

生态学重点学科丛书

北京市生态学重点学科建设项目资助



# 污染生态学

乔玉辉 主编

李花粉 马祥爱 副主编



化学工业出版社

生态学重点学科丛书

北京市生态学重点学科建设项目资助



# 污染生态学

乔玉辉 主编

李花粉 马祥爱 副主编



化学工业出版社

· 北京 ·

污染生态学是研究环境污染物质、环境和生物有机体(人)之间的相互作用、机理及生态修复的一门新兴学科。本书主要介绍了污染生态学的基本概念和发展概况,环境污染的生态过程、生态效应与检测、污染生态诊断及其生态风险评价等的原理和方法,以及利用生态修复技术恢复受损环境等内容,重点是结合生态学的原理和方法,解释和解决生态环境污染问题。

本书可以作为高等院校生态学、环境类专业的本科生和研究生教材,也可以作为地学和农学等专业选修课的参考教材以及生态、环保科技工作者与管理人员等相关专业的参考资料。

### 图书在版编目(CIP)数据

污染生态学/乔玉辉主编. —北京:化学工业出版社, 2008. 1  
(生态学重点学科丛书)  
ISBN 978-7-122-01795-6

I. 污… II. 乔… III. 污染生态学 IV. X171

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第205269号

---

责任编辑:刘兴春

文字编辑:刘莉珺

责任校对:陈静

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:大厂聚鑫印刷有限责任公司

装订:三河市宇新装订厂

720mm×1000mm 1/16 印张14 $\frac{3}{4}$  字数302千字 2008年4月北京第1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: 32.00 元

版权所有 违者必究

# 序

生态学是一门研究生物与环境之间关系的科学，其发生和发展的整个历程都与农业有着密切的联系。半个世纪以来，在世界范围内面临重大生态环境危机的情形下，生态学以其固有的非线性思维和整体性的思想，以自身长期的科学积累为基础，积极面对挑战，在诸多的学科中脱颖而出，在世界探索可持续发展道路上正在发挥着越来越重要的作用。在参与解决社会面临问题的过程中，生态学学科自身也得到了发展，由一门默默无闻，甚至颇受争议的学科发展至今以崭新的面目出现在当代科学的舞台，并引起了科学界和社会各界的广泛关注。

国际生态学研究在半个世纪以来发生了一系列重大的变化。生态学改变了长期以来的纯自然主义的倾向，明确提出人类是生物圈固有的组成部分，并对生态系统产生举足轻重的影响。生态学正越来越紧密地与全球及地区的社会经济发展相结合，并服务于生产实践。许多全球性以及国家的重大建设项目和热点问题均离不开生态学的参与，有关生态系统服务、生态系统分析以及生态工程设计等在区域经济发展中正发挥着越来越重要的作用。据 Elsevier 出版社的《Ecological Abstracta》统计，20 世纪 90 年代初生态学论文中有 73.2% 属基础性研究，26.8% 属于应用生态学研究，而到目前为止，生态研究中属于应用生态学的研究已占到 40%。

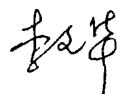
中国是一个生态脆弱、资源相对短缺、环境压力突出的国家。从 20 世纪 80 年代以来学术界和各国政府普遍关注的“人口、资源、能源、环境和粮食”等重大问题实质上在中国并未得到根本缓解。在全国范围内，城市及公路的绿化和大范围的区域生态建设得到了大幅度的发展，然而更多的生态问题则隐藏到了背后。中国的生态学肩负着太多的任务，一方面它仍要继续高举火炬，揭示那些尚未被人们认识的问题和潜在风险，以照亮未来的前进方向；另一方面它还要紧握利剑，不断创新与探索，并提出解决这些问题的方法和技术。

中国农业在过去 30 余年的现代化过程中成功实现了满足人口迅速增长的食物需求，并根本性地改变了中国人口的食物消费结构，为国家的现代化和人民物质生活水平的提高奠定了坚实的基础。然而，客观上说这些成就的取得是以牺牲资源环境为代价的。在未来中国农业的发展历程中，一味地移植西方高投入、高能耗、高排放、低效率的生产方式对中国来说既不可取也不可能。如何走出一条可持续发展的道路成为世界关注所在，而生态学特别是中国传统的智慧和知识必将为此做出积极的贡献。

中国农业大学的生态学科是一个具有光荣历史的年轻的学科，其生态研究和教学始于 20 世纪 70 年代末，以已故辛德惠院士为代表的老一辈生态学工作者在生

态学理论指导下针对黄淮海平原水盐运动调控和盐碱地改良的研究与实践取得了杰出成就，并创造性地提出了工程生态设计方法、泛生态学理论等一系列理论和方法。近年来，在几代人的努力下，该校已建立了本科-硕士-博士为一体的教学及科研体系，广泛开展了多个领域的生态学研究，并在不同领域做出了突出的成就，逐步形成了“立足华北、理实兼备、应用为主”的发展模式，为国内生态学在农业领域的应用奠定了良好的学科发展基础。

本丛书是在北京市教委及其他国家科研项目和国际合作项目共同支持下，由中国农业大学生态科学与工程系及相关院校教师共同参与编写完成的，是在长期教学研究基础上总结凝练形成的，基本代表了目前国内外的一些主要研究方向和学科进展，其中有些学科如土壤生态学、生态工程等属于生态学的新兴领域。相信该丛书的出版能成为高等院校生态学专业学生学习的重要参考资料，并为农林科研院所的生态学特别是应用生态学研究奠定良好的发展基础。



2007年5月于北京

# 前 言

污染生态学是研究环境污染物质、环境和生物有机体（人）之间的相互作用、机理及生态修复的一门新兴学科，即研究生物系统与被污染的环境系统之间的相互作用规律并采用生态学原理和方法对污染环境进行控制和修复的科学。

污染生态学侧重于研究污染条件下生物的生态效应，核心是分析环境中的污染物在生态系统中的行为及其对生物的影响，目的是要利用生物控制污染和改善环境质量，并对环境质量进行综合评价和预测，提出生态区划与管理对策。它是一门非常年轻的学科，所以本身不够完整、不够系统，学科之间的界限也不很明确。但由于它具有很强的时代性和应用性，因此具有很强的生命力。同时，我国的研究基础比较薄弱，通过对该新兴学科的研究，可实现污染生态学理论与方法的突破。它将随国民经济的发展而迅速发展，为我国经济建设、保障人体健康创造必要的环境条件。

本课程为生态学专业的专业课，同时也作为环境科学、地学和管理学等各有关专业的选修课。通过本课程的学习，要求学生较全面掌握污染生态学的基本理论、技术和方法，学习和了解污染生态控制与污染生态修复技术以及国内外污染生态学的发展前沿和动向。课程主要内容包括污染生态学的基本概念和发展概况，环境污染的生态过程、生态效应与检测、污染生态诊断及其生态风险评价等的原理和方法，以及利用生态修复技术恢复受损环境等内容，重点是结合生态学的方法和原理，解释和解决生态环境污染问题。

本书共分八章，各章的编写人员分别是：第一章，乔玉辉（中国农业大学）；第二章，任丽萍（中国农业大学）；第三章，高玉红（河北农业大学）；第四章，高玉红、乔玉辉；第五章，田光明（浙江大学），赵晶（中国农业大学）；第六章，马祥爱（山西农业大学）；第七章，李花粉（中国农业大学），雷泽湘（仲恺农业技术学院）；第八章，乔玉辉、马祥爱。全书由乔玉辉与马祥爱进行了统一的修改和校对。

本书的完成得力于编者们的辛勤劳动和通力合作；本书的多数资料参考了国内外同行学者的研究成果，没有他们的辛勤劳动，也就没有今天污染生态学的发展；在本书的编写过程中还得到了来自中国农业大学生态科学与工程系各位领导、教师和同志的大力支持，在此一并表示衷心感谢！

限于学识水平及编写时间，书中不足之处在所难免，期待得到读者的批评指正，使之日益丰富和完美。

编者

2008年1月

<b>第一章 绪论</b> .....	1
<b>第一节 生态环境问题与污染生态学的形成</b> .....	1
一、生态环境问题的产生 .....	1
二、全球主要生态环境问题 .....	1
三、污染生态学的形成 .....	5
<b>第二节 污染生态学概述</b> .....	6
一、污染生态学的定义 .....	6
二、污染生态学与其他学科的区别与联系 .....	6
三、污染生态学的研究内容 .....	7
四、污染生态学的研究方法 .....	8
<b>第三节 污染生态学的研究前沿与展望</b> .....	10
一、污染生态过程 .....	11
二、生态毒理学研究.....	11
三、污染生态修复 .....	12
四、生物技术在环境中的应用与发展 .....	12
五、生态风险评价 .....	13
<b>思考题</b> .....	14
<b>参考文献</b> .....	14
<b>第二章 环境污染在生态系统中的行为</b> .....	15
<b>第一节 污染物的概念和分类</b> .....	15
一、污染物的概念 .....	15
二、污染物的分类 .....	15
<b>第二节 污染物在环境中的迁移与转化</b> .....	17
一、污染物在环境中的迁移 .....	17
二、污染物在环境中的转化 .....	21
<b>第三节 污染物在生物体内的转运转化规律</b> .....	23
一、污染物在生物体内的转运 .....	23
二、污染物的生物转化.....	35
<b>第四节 生物富集</b> .....	39
一、生物富集的概念.....	39
二、影响生物富集的因素.....	41
<b>第五节 生物对污染物在环境中行为的影响</b> .....	46

一、生物引起的环境污染 .....	46
二、生物对污染物环境行为的影响 .....	47
思考题 .....	49
参考文献 .....	49
<b>第三章 环境污染物的生态毒理效应</b> .....	<b>50</b>
第一节 分子水平上的生态毒理效应与生物标志物 .....	50
一、概述 .....	50
二、生物标志物 .....	51
三、污染对蛋白质的影响 .....	52
四、污染对生物体酶类的影响 .....	54
五、污染对核酸 (DNA) 的影响 .....	58
第二节 细胞及组织器官水平上的生态毒理效应 .....	59
一、对细胞的生态毒性效应 .....	59
二、对组织器官的生态毒性效应 .....	62
第三节 对个体水平的生态毒理效应 .....	63
一、死亡毒性 .....	63
二、行为毒性 .....	64
三、生长发育毒性 .....	65
四、生殖发育毒性 .....	66
五、发病率 .....	67
第四节 环境污染对生物种群和群落的影响 .....	67
一、环境污染对生物种群的影响 .....	68
二、环境污染对生物群落的影响 .....	70
第五节 环境污染对生态系统的影响 .....	72
一、概述 .....	72
二、结构效应 .....	72
三、功能效应 .....	74
四、物种多样性和生态系统功能的关系 .....	77
思考题 .....	78
参考文献 .....	79
<b>第四章 污染物的生态毒性效应检测</b> .....	<b>80</b>
第一节 常规毒性试验 .....	80
一、急性毒性试验 .....	80
二、亚慢性毒性试验 .....	81
三、慢性毒性试验 .....	82
四、蓄积毒性试验 .....	82
五、联合毒性试验 .....	83
第二节 微宇宙毒性试验 .....	83



一、陆生微宇宙 .....	83
二、湿地微宇宙 .....	84
三、水生微宇宙 .....	84
第三节 分子及细胞生态毒理方法 .....	85
一、单链构象多态性 (SSCP) 和变性梯度凝胶电泳 (DGGE) .....	85
二、单细胞凝胶电泳技术 .....	85
三、实时定量 PCR 技术 .....	86
四、毒理芯片技术 .....	86
五、解毒酶活性检测技术 .....	88
思考题 .....	88
参考文献 .....	88
<b>第五章 污染生态诊断与生物监测</b> .....	<b>89</b>
第一节 污染生态诊断和生物监测概述 .....	89
一、生态诊断与生物监测的发展 .....	89
二、生物监测的优缺点 .....	90
三、生态系统污染衡量标准 .....	92
第二节 污染生态诊断与监测方法 .....	94
一、个体生物诊断与监测法 .....	94
二、生物标志物监测法 .....	97
三、群落和生态系统监测与评价法 .....	102
四、其他监测方法 .....	108
第三节 水体污染的生物监测 .....	111
一、利用污水生物系统监测 .....	112
二、水污染的植物监测 .....	113
三、水污染的动物监测 .....	114
四、水污染的微生物监测 .....	115
第四节 大气污染生物监测 .....	117
一、利用植物监测 .....	118
二、利用动物监测 .....	122
三、利用微生物监测 .....	123
第五节 土壤环境污染生物监测方法 .....	124
一、土壤污染植物监测法 .....	124
二、土壤污染动物监测法 .....	125
三、微生物监测 .....	126
思考题 .....	127
参考文献 .....	127
<b>第六章 污染环境的微生物修复</b> .....	<b>129</b>
第一节 环境中的微生物 .....	129

一、环境微生物系统 .....	129
二、污染环境对微生物的影响 .....	131
三、生物修复的基本概念 .....	133
四、用于生物修复的微生物及其他生物 .....	134
第二节 微生物污染修复原理 .....	136
一、微生物对污染物的避性 .....	137
二、微生物对污染物的结合、钝化作用 .....	138
三、微生物对污染物的降解与转化 .....	138
四、质粒与微生物的抗性 .....	148
五、微生物对污染物的外排 .....	150
第三节 微生物修复类型及影响因素 .....	151
一、原位生物修复 .....	151
二、异位生物修复 .....	153
三、原位-异位联合修复技术 .....	155
四、影响生物修复的因素 .....	155
第四节 污染环境的微生物修复 .....	156
一、土壤污染的微生物修复 .....	156
二、富营养化水体的微生物修复 .....	159
三、地下水污染生物修复 .....	160
四、海洋石油污染的生物修复 .....	161
五、微生物修复存在的问题 .....	163
思考题 .....	163
参考文献 .....	163
<b>第七章 污染环境的植物修复</b> .....	<b>164</b>
第一节 植物修复的概念及原理 .....	164
一、植物修复的概念 .....	164
二、植物修复的特点 .....	164
三、植物修复的原理 .....	165
四、修复植物的筛选 .....	168
第二节 土壤污染的植物修复 .....	170
一、土壤重金属污染的植物修复 .....	170
二、土壤有机物污染的植物修复 .....	172
三、提高土壤污染植物修复效果的方法 .....	174
第三节 水体污染的植物修复 .....	175
一、水生植物的特点 .....	176
二、常见水生植物对污染水体的净化 .....	178
三、污染水体的植物/生态修复技术 .....	181
第四节 植物修复技术的应用与发展趋势 .....	186

一、植物修复的发展与应用现状 .....	186
二、植物修复领域的发展趋势 .....	188
思考题 .....	190
参考文献 .....	190
<b>第八章 生态污染风险评价</b> .....	<b>192</b>
<b>第一节 生态风险评价的基本概念及发展历程</b> .....	<b>192</b>
一、与生态风险评价相关的几个基本概念 .....	192
二、风险评价的发展历程 .....	193
三、生态风险的特点 .....	196
<b>第二节 生态风险评价程序及方法</b> .....	<b>197</b>
一、生态分析评价程序概述 .....	197
二、问题表述 .....	198
三、风险分析 .....	203
四、生态风险表征 .....	204
五、风险评价工具——模型 .....	206
六、生态风险评价的方法 .....	207
<b>第三节 生态风险评价案例介绍</b> .....	<b>211</b>
一、土壤重金属污染生态风险评价 .....	211
二、水体环境质量的生态评价 .....	214
三、森林环境质量的生态评价 .....	217
<b>第四节 生态风险管理</b> .....	<b>219</b>
思考题 .....	221
参考文献 .....	221

# 第一章 绪 论

## 第一节 生态环境问题与污染生态学的形成

环境是相对于主体而言的，与某一主体有关的周围事物。人类是环境发展到一定阶段的产物，环境是人类生存的物质基础。因此，人类的生活、生产和一切活动都和自然环境分不开，与自然生态系统中的结构和功能状况密切相关。人类主要是通过生产和消费从自然界获取生存的资源，然后将经过改造和使用过的自然物和各种废弃物归还给自然界，正是这种无节制的使用与改造，使我们人类面临前所未有的生存危机，弗·恩格斯曾经说过我们不要过分陶醉于我们对自然界的胜利，对于每一次这样的胜利，自然界都报复了我们。

### 一、生态环境问题的产生

在人类发展的初期，人类的祖先过着茹毛饮血、渔猎为生的生活。当时人类对环境的影响和其他动物区别不大，对自然环境的依赖性非常明显。虽然人类的过度采伐和狩猎也曾对许多物种的数量和生存造成一定破坏，但那时的环境问题还是局部的、暂时的，大多数破坏并没有影响自然生态系统的恢复能力和正常功能。随着人们学会了驯化动物和植物，开始出现了农业和畜牧业，人类改造自然环境的能力有所加强，对人类的发展起到了重要作用，同时也产生了相应的环境问题，如砍伐森林、破坏草原，引起了水土流失、水旱灾害和沙漠化。

16、17 世纪以来，尤其是 18 世纪后半叶开始，以蒸汽机广泛使用为标志的第一次工业革命，使人类的生产能力得到了巨大的发展，大大提高了人类利用和改造环境的能力，但同时也带来了新的环境问题。工业生产排放的废水、废气和废渣在环境中难以降解和净化，造成了严重的环境污染。与大工业相伴而来的都市化、交通运输以及农业的发展，引起了许多环境问题，使人类生存的环境进一步恶化。从 20 世纪 30 年代的比利时马斯河谷事件开始，震惊世界的环境八大公害相继发生（图 1-1），在工业发达国家，大气、水体和土壤及农药、噪声和核辐射等环境污染对人类生存安全造成了严重威胁，经济发展也受到了严重挑战。

### 二、全球主要生态环境问题

目前对人类生存和发展产生严重威胁的环境问题，一是因人类活动所排放的废弃物而引起的环境污染，如温室效应与气候变暖、臭氧层的破坏、酸雨、有毒物质污染等；另一类是生态环境的破坏。这些环境问题有的是全球性的。

——马斯河谷事件。1930年12月1日~5日，比利时马斯河谷的气温发生逆转，工厂排出的有害气体和煤烟粉尘，在近地大气层中积聚。3天后，开始有人发病，一周内，60多人死亡，还有许多家畜死亡。这次事件主要是由于几种有害气体和煤烟粉尘污染的综合作用所致，当时的大气中二氧化硫浓度高达25~100mg/m<sup>3</sup>。

——多诺拉事件。1948年10月26日~31日间，美国宾夕法尼亚州的多诺拉小镇，大部分地区持续有雾，致使全镇43%的人口（5911人）相继发病，其中17人死亡。这次事件是由二氧化硫与金属元素、金属化合物相互作用所致，当时大气中二氧化硫浓度高达0.5~2.0mg/m<sup>3</sup>，并发现有尘粒。

——伦敦烟雾事件。1952年12月5日~8日，素有“雾都”之称的英国伦敦，突然有许多人患起呼吸系统病，并有4000多人相继死亡。此后两个月内，又有8000多人死亡。这起事件原因是，当时大气中尘粒浓度高达4.46mg/m<sup>3</sup>，是平时的10倍，二氧化硫浓度高达1.34mg/m<sup>3</sup>，是平时的6倍。

——洛杉矶光化学烟雾事件。1936年在洛杉矶开采出石油后，刺激了当地汽车业的发展。至20世纪40年代初期，洛杉矶市已有250万辆汽车，每天消耗约1600万升汽油，但由于汽车汽化率低，每天有大量碳氢化合物排入大气中，受太阳光的作用，形成了浅蓝色的光化学烟雾，使这座本来风景优美、气候温和的滨海城市，成为“美国的雾城”。这种烟雾刺激人的眼、喉、鼻，引发眼病、喉头炎和头痛等症状，致使当地死亡率增高，同时，又使远在百里之外的柑橘减产，松树枯萎。

——水俣事件。日本一家生产氮肥的工厂从1908年起在日本九州南部水俣市建厂，该厂生产过程中产生的甲基汞化合物直接排入水俣湾。从1950年开始，先是发现“自杀猫”，后是有人生怪病，因医生无法确诊而称之为“水俣病”。经过多年调查才发现，此病是由于食用水俣湾的鱼而引起。水俣湾因排入大量甲基汞化合物，在鱼的体内形成高浓度的积累，猫和人食用了这种被污染的鱼类就会中毒生病。

——富山事件。20世纪50年代日本三井金属矿业公司在富山平原的神通川上开设冶炼锌厂，该厂排入神通川的废水中含有金属镉，这种含镉的水又被用来灌溉农田，使稻米含镉。许多人因食用含镉的大米和饮用含镉的水而中毒，全身疼痛，故称“骨痛症”。据统计，在1963~1968年5月，共有确诊患者258人，死亡人数达128人。

——四日事件。20世纪50~60年代日本东部沿海四日市设立了多家石油化工厂，这些工厂排出的含二氧化硫、金属粉尘的废气，使许多居民患上哮喘等呼吸系统疾病而死亡。1967年，有些患者不堪忍受痛苦而自杀，到1970年，患者已达500多人。

——米糠油事件，1968年，日本九州爱知县一带在生产米糠油过程中，由于生产失误，米糠油中混入了多氯联苯，致使1400多人食用后中毒，4个月后，中毒者猛增到5000余人，并有16人死亡。与此同时，用生产米糠油的副产品黑油作家禽饲料，又使数十万只鸡死亡。

图 1-1 震惊世界的环境八大公害事件

### 1. 气候悄悄变暖与温室效应

近40年以来，地球上的气候发生了异常变化，北美出现了历史上少有的热浪，非洲长达7年的干旱，造成百万人因饥饿死亡，以及欧洲严寒与早冬令人防不胜防，等等，这些气候异常现象给人类带来了重大影响。据研究发现，这些恶果与各种温室气体的浓度增加有关。

在地球外面的大气层中能吸收红外辐射并对大气有加热作用的气体称温室气体，如二氧化碳（CO<sub>2</sub>）、甲烷（CH<sub>4</sub>）、氧化亚氮（N<sub>2</sub>O）、对流层臭氧（O<sub>3</sub>）和氯氟烃（CFCs）等。这些气体组成一道无形的玻璃墙，对大气的保温作用如同玻璃温室一样，故称温室效应。以二氧化碳为例，1750年之前，大气中二氧化碳含量基本维持在280×10<sup>-6</sup>。工业革命后，随着人类活动，特别是消耗的化石燃料（煤炭、石油等）的不断增长和森林植被的大量破坏，人为排放的二氧化碳等温室气体不断增长，大气中二氧化碳含量逐渐上升，每年大约上升1.8×10<sup>-6</sup>（约

0.4%)，到目前已上升到近  $360 \times 10^{-6}$ 。从测量结果来看，大气中二氧化碳的增加部分约等于人为排放量的一半。许多学者的预测表明，到 21 世纪中叶，世界能源消费的格局若不发生根本性变化，大气中二氧化碳的浓度将达到  $560 \times 10^{-6}$ ，地球平均温度将有较大幅度的增加。政府间气候变化小组 1996 年发表了新的评估报告，再次肯定了温室气体增加将导致全球气候的变化。依据各种计算机模型的预测，如果二氧化碳浓度从工业革命前的  $280 \times 10^{-6}$  增加到  $560 \times 10^{-6}$ ，全球平均温度可能上升  $1.5 \sim 4^\circ\text{C}$ 。

因此，气温的升高不可避免地使南极冰层部分融解，引起海平面上升，这将对人类的生存构成严重威胁。直接受到影响的人口约 10 亿，沿海城市可能要内迁，同时大部分沿海平原将发生盐碱化或沼泽化，如考虑到特大风暴及盐水的侵入，沿海海拔 5m 以下的地区均将受到影响，这些地区的人口和粮食产量约占世界的 1/2。同时，全球气温的升高，使内陆地区的地面蒸发加剧，气候也将发生难以预测的变化，生产力水平也将明显下降。

1992 年在联合国环境与发展大会上，世界上许多国家签署了《气候变化框架公约》，标志着各国对大气中温室气体增加的效应有了共同的认识，并承诺为保护人类的未来和可持续发展而采取必要的行动。

## 2. 臭氧空洞的出现

在大气层的上部，位于地球上空 25~40km 的大气平流层的臭氧层是地球的一个保护层，能阻止过量的紫外线到达地面。由于紫外线辐射能被蛋白质或核酸所吸收，破坏其化学键，对生物有极大的杀伤力，并可能引起突变。因此，如果没有臭氧层的屏障，对地球上的生物界和人类来说，都是灾难性的。近 20 年的观察表明，平流层的臭氧浓度正在减少，1985 年发现南极上空出现了臭氧“空洞”。研究表明，平流层臭氧每减少 1%，紫外线对地球表面辐射量增加 2%。

臭氧层的减少是人类活动所引起的，尤其是氯原子能催化臭氧的分解，因而打破了臭氧的自然平衡。到达平流层的氯主要是人们排放的氯氟烷烃（简称 CFC）和含溴卤代烷烃，如应用在冷冻机、电冰箱及高级电子元件作清洁剂的氟里昂，均对臭氧层产生威胁。卫星资料证明，南纬  $39^\circ \sim 60^\circ$  臭氧减少 5%~10%，南纬  $19^\circ \sim$  北纬  $19^\circ$  近赤道地区减少 1.6%~2.1%，如按现行速度计算，到 2075 年臭氧将比 1985 年减少 40%。因此，到那时全球的皮肤癌患者将增加大约 1.5 亿，农作物产量将减少 7.5%，人体的免疫功能将减退。因此，臭氧浓度的减少趋势及其可能的严重后果已引起人们的关注。

臭氧层破坏是全球环境问题，需要全人类采取合作保护行动。1987 年，23 个国家签署了《消耗臭氧层物质蒙特利尔议定书》限制和取缔生产氯氟烃和溴氟烃等化学物质。目前，向大气层排放的消耗臭氧层物质已经逐年减少，2000 年，平流层中消耗臭氧层物质的浓度达到最大限度，然后开始下降。要到 21 世纪中期臭氧层浓度才能达到 20 世纪 60 年代的水平。

## 3. 酸沉降

大气污染最严重的是二氧化硫污染。自从工业革命以来，随着工业的发展，燃

烧化石燃料排放的二氧化硫不断增加。酸沉降是由于大气中二氧化硫和一氧化氮在强光照射下,进行氧化和光化学作用,并和水汽结合而形成,俗称酸雨,一般将pH值小于5.6的雨称为酸雨。酸雨能直接伤害植物,1%浓度的二氧化硫会使棉花、小麦和豌豆等农作物明显减产。酸雨也能引起土壤性质改变,主要是使土壤酸化,影响生物数量和群落结构,抑制硝化细菌、固氮菌等的活动,使有机物的分解、固氮过程减弱,因而土壤肥力降低,生物生产力明显下降。我国降水酸度由北向南逐渐加重,江南酸雨较多,并已连成片,华南和西南地区已普遍发生酸雨,有些地区的酸雨发生率高达90%以上。

1977年联合国会议承认酸雨是属于全球性的污染问题。20世纪70年代末,联合国环境规划署、欧洲委员会和世界气象组织协作建立了酸雨监测网,1979年在日内瓦东西方34个国家又签订了一项控制远距离越界空气污染公约,1982年人类环境国际会议又把酸雨作为一个重要的问题提出,同年6月,在瑞典专门召开了有33个国家参加的酸雨问题国际会议。由此可见,国际上对酸雨问题的重视程度。

#### 4. 有毒有害化学物质污染

全球有机化学品产量在20世纪30年代仅100万吨,1970年增加到6300万吨,1985年增至2.5亿吨。现在大约每7~8年产量就翻一番。虽然大量的化学品为人类的衣、食、住、行提供了物质基础,但太多的化学品进入人们的家庭、生存环境甚至人体中,对生态环境和人类的健康构成威胁。

过去的30多年中,全球发生过好多起重大的化学污染事件,使成千上万的人蒙受死亡和灾难的威胁。主要是来自化学工业的危险废物,由于化学品种类增加太快,人们对它们的毒性以及如何安全管理知之甚少,一旦发生事故往往措手不及和束手无策。化学污染往往是由于泄漏、火灾、运输发生突然性事故或爆炸,危害和影响在极短时间内发生,要想及时获得安全处置是很困难的。而危险的化学物质造成的污染处置费用昂贵,往往不很有效,增加了危害的程度。

有很多化学污染是在生产和生活中悄悄发生的,如长期大量服用止痛药的患者易造成肾功能障碍,反应厉害的孕妇服用酰胺啉酮(反应停)后,可能会生下手脚不全的畸形儿。用含镉污水灌溉的稻米,人长期食用可能会患骨痛病致死。此外,还有化妆品、食品添加剂、防腐剂等,这些难降解的高毒化学品可以在生物组织中积累并在环境中转移,已经发现在人体与野生生物体内积累的高浓度的持久性有机污染物可以从排放点转移到几千英里之外,对人体的危害是长期的累积效应。

#### 5. 水体富营养化

由于大量N、P等营养元素进入水体,使水中藻类、漂浮植物大量繁殖,使水体浑浊,透明度降低,导致阳光入射强度和深度降低,溶解氧减少,大量的水生生物死亡,从而使水生生态系统和水功能受到严重阻碍和破坏。直接影响工业供水和人畜饮水质量,给人类健康和水产养殖带来威胁。

氮磷是水体富营养化最重要的营养因子,其中磷是限制因子,氮是伴随因子。当水体中磷达到0.02mg/L,氮达到0.2mg/L时,就可能出现“藻华”现象。在众多的环境问题中,富营养化已成为我国湖泊最为突出的问题之一。水体富营养化

现象除发生在湖泊、水库中，也发生在海湾内，如近几年许多海湾发生的赤潮现象就是海水富营养化的表现。

### 6. 生态环境破坏

生态环境破坏是由于对自然资源的不合理开发和利用而引起的。如水土流失、土地沙漠化、地面沉降等。一般情况下，土地有良好植被的林区和草原，能保持水土，能量流动和物质循环能正常进行，自然生态系统保持着良好的状态，具有较高的生产力水平。但由于人口激增，加之不合理的开发自然资源，特别是破坏森林植被，引起水土流失，不仅使土地因含有养分的表土被冲刷而变得贫瘠，而且造成江河湖泊的泥沙淤积，河床抬高，影响交通运输和经济发展，并且可能形成旱涝灾害，进一步恶化生态环境。

在我国，水土流失是生态环境最突出问题之一，而最严重的地区是黄土高原。远在 3000 年前，黄河中上游地区分布有良好的森林和草原，土地肥沃，气候宜人，具有比较优越的生态条件，农牧业相当发达，由于多年来大规模毁林开荒，扩大耕地，以致西北、华北一带森林损失殆尽，使环境生态严重失调，地面失去植被的保护，黄土不能涵养水分，造成严重的水土流失，雨量减少，湿度下降，气候恶化，出现干旱，风蚀沙化的土地日益扩大，黄河已成为世界著名的泥沙之河，河床日益抬高，蓄洪排涝能力减弱，加剧了水旱灾害的发生。1998 年夏季长江流域的特大洪水，正是由于长江上游地区的植被被破坏，水土流失，中下游河流含沙量增加，天然水面急剧减少，如洞庭湖、鄱阳湖等大型湖泊面积缩小，使排洪、蓄洪能力减弱的结果。

## 三、污染生态学的形成

随着环境问题的出现，并已影响到经济的发展乃至人类的生存，因此，如何认识和解决环境问题已受到社会的关注。环境科学作为一门独立的学科在 20 世纪 50 年代被提出来，并在地学、生物学、化学、物理学、医学等学科的基础上，运用原有的理论和方法，研究环境问题，通过这种研究，逐渐形成了一些新的边缘学科，如环境地学、环境生物学、环境化学、环境物理学、环境医学、环境工程学、环境经济学、环境管理学等。同时环境问题的解决和控制都要以生态学原理为基础，因而生态学引起社会的广泛关注并得到了快速发展，多学科之间的联系和渗透也促使它更多地从中吸收新的理论和方法，从而使生态学更具活力地进入了新的发展时期——应用生态学时期。

早在 19 世纪中叶工业革命时期，发达国家因工厂排放废水引起河流和湖泊污染，有些生物学家已开始研究水污染对水生生物的影响，随后又开展了水污染的生物监测和生物处理的研究。1902 年，Kolkwitz 和 Marsson 就对水中的微型生物进行分类，并提出了“污水生物系统”的概念；20 世纪 50~60 年代，由于工农业生产发展迅速，环境污染更加严重，发生了环境污染事件。人们更加注意研究水污染的生物监测和城市生活污水及工业废水的生物处理等问题。70 年代以来，环境生物学工作者在水、气污染的生物监测和生物净化、遗传毒理学和生态毒理学、土壤



污染和土地处理系统以及自然保护等领域开展了大量科学研究工作。并研究污染物在环境及生态系统中迁移转化规律,研究生物的受害机制、净化机制;研究污染物沿食物链的富集机制和人体受害原因。同时研究生物抗性的形成原因和生物防治污染的工程措施。

伴随着环境科学的兴起和应用生态学的发展,在上述研究的基础上逐步形成了一门新的分支学科——污染生态学。污染生态学经历发生、成长、发展和壮大等几个历史阶段,已经形成了具有自己学科特色的理论体系和研究方法论。如今,污染生态学已成为研究生物系统与被污染环境之间相互作用规律及采用生态学原理对污染环境进行控制与修复的一门独立科学,是应用生态学的重要组成部分,是生态学与环境科学相互融合、相互交叉的产物。

## 第二节 污染生态学概述

### 一、污染生态学的定义

污染生态学 (pollution ecology) 是研究生物与受污染的环境之间相互作用机理和规律的科学,即研究生物系统与被污染的环境系统之间的相互作用规律并采用生态学原理和方法对污染环境进行控制和修复的科学。

污染生态学侧重于研究污染条件下生物的生态效应,核心是分析环境中的污染物在生态系统中的行为及其对生物的影响,目的是要利用生物控制污染和改善环境质量,并对环境质量进行综合评价和预测,提出生态区划与管理对策。污染生态学是应用生态学的最重要组成部分,是生态学中实践意义较强的一个重要分支,是生态学与环境科学相融合、相交叉的产物。

经过 30 多年的发展,污染生态学已经形成了具有自己特色的理论体系和研究的方法论。其研究领域主要包括 3 个方面:①污染物对生物个体、种群、群落及生态系统的影响;②污染物在生物体内和生态系统各组分之间的迁移和转化;③生物体和生态系统对污染物的吸收、富集、降解和净化作用。

### 二、污染生态学与其他学科的区别与联系

污染生态学是环境科学与生态学新兴的交叉学科,同其他相关学科之间有密切的联系,最密切的有环境生物学、生态学及毒理学。

#### 1. 环境生物学 (environment biology)

有人把污染生态学作为环境生物学的一个分支学科。环境生物学是研究生物与受人类干扰的环境之间相互作用规律及其机理的学科(但也有人认为环境生物学就是生态学)。环境生物学所指的受人类干扰的环境包括两方面的内容:其一是环境污染;其二是指人类对自然资源的不合理利用,如对森林的滥砍乱伐,对草原的滥垦和过度放牧,围湖造田等造成对环境的破坏。因此,环境生物学包括污染生态学。