

## 序

环境污染时刻影响着包括人在内的所有生物的生存和繁衍,生物也在采用各种机制与污染物交锋,设法对污染产生适应和进化,适应和进化是生态学研究的永恒主题。2011年2月,教育部新颁布的《学位授予和人才培养学科目录》中,将生态学从生物学中分离出来,成为与生物学平级的一级学科,大大提升了生态学的学科地位,同时也提升了研究生物与污染环境相互关系的污染生态学的学科地位。这样的调整对我们污染生态学工作者来说是一件喜事。污染生态学在生态学学科体系中的地位举足轻重,近几年来,每年都召开全国污染生态学学术研讨会,2013年的研讨会由云南大学主办,我向与会者作了关于污染生态学学科发展的主题报告,看到了来自全国各地的污染生态学同行,看到污染生态学的教学和科研队伍日益壮大,我感到非常欣慰。

2013年年初,昆明理工大学环境科学与工程学院王宏镛、王海娟和曾和平三位中青年教师找到我,说要编写一本《污染与恢复生态学》研究生教材,想听听我的意见。他们三人都是我的学生,我对此事非常支持,当时我主编的《污染生态学》刚出第三版,我也希望有更多不同风格的教材问世。同时我也告诉他们,编写教材是一件艰苦的工作,一定要有自己的特色和主线,一定要出精品。现在看来,他们是按我的要求去认真做了。

编写大纲经反复修改,最后确定了与现有同类教材编写体例不同的以生命组织层次为主线,这是经典生态学的主线,那么考察污染物对这些生命组织层次的影响以及它们如何应对和调整,是一件很有意义的事情,这样的编排也是学生本科阶段学习普通生态学课程的进一步深化。同时,这样的编写体例是一个新的尝试,大家可以多提意见,帮助他们继续改进,也希望作者能通过不断教学实践吸取多方面的意见和要求,把这本教材修改好,精益求精,成为一本精品教材。

该书结构清晰,内容丰富,通俗易懂,兼顾了污染与恢复生态学的基础理论和应用实践,同时也介绍一些污染与恢复生态学的基本研究方法,如科研选题、实验设计、数据处理、论文写作与出版等研究生必须掌握的科研基本环节。

我对该书的出版表示热烈祝贺并欣然为之作序。借此机会,我希望有更多的污染生态学佳作出版,以推进我国污染生态学的教学和科研水平,培养大批致力于污染生态学研究的专业技术人才,为防治污染、加快生态环境保护、建设“生态中国”作出更大的贡献。

王焯校

2015年7月于昆明



## 前 言

当前研究生专业课教学中,存在两种错误倾向:一是教学内容与本科阶段大同小异甚至重复,学生没有兴趣;二是学生普遍认为不需要教科书,只要任课教师讲几个专题,或结合自己的科研作些介绍即可。第一个问题比较好解决,研究生教学是本科教学的延展和深化,教师在教学内容上应注意“更上一层楼”,在本科教学的基础上增加深度和广度;但第二个问题争论很多,我们和学生交流发现,多数学生还是想有本教材,因为他们觉得教师随意发点讲义、介绍几个专题只能获得一些零散琐碎的、缺乏系统性的知识,有“见树不见林”之感。

我们认为,研究生专业课教学还是应该有一本教材的,这样可以为学生提供一个相对完整的知识框架。昆明理工大学历来重视研究生课程教学,近几年来,从众多研究生课程中遴选出100门作为“百门研究生核心课程”进行重点建设。2012年年底,“污染与恢复生态学”获准立项,入选“百门研究生核心课程”,该项目的任务之一是编写一本有特色和影响力的教材。

2013年年初,我们将编写《污染与恢复生态学》研究生教材的想法向我们的恩师、八十高龄的云南大学生命科学学院王焕校教授汇报。王教授是我国污染生态学研究的开拓者之一,他的《污染生态学基础》(1990)、《污染生态学》(2000,2002,2012,共三版)影响了我国一代又一代的污染生态学工作者。王教授对教材编写工作极为支持,欣然担任编写顾问,并多次和我们讨论编写大纲,处理编写过程中遇到的一些问题。王教授的大力支持使我们深受鼓舞,也坚定了我们编好本书的信心和决心。我们一直铭记王教授的教诲:“要出书就要出精品,否则就不要出”。

一本好的教材应该有一条好的主线,王焕校教授的《污染生态学》是以污染物在生物体内的生物过程为主线,即吸收—迁移—富集—毒害—解毒—抗性—适应—进化,环环相扣,由浅入深,由表及里,层层剖析,而我们新编的教材又不能与之重复。我们认真比较分析了国内出版的几本《污染生态学》和《环境生物学》教材的编写特点,确定以生物圈中生命的组织层次为主线,介绍每一层次(个体—种群—群落—生态系统—景观)上生物与污染环境之间的关系,这样可以与经典的普通生态学教材相衔接。同时,我们也定下了教材编写须遵循的三个主要原则:一是科学性原则,不要有任何学术上的错误;二是简明性原则,教材不同于专著,内容不要包罗万象,一切以教师易教、学生易学为检验编写成败的标准;三是可读性原则,尽可能图文并茂,不要晦涩难懂。

除绪论外,本书共十章。第一至五章以污染条件下生物个体、种群、群落、生态系统和景观与污染环境的相互关系为主线,介绍环境污染对这几个主要生命组织层次的影响以及它们如何应对;第六至九章重点介绍污染淡水、海洋、土壤和景观的生态恢复问题;第十章与研究生今后的科研联系较为紧密,简要介绍了如何选题、如何设计实验、如何开展污染与恢复生态学研究、如何对数据进行统计分析、如何撰写科技论文、如何投稿以及与编辑和审稿人沟通等内容。

本书由王宏镛、王海娟、曾和平主编,部分研究生参与了编写工作。具体编写分工是:绪论(王宏镛),第一章(王海娟),第二章(李燕燕、王胜龙),第三章(罗艳),第四章(代碧玉、蒋诗怡),第五章(曾和平),第六章(和淑娟),第七章(李勤椿),第八章(殷飞),第九章(曾和平),第十章(王宏镛)。在书稿校对过程中,研究生李勤椿倾注了大量心血,同时得到研究生张雪梅、

何文豪、王战台、曹旻霞、赵书晗的大力帮助。大家分工合作,优势互补,历时两年半,几易其稿,终于付梓。因此,本书是昆明理工大学环境生态学实验室教师和研究生集体智慧的结晶。在编写过程中,西南林业大学国家高原湿地研究中心王胜龙博士编写了第二章第六节“污染环境下种群的变异和进化”,为本书增色不少;中山大学生命科学学院李金天博士馈赠了他们发表论文的高清插图,在此深表谢意。全书最后由王宏滨统稿。

衷心感谢德高望重的王焕校教授自始至终对本书的亲切关怀并欣然为之作序,昆明理工大学环境科学与工程学院宁平教授、潘波教授和潘学军教授经常过问编写进展情况,昆明理工大学研究生院为本书出版提供了出版经费,在此一并致以谢忱。我们还要特别感谢科学出版社对全书的精心编辑。

本书的编写体例是一个新的尝试,虽然我们尽了全力,但限于编者学识水平,疏漏和不妥之处在所难免,恳请各位同行和使用本书的师生批评指正。如有任何意见和建议,请发至本书主编之一王宏滨的邮箱(whb1974@126.com),我们将不胜感激,同时将认真考虑您的意见和建议,以便再版时修正。

王宏滨 王海娟 曾和平

2015年7月13日于昆明

# 目 录

## 序

## 前言

绪论	1
一、污染与恢复生态学产生的学科背景	1
二、污染与恢复生态学的定义	1
三、污染与恢复生态学的主要研究内容	2
四、污染与恢复生态学的研究任务	2
五、污染与恢复生态学的发展趋势	3
小结	4
复习思考题	5
建议读物	5
推荐网络资讯	5
第一章 个体污染生态学	6
第一节 污染环境下的生物的生长	6
一、污染对生物生长的影响	6
二、污染环境下的生物生长的调整	18
第二节 污染环境下的生物的发育	23
一、污染对生物发育的影响	23
二、污染环境下的生物发育的调整	26
第三节 污染环境下的生物的繁殖	27
一、污染对生物繁殖的影响	27
二、污染环境下的生物的繁殖对策	31
第四节 生物个体与污染环境关系的一般原理	32
一、环境污染物对细胞膜结构和功能的影响	32
二、生物对污染环境的适应	36
小结	37
复习思考题	37
建议读物	38
推荐网络资讯	38
第二章 种群污染生态学	39
第一节 种群对污染压力的响应	39
一、水分生理的响应	39
二、光合生理的响应	40
三、呼吸作用的响应	40
四、遗传结构的响应	41

第二节 污染环境下载群的空间分布特征 .....	41
一、种群分布界限 .....	41
二、种群分布格局 .....	42
第三节 污染环境下载群的数量特征 .....	43
一、种群参数变化 .....	43
二、种群增长情况 .....	48
三、种群数量的变动情况 .....	49
第四节 污染环境下载群的遗传特征 .....	50
一、基因库的变化 .....	50
二、基因型频率和基因频率的变化 .....	50
三、遗传漂变 .....	50
四、遗传瓶颈和建立者效应 .....	51
第五节 污染环境下载群的行为 .....	51
一、回避行为 .....	51
二、捕食行为 .....	52
三、警惕(警觉)行为 .....	52
第六节 污染环境下载群的变异和进化 .....	53
一、基因突变 .....	53
二、染色体变异 .....	57
三、种群的微进化 .....	59
第七节 污染环境下载群的调节 .....	60
一、种群密度调节 .....	60
二、食物调节 .....	61
三、捕食者调节 .....	61
小结 .....	62
复习思考题 .....	62
建议读物 .....	62
推荐网络资讯 .....	63
<b>第三章 群落污染生态学 .....</b>	<b>64</b>
第一节 群落对污染压力的响应 .....	64
一、群落物种多样性的丧失 .....	64
二、群落对污染环境的适应 .....	65
第二节 污染环境下载群的结构变化 .....	67
一、垂直结构的变化 .....	67
二、水平结构的变化 .....	69
三、污染对群落种间关系的影响 .....	70
第三节 污染环境下载群的功能变化 .....	71
一、群落生产力 .....	71
二、养分循环 .....	73
第四节 污染环境下载群的演替 .....	74

---

一、环境污染下植物群落的演替	74
二、环境污染下动物群落的演替	74
三、环境污染下微生物群落的演替	75
第五节 生物群落对环境污染的生态监测	76
一、利用生物群落监测大气污染	76
二、利用生物群落监测水污染	78
三、利用生物群落监测土壤污染	82
小结	83
复习思考题	83
建议读物	83
推荐网络资讯	83
<b>第四章 生态系统污染生态学</b>	<b>84</b>
第一节 污染生态系统	84
一、污染生态系统的组成	84
二、污染生态系统受污染的程度	84
三、生态系统受污的效应体现	84
第二节 污染环境生态系统中组成成分的变化	85
一、生产者的变化	85
二、消费者的变化	85
三、分解者的变化	85
第三节 污染环境生态系统的结构变化	86
一、形态结构的变化	86
二、时空结构的变化	87
三、营养结构的变化	88
第四节 污染环境生态系统的生物生产力	89
一、初级生产的变化	89
二、次级生产的变化	89
第五节 污染物对生态系统主要元素循环的影响	90
一、氮循环	90
二、磷循环	92
三、有毒有害物质的循环	94
第六节 环境污染下生态系统的信息传递	96
一、环境污染下生态系统信息传递的特征	96
二、环境污染对生态系统信息传递的影响	97
第七节 污染环境下的生态系统服务功能	102
一、污染环境对生态系统多样性和复杂性的影响	102
二、环境污染对生态系统服务功能的影响	105
小结	108
复习思考题	109
建议读物	109

推荐网络资讯·····	109
<b>第五章 景观污染生态学</b> ·····	110
<b>第一节 污染环境景观的结构变化</b> ·····	110
一、污染条件下景观组成要素的变化·····	110
二、污染条件下景观异质性的变化·····	114
<b>第二节 污染环境景观的功能变化</b> ·····	115
一、景观生产功能的变化·····	115
二、景观生态功能的变化·····	119
三、景观美学功能的变化·····	121
四、景观文化功能的变化·····	121
<b>第三节 污染环境景观的动态变化</b> ·····	121
一、对景观稳定性的影响·····	122
二、景观的破碎化·····	123
三、景观多样性的变化·····	123
小结·····	124
复习思考题·····	125
建议读物·····	125
推荐网络资讯·····	125
<b>第六章 污染淡水生态系统的恢复</b> ·····	126
<b>第一节 污染河流生态系统的恢复</b> ·····	126
一、污染河流生态系统概述·····	126
二、河流生态系统受损的原因·····	127
三、污染河流结构和功能的变化·····	129
四、污染河流生态恢复的原理、目标与原则·····	132
五、污染河流生态系统恢复的方法·····	136
<b>第二节 污染湖泊生态系统的恢复</b> ·····	137
一、污染湖泊生态系统概述·····	137
二、湖泊生态系统退化的原因·····	138
三、污染湖泊结构和生态功能的变化·····	140
四、污染湖泊生态系统恢复的原理与方法·····	142
小结·····	148
复习思考题·····	148
建议读物·····	148
推荐网络资讯·····	148
<b>第七章 污染海洋生态系统的恢复</b> ·····	149
<b>第一节 污染海洋生态系统概述</b> ·····	149
一、海洋污染概况·····	149
二、污染海洋生态系统的表现及其成因·····	150
三、海洋污染的生态效应·····	157
<b>第二节 赤潮的防治</b> ·····	158



---

一、物理法 .....	158
二、化学法 .....	158
三、生物法 .....	159
第三节 海洋油污染的防控 .....	160
一、物理处理 .....	160
二、化学处理 .....	160
三、生物处理 .....	161
第四节 重金属污染的防治 .....	162
第五节 持久性有机物污染的防治 .....	163
一、物理法 .....	163
二、化学法 .....	163
三、生物法 .....	163
第六节 放射性物质污染的控制 .....	164
一、放射性物质的近海处理 .....	164
二、放射性物质的深埋 .....	164
第七节 海上溢油事故处理案例分析 .....	165
小结 .....	165
复习思考题 .....	166
建议读物 .....	166
推荐网络资讯 .....	166
<b>第八章 污染土壤生态系统的恢复 .....</b>	<b>167</b>
第一节 土壤污染概述 .....	167
一、土壤污染的定义 .....	167
二、土壤污染的特点 .....	168
三、土壤污染的来源 .....	168
四、土壤污染的类型 .....	169
第二节 污染土壤的物理修复 .....	170
一、污染土壤物理修复的原理 .....	170
二、污染土壤物理修复的方法 .....	171
三、污染土壤物理修复的优缺点 .....	171
第三节 污染土壤的化学修复 .....	172
一、污染土壤化学修复的原理 .....	172
二、污染土壤化学修复的方法 .....	172
三、污染土壤化学修复的优缺点 .....	176
第四节 污染土壤的植物修复 .....	176
一、污染土壤植物修复的原理 .....	177
二、污染土壤植物修复的方法 .....	177
三、污染土壤植物修复的优缺点 .....	179
第五节 污染土壤的微生物修复 .....	181
一、污染土壤微生物修复的概念 .....	181

二、污染土壤的微生物修复原理 .....	181
三、污染土壤微生物修复的种类 .....	183
四、污染土壤微生物修复技术 .....	185
五、微生物修复技术的优缺点 .....	186
第六节 案例分析 .....	186
一、美国重金属污染土壤治理案例 .....	186
二、中原油田五厂污染土壤的修复试验工程 .....	187
三、利用植物修复技术修复土壤重金属污染 .....	188
小结 .....	189
复习思考题 .....	189
建议读物 .....	189
推荐网络资讯 .....	190
<b>第九章 污染景观的生态恢复</b> .....	<b>191</b>
第一节 污染景观恢复的原则 .....	191
一、整体性原则 .....	191
二、生态持续性原则 .....	191
三、资源持续利用原则 .....	192
四、经济合理性和针对性原则 .....	192
五、社会广泛参与原则 .....	192
第二节 污染景观的结构恢复 .....	192
一、景观要素的恢复 .....	192
二、景观异质性的恢复 .....	194
三、景观网络重新形成与空间格局再生 .....	194
第三节 污染景观的功能恢复 .....	194
一、景观连接度与连通性的恢复 .....	195
二、景观中水分和养分运动的恢复 .....	195
三、景观中物种运动的恢复 .....	196
四、景观美学功能和文化功能的恢复 .....	196
第四节 污染景观的动态过程恢复 .....	196
一、景观稳定性的恢复 .....	196
二、景观完整性的恢复 .....	198
三、景观多样性的恢复 .....	198
小结 .....	198
复习思考题 .....	199
建议读物 .....	199
推荐网络资讯 .....	199
<b>第十章 污染与恢复生态学的一般研究方法</b> .....	<b>200</b>
第一节 研究课题的确定 .....	200
一、选题的来源 .....	200
二、选题的方法 .....	200

---

三、选题的注意事项 .....	201
第二节 实验的设计 .....	201
一、实验设计的基本原则 .....	201
二、实验设计的方法 .....	202
三、实验设计的常见错误 .....	203
第三节 实验的开展 .....	204
一、野外调查 .....	204
二、受控实验 .....	204
三、多学科交叉 .....	204
四、新技术的运用 .....	205
第四节 实验数据的统计分析 .....	205
一、常用方法 .....	205
二、常用软件 .....	207
第五节 研究论文的撰写与发表 .....	208
一、研究论文的一般结构 .....	208
二、研究论文主要部分撰写注意事项 .....	208
三、论文投稿的注意事项 .....	210
第六节 主要污染与恢复生态学期刊 .....	210
小结 .....	211
复习思考题 .....	211
建议读物 .....	211
推荐网络资讯 .....	211
参考文献 .....	212

# 绪 论

## 一、污染与恢复生态学产生的学科背景

自 20 世纪 30 年代以来,国际上相继暴发了八大公害事件,如比利时马斯河谷烟雾事件(烟尘及  $\text{SO}_2$ , 1930. 12)、美国洛杉矶光化学烟雾事件(光化学烟雾, 1943. 5~10)、美国多诺拉烟雾事件(烟尘及  $\text{SO}_2$ , 1948. 10)、英国伦敦烟雾事件(烟尘及  $\text{SO}_2$ , 1952. 10)、日本九州南部熊本县水俣事件(甲基汞, 1953~1961)、日本四日市哮喘事件( $\text{SO}_2$ 、煤尘、重金属粉尘, 1955)、日本九州爱知县米糠油事件(多氯联苯, 1968)和日本富山县神通川流域骨痛病事件(镉, 1931~1975)。这些污染事件的发生造成了人群中甚至死亡,引起了公众的警觉和对环境污染问题的关注。

环境污染是环境问题的一种类型,它是指由于人为或自然的因素,有害物质或者因子进入环境,破坏了环境系统正常的结构和功能,降低了环境质量,对人类或者环境系统本身产生不利影响的现象(左玉辉, 2002)。进入 21 世纪后,我国环境污染问题也时有发生。2005 年 11 月 13 日,吉林石化公司双苯厂一车间发生爆炸,约 100t 苯类物质(苯、硝基苯等)流入松花江,造成了江水严重污染;2007 年 5~6 月,江苏太湖暴发了严重的蓝藻污染事件,造成无锡全城自来水污染,市民的日常饮用水和基本生活成为难题;2008 年 3 月云南澄江锦业工贸有限责任公司长期违法排放含砷的生产废水,导致严重污染,沿湖居民 2.6 万余人的饮用水源取水中断;2012 年 2 月广西两企业将含镉废水偷排入龙江河,镉泄漏量约 20t,波及河段约 300km,沿江居民生活受到严重影响。据环境保护部统计,2009 年环境保护部接报的 12 起重金属、类金属污染事件,致使 4035 人血铅超标,182 人镉超标,引发 32 起群体事件。另据《2014 中国环境状况公报》显示,2014 年,全国共发生突发环境事件 471 起,其中重大事件 3 起,较大事件 16 起,一般事件 452 起。

环境污染所造成的经济和健康损失极大地削弱了业已取得的经济成果,同时对生物的生长、发育、繁殖构成了强大的选择压力,面对从未接触过的污染物,生物必须在代谢方式和能量分配上作出调整,对污染环境进行适应,如果无法适应污染环境,生物只能走向衰落或者灭绝。目前全球性的环境污染问题主要有温室效应、臭氧层空洞、酸雨、淡水污染、海洋污染、危险废物越境转移等。环境污染除了本身对人类及环境造成危害外,还降低了水、生物和土地等资源中可利用部分的比例,使得资源短缺的局面更加严峻;环境污染加重了生态破坏,加快了植被破坏和物种灭绝。

在环境污染广泛存在的大背景下,生物与环境的关系不再是经典的生物与正常环境(光照、温度、水分、土壤等)之间的关系,而是生物与污染环境之间的关系,在明晰这些关系的基础上,需要寻求受污染环境恢复和重建的途径,因此,污染与恢复生态学便应运而生。

## 二、污染与恢复生态学的定义

污染与恢复生态学是运用生态学、环境科学等学科的理论和方法,探索生物与污染环境之间的相互作用规律和机理,并寻求受污染环境恢复和重建对策的科学。该学科是生态学和环境科学交叉、渗透形成的边缘学科,属于应用生态学的范畴。

需要说明的是,污染与恢复生态学不是污染生态学和恢复生态学的简单叠加。传统的污染生态学虽然也研究污染环境的控制和修复,但这种控制和修复主要针对生物防治(植物修复和微生物修复)。我们认为对污染环境的恢复和重建不应仅限于生物手段,在肯定生物手段的优点并加以利用时,也应合理吸收物理和化学手段的长处。此外,传统的恢复生态学研究范围很广,包括森林、草原、荒漠、近海和海岸、河流与湖泊、小流域治理、湿地、废弃地、道路交通工程等(冯雨峰和孔繁德,2008),它既包括了受污染的退化生态系统的恢复,也包括很多非污染引起的退化生态系统的恢复。污染与恢复生态学以环境污染为主线,这里的“恢复生态学”侧重污染环境的恢复与重建问题,它包括物理、化学和生物等手段。

### 三、污染与恢复生态学的主要研究内容

污染与恢复生态学主要有以下三大研究内容。

#### (一) 污染物对生物个体、种群、群落、生态系统和景观的影响

经典的生态学研究个体、种群、群落、生态系统和景观等,偏重于正常环境。在本书中,我们紧密围绕适应和进化这一生态学的精髓,仍然沿用经典生态学的生命组织层次这一主线,重点揭示生物个体、种群、群落、生态系统和景观对环境污染的响应、适应和进化问题。

污染物进入环境后,首先对生物个体的生长、发育和繁殖产生干扰和破坏,但随后污染物对生物个体所产生的影响可以直接反映在生物种群、群落、生态系统乃至更大的景观水平上。污染物进入生态环境后,与其中的生物及其环境发生相互作用,生物的种群结构、种群增长和种群进化都发生相应变化,进入生物体内的污染物随食物链流动,产生各种各样的生态效应,包括对生态系统组成成分、结构(物种结构、营养结构和空间结构)以及物质循环、能量流动、信息传递和系统动态进化过程的不利影响,主要表现为生物多样性减少、食物链变短、食物网简化、生态系统复杂性和稳定性降低等(左玉辉,2002)。

#### (二) 生物个体、种群、群落、生态系统和景观对污染的响应和适应

在污染物对生物个体、种群、群落、生态系统和景观产生影响的同时,生物会在各个生命组织层次上作出响应和调整,进而对污染环境产生适应和进化。在污染与恢复生态学研究,达尔文的进化论思想也同样适用,即能适应污染的生物在环境中存活下来,反之,不能适应污染的生物便遭淘汰。

#### (三) 受污染生态系统的恢复与重建

在明晰五个生命组织层次与污染环境之间关系的基础上,需要采用物理、化学和生物等各种手段,对受污染的生态系统进行恢复与重建。由于现代生态学重点以生态系统为研究对象,并且生态恢复侧重于生态系统结构和功能的恢复,本书重点阐述污染淡水、污染海洋、污染土壤和污染景观的生态恢复与重建问题。

### 四、污染与恢复生态学的研究任务

污染与恢复生态学的研究任务主要包括两个方面:

#### (1) 揭示环境污染对各生命组织层次的影响及各层次对污染的响应和适应。

环境污染的生物效应是污染与恢复生态学的一项重要研究内容,主要研究污染物在环境

中的迁移、转化和积累的生物学规律以及对生物的影响和危害,这种效应包括从分子、细胞、组织、器官、个体、种群水平到生态系统等各级生物层次,揭示污染效应的机理(乔玉辉,2008)。同时,也要揭示各生命组织层次对污染的响应和适应规律。

(2) 寻求受污染生态系统恢复和重建的方法与途径。

对受污染生态系统进行恢复和重建的方法有很多,如物理、化学和生物法,各种方法各有利弊,在实际治污过程中,应充分发挥各种方法的长处,扬长避短。例如,在污水处理中,一级处理去除污水中的漂浮物、悬浮物和其他固体废物,二级处理大幅度去除污水中的悬浮物、有机污染物和部分金属污染物后,由于三级处理常用的超滤、活性炭吸附、离子交换、电渗析等手段的基建和运行费用较为昂贵,可以采用土地处理系统、氧化塘等辅助设施完成水质的深层净化。

## 五、污染与恢复生态学的发展趋势

随着学科之间的不断交叉渗透,污染与恢复生态学的发展呈现出了一些新特点:

(1) 宏观和微观两极分化。

随着分子生态学和全球生态学的兴起,当前污染与恢复生态学的研究明显呈现出向微观和宏观两极发展的趋势。从基因—细胞—组织—器官—系统—个体—种群—群落—生态系统—景观—区域—生物圈等生命组织层次上,都有它们与污染物相互关系的研究。例如,在宏观层次,有污染物随大气环流、海洋洋流全球迁移和大尺度下生态系统退化机理的研究,有景观结构、功能与动态变化特别是在污染条件下景观的破碎化和全球污染物的生物地球化学循环研究等;在中观层次,主要是污染造成的种群遗传组成上微小差异而产生的微观进化研究;在微观层次,有在细胞水平上研究污染条件下染色体的变异与在分子水平上研究基因和基因组的变化以及相应的蛋白质和蛋白质组的变化等。此外,还要通过微观和宏观相结合,研究污染物从个体(主要是微观方面)—种群—群落—生态系统的迁移、转化、净化规律,力求组成合理高效的水生和陆生生态系统,以保证被污染区域的环境质量得到改善。

(2) 复合污染生态学成为学科研究的热点和难点。

环境中的污染物以单个存在的情况是很少的,大多数情况下是无机污染物之间、有机污染物之间以及无机和有机污染物联合作用构成的复合污染。由于复合污染下污染物对生物有机体的效应与单一污染物作用存在差异,因此,复合污染研究更能客观体现出环境中污染物与生物有机体之间的相互作用规律和机理。复合污染研究对于客观揭示环境中污染物的行为具有重要意义。但是,由于环境因素的复杂性、污染物种类的多样性以及生物体对污染物耐受的差异广泛性,复合污染的规律更为复杂。因此,对于复合污染的研究在理论和方法上还需要进行更多的探索和创新。

(3) 新材料、新化合物的污染生态效应得到密切关注。

目前全世界每天大约要产生近千种新的化合物,很多化合物进入环境后,人们对其毒性和生物的适应性还一无所知。纳米材料、绿色离子液体、抗生素等的广泛使用,虽然改善了人们的生产生活并防治了疾病,但其对环境和生物的生态风险必须引起足够的重视。近几年来,持久性有机污染物、环境内分泌干扰物、纳米材料等新型污染物的环境归趋、生物毒性和生物降解等一直是污染与恢复生态学研究的热点。

(4) 与食品安全、生物安全和生态安全的联系更加紧密。

污染问题引起人们的广泛关注最先是从其对人体健康的影响开始的,因此长期以来对污

染物的行为与人体健康就存在着千丝万缕的联系。特别是我国加入世界贸易组织(WTO)后,农产品中重金属超标问题已成为国际贸易中的一道绿色壁垒,阻碍了我国农产品进入国际市场。我们与国外农产品的竞争在某种程度上是“绿色食品”、“有机食品”、“食品安全”意义上的竞争。随着近年来“奶粉三聚氰胺”、“非食用食品添加剂”等食品安全事件频发,食品安全问题引起了国内外的广泛关注。国家自然科学基金委员会生命科学部在制定“十一五”学科发展战略和优先发展领域中,将“食品安全的重要基础研究”列为26个生命科学优先发展领域之一。目前普遍认为,广义的健康包括人的身体健康、心理健康和生态系统健康,环境污染时刻影响着这三个方面,因此,污染环境与健康的研究将是很长时期内污染与恢复生态学的一个研究重点。

(5) 污染环境的经济有效和环境友好恢复治理技术的研发。

由于雾霾笼罩、饮用水源地污染、垃圾围城等环境问题时刻困扰人们的生产生活,治理环境污染和加强生态环境保护,实现“天蓝、地绿、水清”的“绿色中国梦”已得到全社会的共识,很多污染治理和恢复技术,如物理、化学和生物法应运而生,种类繁多,每种技术和方法均有各自的优缺点。因此,在使用各种技术时要尽可能防止二次污染,兼顾技术、经济和环境可行性,开发经济有效和环境友好的污染治理、恢复技术任重道远。

2015年8月,全国污染生态学学术研讨会在兰州大学召开。大会主席、南开大学环境科学与工程学院周启星教授在题为“污染生态学——今后发展与环境对策”的主题报告中,提出了以下8大科学与技术前沿:

- (1) 污染生态行为与生态过程。
- (2) 复合污染生态效应及其分子毒理。
- (3) 污染环境生态诊断与预警。
- (4) 污染生态系统生物标记物。
- (5) 污染进化及其机制。
- (6) 污染环境的生态修复技术。
- (7) 组合技术应用。
- (8) 复合污染控制、治理与修复的生态工程及其实践。

## 小 结

污染与恢复生态学是运用生态学、环境科学等学科的理论和方法,探索生物与污染环境之间的相互作用规律和机理,并寻求受污染环境恢复和重建对策的科学。它是在一系列环境公害出现以后,生态学和环境科学相互交叉渗透形成的边缘学科。

污染与恢复生态学主要有三大研究内容:①污染物对生物个体、种群、群落、生态系统和景观的影响;②生物个体、种群、群落、生态系统和景观对污染的响应和适应;③受污染生态系统的恢复与重建。

随着学科之间的不断交叉渗透,污染与恢复生态学的发展呈现出一些新特点:①宏观和微观两极分化;②复合污染生态学成为学科研究的热点和难点;③新材料、新化合物的污染生态效应得到密切关注;④与食品安全、生物安全和生态安全的联系更加紧密;⑤污染环境的经济有效和环境友好恢复治理技术的研发。

### 复习思考题

1. 污染与恢复生态学是在何种背景下产生的?
2. 简述污染与恢复生态学的定义、研究内容和研究任务。
3. 通过查阅相关文献,谈谈目前污染与恢复生态学的发展趋势。
4. 你认为应该如何学习污染与恢复生态学?

### 建议读物

王焕校. 2012. 污染生态学. 3 版. 北京: 高等教育出版社.

黄铭洪. 2003. 环境污染与生态恢复. 北京: 科学出版社.

Freedman B. 1989. Environmental Ecology: the Impacts of Pollution and Other Stresses on Ecosystem Structure and Function. San Diego: Academic Press, Inc.

### 推荐网络资讯

中华人民共和国环境保护部: <http://www.zhb.gov.cn>

中国生态环保网: <http://www.zgsthbw.org>

环境生态网: <http://www.eedu.org.cn>

中国科学院生态环境研究中心: <http://www.rcees.ac.cn>

中国环境修复网: <http://www.hjxf.net>



# 第一章 个体污染生态学

随着环境中污染物数量不断增加,生物处于污染环境条件下,相应的生物体内的毒物含量也逐渐积累。污染物必然会在生物体内发生不同的变化,最直接的表现是对生物新陈代谢产生影响,当富集到一定程度后,生物就开始出现受害症状,如生理生化过程受阻,生长发育停滞,最后可能导致死亡。在污染条件下,生物的生长、发育、繁殖、行为和分布都会受到不同程度的影响,且不同生物受害程度不同。此外,污染物具有远期效应,这主要体现在某些污染物的致癌、致畸、致突变作用上(简称“三致”效应),环境污染已经成为影响人群健康的大敌(段昌群,2010)。

环境污染作为一种选择因子,生物也会对其逐渐适应,包括对自身形态、生理、行为的调整,以及遗传多样性的调节。本章将重点介绍污染物对于生物个体生长、发育、繁殖等方面的影响及生物自身的调整与适应。

## 第一节 污染环境下水生物的生长

### 一、污染对生物生长的影响

生态系统对人类释放的污染物有一定的阈值,也称环境容纳量,超过系统中生物和环境净化能力时,污染物就不断地在环境和生物体内积累,进而使生物开始出现受害症状。受害症状从形态结构、生理代谢、生化过程和行为特征等多个方面表现出来,甚至部分敏感生物会死亡,而抗性生物则可能表现不明显,这些都取决于污染物的种类、污染程度、生物种类差异和生物自身的个体差异。

#### (一) 对形态结构的影响

##### 1. 植物

污染物对植物形态结构的影响包括植株大小、叶片斑点、根长、株高、生物量等方面。

例如,与对照相比,镉胁迫使4个水稻品种的产量和每株穗数、每穗总粒数、结实率、粒重等经济性性状显著下降,但下降幅度因品种而异(表1-1)。苗期耐镉较强的两个品种下降幅度较小,耐性相近而籽粒镉含量不同的品种间相比,籽粒镉含量较高的秀水63和ZH9826下降幅度分别要大于籽粒镉含量较低的秀水217和嘉绍2号(程旺大等,2005)。另有研究表明,Pb、Cd能明显抑制植物根生长和使根形态畸变,当外界Cd、Pb浓度过高时,甚至会直接导致植物死亡。高浓度Pb能导致豌豆根部细胞细胞壁和皮层薄壁组织木质化和不规则径向增厚(谌金吾,2013)。

表 1-1 镉处理对不同水稻品种产量及产量性状的影响(程旺大等,2005)

品种	处理	单株穗数		单穗总粒数		结实率		粒重		单株稻谷产量	
		值	相对变化率 <sup>a</sup> /%	值	相对变化率/%	值/%	相对变化率/%	值/mg	相对变化率/%	值/g	相对变化率/%
秀水 63	CK(对照)	5.8		117.8		83.8		24.3		14.2	
	Cd	5.6	-3.4	111.2	-5.6	79.6	-5.0	23.3	-4.2	11.73	-17.4

续表

品种	处理	单株穗数		单穗总粒数		结实率		粒重		单株稻谷产量	
		值	相对变化率 <sup>a</sup> /%	值	相对变化率 <sup>a</sup> /%	值/%	相对变化率 <sup>a</sup> /%	值/mg	相对变化率 <sup>a</sup> /%	值/g	相对变化率 <sup>a</sup> /%
秀水 217	CK	5.5		121.1		83.3		25.2		14.25	
	Cd	5.3	-3.6	117.3	-3.2	79.4	-4.6	24.4	-3.2	11.83	-17.0
ZH9826	CK	5.7		124.6		83.9		22.3		13.6	
	Cd	5.3	-7.0	116.3	-6.7	78.6	-6.3	20.8	-7.0	10.57	-22.3
嘉绍 2 号	CK	5.4		119.4		82.8		23.0		12.83	
	Cd	5.1	-5.6	112.5	-5.8	78.5	-5.2	21.8	-4.9	10.03	-21.8
差异显著性分析	LSD <sub>0.05</sub> (C) <sup>b</sup>	0.3		4.8		2.4		0.5		0.81	
ANOVA <sup>c</sup>	C×Cd	ns		ns		ns		*		ns	

注: a. 相对变化率=100%×(Cd处理-对照)/对照; b. LSD<sub>0.05</sub>(C): 品种间比较; c. ns 表示无显著差异, \* 表示差异显著( $p < 0.05$ )。

邱昌恩等(2007)以 BG11 为培养基,研究了从 0.1mg/L 到 200mg/L 的 7 个浓度 Cd<sup>2+</sup> 培养条件下绿球藻的生长变化,其中低浓度下(1mg/L 以下)绿球藻生长基本不受影响,在中等浓度以下(5~10mg/L)绿球藻有一定的耐性,最大比生长率[生长速率  $\mu = (\lg N - \lg N_0)/t$ ,  $N_0, N$  表示培养生物生长计时开始和结束时的藻类生物量即光密度,  $t$  为结束与起始时间差]比对照延迟 2 天;在高浓度下(50mg/L 以上)绿球藻出现负增长,如图 1-1 所示。

## 2. 动物

污染物可通过皮肤接触、饮食和呼吸等方式进入动物体内,随着污染物在动物体内的积累,逐渐对动物体本身产生毒害。很多污染物能够直接或间接地导致儿童身高发育迟缓,如铅能抑制生长激素(GH)的合成与释放,从而延缓儿童的体格发育,使儿童发育迟缓,身材矮小;较高浓度的合成雌激素能够促进骨骺板的愈合和线性生长的终止。同时,铅影响钙在动物体内的吸收和代谢,从而干扰骨形成,造成身高发育迟缓(考验等,2009)。

Berry 等(2002)考察了发育中大鼠慢性铅暴露对 GH 以及 IGF-1(一号增长因子,也称生长促进因子)的效应。对 20 只雄性大鼠饮水中加入乙酸铅 6 周后,与对照组相比,血浆平均 GH 水平、GH 峰值、最低值浓度和 GH 峰面积分别减少了 44.6%、37.5%、60%和 35%。铅中毒能够减弱 GH 的释放,但是并不改变下丘脑 GH 分泌脉冲,表明铅通过对脑垂体产 GH 细胞有直接作用。除铅外,长期吸入烟草烟雾同样能导致 GH 释放减少。Kapoor 和 Jones (2005)研究表明,吸烟会导致 GH 释放减少,表现为 IGF-1 水平下降。

甲状腺功能减退是导致动物矮小的病因之一。有研究发现,多氯联苯(PCB)和农药均能引起甲状腺功能减退,从而导致儿童身材矮小(考验等,2009)。

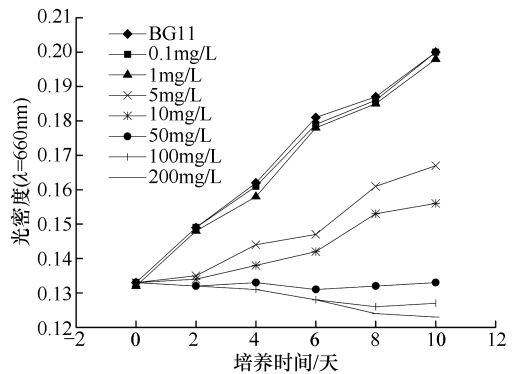


图 1-1 Cd<sup>2+</sup> 对绿球藻生长的影响(邱昌恩等,2007)

曾丽璇(2004)研究表明,水中镉浓度与河蚬的个体死亡率之间存在着明显的剂量-效应关系。随着镉浓度升高,河蚬死亡率明显上升。同时,同一实验浓度的镉对河蚬的影响表现出随着时间的延长,河蚬死亡率上升的正相关关系(表 1-2)。

表 1-2 河蚬镉污染急性毒性实验(N=20)(曾丽璇,2004)

实验浓度/ ( $\mu\text{g/L}$ )	浓度对数	实验河蚬存活率/%			
		24h	48h	72h	96h
100	2.0	100	100	100	100
200	2.3	100	100	100	90
400	2.6	100	95	85	80
800	2.9	85	75	60	50
1600	3.2	65	40	15	5
3200	3.5	45	30	10	0
6400	3.8	20	5	0	0

### 3. 微生物

研究表明,环境中的某些重金属在低浓度时不会对微生物产生不利影响,反而有利;但高浓度的重金属可以抑制微生物的生长和繁殖(池振明,2005)。李淑英等(2012)以 4 种典型的大肠杆菌( $G^-$ )、枯草芽孢杆菌( $G^+$ )、啤酒酵母菌(真菌)和链霉菌(放线菌)为对象,研究了不同  $\text{Hg}^{2+}$ 、 $\text{Cd}^{2+}$ 、 $\text{Cr}^{6+}$  和  $\text{Pb}^{2+}$  浓度下 4 种微生物的生长状况。结果表明,低浓度重金属离子对 4 种微生物生长有促进作用,高浓度有抑制作用, $G^+$  较  $G^-$  对  $\text{Hg}^{2+}$  和  $\text{Cd}^{2+}$  更为敏感;4 种微生物对重金属离子的敏感性表现为链霉菌>枯草芽孢杆菌>大肠杆菌>啤酒酵母菌,对微生物毒性顺序为  $\text{Hg}^{2+}$ > $\text{Cd}^{2+}$ > $\text{Cr}^{6+}$ > $\text{Pb}^{2+}$ 。

#### (二) 对生理生化过程的影响

污染物对生物生长发育的影响,主要通过新陈代谢过程实现。因此,研究污染物对生物生理生化活动的影响,具有重要意义。

##### 1. 植物

土壤、大气和水体中污染物的广泛存在,使植物生存环境发生变化,直接或间接地影响植物的各项生理生化过程。基于重金属的化学和物理性质,其对生物产生毒性效应的分子机制主要有 3 类:第一,诱导自氧化和 Fenton 反应;第二,阻断必需功能活性基团和生物活性分子合成;第三,置换生物活性分子中的必需金属离子。 $\text{Cd}$ 、 $\text{Pb}$  作为植物非必需元素进入植物体内,会导致植物一系列生理生化响应,包括水势降低、细胞膜流动性改变、激素合成降低、植物呼吸、固氮和光合作用受阻等(谌金吾,2013)。

##### 1) 水分代谢

植物水分代谢是指植物的水分吸收、运输、利用和散失等过程。对于陆生植物的水分运输途径主要包括:其吸收土壤水分,通过根毛进入皮层,再进入内皮层,通过木质部薄壁细胞进入茎的导管,通过叶脉导管进入叶肉细胞,再通过气孔伴随蒸腾作用进入大气中。污染物影响植物的水分代谢主要表现在以下几个方面(段昌群,2010):

(1) 降低土壤水分的有效性,减少植物对水分的吸收。在污染环境中,土壤溶液中溶质离子浓度远远大于植物体内离子浓度,导致根部水分外渗,最终使细胞大量失水,发生质壁分离,

甚至能使细胞膜破裂。另外,pH 升高或降低也能影响根部对水分的吸收。

(2) 降低植物的呼吸作用,使植物水分吸收能力下降,引起生理性干旱。实验表明,植物对水分的吸收是需要能量的,很多污染物能显著抑制植物的呼吸作用,使能量的产生能力和产生水平降低,从而使植物根系不能有效地吸收土壤中的水分。例如,氰化物、大多数重金属离子都能通过抑制呼吸作用而引起植物对水分吸收能力的下降。

(3) 损害叶片,降低蒸腾作用。植物主要靠根压和蒸腾拉力吸水,但当空气中  $\text{SO}_2$  等气体过多时,将灼伤叶片,或使保卫细胞失水而关闭,减少甚至停止蒸腾作用。Pb 还能促进脱落酸(ABA)在植物体内的积累,而导致气孔关闭。Pb 降低植物水势是因为其能使植物叶片中保卫细胞体积变小,降低与保持细胞膨胀状态和维持细胞壁塑性的一些混合物的水平(谌金吾,2013)。

## 2) 矿质营养

环境污染影响植物对营养的吸收,其中一个重要的方面就是影响根对无机养分的吸收。污染对植物吸收营养的影响主要表现在以下几个方面:

(1) 污染物通过改变土壤环境的 pH,改变了营养元素的有效性。

绝大多数污染物均能影响环境的 pH,特别是  $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_x$ 、HF 等酸性物质,将显著地降低环境的 pH,而很多有机污染物则显著地增加 pH。各种营养元素尤其是微量金属元素随着土壤 pH 变化有效态差异较大(段昌群,2010)。

在土壤环境中 pH 低于 4 或高于 9 的酸碱条件下,植物的正常代谢过程受到破坏,影响根系对矿质的吸收。一方面,pH 的改变影响根表面所带电荷而使离子吸收受到影响。pH 较低时,土壤溶液中  $\text{H}^+$  浓度增加,影响根表面羧基的解离,而使正电荷加强,阴离子吸收量增多;土壤溶液 pH 较高时,则根表面的负电荷加强,阳离子吸收量增多,阴离子吸收量减少。另一方面,pH 的改变对植物吸收养分存在间接的影响。首先,土壤 pH 的改变影响溶液中养分的溶解和沉淀。N、P、K、S、Ca 及 Mg 在土壤 pH 为中性时有较大的有效性,而 Mn、B、Cu 及 Zn 几种微量元素在微酸性反应时有效性较大,Fe 在酸性反应时有较大的有效性。

(2) 污染物改变土壤微生物的活性,且影响酶的活性,从而影响无机营养的可利用性。

污染物能影响植物根系对土壤中营养元素的吸收,原因之一是污染物能改变土壤微生物的活性,也能影响土壤酶的活性。实验表明,土壤酶活性与添加铅浓度呈显著的负相关,如蛋白酶、蔗糖酶、 $\beta$ -葡萄糖苷酶、淀粉酶等。由于土壤微生物和酶活性的变化,从而影响土壤中某些元素的释放态和可给态量(段昌群,2010)。

(3) 重金属通过元素之间的拮抗作用影响植物对某些元素的吸收。

重金属影响植物对某些元素的吸收,还与元素之间的拮抗作用有关。大量研究表明,Zn、Ni、Co 等元素能严重妨碍植物对 P 的吸收;Al 能使土壤中 P 形成不溶性的铝-磷酸盐,降低植物对 P 的吸收(段昌群,2010)。Ca 和很多元素都有拮抗作用,因此在抑制重金属污染土壤毒害时很多改良剂都选择了含钙制剂,通过钙与重金属的拮抗作用减少重金属对植物的毒害。

(4) 污染物能够影响植物体不同部位矿质营养的吸收与分布差异。

镉胁迫显著影响籽粒中一些矿质元素的含量,但影响效应因元素种类而呈现抑制或促进两种。镉胁迫下一些营养元素在植株营养体中的吸收、积累会发生变化,按镉对籽粒元素含量的效应可将所涉及的 8 种元素划分为 2 类(表 1-3):一类表现为抑制效应,即镉胁迫显著降低籽粒中元素含量,包括 K、P、Mg、Mn 和 Zn 等 5 种;另一类表现为促进效应,包括 Fe、Cu 和 Ca 等 3 种,具体见表 1-3。

表 1-3 镉处理对不同品种籽粒中 K、P、Mg、Ca、Cu、Fe、Mn 和 Zn 含量的影响(程旺大等, 2005)

元素含量	秀水 63		秀水 217		ZH9826		嘉绍 2 号		差异显著性分析		
	CK	+Cd	CK	+Cd	CK	+Cd	CK	+Cd	LSD <sub>0.05</sub> (C)	CXCd	
K	mg/kg	1962	1914	2303	2082	2116	2013	2003	1808	35.1	**
	RC/%		-2.5		-9.6		-4.9		-9.8		**
P	mg/kg	3404	3307	3674	3508	3792	3759	3618	3423	23.7	**
	RC/%		-2.9		-4.5		-0.9		-5.4		**
Mg	mg/kg	682	632	659	601	639	622	642	621	6.48	**
	RC/%		-7.3		-8.7		-2.7		-3.2		**
Ca	mg/kg	198.8	211.3	178.2	186.1	173.6	181.4	192.5	202	3.31	**
	RC/%		6.3		4.4		4.5		4.9		**
Cu	mg/kg	4.56	6.05	4.02	5.19	4.3	5.74	4.11	5.36	0.24	**
	RC/%		32.6		29.1		33.6		30.4		**
Fe	mg/kg	118.1	19.54	17.75	18.15	16.25	18.49	18.65	19.25	0.37	**
	RC/%		8.0		2.3		13.8		3.2		**
Mn	mg/kg	22.24	20.8	18.79	17.48	17.79	17.06	19.99	19.08	0.49	**
	RC/%		-6.5		-7.0		-4.1		-4.6		**
Zn	mg/kg	28.28	24.05	26.15	21.7	22.64	20.11	28.1	25.37	0.16	**
	RC/%		-15.0		-17.0		-11.2		-9.7		**

注:RC(相对变化率)=100%×(Cd 处理-对照)/对照;LSD<sub>0.05</sub>(C):品种间比较; \*\* 表示差异极显著。

(5) 污染物通过影响植物激素分泌和细胞膜通透性,改变营养吸收状态。

生长素和细胞分裂素除了对生长过程产生重要影响外,还能影响对离子的吸收。例如,生长素能直接参与阳离子的吸收,可能是由于生长素将质膜 H<sup>+</sup>-ATPase 作为最终目标,从而对金属的吸收产生影响。尽管细胞质偏碱性, H<sup>+</sup>-ATPase 造成质外体酸化软化了细胞壁,跨膜的电化学梯度导致阳离子通道打开或膜上的离子转运蛋白活化,阳离子进入细胞(Vamerali et al., 2011)。

细胞膜具有选择通透性,构成了生命体系物质交换、转运、物质和能量产生与消耗的具体场所。污染物通常通过改变细胞膜通透性而影响营养元素吸收。Bapu 等(1994)发现,汞还能使机体内的 Mg、Na、K、Mn、Cu、Cr、Ni 等含量下降,说明 Hg<sup>2+</sup> 不仅对水的渗透吸收有抑制作用,还会影响对其他元素的渗透吸收。

(6) 污染物通过抑制植物根系呼吸作用导致营养成分主动吸收能力下降。

有些营养元素的吸收是靠主动运输获得的,这是一个需能的过程,而能量靠根部细胞呼吸作用获得。污染物通过影响根系的吸收能力,间接影响养分的吸收。研究证明,镉能明显影响玉米对 N、P、K、Ca、Mg、Fe、Mn、Zn、Cu 的吸收。镉能使玉米幼苗体内 N、P、Zn 的含量降低; Ca 的含量增加,均达到显著相关的水平; Mn、Cu 含量略有降低(段昌群, 2010)。镉影响植物对氮的吸收可能是由于镉能抑制植物根系亚硝酸还原酶的活性,直接影响对氮的吸收(王焕校, 2012)。

3) 光合作用

污染物对光合作用的影响主要表现在以下几个方面: