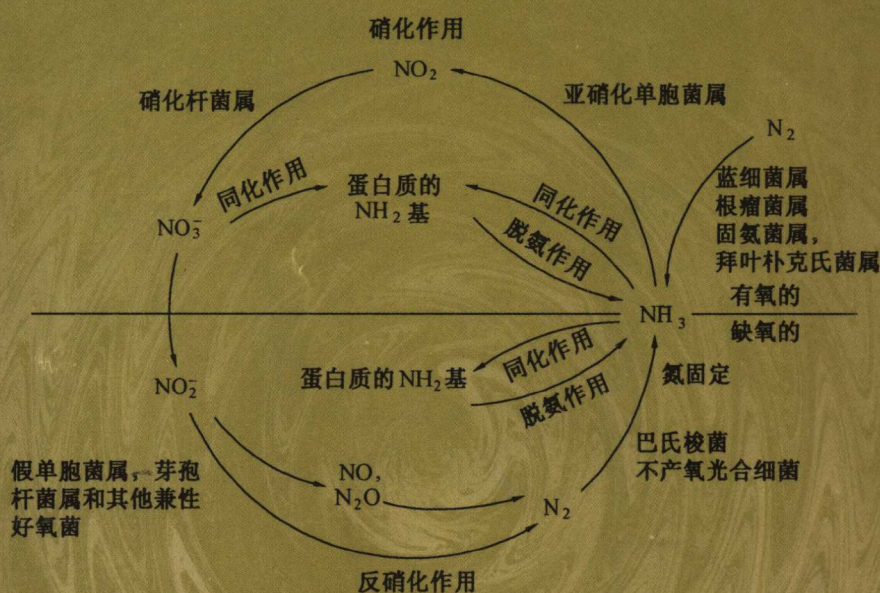


市政与环境工程系列研究生教材

# 污染控制微生物生态学

主编 李建政 任南琪



哈尔滨工业大学出版社

X506  
L-439

市政与环境工程系列研究生教材

# 污染控制微生物生态学

主 编 李建政 任南琪  
副主编 秦 智 赵 丹

哈尔滨工业大学出版社  
哈尔滨

## 内 容 提 要

本书是作者在环境工程微生物学与环境生物工程技术相关研究和教学基础上编撰而成,系统介绍了生态系统、种群生态学、群落生态学、环境因子对微生物的生态作用、微生物在生物圈地球化学变化中的作用等一般生态学知识和基本原理;讲解了污染环境微生物生态学和水体及土壤污染与自净的生态学原理,分述了废水生物处理生态工程、水体富营养化及其生物学控制、处理有机固体废弃物的生态工程、工业废气生物处理工程技术和污染土壤生态的生物修复技术。本书力图做到理论与实践、基本原理与应用的有机结合,读者可以较全面地学习到环境生态学的基本知识,了解生态学基本原理在环境污染控制技术中的应用情况,触及国际前沿,把握环境生物工程技术的研究、开发和应用趋势。

本书内容丰富、系统性强,可以用作高等学校和科研院所环境科学、环境工程专业研究生及本科生的试用教材,也可供生态学、环境保护科技工作者与管理人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

污染控制微生物生态学/李建政,任南琪主编. —哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2005.7

(市政与环境工程系列研究生教材)

ISBN 7-5603-2172-2

I.污… II.①李… ②任… III.污染控制-微生物生态学  
IV.X323

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 058869 号

出版发行 哈尔滨工业大学出版社  
社 址 哈尔滨市南岗区复华四道街 10 号 邮编 150006  
传 真 0451-86414749  
网 址 <http://hitpress.hit.edu.cn>  
印 刷 哈尔滨市工大节能印刷厂  
开 本 787×1092 1/16 印张 20 字数 450 千字  
版 次 2005 年 7 月第 1 版 2005 年 7 月第 1 次印刷  
书 号 ISBN 7-5603-2172-2/X·20  
印 数 1~4 000  
定 价 26.00 元

---

(如因印装质量问题影响阅读,我社负责调换)

## 前 言

保护环境,促使社会经济和环境的协调发展,实施可持续发展战略,是人类社会和经济持续发展的保证。然而,环境污染日趋严重,其危害已突破了区域界限,表现出污染的多样性、持久性和全球化等新特点,给人类生存、生产和生态平衡构成了严重威胁。目前,利用微生物对环境污染物的吸附与吸收、转化和降解作用,对污水、固体废弃物、工业废气进行处理与净化,对污染环境进行修复,已成为经济效益和环境效益俱佳、解决环境污染问题的最有效手段,环境生物工程就是现代生物技术与环境工程相结合的产物。对污水(废水)、固废、有害工业气体等废弃物的生物处理过程,以及对污染环境的生态修复,均需要众多微生物的共同参与和作用,同时还要受到环境因素或工程控制条件的制约。因此,对污染环境微生物生态学基础知识和理论的了解和深入研究,将会有力地促进环境生物工程技术的研发与应用。在环境科学与工程学科,环境工程、排水工程等专业课与环境微生物学关系紧密,而环境工程微生物学是最重要的一门专业基础课。然而,在大学生和研究生教学中发现,学生尤其是环境工程专业的学生严重缺乏环境微生物生态学的基础知识,他们渴望更多地了解微生物生态学基本原理在环境工程技术领域的应用情况,从微生物生态学角度去重新认识和进一步开发环境生物工程技术。本书就是根据这一需求进行内容组织和编写的。

本书共分12章,前7章在对生态系统、种群生态学、群落生态学、环境因子对微生物的生态作用、微生物在生物圈地球化学变化中的作用等一般生态学知识和基本原理进行介绍的基础上,重点讲解了污染环境微生物生态学和水体及土壤污染与自净的生态学原理;后五章主要对废水生物处理生态工程、水体富营养化及其生物学控制、处理有机固体废弃物的生态工程、工业废气生物处理工程技术和污染土壤生态的生物修复技术进行了分述。本书的编写,力图做到理论与实践、基本原理与应用的有机结合,读者可以较全面地学习到环境生态学的基本知识,了解生态学基本原理在环境污染控制技术中的应用情况,触及国际前沿,把握环境生物工程技术的发展趋势,为以后的学习和工作奠定基础。

本书由李建政、任南琪任主编,秦智、赵丹任副主编。各位作者的具体分工为:第1章李建政;第2章和第3章秦智;第4章秦智、任南琪;第5章任南琪、赵丹;第6章李建政、任南琪;第7章李建政;第8章赵丹、任南琪;第9章李建政;第10章赵丹;第11章李建政;第12章秦智。作为哈尔滨工业大学市政与环境工程研究生主干课程用书,本书的编写得到了哈尔滨工业大学研究生院的大力支持,作者对此深表感谢。

限于作者知识水平和写作能力,书中难免有疏漏之处,我们殷切希望广大读者和有关专家提出批评和建议,为环保事业的发展共同努力。

作 者

2004年11月

# 目 录

|                       |      |
|-----------------------|------|
| 第 1 章 生态系统            | (1)  |
| 1.1 生态系统的概念与功能        | (1)  |
| 1.1.1 生态系统的概念         | (1)  |
| 1.1.2 生态系统的组成结构和基本特征  | (2)  |
| 1.1.3 生态系统的功能         | (4)  |
| 1.1.4 生态系统的分类         | (7)  |
| 1.2 生态学金字塔            | (8)  |
| 1.2.1 食物链与生物放大        | (8)  |
| 1.2.2 生态学金字塔及其类型      | (9)  |
| 1.3 生态系统的平衡及其调节机制     | (10) |
| 1.3.1 生态平衡的概念         | (10) |
| 1.3.2 生态平衡的基本特征       | (11) |
| 1.3.3 生态平衡的调节机制       | (11) |
| 1.3.4 生态平衡失调          | (13) |
| 1.4 微生物在生态系统中的重要作用    | (15) |
| 第 2 章 种群生态学           | (16) |
| 2.1 种群与种群生态学          | (16) |
| 2.1.1 种群的概念与种群生态学     | (16) |
| 2.1.2 种群的基本特征         | (16) |
| 2.2 种群增长的基本模式         | (24) |
| 2.2.1 种群在无限环境中的指数增长   | (25) |
| 2.2.2 种群在有限环境中的逻辑斯谛增长 | (26) |
| 2.3 种间关系              | (27) |
| 2.3.1 相互作用类型          | (27) |
| 2.3.2 种间竞争            | (28) |
| 2.4 环境污染的种群动态         | (32) |
| 2.5 种群调节              | (33) |
| 2.5.1 密度制约因素和非密度制约因素  | (33) |
| 2.5.2 密度调节            | (33) |
| 2.5.3 非密度调节           | (35) |
| 2.6 种群对环境变化的生态对策      | (35) |

|                                 |      |
|---------------------------------|------|
| 2.6.1 生态对策的概念 .....             | (35) |
| 2.6.2 $r$ -选择和 $K$ -选择 .....    | (35) |
| 第3章 群落生态学 .....                 | (37) |
| 3.1 群落的概念与基本特征 .....            | (37) |
| 3.1.1 群落的概念 .....               | (37) |
| 3.1.2 群落的基本特征 .....             | (37) |
| 3.2 生物群落对污染环境的指示作用 .....        | (38) |
| 3.2.1 植物群落的指示作用 .....           | (38) |
| 3.2.2 动物群落的指示作用 .....           | (39) |
| 3.2.3 微生物群落的指示作用 .....          | (39) |
| 3.3 群落演替 .....                  | (40) |
| 3.3.1 群落演替的概念 .....             | (40) |
| 3.3.2 群落的形成与发育 .....            | (41) |
| 3.3.3 外因生态演替和内因生态演替 .....       | (43) |
| 3.4 顶极群落学说 .....                | (44) |
| 3.4.1 演替顶极的概念 .....             | (44) |
| 3.4.2 顶极群落学说 .....              | (45) |
| 3.5 微生物群落中的种群关系 .....           | (46) |
| 3.5.1 互惠关系 .....                | (46) |
| 3.5.2 拮抗关系 .....                | (49) |
| 第4章 环境因子对微生物的生态作用 .....         | (52) |
| 4.1 非生物因子对微生物的影响 .....          | (52) |
| 4.1.1 温度 .....                  | (52) |
| 4.1.2 pH 值 .....                | (55) |
| 4.1.3 氧化还原电位 .....              | (56) |
| 4.1.4 辐射 .....                  | (58) |
| 4.1.5 有害化学物质 .....              | (61) |
| 4.1.6 渗透压 .....                 | (63) |
| 4.1.7 其他环境因子 .....              | (65) |
| 4.2 生态因子与生物相互作用的基本规律 .....      | (66) |
| 4.2.1 生态因子的综合作用 .....           | (66) |
| 4.2.2 生态因子的不可替代性和补偿作用 .....     | (67) |
| 4.2.3 限制因子定律 .....              | (67) |
| 4.2.4 最小因子定律 .....              | (67) |
| 4.2.5 耐性定律 .....                | (68) |
| 4.2.6 生态因子的拮抗作用 .....           | (69) |
| 4.2.7 生态因子的叠加作用、增强作用和减效作用 ..... | (69) |

---

|                             |       |
|-----------------------------|-------|
| 4.3 微生物的微环境和表面环境 .....      | (70)  |
| 4.3.1 微环境 .....             | (70)  |
| 4.3.2 表面环境 .....            | (70)  |
| 第5章 微生物在生物圈地球化学变化中的作用 ..... | (72)  |
| 5.1 微生物的特点与有机物的矿化作用 .....   | (72)  |
| 5.1.1 微生物分布的普遍性 .....       | (72)  |
| 5.1.2 微生物具有惊人的繁殖速度 .....    | (73)  |
| 5.1.3 微生物具有很高的代谢强度 .....    | (73)  |
| 5.1.4 微生物代谢类型的多样性 .....     | (73)  |
| 5.2 碳素循环 .....              | (74)  |
| 5.2.1 生物圈中的碳素循环 .....       | (74)  |
| 5.2.2 有机物的好氧分解和厌氧分解 .....   | (82)  |
| 5.2.3 甲烷的微生物代谢 .....        | (82)  |
| 5.3 氧素循环 .....              | (85)  |
| 5.4 氮素循环 .....              | (87)  |
| 5.4.1 生物圈中的氮素循环 .....       | (87)  |
| 5.4.2 微生物的固氮作用 .....        | (87)  |
| 5.4.3 氮素的同化 .....           | (89)  |
| 5.4.4 氨化作用 .....            | (90)  |
| 5.4.5 硝化作用 .....            | (91)  |
| 5.4.6 反硝化作用 .....           | (95)  |
| 5.5 硫素循环 .....              | (96)  |
| 5.5.1 生物圈中的硫素循环 .....       | (96)  |
| 5.5.2 无机硫化物的同化 .....        | (97)  |
| 5.5.3 有机硫化物的矿化 .....        | (97)  |
| 5.5.4 还原态无机硫化物的微生物氧化 .....  | (98)  |
| 5.5.5 氧化态无机硫化物的还原 .....     | (99)  |
| 5.5.6 微生物代谢形成的其他硫化物 .....   | (101) |
| 5.6 磷素循环 .....              | (101) |
| 5.6.1 生物圈中的磷素循环 .....       | (101) |
| 5.6.2 有机磷的矿化 .....          | (101) |
| 5.6.3 磷的有效化 .....           | (102) |
| 5.6.4 磷的同化 .....            | (102) |
| 5.6.5 磷与水体污染 .....          | (103) |
| 第6章 污染环境微生物生态学 .....        | (104) |
| 6.1 概述 .....                | (104) |
| 6.2 环境污染与环境污染物 .....        | (104) |

|                                 |              |
|---------------------------------|--------------|
| 6.2.1 环境污染与污染源 .....            | (104)        |
| 6.2.2 污染物与优先污染物 .....           | (105)        |
| 6.3 环境污染的生态学效应 .....            | (107)        |
| 6.3.1 污染生态效应的内涵 .....           | (107)        |
| 6.3.2 污染生态效应发生的机制 .....         | (107)        |
| 6.3.3 环境污染对微生物个体的影响 .....       | (109)        |
| 6.3.4 环境污染对微生物群落及其生态系统的影响 ..... | (111)        |
| 6.3.5 微生物对环境污染的抗性 .....         | (111)        |
| 6.4 微生物代谢造成的环境污染 .....          | (114)        |
| 6.4.1 微生物形成的污染物 .....           | (115)        |
| 6.4.2 微生物代谢含氮化合物产生的环境污染 .....   | (119)        |
| 6.4.3 微生物代谢含硫化合物产生的环境污染 .....   | (121)        |
| 6.5 金属污染物及其微生物转化 .....          | (122)        |
| 6.5.1 铁和锰的生物转化 .....            | (122)        |
| 6.5.2 汞污染及其生物转化 .....           | (126)        |
| 6.5.3 砷污染及其微生物转化 .....          | (127)        |
| 6.5.4 镉和铅的生物转化 .....            | (128)        |
| 6.6 有机污染物的生物降解 .....            | (129)        |
| 6.6.1 有机污染物的生物降解性 .....         | (129)        |
| 6.6.2 重要有机污染物的微生物降解 .....       | (134)        |
| 6.6.3 质粒与污染物的微生物降解 .....        | (145)        |
| <b>第7章 水土污染与自净的生态学原理 .....</b>  | <b>(150)</b> |
| 7.1 水体的微生物生态特征 .....            | (150)        |
| 7.1.1 微生物的水域环境 .....            | (150)        |
| 7.1.2 水体中的微生物 .....             | (151)        |
| 7.1.3 水生微生物在生态系统中的作用 .....      | (154)        |
| 7.2 水体污染与水体的自净 .....            | (155)        |
| 7.2.1 水体污染与水体自净的概念 .....        | (155)        |
| 7.2.2 水体的自净过程及其生态学特征变化 .....    | (156)        |
| 7.2.3 水体自净的评价指标 .....           | (157)        |
| 7.3 河流污化带系统及其生态学特征 .....        | (158)        |
| 7.3.1 多污带 .....                 | (158)        |
| 7.3.2 中污带 .....                 | (158)        |
| 7.3.3 寡污带 .....                 | (159)        |
| 7.4 土壤微生物生态 .....               | (161)        |
| 7.4.1 微生物与土壤的形成 .....           | (161)        |
| 7.4.2 土壤的生态条件 .....             | (161)        |

|                                  |       |
|----------------------------------|-------|
| 7.4.3 土壤中的微生物及其分布 .....          | (162) |
| 7.5 植物-微生物生态系统 .....             | (166) |
| 7.5.1 根际微生物生态 .....              | (166) |
| 7.5.2 植物与微生物共生体 .....            | (168) |
| 7.6 污染土壤的微生物生态 .....             | (168) |
| 7.6.1 土壤环境污染的概念 .....            | (168) |
| 7.6.2 土壤主要污染源及污染物 .....          | (169) |
| 7.6.3 土壤污染的主要途径 .....            | (170) |
| 7.6.4 土壤污染的危害 .....              | (171) |
| 7.7 土壤净化的生态学原理 .....             | (171) |
| 7.7.1 土壤自净的概念 .....              | (171) |
| 7.7.2 土壤自净的机理 .....              | (171) |
| 7.8 环境自净容量的合理利用 .....            | (174) |
| 第8章 废水生物处理生态工程 .....             | (175) |
| 8.1 好氧活性污泥处理系统 .....             | (175) |
| 8.1.1 好氧活性污泥系统净化污水的机制和过程 .....   | (175) |
| 8.1.2 活性污泥中的微生物 .....            | (176) |
| 8.1.3 活性污泥中的微生物生态演替 .....        | (177) |
| 8.1.4 微型动物在废水处理系统中的作用 .....      | (178) |
| 8.1.5 污泥膨胀的生物学原因及其控制对策 .....     | (179) |
| 8.1.6 好氧活性污泥处理系统的类型及其特点 .....    | (183) |
| 8.2 生物膜处理系统 .....                | (186) |
| 8.2.1 普通生物滤池 .....               | (186) |
| 8.2.2 塔式生物滤池 .....               | (187) |
| 8.2.3 生物转盘 .....                 | (188) |
| 8.2.4 生物接触氧化工艺系统 .....           | (189) |
| 8.2.5 生物流化床 .....                | (189) |
| 8.3 厌氧生物处理系统 .....               | (190) |
| 8.3.1 厌氧消化的阶段性 .....             | (191) |
| 8.3.2 厌氧消化的主要微生物菌群及其生理生态特性 ..... | (192) |
| 8.3.3 厌氧消化主要微生物菌群的相互关系 .....     | (194) |
| 8.3.4 厌氧消化过程中微生物优势种群的演替 .....    | (195) |
| 8.3.5 厌氧颗粒污泥的形成及其微生物生理生态特性 ..... | (195) |
| 8.3.6 影响厌氧生物处理的环境因素 .....        | (202) |
| 8.3.7 废水厌氧生物处理工程技术 .....         | (203) |
| 8.4 光合细菌在高浓度有机废水处理中的应用 .....     | (207) |
| 8.5 废水生物脱氮工艺系统 .....             | (208) |

|                              |       |
|------------------------------|-------|
| 8.5.1 废水脱氮的生物学原理 .....       | (208) |
| 8.5.2 废水生物脱氮工程技术 .....       | (209) |
| 8.6 废水生物除磷系统 .....           | (212) |
| 8.6.1 废水除磷微生物学原理 .....       | (212) |
| 8.6.2 废水除磷工程技术 .....         | (213) |
| 8.7 废水稳定塘处理系统 .....          | (214) |
| 8.7.1 稳定塘中的生物 .....          | (214) |
| 8.7.2 稳定塘生态系统的结构 .....       | (217) |
| 8.7.3 稳定塘生态系统中的种群关系 .....    | (217) |
| 8.7.4 稳定塘内物质的迁移与转化 .....     | (218) |
| 8.7.5 稳定塘净化污水的生态学机制 .....    | (222) |
| 8.7.6 稳定塘生态系统的影响因素 .....     | (223) |
| 8.7.7 稳定塘的类型及其生态学特点 .....    | (225) |
| 第9章 水体富营养化及其生物学控制 .....      | (230) |
| 9.1 水体的富营养化及其危害 .....        | (230) |
| 9.1.1 水体富营养化的概念 .....        | (230) |
| 9.1.2 水体富营养化的危害 .....        | (230) |
| 9.1.3 水体富营养化的机理 .....        | (232) |
| 9.2 富营养化水体中的优势微生物 .....      | (232) |
| 9.3 藻类生长的环境条件 .....          | (235) |
| 9.3.1 营养物质及其来源 .....         | (235) |
| 9.3.2 光与温度对藻类生长的影响 .....     | (236) |
| 9.3.3 溶解氧和 pH 值 .....        | (237) |
| 9.4 评价水体富营养化的生物学指标 .....     | (238) |
| 9.4.1 光合作用强度与呼吸作用强度的比值 ..... | (238) |
| 9.4.2 藻类生产潜在能力 .....         | (238) |
| 9.4.3 光合作用产氧能力 .....         | (239) |
| 9.4.4 生物性指标 .....            | (239) |
| 9.4.5 其他指标 .....             | (239) |
| 9.5 富营养化水体的控制措施 .....        | (240) |
| 9.5.1 化学药剂控制法 .....          | (240) |
| 9.5.2 破坏水体的分层 .....          | (241) |
| 9.5.3 藻类的生物学控制 .....         | (241) |
| 9.5.4 藻类的生态学控制 .....         | (241) |
| 9.5.5 工程控制措施 .....           | (242) |
| 第10章 处理有机固体废弃物的生态工程 .....    | (243) |
| 10.1 堆肥 .....                | (244) |

|                                   |              |
|-----------------------------------|--------------|
| 10.1.1 堆肥的微生物学过程 .....            | (245)        |
| 10.1.2 堆肥的基本材料 .....              | (249)        |
| 10.1.3 影响堆肥的环境因素 .....            | (249)        |
| 10.1.4 堆肥化生态工程技术 .....            | (254)        |
| 10.2 沼气发酵 .....                   | (256)        |
| 10.2.1 沼气发酵的微生物学原理 .....          | (256)        |
| 10.2.2 影响沼气发酵的因素 .....            | (260)        |
| 10.2.3 沼气发酵的实用性 .....             | (263)        |
| 10.3 卫生填埋 .....                   | (264)        |
| 10.3.1 卫生填埋工程技术 .....             | (265)        |
| 10.3.2 填埋坑中的微生物活动过程 .....         | (269)        |
| 10.3.3 卫生填埋场的管理 .....             | (270)        |
| <b>第 11 章 工业废气生物处理工程技术 .....</b>  | <b>(273)</b> |
| 11.1 工业废气生物处理系统的原理与分类 .....       | (273)        |
| 11.1.1 工业废气生物处理系统的原理 .....        | (273)        |
| 11.1.2 工业废气生物处理工程技术的分类 .....      | (274)        |
| 11.1.3 工业废气生物处理系统中的微生物 .....      | (274)        |
| 11.2 生物吸收法 .....                  | (276)        |
| 11.3 微生物过滤法 .....                 | (277)        |
| 11.3.1 生物过滤法净化废气的机理和工艺过程 .....    | (277)        |
| 11.3.2 影响生物过滤器性能的因素 .....         | (278)        |
| 11.3.3 废气微生物过滤法的生态工程技术 .....      | (280)        |
| 11.4 活性污泥法 .....                  | (283)        |
| 11.4.1 活性污泥法净化废气的机理和工艺过程 .....    | (283)        |
| 11.4.2 废气对废水生物处理系统的影响 .....       | (283)        |
| 11.4.3 活性污泥法处理废气的优点 .....         | (284)        |
| <b>第 12 章 污染土壤生态的生物修复技术 .....</b> | <b>(286)</b> |
| 12.1 土壤中的主要污染物质 .....             | (286)        |
| 12.2 土壤生物修复的概念及优点 .....           | (288)        |
| 12.2.1 土壤生物修复的概念 .....            | (288)        |
| 12.2.2 土壤生物修复的优点和局限性 .....        | (289)        |
| 12.2.3 土壤生物修复的产生和发展 .....         | (290)        |
| 12.3 土壤生物修复技术的原理与类型 .....         | (291)        |
| 12.3.1 土壤生物修复技术的原理 .....          | (291)        |
| 12.3.2 土壤生物修复技术的类型 .....          | (294)        |
| 12.4 用于生物修复的微生物 .....             | (294)        |
| 12.4.1 土著微生物 .....                | (294)        |

---

|                            |       |
|----------------------------|-------|
| 12.4.2 外来微生物 .....         | (295) |
| 12.4.3 基因工程菌 .....         | (296) |
| 12.5 修复土壤的生物生态控制措施 .....   | (296) |
| 12.5.1 接种微生物 .....         | (296) |
| 12.5.2 添加营养物 .....         | (297) |
| 12.5.3 提供电子受体 .....        | (297) |
| 12.5.4 共代谢底物与共代谢酶的诱导 ..... | (298) |
| 12.5.5 添加表面活性剂 .....       | (299) |
| 12.6 污染土壤生物修复的生态工程技术 ..... | (299) |
| 12.6.1 原位处理工艺 .....        | (299) |
| 12.6.2 异位处理工艺 .....        | (302) |
| 12.6.3 反应器处理工艺 .....       | (303) |
| 参考文献 .....                 | (306) |

# 第1章 生态系统

微生物个体体积虽然很小,但在自然界的作用却是巨大的,而要了解微生物在自然界所占的位置及其作用,就必须首先对生态系统进行研究。环境微生物学的研究,既可以从微观着手,以某个种为研究对象,从微生物细胞的显微结构以至对细胞进行遗传学改造等方面进行研究,也可以从宏观的方向去发展,研究微生物群体对环境的影响及其在整个生态系统中的作用。后者正是环境微生物生态学所要研究的内容。

## 1.1 生态系统的概念与功能

### 1.1.1 生态系统的概念

生态系统(ecosystem)这一概念最初是由英国植物群落学家坦斯利(Tansley, 1935)首先提出的,其基本点是强调系统中各成分之间,包括生物与生物、生物与环境以及环境各因素之间在功能上的统一性。因此,生态系统主要是一功能单位而不是生物学的分类单位。

在自然界中,生物(包括动物、植物和微生物)的生存与周围环境(主要指阳光、温度、水分、空气、土壤等,也包括其他生物)之间存在着密切的关系。生物在其生活过程中,一方面需要不断从环境中摄取生命活动所必需的能量与建造自身的营养物质,同时也要不断地将某些代谢物质排出机体,归还到环境中去。例如,绿色植物能利用日光将  $\text{CO}_2$ 、 $\text{H}_2\text{O}$  和矿质营养合成有机物质;食草动物,如昆虫、兔、羚羊、鹿等则依靠绿色植物合成的有机物而生存;狮、虎、豹、狼等肉食性动物又以食草动物为其生活的食物来源;微生物则靠分解死亡的动植物残体或排泄物以获得其生命活动所需的营养物质和能量。绿色植物、动物、微生物通过呼吸代谢作用,分解有机化合物获得生命活动所需能量的同时,将  $\text{CO}_2$ 、 $\text{H}_2\text{O}$  和其他代谢产物归还于环境。因此,生物与生物、生物与环境总是不可分割地相互联系、相互作用着。环境各因子间也是相互影响、互相制约的。一个因子的变化可以引起其他一系列因子发生相应地改变,如光照增强,将导致环境温度的升高,大气相对湿度的减小,土壤水分蒸发的加快等,所以,环境因子对生物的影响是综合性的。可见,生物与生物、生物与环境之间,通过能量和物质流动紧密地结合成了一个整体。在这个整体中,能量不停地流动,物质不断地循环。生态系统就是指一定空间内生存的所有生物和环境相互作用的,具有能量转换、物质循环代谢和信息传递功能的统一体。

生态系统是有边界、有范围、有层次的。根据定义,生态系统在空间边界上又是模糊的。也就是说,它在大小上是不确定的,其空间范围往往是依据人们所研究的对象、研究内容、研究目的或地理条件等因素而确定。从结构和功能的完整性角度分析,生态系统可以是含有光合微生物的一滴水,也可以是整个生物圈(biosphere)。所以,生态系统可以是一个很具体的概念,一个池塘、一片森林或一块草地都是一个生态系统。同时,它又是在空间范围上抽象的概念。不同大小的生态系统只是研究的空间范围及其复杂程度不同,小的生态系统联

合成大的生态系统,简单的生态系统组合成复杂的生态系统,而生物圈是地球上最大、最复杂的生态系统,从地球表面向上 23 km 的高空,向下 11 km 的地、海洋深处(太平洋最深的海槽),都属于生物圈的范围。

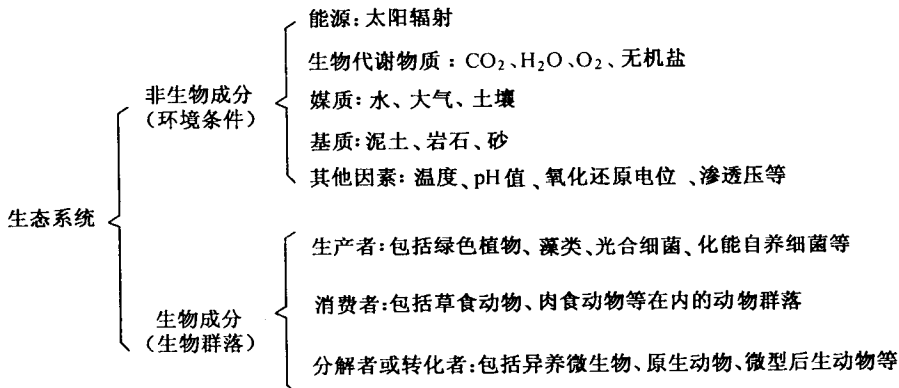
### 1.1.2 生态系统的组成结构和基本特征

#### 1.1.2.1 生态系统的组成成分

生态系统的组成成分是指系统内所包括的若干类相互联系的各种要素。从理论上讲,地球上的一切物质都可能是生态系统的组成成分。生态系统的类型是多种多样的,它们各自的生物种类和环境要素存在着许多差异。然而,各类生态系统却都是由两大部分、四个基本成分所组成。两大部分是指生物和非生物环境,或称之为生命系统 and 环境系统;四个基本成分是指非生物环境、生产者、消费者和还原者。

非生物环境或称环境系统是生态系统的物质和能量的来源,包括生物活动的空间和参与生物生理代谢的各种要素,如光、水、二氧化碳以及各种矿质营养物质。生命系统包括植物、动物和微生物。

生态系统的四个基本成分,除了非生物环境外,其他三者是依照生态功能对生物成分的进一步划分。



(1)非生物环境(abiotic environment):包括气候因子,如光照、热量、水分、空气等;无机物质,如  $\text{CO}_2$ 、 $\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{O}_2$ 、 $\text{N}_2$  及矿质盐分等;有机物质,如碳水化合物、蛋白质、脂类及腐殖质等。

(2)生产者(producers):指能利用太阳光等能源,将  $\text{CO}_2$ 、 $\text{H}_2\text{O}$  和无机盐等简单无机物合成为复杂有机物的自养生物,如陆生的各种植物,水生的高等植物和藻类,还包括一些光能营养型细菌和化能营养型细菌。在污染严重的水体中,水生多细胞藻类占优势。生产者是生态系统的必要成分,它们将光能转化为化学能,是生态系统所需一切能量的基础。

(3)消费者(consumers):以自养生物或其他生物为食而获得生存能量和营养物质的异养生物,主要是各类动物。其中,有的直接以植物为食,如牛、马、兔、池塘中的草鱼以及许多陆生昆虫等,这些食草动物(herbivores)称为初级消费者(primary consumer);有的以食草动物为食,如食昆虫的鸟类、青蛙、蜘蛛、蛇、蝙蝠等,可统称为次级消费者(secondary consumers)。食肉动物之间依据“弱肉强食”的自然法则,可进一步分为三级消费者、四级消费者。但是,生态系统中以食肉动物为食的三级或四级消费者数量并不多,通常是生物群落中体型较大、性情凶猛的种类,如陆地生态系统中的虎、狮、豹,海洋中的鲨鱼等。

消费者中最常见的是杂食性消费者(omnivory consumers),如池塘中的鲤鱼,大型兽类中的熊等。正是杂食消费者的这种杂食性营养特点,构成了生态系统中极其复杂的营养网络关系。

生态系统中还有两类特殊的消费者:一类是腐食消费者(saprophagous consumers),它们是以动植物尸体为食,如白蚁、蚯蚓、兀鹰等;另一类是寄生生物(parasites),它们寄生于生活着的动植物的体表或者体内,靠吸收寄主养分为生,如虱子、蛔虫、线虫、菟丝子和菌类等。

(4)分解者(decomposers):亦称还原者(reducers),这类生物也属异养生物,故又有小型消费者之称,包括细菌、真菌、放线菌和原生动物。它们在生态系统中的重要作用是把复杂的有机物分解为简单的无机物,归还到环境中供生产者重新利用。

大部分自然生态系统都具有上述四个组成成分,在能量获得和物质循环中各以其特有的作用而相互影响,互为依存,通过复杂的营养关系而紧密结合为一个统一整体,共同组成了生态系统这个功能单元。一个独立发生功能的生态系统至少应包括非生物环境、生产者和还原者三个组成成分,生态系统四个基本成分间的相互关系和作用,可以用图 1.1 表示。

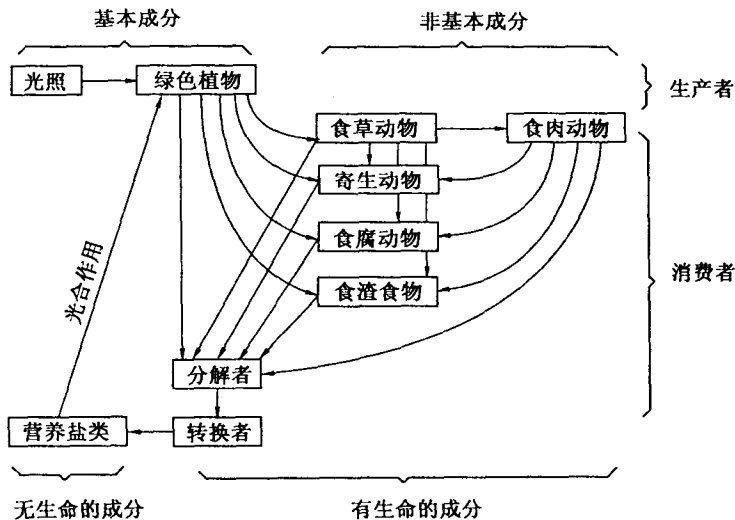


图 1.1 生态系统的组成成分及其相互关系

(引自 clarke, 1963)

### 1.1.2.2 生态系统的结构

生态系统的结构是指组成成分的营养关系和各种生物的空间分布状态。具体地说,生态系统的结构包括物种结构、营养结构和空间结构。由于生态系统是一个功能单位,强调的是系统中的物质循环和能量流动,因而在结构方面也主要是从营养功能上划分的,简单地讲,食物网及其相互关系就是生态系统的营养结构。至于物种结构,各类生态系统的差异很大,如水域生态系统的生产者主要是须借助显微镜才能分辨的浮游藻类,而森林生态系统中的生产者却是一些高大的乔木和各种灌木。而且,即使一个比较简单的生态系统,要全部搞清它的物种结构也是极其困难的,甚至是不可能的。在实际工作中,人们主要是以群落中的优势种类、生态功能上的主要种类或类群作为研究对象。

生态系统的空间结构实际上就是生物群落的空间分布格局状况,包括群落的垂直结构

(即成层现象)和水平结构(即种群的水平配置格局),这些方面的内容在种群生态学和群落生态学等章节中有更多的叙述。

### 1.1.2.3 生态系统的基本特征

任何“系统”都是具有一定结构,各组分之间发生一定联系并执行一定功能的有序整体,所以生态系统与物理学上的系统具有基本的相似性。但生物成分的存在决定了生态系统具有不同于机械系统的许多特征。

#### 1. 动态特征

生态系统是生物群落与周围环境通过物质交换和能量传递而相互作用的功能系统。所以,生态系统具有有机体的一系列生物学特性,如发育、代谢、繁殖、生长与衰老等。这就意味着生态系统具有内在的动态变化能力,任何一个生态系统总是处于不断发展、进化和演变之中,这就是我们在后续章节中讲到的生态演替现象。人们可根据生态系统的发育状况将其分为幼年期、成长期、成熟期等不同发育阶段。每个发育阶段所需要的进化时间对于各种类型的生态系统是不同的,处在不同发育阶段的生态系统在结构和功能上也各具特点。

#### 2. 区域特征

生态系统都与特定的空间相联系,包含一定地区和范围的空间概念。在不同的空间范围内,栖息着与其生态条件相适应的生物类群。生命系统与环境系统的相互作用以及生物对环境的长期适应结果,使生态系统的结构和功能反映了一定的地区特性。例如,同是森林生态系统,寒温带的长白山区的针阔混交林与海南岛的热带雨林生态系统相比,无论是物种结构、物种丰度以及系统的功能等均表现出明显的差别。这种差异是区域自然环境不同的反映,也是生物群落在长期进化过程中对各自空间环境适应和相互作用的结果。

#### 3. “自维持”特性

物理学上的机械系统,是在人的管理和操纵下完成其功能的。然而,自然生态系统则不同,它所需要的能源是生产者对光能的“巧妙”转化,消费者取食植物,而动、植物残体以及它们生活时的代谢排泄物通过分解者作用,使结合在复杂有机物中矿质元素又归还给环境,重新供生产者利用,这个过程往复循环,从而不断地进行着能量和物质的交换与转移,保证了生态系统的发生、运行和功能的发挥。生态系统功能连续的自我维持基础就是它所具有的代谢机能,这种代谢机能是通过系统内的生产者、消费者和分解者三个不同营养水平的生物类群完成的,它们是生态系统“自维持”(self-maintenance)的结构基础。

#### 4. 自动调节功能

一个成熟的自然生态系统,在未受到人类或者其他因素的严重干扰和破坏的情况下,其结构和功能是非常和谐和相对稳定的,这是因为生态系统具有自动调节的功能。生态系统的自动调节功能是指生态系统在受到外来干扰而使稳定状态发生改变时,系统靠自身内部的机制再返回稳定、协调状态的能力。生态系统自动调节功能表现在三个方面,即同种生物种群密度调节,异种生物种群间的数量调节,生物与环境之间相互适应的调节。

### 1.1.3 生态系统的功能

生态系统的基本功能包括生物生产、能量流动、物质循环和信息传递。这些基本功能是由生态系统中的生物群落具体实现的,相互联系,紧密结合。

### 1.1.3.1 生物生产

生态系统中的生物生产包括初级生产(primary production)和次级生产(secondary production)两个过程。在一个生态系统中,这两个生产过程彼此联系,但又是分别独立进行的。

初级生产又称植物性生产,是指生态系统的生产者(主要是绿色植物)把太阳能转变为化学能,将简单无机物转变为复杂的有机物的过程,实质上是一个能量转化和物质积累的过程,是绿色植物进行光合作用的过程。生态系统的初级生产可分为总初级生产量(gross primary production)和净初级生产量(net primary production)。总初级生产量是指在测定阶段,包括生产者自身呼吸作用被消耗掉的有机物在内的总积累量。净初级生产量则指在测定阶段,从植物光合作用积累量中扣除生产者自身呼吸的消耗量所剩余的积累量。在生态系统的净初级生产量中,有相当一部分被消费者所消耗和利用,从净生产量中再扣除异养呼吸这一部分的消耗量,所剩的积累量就是整个生态系统生物生产的净生产量,称为生物群落净生产量。

次级生产又称动物性生产,是指消费者(主要是动物)和分解者利用初级生产物质进行同化作用建造自身和繁衍后代的过程,也就是异养生物对初级生产物质的利用和再生产过程。生态系统净初级生产量中只有一部分被食草动物所利用,而大部分未被采食或触及。被食草动物摄食利用的那一部分初级生产量称为消耗量(consumption)。消耗量中的大部分被消化吸收,这一部分成为同化量(assimilation),未被消化利用的剩余部分,经消化道排出体外,称为粪便量。粪便量与排尿量合在一起称为粪尿量。被动物所同化的能量,一部分用于呼吸而被消耗掉,剩余部分才被用于个体生长或用于繁殖。生态系统中各种消费者的营养层次虽然不同,但它们的次级生产过程基本上都遵循与上述相同的途径。生态系统的次级生产过程可以用图 1.2 来描述。

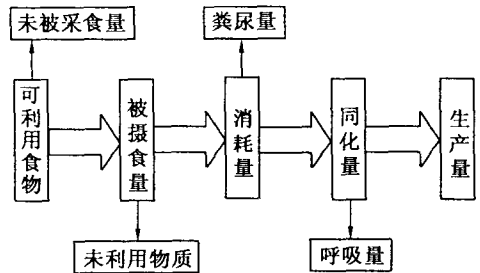


图 1.2 生态系统次级生产过程模式图

### 1.1.3.2 能量流动

生态系统的能量流动(energy flow of ecosystem)是指能量通过食物网络在系统内传递和耗散的过程,始于生产者的初级生产,止于分解者功能的完成。整个过程包括着能量载体形态的转变,能量的转移、利用和耗散。生态系统的能量流动也可看做是动能和势能在系统内的传递与转化的过程。因为,生态系统中的能量也包括动能和势能两种形式,生物与环境之间以传递和对流的形式相互传递与转化的能量是动能,包括热能和光能;而通过食物链在生物之间传递与转化的能量就是势能。

生态系统是通过食物关系使能量在生物间发生转移的。初级生产者将太阳能转化为化学能储存在光合作用合成的有机物中,初级生产产品是进入生态系统中可利用的基本能源。它们作为消费者和分解者的食物被利用,从而保证了生态系统功能的发生。

生态系统每一营养层次中的生物所含的能量可能有四个去向:①由生物本身的代谢活动以热能的形式损耗;②生物死亡后被分解者所分解;③未被分解,以有机物形式储积起来;④剩下部分(约 10%~20%)为高一级营养层次的生物所消费。所以,无论是初级生产过程还是次级生产过程,能量在传递或转变中总有一部分被耗散。研究表明,食草动物的摄食量中仅有 10%~20%转变为次级生产量。食肉动物捕食食草动物,能量又发生一次转移而进