

农业

微生物生态学

NONGYE

WEISHENGWU SHENGTAIXUE

刁治民 周富强 高晓杰 朱锦福 张 艳 编著



西南交通大学出版社
[Http://press.swjtu.edu.cn](http://press.swjtu.edu.cn)

内 容 简 介

农业微生物生态学结合现代生态学研究 and 微生物特点,从微生物的生态学角度阐述了研究微生物生态学的基本方法,微生物的基础生态学理论,自然环境中的微生物种类与分布,以及极端环境微生物学;自然环境中的微生物之间以及微生物与生物之间的生态关系,微生物种群和微生物与动植物群落的相互作用、微生物的生物地化循环问题、微生物与环境污染之间的相互作用、微生物生态学原理与能源和清洁生产关系、微生物生态学与环境保及环境处理。重点论述微生物与植物之间的生态关系,微生物在植物营养元素循环中的作用以及对植物的影响,阐明微生物在植物生产中的重要作用;污染环境中的微生物生态学及微生物生态学在生产实践上的具体应用。

本书内容丰富实用,突出了创新性和实践可应用性。适合微生物学、生态学、环境科学以及生物科学、生物技术、生物工程、农学等相关专业的本科生、研究生及教师参考;也可供从事农业、医药、食品工程、水污染处理、水域管理、环境保护、生态学和环境管理的科技工作者参考。

图书在版编目(CIP)数据

农业微生物生态学 / 刁治民等编著. —成都:西南交通大学出版社, 2008.2
ISBN 978-7-81104-771-4

I. 农… II. 刁… III. 农业科学:微生物生态学 IV. S182

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第012476号

农业微生物生态学

刁治民 周富强 高晓杰 朱锦福 张艳 编著

*

责任编辑 刘婷婷

特邀编辑 瞿玲

封面设计 翼虎书装

西南交通大学出版社出版发行

(成都二环路北一段111号 邮政编码:610031 发行部电话:028-87600564)

<http://press.swjtu.edu.cn>

四川锦祝印务有限公司印刷

*

成品尺寸:210 mm×285 mm 印张:26.125

字数:906千字

2008年2月第1版 2008年2月第1次印刷

ISBN 978-7-81104-771-4

定价:49.50元

图书如有印装问题 本社负责退换
版权所有 盗版必究 举报电话:028-87600562

前 言

生命科学是 21 世纪的前沿科学，需要一大批基础理论扎实、实验动手能力强、有较强的应变能力和较好的协作性的高级人才。为了迎接新世纪生物高新技术发展的挑战，使生命科学跻身于一流水平，同时，也为更进一步促进农业生物技术研究成果与生产实践紧密结合，本着前沿、实用，创新的目的，我们在有关部门的支持下，编写了《农业微生物生态学》。

微生物生态学（Microbial Ecology）是研究微生物与周围生物和非生物环境之间的相互关系，研究微生物在自然环境中的作用和对环境因素的影响的学科。其内容主要涉及微生物在自然界中的分布，微生物在环境、生态系统中的功能，微生物在农业环境保护中的应用等。

目前，全球正面临着人口膨胀、资源紧缺、污染加剧的现状，这些不但使我们的经济和社会发展面临着严峻的考验和压力，同时，农业的发展也提出了现代化的要求。生命科学和生物技术的发展及其在农业领域中的应用，给农业的发展带来了深远的甚至是革命化的变化，促进了农业生产力的提高，出现了良好的应用前景和巨大效益。

由于环境污染日益严重，给人类生存、生产和生态平衡构成了严重的威胁。而微生物无处不在，个体微小，生理和代谢功能多样，能在各种环境中代谢并清除几乎所有的天然和人工化合物，是污染环境自净的主力军。如何利用微生物保护和改进环境质量以及极端环境中的微生物是目前研究的热点，并重点突出微生物在污染环境和极端环境中的作用。

人类活动所涉及的岩石圈、大气圈和水圈构成了全球最大的生态系统。作为生态系统中生产者和分解者的重要角色，在各大生态系统中微生物的活动是不可或缺的。无论是在经典生态学领域还是现代航天领域、医学领域和分子生态学领域，微生物生态学研究均具有巨大的潜力，目前对于微生物生态学的研究主要偏重于农业、石油工业、生物医药、食品加工业和环境污染处理等行业，其他全新领域微生物生态学的研究有待拓展或深化。

微生物生态学既是生命科学中基本功能群和分类单位群结合的微生物学范畴，又是研究基于阐明了微生物分类问题后相关生态学问题的一门学科。微生物学和生态学的学科交叉和应用构成了微生物生态学研究的基本范畴和任务，而其所属的各种不同类型的生态系统均离不开微生物活动的足迹。结合现代生态学研究 and 微生物特点，本书从微生物的生态学角度阐述了微生物的基础生态学理论、微生物种群和微生物与动、植物群落的相互作用、微生物的生物地化循环问题、微生物与环境污染物之间的相互作用、微生物生态学原理与能源和清洁生产关系、微生物生态学与环境处理、微生物与矿产形成及生物冶金、微生物生态学在农业生产和水域生态学上的具体应用。

本书介绍了近年来国内外最新的微生物生态学研究进展和研究成果，比较全面地反映了现代微生物生态学的各个方面。可以作为微生物学、生态学、环境保护和环境医学专业的本科学士、研究生教材，也可作为生命科学各专业教学用书或参考书。并且可供从事微生物学、生态学和环境保护的农业、医药、食品工程、水污染处理和水质管理的科技工作者参考。

微生物生态学为微生物学专业研究生的专业基础课，同时也可作为相关专业研究生的选修课。

通过本课程的学习，使学生能掌握微生物生态学的基本概念和研究方法，掌握微生物生态学原理和研究技术，微生物在环境生态保护、经济可持续发展中的重要意义，为进一步学习微生物学、生态学和从事相关专业研究打下基础，有利于后续的教学，同时有利于提高学生分析和解决问题的能力。笔者相信，随着生命科学和生物技术的发展，《农业微生物生态学》必将对高等教育和研究生培养起到积极作用；对于加快农业生物技术在农业领域中的转化和应用，推动农业科技和农业的进一步发展发挥应有作用。

本书是在参阅大量文献资料，结合多年的教学和科研成果的基础上完成的。全书共分九章，其中第三、

四、五、六、七由刁治民编写；第一、二、八、九章由周富强、高晓杰、朱锦福、张艳编写，全书由刁治民定稿。

值此书出版之际，特向被本书引用为参考资料的专家及作者表示衷心的感谢。

在本书编写过程中，承蒙中科院院士陈文新教授给予指导和鼓励，青海师范大学有关领导给予了热情的支持和资助。西南交通大学出版社也为本书的出版给予了很大的帮助。在此一并致以衷心的感谢。

由于微生物生态学和生态学科学发展和现代生命科学实验技术手段的完善，参考文献、资料和研究成果层出不穷，新知识、新技术和新方法不断出现，所涉及的内容存在多学科交叉的问题，限于作者知识水平，本书内容疏漏和不足在所难免，恳请有关专家、学者指正，以使内容更加完善。

刁治民

2007年7月

目 录

第一章 绪 论	1
第二章 微生物生态系统	7
第一节 微生物生态系统及特征	7
第二节 环境(生态)因子与生长抑制	15
第三节 微生物群落的发展与演替	17
第四节 微生物的细胞行为	22
第五节 微生物的群体增长	24
第六节 微生物生态系统的特点	29
第七节 微生物与环境的关系	32
第三章 微生物在自然界的分布及作用	34
第一节 土壤微生物生态	34
第二节 水体微生物生态	60
第三节 空气中微生物生态	73
第四节 工农业产品中的微生物	76
第四章 极端环境微生物	83
第一节 概 述	83
第二节 高温环境中的微生物——嗜热菌	83
第三节 低温环境中的微生物——嗜冷微生物	87
第四节 酸性环境中的微生物——嗜酸菌	89
第五节 碱性环境中的微生物——嗜碱菌	91
第六节 高盐环境中的微生物——嗜盐菌	92
第七节 高压环境中的微生物——嗜压菌	98
第八节 辐射环境中的微生物——抗辐射微生物	99
第九节 不可培养的微生物	100
第五章 微生物种群的生态关系	101
第一节 微生物群体内的相互作用	101
第二节 微生物之间的生态关系	103
第三节 微生物与植物的生态关系	108
第四节 植物内生微生物	149
第五节 土壤杆菌与植物肿瘤	161
第六节 微生物与植物病害的生态关系	168
第七节 微生物与动物的生态关系	185
第六章 微生物在植物营养元素循环中的作用	190
第一节 概 述	190
第二节 微生物在碳素循环中的作用	191
第三节 微生物在植物氮素循环中的作用	199
第四节 微生物在硫素循环中的作用	224

第五节	微生物在植物磷素循环中的作用	229
第六节	微生物与钾的转化	231
第七节	微生物在植物铁营养中的潜在作用	232
第八节	微生物在植物其他营养元素循环中的作用	236
第九节	物质循环与土壤肥力	239
第十节	微生物代谢产物对环境的污染	243
第七章	微生物与污水环境治理生态学	254
第一节	概 述	254
第二节	废水好氧微生物处理技术	257
第三节	废水厌氧微生物处理技术	287
第四节	微生物脱氮技术	299
第五节	微生物除磷技术	307
第六节	水体有机污染物的联合处理技术	318
第七节	水产养殖水体的生物处理技术	321
第八节	水体污染物的微生物生态处理技术	327
第八章	微生物与固体废物生态学	331
第一节	微生物堆肥的基本概念	331
第二节	有机废弃物稳定化的生物学原理	332
第三节	固体废弃物的堆肥处理技术	334
第四节	畜禽粪便处理与资源化工程	348
第九章	微生物与污染物的生态关系	361
第一节	微生物降解转化物质的巨大潜力	361
第二节	微生物降解动力学	362
第三节	人工合成有机化合物的微生物降解	364
第四节	金属的微生物转化	377
第五节	影响微生物降解转化作用的因素	390
第六节	石油的微生物降解	393
第七节	煤的微生物脱硫与降解	396
第八节	细菌冶金	399
第九节	微生物脱臭	403
第十节	降解质粒	408
第十一节	治理污染基因工程菌	409
参考文献		411

第一章 绪 论

一、基本概念

生态学 (ecology), 是研究生物与其周围生物和非生物环境之间相互关系的一门科学。其中非生物环境 (abiotic environment), 指非生命物质, 如土壤、岩石、水、温度等; 生物环境 (biotic environment) 包括微生物、动物、植物。

(一) 生态学的定义

生态学一词最早是由德国生物学家黑格尔 (Ernest Haeckel) 于 1869 年提出。他当时认为生态学是动物与有机环境和无机环境的全部关系, 并把生态学定义为“自然界的经济学”。其英文和经济学 (economics) 是相同的, 均来自于希腊文, 表示家庭居处或环境的意思, 可见, 生态学与经济学、家庭、环境等有着密切的关系。后来有的学者把生态学定义为“研究生物或生物群体与其环境的关系, 或生活着的生物与其环境之间相互联系的科学”, 也有人将生态学称为环境生物学 (environmental biology)。

我国著名生态学家马世骏把生态学定义为“研究生物与环境之间相互关系及其作用机理的科学”。生态学中所说的生物包含植物、动物和微生物。由于人类环境问题和环境科学的发展, 生态学也扩展到人类生活和社会形态等方面, 并把人类这一生物种也列入生态系统中, 来研究并阐明整个生物圈内生态系统的相互关系问题。

生物的生存、活动、繁殖需要一定的空间、物质与能量。生物在长期进化过程中, 逐渐形成对周围环境某些物理条件和化学成分, 如空气、光照、水分、热量和无机盐类等的特殊需要。各种生物所需要的物质、能量以及它们所适应的理化条件是不同的, 这种特性称为物种的生态特性。

任何生物的生存都不是孤立的, 如同种个体之间有互助, 有竞争; 植物、动物、微生物之间也存在复杂的相生相克关系。人类为满足自身的需要, 不断改造环境, 环境反过来又影响人类。

随着人类活动范围的扩大与多样化, 人类与环境的关系问题越来越突出。因此近代生态学研究的范围, 除生物个体、种群和生物群落外, 已扩大到包括人类社会在内的多种类型生态系统的复合系统。人类面临的人口、资源、环境等几大问题都是生态学的研究内容。

生态学原是一门研究生物与其生活环境相互关系的科学, 是生物学的重要分科之一。初期主要研究植物, 后来逐渐涉及动物和人类。目前, 随着现代科学技术的发展并向生态学的不断渗透, 生态学有了新的内容和动力, 成为多学科、较活跃的科学领域之一。

生态学的基本内容按所研究的生物类别分类, 有微生物生态学、植物生态学、动物生态学、人类生态学等。

按生物系统的结构层次分类, 有个体生态学、种群生态学、群落生态学、生态系统生态学等。

按生物栖居的环境类别分类, 有陆地生态学和水域生态学。其中陆地生态学可分为森林生态学、草原生态学、荒漠生态学等, 而水域生态学可分为海洋生态学、湖沼生态学、河流生态学等。还有更细的划分, 如植物根际生态学、肠道生态学等。

生态学与非生命科学相结合的有数学生态学、化学生态学、物理生态学、地理生态学、经济生态学等; 与生命科学分支相结合的有生理生态学、行为生态学、遗传生态学、进化生态学、古生态学等。应用性分支学科有: 农业生态学、医学生态学、工业资源生态学、环境保护生态学、城市生态学等。

生态学的一般规律大致可从种群、群落、生态系统和人与环境的关系四个方面说明。

在环境无明显变化的条件下, 种群数量有保持稳定的趋势。一个种群所栖居的空间和资源是有限的, 只能承载一定数量的生物, 承载量接近饱和时, 如果种群数量 (密度) 再增加, 增长率则会下降乃至出现负值, 使种群数量减少; 而当种群数量 (密度) 减少到一定限度时, 增长率会再度上升, 最终使种群数量达到该环境允许的的稳定水平。对种群自然调节规律的研究可以指导生产实践。例如, 制定合理的渔业捕捞量和林业采伐量, 可保证在不伤及生物资源再生能力的前提下取得最佳产量。

（二）微生物生态学

1. 微生物生态学的定义

微生物生态学（microbial ecology），是指研究微生物与周围生物和非生物环境之间相互关系的一门学科。它是一门年轻的学科。微生物生态学一词自 1960 年初才常被使用，且在以后开始快速发展。微生物在下列问题上，提供了解决之道：① 废水、废弃物处理；② 缓和氮肥短缺；③ 低级矿之利用；④ 生物防治；⑤ 副产品、废弃物之处理产生食物、饲料、能量。

2. 微生物生态学研究的内容

微生物生态学既是生命科学中基本功能群和分类单位群结合的微生物学范畴，又是研究基于阐明微生物分类问题后相关生态学问题的一门学科。微生物学和生态学的学科交叉和应用构成了微生物生态学研究的基本范畴和任务：

- （1）微生物生态学研究使用的是传统的和现代分子生物学方法。
 - （2）在自然环境中的微生物种类、分布及随着不同的环境条件变化而发生的变化规律。
 - （3）在极端环境中微生物的种类和它们所起的作用，在极端环境中微生物的生命机理。
 - （4）在自然界微生物之间的关系，微生物与动物、植物之间的关系，这些相互关系对自然界的影响和环境因素对这些相互关系的影响。
 - （5）在自然环境中，微生物的代谢活动对自然界的影响，环境条件的变化对微生物代谢活动的影响。
 - （6）污染环境的微生物生态学重点研究污染环境中的微生物学，主要包括污染物对某些微生物的毒性，微生物对污染物的抗性和抗性机理，微生物对污染物的降解作用，污染物的微生物降解与遗传基因的相互关系，环境条件的变化对污染物降解的影响，自然界微生物群落和实验室遗传构建的特殊污染物降解菌在净化废气、废水、固体废物和污染物的应用，自然环境中某些微生物本身以及某些微生物的代谢产物对环境的污染等。
 - （7）由于微生物生态学是研究自然界中的微生物，各种生物因素和非生物因素的相互作用十分复杂，所以必须用一些实验模型和数学模型，并借助计算机来研究和描述这些相互作用。
- 微生物生态学也可以称为环境微生物学，但是在内容的重点和所包括的范围方面它们是有区别的：微生物生态学研究非污染环境 and 污染环境中的微生物学；而环境微生物学讨论的重点是污染环境中的微生物学，主要包括污染物对微生物的影响，微生物的活动对污染物的降解，转化和环境质量变化的影响。

（三）微生物生态学

微生态学（microecology）是研究细胞水平的生态学，是微观层次的生态学，研究对象侧重于有生命宿主，侧重点在于植物、动物、人类宿主，研究正常微生物菌群与宿主相互关系的生命科学。而微生物生态学是宏观层次的生态学，研究对象是微生物与环境的相互关系，侧重于微生物。

（四）研究微生物生态学的目的

研究微生物生态学的目的是通过研究，充分了解和掌握微生物生态系统的结构和功能，了解环境条件的变化对自然界微生物群体生长和代谢的影响，了解微生物在自然界中所起的作用，更好地发挥微生物的作用，充分开发和利用自然界中的微生物资源，并保护好微生物基因资源，利用有益微生物为人类服务，为提高生产效率、保护人类健康和保护生态平衡发挥微生物的最佳作用。

二、微生物生态学的发展

20 世纪的前半叶，微生物学家对于生态学少有兴趣，即使当时的普通生态学家在针对分解、腐朽及营养循环之过程，亦常加以忽略。

- （1）1879 年，瓦林顿（Warington）揭示硝化作用分两个阶段。
- （2）1890 年，维诺格拉斯基（Winogradsky）分离获得硝化细菌纯培养，揭示微生物新类群——化能自养细菌。创造了硅胶平板分离法、土壤埋片法、土壤微生物测数法、选择性培养基加富培养以及土壤染色法等，成为这一领域的奠基人。
- （3）1927 年，瓦格斯曼（Waksman）所著《土壤微生物学原理》一书出版。

(4) 1934 年, George Francis Gause 设计了一个生态学经典实验, 发现纤毛虫和原生动物之间存在捕食关系。研究 *Didinium nasutum* 原生动物捕捉 *Paramecium caudatum* 关系。

(5) The in situ observation of microorganisms, the contact slide.

(6) 1960, Ronald Atlas & Richard Bartha 开始研究海洋石油污染物的生物分解 (生物复育, 生物矫正 bioremediation)。

(7) Biomagnification of DDT, PCBs, mercury and other pollutants.

(8) 1970 年, 发生了能源危机, 导致对于再生之共生性和非共生固氮作用的研究。

(9) 1979 年, Robert Hungate 研究反刍动物瘤胃中微生物后发现微生物群体之间存在非常复杂的相互关系。

(10) 1981—1982 年, Martin Alexander 发现许多人工合成的化合物完全不能被微生物降解。

(11) Space exploration 刺激了人类对于极地微生物的研究 (如 the cold, dry valleys of Antarctica)。

(12) Thomas Brock 研究温泉 (hot springs) 微生物。

(13) Holger Jannasch 研究深海热出口 (deep-sea thermal vents) 的微生物。

(14) 过去的 30 年, 在研究微生物生态系统 (microbial ecosystem) 的构造及功能的方法学 (methodology) 上有较大进展。

在国内, 20 世纪 30 年代末, 张宪武、陈华癸、樊庆笙将国外新知识介绍进来, 目前在微生物资源调查、环境治理等方面已取得较大进展。

三、研究微生物生态学的意义

微生物生态学研究有助于破解微生物基因的进化, 基因和菌代谢调控及生物对环境的适应机理等问题。利用 PCR 技术研究自然样品中的微生物和有关基因有利于发现微生物的多样性, 保护微生物资源和基因库, 因此研究微生物生态学有着重要的理论和现实意义。

(1) 微生物资源丰富, 许多环境的微生物资源尚待调查和开发。特殊生理功能的微生物和特殊用途的基因是国家重要的生物资源, 开展我国各种自然环境中微生物生态调查, 对于发现新的、在环境保护方面有重要用途的微生物菌株有重要的实际意义。

(2) 微生物在自然界中参与元素物质循环、转化、分解, 对于保持生态平衡有重要作用。

微生物在自然界中参与了 C、H、O、P、S、Fe 等物质的转化和循环作用, 某些微生物在纤维素降解、氮气固定和某些特殊化合物的分解方面起独特的作用。自然界还存在着特殊的环境, 如低温、高温、强酸、强碱、高渗透压、高辐射等极端环境, 在这些特殊环境中的微生物代谢活动对于保持局部的生态平衡具有重要意义, 而且这些微生物还是研究微生物抗极端环境的良好材料。更为重要的是这些微生物在发酵工业、环境保护和日常生活中具有特殊的用途。

(3) 在土壤环境中, 微生物对于提高土壤肥力, 促进作物生长, 抗病原菌的侵入和提高植物产量有重要作用。在农田中, 微生物还可用于污水、农作物秸秆、有机垃圾等废弃物的转化和净化。同时, 微生物还可以降解农药, 保护农田环境。

(4) 由于微生物个体小, 有强大的比表面积, 生理生化功能多样, 代谢能力强, 易适应新环境, 遗传功能易于改造, 反应速度快, 故能彻底净化环境污染物, 不会造成二次污染。近年来, 生物工程技术的不断发展, 使构建新的具有降解多种污染物的微生物菌株成为可能, 为更有效地净化日益严重的环境污染带来了新的希望。

(5) 许多环境污染物或微生物转化某些污染物产生的一些中间产物对人体和生态平衡危害较大, 有些污染物和它们的代谢中间产物甚至可以导致人体细胞癌变, 所以开展对污染生态中微生物降解污染物的途径、降解程度和降解速率的研究, 可给环境医学和环境保护的对策提供理论依据。

(6) 控制人、动、植物病原菌的生长和扩散。自然界中有许多微生物是人、动物、植物的病原菌, 有些微生物在自然界生长和代谢过程中产生毒物或改变自然条件, 不利于生物的生长和生存, 这样的微生物应设法控制它们的生长和扩散。

(7) 由于科学技术的发展以及人们生活和工作的需要, 排放到自然环境中的人工合成化合物越来越多, 这些化合物在自然界的停留时间应受到高度重视。在许多发达国家, 每种人工合成化合物排放到自然界之前, 都应经过微生物降解实验的研究, 以判断该化合物将对环境产生的影响。

(8) 利用微生物检测环境省时, 省力, 费用低, 用途广。

四、微生物在生态环境研究中的应用

(一) 研究微生物的四大基本技术

研究微生物的四大基本技术是: ① 显微镜观察技术; ② 无菌技术; ③ 纯种分离技术; ④ 纯种培养技术。

(二) 微生物生态学研究内容和应用

1. 污染环境微生物学研究

(1) 污染环境微生物学主要研究污染物、微生物、环境三者之间的关系和作用规律, 由此制定污染环境的治理措施和预防环境污染的措施, 主要包括以下几方面: ① 研究污染物对污染环境中微生物群落的组成和功能的影响; ② 研究污染环境中污染强度与微生物群落特性的关系, 确定污染强度对环境质量和功能的影响; ③ 研究微生物在污染环境中的作用, 即微生物对受损环境的修复能力, 以确定环境的自净容量, 并由此确定保持环境原有功能条件下环境的允许污染负荷, 为环境管理提供科学依据; ④ 对新的污染物及其中间产物, 尤其是其中的难降解、有毒有机物进行生物转化和降解, 以及降解所需环境条件, 为确定生产废物排入自然环境的可行性作出评价, 并为选择合适的排放途径和处理方法提供科学依据。

(2) 污染环境微生物学研究的目的是: ① 为环境微生物监测和评价提供依据; ② 为制定强化污染环境自净能力的措施提供依据; ③ 为促进环境的良性循环和制定有效的管理措施提供依据; ④ 为环境污染控制的研究和实践提供方法和技术。

2. 污染物在环境中的转化和归宿研究

污染物在环境中的转化和归宿主要研究以下内容: ① 污染物微生物转化作用和途径; ② 微生物转化速率与环境条件的关系; ③ 污染物被微生物转化和降解产物的特性和环境效应等。

3. 废物处理微生物学研究

废物处理微生物学主要对废物生物处理研究较多, 主要如下所列:

(1) 废物生物处理微生物生态学研究成果: ① 生化反应单元中营养平衡研究。废水生物处理的目的是去除废水中的有机物。② 微生物群落研究。生化单元的处理能力与微生物群落大小和种群组成有关, 所以在厌氧处理的研究中产生了多种提高单位体积微生物生物量的新方法, 如厌氧流化床、厌氧固定生物膜法; 在好氧生物处理法中, 加入特效菌种, 改变群落种群组成。二者都提高了设备的废水处理能力, 提高了处理过程对难降解、有毒有机物的净化效果, 扩大了废水生物处理的范围。③ 改革运行工艺。

(2) 生物工程菌研究。

(3) 生物处理运行检测技术研究: ① 生物污泥中细菌数量检测法, 目前还未形成有效的标准方法。② 活性污泥膨胀微生物学和发生机理检测法, 虽未彻底解决, 但是已经为活性污泥膨胀的控制提供了重要依据。③ 生物污泥活性检测技术, 目前 ATP 含量、酶活性测定和呼吸耗氧速率检测法的研究已日趋成熟。

(4) 微生物生理特性与工艺条件确定。在用微生物法去除废水中氮、磷的工艺研究中, 根据氮循环的原理, 掌握它们的特性, 控制适当的条件是成败的关键。而磷的去除则是根据某些微生物对磷的摄取、富集和释放需要不同环境条件而设计的。因此, 要使其高效运行就必须了解它们的生理特性和所需环境条件, 由此达到高效低耗。

4. 环境微生物监测技术

微生物具有生理类型多、世代周期短、适应性强、分布广等特性, 因此, 非常适合作为环境监测指标生物。近年来除常规微生物监测技术外, 在病原体指示生物和环境毒理学监测方面有了较大发展。

(1) 病原体指示生物: 原用大肠杆菌, 近年来有关科学家在寻找新的指示生物中发现细菌噬菌体与人、动物和植物病毒有着相似的特性, 而且对操作人员安全无害, 但至今未能标准化。

(2) 微生物环境毒理监测: 环境毒理监测主要是鉴别有毒有害化合物、工业废水、固体废弃物和受污染环境的毒性, 以及对生物群落功能和对人体的危害。这方面多年来一直以高等动物, 如鱼、鼠、兔、猫等为试验生物, 试验周期长、费用大, 易受环境和季节等因素影响, 所以有关工作者将目光转向了微生物。

在三致(致癌、致畸、致突变)物质监测方面出现了一批微生物学新方法, 如鼠伤寒沙门氏菌试验(即 Ames

试验)、大肠杆菌回变试验。其中 Ames 试验法已成为标准方法。

在毒性试验方面也出现了一批微生物学新方法,如发光细菌法、脱氢酶活性法、硝化细菌法、藻类和原生动物法、微生物分子生物学方法等。其中发光细菌法已成为标准方法。

五、生态环境微生物学的内容和任务

(一) 生态环境微生物学的内容

(1) 微生物学的基础知识:① 微生物所包括的生物类群及其特征;② 微生物的生理特性和代谢规律;③ 微生物的遗传特性及其遗传变异与环境条件的关系;④ 微生物生态学原理和研究方法;⑤ 微生物的生长和生长测定技术;⑥ 微生物在自然界物质循环中的作用。

(2) 正常自然环境中的微生物种类、分布及其随着不同的环境条件变化而发生的变化规律。

(3) 极端环境中的微生物种类和它们所起的作用。

(4) 研究各营养元素循环中起作用的微生物类群、转化功率以及环境条件对它们的影响。

(5) 自然界中微生物与微生物、微生物与动植物之间的相互关系,以及这些相互关系对自然界的影响,环境条件的变化对这些相互关系的影响。

(6) 环境污染微生物净化——利用微生物处理环境中的污水、污染物及人工合成的有毒化合物。

这是一个污染微生物生态学问题,其内容主要有:① 污染物对污染环境中微生物群落的影响;② 微生物对污染物净化能力与污染物种类和污染强度的关系;③ 了解对典型污染物具有较强净化能力的微生物的特性和强化环境自净能力的措施。掌握污染物、环境和微生物三者之间相互关系和相互作用的规律和技术。

(7) 微生物与废物生物处理。废物生物处理是强化了自然净化过程,是利用微生物对污染物较强的代谢能力使废物无害化的过程。实际上是废物处理微生物生态学问题。

(8) 微生物环境污染主要有三类:① 微生物病原体污染,这是最重要的微生物污染,如水体常由于生活污水、医院污水、畜禽食品加工废水、皮革加工废水等污染,含有致病的沙门氏菌、大肠埃希氏菌、志贺氏菌、霍乱弧菌等多种病原微生物。② 微生物代谢产物的污染,主要包括微生物代谢产生的毒素,如细菌产生的肉毒梭菌毒素、肠毒素,放线菌产生的放线菌素,真菌产生的黄曲霉毒素,藻类产生的毒素等,以及污染物微生物降解、转化产物,如亚硝酸、硫化氢、甲基汞和由 DDT 转化成的 DDD 等。③ 微生物引起的材料腐败和腐蚀,它们不仅侵害大多数有机物,而且侵害金属、水泥、电子元件和玻璃等。因此,了解微生物对环境和人类生活资料、生产资料及人体健康的危害和防治技术是必要的。

(9) 环境微生物监测,包括:① 常规微生物检测原理、技术;② 监测结果在环境检测评价中的应用。

(二) 微生物生态学课的任务

(1) 了解环境微生物学在生态环境科学研究和实践中的应用原理和技术。

(2) 了解微生物生态学的发展概况和趋势。

(3) 微生物生态学的核心问题是微生物与环境的相互关系,不同生态环境中微生物的组成和生态功能不同。

(4) 微生物主要是作为分解者在生态系统的能量流动、物质循环和信息传递中发挥重要作用。

(5) 存在于土壤、水体、动植物体和人体等生境的微生物群落是环境条件选择和生物适应、进化的结果,也在各自的生境中发挥着独特的生态功能。

(6) 极端环境微生物具有特定的生态分布、特有的适应机制和特别的资源潜力。

(7) 微生物在污染环境的修复和三废处理中起重要作用,进一步提高微生物的降解活性是微生物生态学面临的主要课题。

(8) 微生物学的检测技术和微生物生态学的研究方法。

(三) 学习微生物生态学的意义

(1) 我国国土面积大,微生物资源十分丰富,开展微生物生态调查对于发现新的在工农业、食品、医药和环境保护方面有重要用途的微生物菌株有重要的实际意义。

(2) 微生物在自然界中参与氮、磷等元素和物质循环、转化、分解,对于保持生态平衡有重要作用。

(3) 微生物对于提高土壤肥力、抗病原菌以及农作物产量有着相当大的作用。

(4) 利用混合微生物群体净化环境，通过生物工程技术构建新的具有降解多种污染的微生物菌株。

(5) 开展污染生态中微生物降解污染物的途径、降解程度和降解速率的研究，为环境医学和环境保护提供理论依据。

(6) 控制人和动、植物病原菌的生长和扩散。

总之，研究微生物的生态有着重要的理论意义和实践价值。例如，研究微生物的分布规律，有助于开发丰富的菌种资源，防止有害微生物的活动；研究微生物间及其与他生物间的相互关系，有助于发展新的微生物农药、微生物肥料以及积极防治人的疾病和动、植物病虫害，也有利于发展食品混菌发酵、序列发酵和生态农业；研究微生物在自然界物质循环中的作用，有利于阐明地球进化和生物进化的原因，也可促进探矿、冶金、保护环境、提高土壤肥力以及开发生物能（沼气）等各项生产事业的发展。

六、学习方法

(1) 重视微生物相关规律的研究，发挥微生物最佳的功能。

(2) 学习生命科学的相关学科基础。

(3) 注意阅读和收集国内外的最新资料，了解发展的前沿动态，开阔思路，勇于创新。

第二章 微生物生态系统

微生物，尤其是原核微生物是地球上出现最早的细胞生物，它们不但是高等生物的始祖，而且高等生物在进化过程中总是得到它们的帮助，同时也受到它们的竞争和危害。微生物还是许多地球化学过程的积极参加者，对于一个稳定生态系统的形成及其稳定状态的保持都起着重要的作用。

因此，研究微生物在自然环境中的行为曾被许多微生物生态学家视为在此领域中微生物学研究工作的最终目的。然而，由于近代对微生物学各分支学科（如微生物分类学、微生物生物化学、微生物应用、微生物生理学和遗传学等）的深入研究，以及微生物学应用范围的迅速扩展，这一最终目的已经被打破。也就是说人类的进步、科学（尤其是生命科学和环境科学）的发展，不断赋予微生物学新的使命。

微生物生态学是生态学和微生物学的分支学科，也是环境科学的分支学科。生态学研究处于同一生态系统中的生物之间的相互关系以及它们在生态系统中的功能；研究生物与非生物的环境因子之间的相互作用规律，所以对一个生态系统的深入研究是一个庞杂的系统工程。它需要多学科（如生物学各分支学科的生物学家、物理学家、化学家、环境学家、地理和气象学家）专家们互相协作。这不仅因为在一个生态系统中一般都生存着多种生物，各种生物之间存在着非常复杂的相互关系；也因为在一个生态系统中，物理化学因素的多样性、相互作用的复杂性和动态性。微生物生态学主要研究：① 各类生态系统中微生物的分布，微生物种间的相互关系和微生物与其环境中物理化学因子之间的相互关系；② 因为在多数生态系统中，微生物总是与高等生物相伴而生的，所以也必须研究微生物与高等生物之间的相互关系；③ 微生物在生态系统中的功能；④ 环境污染对微生物的影响，以及微生物对污染物的净化作用；⑤ 环境的微生物监测和评价的原理和技术；⑥ 污染控制的微生物学方法。

自然环境中的微生物一般都不是单独存在的，存在个体、种群、群落和生态系统从低到高的组织层次中，下面对其进行简单介绍：

（1）生境（habitat）：生境是指发现有生物的物理区域（physical location）。在这一区域中的物理化学特征可以影响在这一区域中生活的微生物生长、代谢活力，生物与生物之间的相互作用和微生物的生存。对于微生物来说，不仅要考虑整个生境的物化特性，还要考虑微生境中具体的微观气候。

（2）群体（population）：具有相似特性和生活在一定空间内的同种个体群，是组成群落的基本组分。

（3）群落（community）：在一定区域或一定生态环境内，各种生物群体构成的一个生态学结构单位，群落中各生物群体之间存在各种相互作用。

（4）生态系统（ecosystems）：生物群落和它们所生活的非生物环境结合起来的一个整体。生态系统是生物圈的组成单元，生物圈内的任何一个相对完整的自然整体都可以被看做为生态系统，如一个池塘、一片森林、一个污水处理池，等等。

（5）生物圈（biosphere）：地球上所有生物及其所生活的非生命环境的总称。

（6）生态学（microbial ecology）：是生物科学的一个重要分支，涉及生物之间、生物与非生物之间的相互作用。微生物生态学是研究微生物群体——微生物区系或正常菌群与周围环境的生物和非生物因素的相互关系的科学。

（7）微生物区系（microflora）：指在一定环境中，微生物的种类和数量组成的综合体现。

第一节 微生物生态系统及特征

一、生态系统

在自然界，微生物总是与生物共处于一个生态系统中，因此，对一个生态系统的研究包括：① 由天文地质过程所形成的物理因子，如能量来源（太阳辐射），气候、温度、湿度状况，背景辐射值等及其变化。② 参加

物质环境的无机物，如与生命活动关系密切的几十种元素和由它们组成的无机物的丰度及其变化规律。③ 连接非生命物质和生命物质的有机物，如蛋白质、核酸、糖类、脂类、氨基酸等的丰度及其变化规律。④ 以绿色植物、藻类为主的初级生产者，以动物为主的消费者和以菌类为主的分解者等生物间的相互作用和功能。

(一) 生态系统的概念

生物自从在地球上出现以来就与自然环境有着密不可分的关系，并形成了相互依存、相互制约的关系。地球上的生物十分庞杂，其中有动物 2 000 万种以上、植物 30 多万种、微生物 10 多万种。这些生物通过新陈代谢不断与环境进行着物质的交换、能量的传递和信息的交流，从而引起环境与生物自身的变化。生物在长期的进化中对环境具有依附性和适应性，但生物也不是被动地适应环境，具有其本身独特的遗传特性。生物受到环境的影响，反过来又作用于环境。

一个生物物种在一定的范围内所有个体的总和称为生物种群；在一定自然区域的环境条件下，许多不同种的生物相互依存，构成了有着密切关系的群体，称为生物群落。由于环境条件的千差万别，地球上出现了各种各样的生物群落（森林、草原、荒漠等），而特定的生物群落又维持了相应的环境条件。一旦生物群落发生变化，也会影响到环境条件的变化。因此，人们把生物群落与其周围非生物环境的综合体，称为生态系统，它是生命系统 and 环境系统在特定空间的组合。目前，人类所生活的生物圈内有无数大小不等的生态系统。

(二) 生态系统的组成

生态系统是由四个部分组成的：

1. 生产者

生产者主要是绿色植物，凡能进行光合作用制造有机物的植物种类，包括单细胞藻类，均属于生产者。还有一些能利用化学能把无机物转化为有机物的化能自养型微生物，如蓝细菌和光合细菌，也应列入生产者之列。

2. 消费者

消费者主要是动物，又分为一级消费者（如草食性动物）、二级消费者（如肉食性动物）……

3. 分解者

分解者指各种具有分解能力的微生物，也包括一些微型动物，如鞭毛虫、土壤线虫等。

4. 无生命物质

无生命物质指生态系统中的各种无生命的无机物、有机物和各种自然因素（如土壤、空气、水等）。

以上四个部分构成了一个有机的统一整体，相互之间沿着一定的途径，不断地进行着物质与能量的交换，在一定条件下，保持着暂时的相对平衡。由于自然界的环境条件是十分复杂的，而且处在不断的变化的状态中，所以不同环境中的微生物群落组成和各种群体之间的比例是不同的，即使在同一环境中，微生物群落组成和各种群体之间的比例，也会随着环境的变化而变化。图 2-1 所示为生态系统的组成成分及其相互关系图。

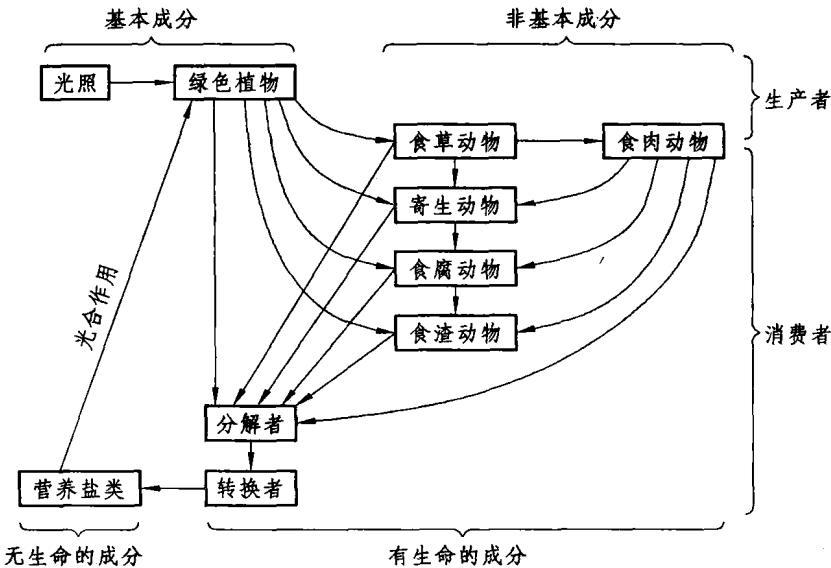


图 2-1 生态系统的组成成分及其相互关系

(三) 生态系统的结构

构成生态系统的各组成部分, 各种生物的种类、数量和空间配置在一定时期均处于相对稳定的状态, 使生态系统能够保持一个相对稳定的结构。对生态系统的结构特征, 一般从形态和营养关系两个角度进行研究。

1. 生态系统的形态结构

生态系统的生物种类、种群数量、种的空间配置(水平分布、垂直分布)、种的时间变化(发育、季相)等构成了生态系统的形态结构。如: 在森林生态系统中, 有各种乔木、灌木和草本植物, 有各种动物和复杂的微生物种群, 它们各自的数量、空间分布和种的时间变化就构成了森林生态系统特有的形态结构。

2. 生态系统的营养结构

生态系统各组成部分之间建立起来的营养关系, 构成了生态系统的营养结构。它是生态系统中能量流动和物质循环的基础。

生态系统中, 由食物关系把多种生物连接起来, 一种生物以另一种生物为食, 另一种生物再以第三种生物为食, ……彼此形成一个以食物连接起来的连锁关系, 称为食物链。如, 老鼠以农作物为食, 而鼯鼠又以老鼠为食, 这就构成了一个最简单的食物链。再如, 碎屑→蘑菇→昆虫→蛙→蛇→鹰是一个较为复杂的食物链。

按照生物间的相互关系, 一般可把食物链分为:

(1) 捕食性食物链(predatory food chain), 由一些以动物为食的动物构成的食物链。如由狐狸和野兔构成的食物链。

(2) 碎食性食物链(detritus food chain), 是由一些食碎屑生物构成的。诸如秃鹫、蚯蚓、千足虫、白蚁、蚁和甲虫等。

(3) 寄生性食物链(parasitic food chain), 是由一些寄生性生物构成的。它们不像生物那样吃掉“捕获物”, 而是与它们的“捕获物”建立起一种紧密的联系, 长期以“捕获物”为生。如: 动物肠内的绦虫, 寄生在动物体外的蜱、虱或七鳃鳗以及一些植物, 如菟丝子、槲寄生等。

(4) 腐生性食物链, 是由腐生性生物构成的, 如水晶兰、真菌等。

在一个生态系统中, 食物关系往往很复杂, 各种食物链相互交错, 形成食物网。能量的流动、物质的迁移和转化就是通过食物链或食物网进行的。

(四) 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体现的。

1. 生物生产

生态系统中的生物生产包括初级生产和次级生产两个过程。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。

2. 生态系统中的能量流动

生态系统中全部生命活动所需要的能量均来自太阳。太阳能在生态系统中的流动是按热力学定律进行的。热力学第一定律告诉我们能量和物质不能凭空产生也不能凭空消亡, 热力学第二定律告诉我们从一种能向另一种能的任何转换都不是完全有效的, 能的消费是不可逆的过程。在能量的转换过程中, 总有一些能量失掉了。因此, 如果没有新的能量从外部投入, 一个封闭系统最终会耗尽其能量。因为生命需要能量, 能量耗尽了, 生命也就停止了。当然, 地球并不是封闭系统, 地球从太阳得到能量。

据科学计算, 太阳每秒辐射的光能相当于每秒燃烧 115×10^8 t 标准煤所发出的热量。在这部分能量中只有 1% 左右被绿色植物所利用。绿色植物通过光合作用把太阳能转变成有机分子中的化学能。当草食动物吃植物时, 能量随之转移至身体内, 当食肉动物吃食草动物时, 能量又发生转移。最后由微生物在腐解动植物残体时, 归还到环境中。太阳能沿着食物链、食物网在生态系统中流动, 维持了生态系统的能量平衡与物质转换。

3. 生态系统中的物质循环

在生态系统中不仅随时进行着能量的转换和流动, 而且无时无刻不在进行着各个组成间的物质循环。生态系统中的一切生物(动物、植物、微生物)和非生物的环境, 都是由运动着的物质构成的, 并在地球长期的演化过程中建立起来了各种循环体系。其中碳、氢、氧、氮、硫、磷等的循环是生态系统基本的物质循环, 锰、

锌、铜、铝、钴、钙、镁、钾等微量元素，也在生态系统中构成了各自的循环。而与人类环境关系比较密切的主要有水、碳、氮三大循环。

4. 生态系统中的信息联系

在生态系统的各组成部分之间及各组分内部，随着能量和物质传递与流动的同时存在着各种信息的联系，这些信息把生态系统联成一个统一的整体，起着推动物质流动、能量传递的作用。信息在生态系统中表现为多种形式，主要有营养信息、化学信息、物理信息、遗传信息和行为信息。

由此可见，生态系统的各组成部分之间都伴随着信息的流动。整个生态系统中能量流和物质流的行为由信息决定，而信息又寓于物质和能量的流动之中，物质流和能量流是信息流的载体。

二、系统的平衡与稳定

在任何一个正常的生态系统中，能量流动和物质循环总是不断地进行着，但在一定的时期内，生产者、消费者和分解者之间保持着一种相对的平衡状态，这种平衡是动态的平衡，不是静止的平衡。系统内部和外界因素的变化，尤其是人为的因素，都可能对系统产生影响，并引起系统的改变，甚至破坏系统的平衡。

当然，一个生态系统在一定范围内有调节和恢复平衡的能力。因此，我们在利用自然的同时，必须有系统的观点，维持生态的平衡，只有这样，才能有持续的发展。

三、生态平衡及生态系统的动态变化

（一）生态平衡

1. 生态平衡的概念

生态平衡(ecological balance)是指一个生态系统在特定时间内，其结构和功能相对稳定，物质与能量的输入输出接近平衡，在受到一定强度的外来干扰时，可以通过自我调节恢复到原初的稳定状态。

地球的生态系统是一个开放的不可逆动态系统，其演变的规律靠的是系统与环境、系统内部各子系统之间以及各要素之间的相互耦合关系，这种关系通过能量、物质和信息的流动与交流在一个相当长的时间内保持系统的平衡。

如果某生态系统各组成成分在较长时间内保持相对协调，物质和能量的输出接近相等，结构与功能长期处于稳定状态，在外来干扰下，能通过自我调节恢复到最初的稳定状态，则这种状态可称为生态平衡。生态平衡包括三个方面：结构上的平衡、功能上的平衡以及输入和输出物质数量上的平衡。

生态平衡是相对的平衡、动态的平衡。在系统各组分之间、生物与环境之间不断的物质、能量与信息的流动，使得生态系统中旧的平衡不断被打破，新的平衡不断建立。只有这样，地球才会由一片死寂变得生机盎然。绝对的平衡意味着没有发展和变化，但这种变化如果太快，则系统各组分之间不可能有一个相对稳定的相互关系，会产生一系列严重的问题，某物种的生物如不能适应这种变化则导致大量灭绝。

一个物种在生态系统中的灭绝往往会引起约三十几个物种的相继灭绝。因此，生态系统的平衡对生物的发展演化非常重要。

2. 生态平衡的基本特征

生态系统在不同发育期的结构和功能是有区别的。在生态学中，把一个生态系统从幼年期到成熟期的发展过程称为生态系统的发育。在没有人为干扰的情况下，生态系统发育的结果是结构更加多样复杂、各种组分间的关系更加协调稳定，各种功能渠道更加畅通。生态系统从幼年期到成熟期主要特征变化包括以下几个方面：

(1) 生态能量学特征：对于幼年期生态系统，群落初级生产量(P)超过其呼吸消耗量(R)，即能量的储存大于消耗，故 P/R 大于1。发展到成熟期的生态系统，群落呼吸消耗增加， P/R 接近于1。在生态学研究， P/R 常作为判断生态系统发育状况的功能性指标。幼年期和成熟期的生态系统，能量渠道的复杂程度也有差别。幼年期生态系统中的食物链大多比较简单，以捕食性食物链为主，多呈直链状；而成熟期的生态系统中的食物链网络关系比较复杂，这种复杂的结构，使它对物理环境的干扰具有较强的抵抗力。

(2) 营养物质的循环特征：成熟期生态系统的内部自我循环能力强，这是系统自我结构复杂化的必然结果，功能表现是由环境输入的物质质量与还原过程向环境输出的量近似平衡。

(3) 生物群落的结构特征：发育成熟期的生态系统，生物群落多样性增加，某一物种占绝对优势的情况减

少,物种的均匀性增大。生物群落的多样性还包括有机物的多样性(或称生化多样性),它是群落代谢产物或分泌物增加的结果,可使系统的各种反馈和相克机制及信息量增多。

(4) 稳定性特征:稳态(homeostasis)代表着生态系统自身的调节能力。对于成熟的生态系统,这种能力主要表现为系统内部的生物种类和种间关系复杂、共生关系发达,抵抗干扰能力强,信息量多,熵值低等。这是生态系统发育到成熟期在结构和功能上高度发展和协调的结果。

(5) 生态对策特征:幼年期生态系统生物群落与环境之间的协调性较差,环境条件变化剧烈,栖息其中的各类生物种群以具有高生殖潜力的物种(r-对策者)为多。与生态系统发育成熟期情况相反,生态条件比较稳定,生物量接近饱和状态,因而更有利于增殖潜力低而竞争力强的k-对策物种。因此,量的生产是幼年期生态系统的特征,而质的生产和反馈力的增强则是成熟期生态系统的标志,也是生态系统保持平衡的重要调节。

3. 生态平衡的调节机制

生态系统通过一系列的反馈作用,对外界的干扰进行内部结构与功能的调整,以保护系统的稳定与平衡的能力,称为生态系统的自我调节能力。生态系统的自我调节能力与系统的多种因素有关。

(1) 生态系统的自我调节能力及其相关因素:① 生物种类与成分:生物的种类与成分越单纯,食物链越简单,系统的自我调节能力就越弱。② 能流、物流途径的复杂程度与能量和营养物质的储备量:能量、物流途径与生物种类成分多少密切相关。生物种类多,食物网络复杂,能流、物流途径也就复杂,生态系统就比较稳定。生态系统的现存生物量越大,能量和营养物质储备就越多,系统的自我调节能力就越强。③ 生物的遗传性和变异性:生态系统中的生物成分越复杂,遗传基因库越丰富,生物群落对环境变化也就越容易适应。④ 信息的传递与调节:生态系统越成熟,生物种类越丰富,通过信息的传递和调节能力也越强,生态系统也越稳定。⑤ 物理与化学的调节:生态系统的非生物因素通过物理或化学作用,也可以对生态系统进行一定程度的调节。如水分对温度和湿度的调节,大气和水的流动对环境污染物的扩散和稀释作用,在光、热、水等因素作用下的有机物降解等。

(2) 生态平衡的调节机制。

① 反馈机制,分正反馈和负反馈,两者的作用是相反的。正反馈是指一部分输出的产物重新回到最初的入口,如水中的藻类死亡后,其分解产生的营养物质重新进入水体内。正反馈可使系统更加偏离平衡状态,因此,它不利于维持平衡生态系统的稳定。生物的生长、种群数量的增加等均属正反馈。生态学系统稳定的维持,只有通过负反馈机制才能实现,这种反馈就是系统的输出变成了决定系统未来功能的输入,也可理解为从生态系统中取走物质,如农作物的收获和污水处理过程中由于细菌的生长繁殖而将水中的有机物和污染物除去等现象。在种群数量调节中,密度制约作用是负反馈机制的体现。负反馈调节作用的意义就在于通过自身的功能减缓系统内的密度以维持系的稳定。

② 抵抗力,是生态系统抵抗外来干扰并维持系统结构和功能原状态的能力,是维持生态平衡的重要机制之一。抵抗力与系统发生状况有关,生态系统发育越成熟,其结构越复杂,抵抗外来干扰的能力就越强。环境容量、自净作用等都是系统抵抗力的表现形式。

③ 恢复力,指生态系统遭受外来干扰或破坏后,系统恢复到破坏前的状态的能力。如一个受到污染的水体,在切断污染源后,其生物群落可以逐步得以恢复,使水体的水质和功能恢复到污染前的水平和状态,这就是系统恢复力的表现。

(二) 生态系统的动态变化

生态系统是一个由生产者、消费者和分解者组成的结构。这个结构对于维持生态系统的养分循环和能量流动是必不可少的。但是,这个结构绝不是稳固的,因为它是由成百上千,甚至上万个不同种的植物、动物和微生物之间的动态相互作用组成的。此外,每一个种的生物都以种群为代表,在种内进行繁殖。但是,种间的杂交则因功能上的、结构上的差异而受到限制。既然生态系统是由各种群之间的相互作用组成,那么究竟是什么东西使得一个物种不能繁殖出它足以征服和消灭物种的数目呢?

现在人们已经认识到,生态系统的平衡是相对的,生态系统一直在变化和调整着。在一些情况下,某一物种的数量可能增加,而在另一些时候,它们又可能减少,并被其他物种所代替。在某些情况下,变化可能较快,仅持续几年时间,而在另一些情况下,变化可能很缓慢,要存在几千年,甚至几百万年。平衡的相对程度是决