

21 世纪环境科学

# 环 境 土 壤 学

陈怀满 主编

科 学 出 版 社

北 京

## 内 容 简 介

环境土壤学是一门新兴的综合性交叉学科,是环境科学和土壤学的重要组成部分。本书对环境土壤学的定义、定位和研究内容等进行了较为全面而深入的讨论,书中素材的组合以及对一些观点的阐述和认识,具有探索性和前沿性,是该学科领域的重要论著。全书共分 11 章,第一章为绪论,阐述了环境土壤学的产生与发展;第二章为土壤的基本组成、性质和分类,是学习本书所必须掌握的有关土壤性质方面的最基本内容;第三章至第七章对典型污染物在土壤圈中的循环和对环境质量的影响作了较为详细的探讨;第八章为土壤退化过程与环境质量,对土壤酸化等主要退化过程进行了论述;第九章和第十章为土壤环境工程,对污染土壤的修复、地下管道的腐蚀与保护等进行了讨论;第十一章为环境土壤学研究法。

本书可作为环境科学与环境工程、土壤学、生态学、生物学、农业科学、地理与资源科学等专业本科生与研究生教材,亦可供相关专业的老师、科技工作者、工程和管理人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

---

环境土壤学 / 陈怀满主编. —北京:科学出版社, 2005

21 世纪环境科学教材

ISBN 7-03-014903-3

I. 环... II. 陈... III. 环境土壤学—高等学校—教材  
IV. X144

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 004184 号

---

责任编辑:谭宏宇 / 责任校对:连秉亮  
责任印制:刘 学 / 封面设计:木 子

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

南京展望文化发展有限公司排版

江苏省句容市排印厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2005 年 2 月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2006 年 5 月第二次印刷 印张: 35 <sup>3</sup>/<sub>4</sub>

印数: 3 201—6 400 字数: 698 000

定价: 52.00 元

# 《环境土壤学》编辑委员会

主 编 陈怀满

编 委 (以姓氏笔画为序)

朱永官	杨 曦	吴启堂	张乃明
张甘霖	陈同斌	陈怀满	周东美
郑春荣	徐建民	董元华	蒋 新

# 前 言

环境土壤学是研究自然因素和人为条件下土壤环境质量变化、影响及其调控的一门学科。它涉及土壤质量与生物品质,即土壤质量与生物多样性以及食物链的营养价值与安全问题;涉及土壤与水 and 大气质量的关系,即土壤作为源与汇对水质和大气质量的影响;涉及人类居住环境问题,即土壤元素丰缺与人类健康的关系;涉及土壤与其它环境要素的交互作用,即土壤圈、水圈、岩石圈、生物圈和大气圈的相互影响;涉及土壤质量的保护与改善等土壤环境工程的相关研究与应用。环境土壤学是一门新兴的土壤学与环境科学等交叉融合的综合性学科。

环境土壤学是环境科学的重要组成部分,是现代土壤学的主要内容和标志。它起源于 20 世纪 70 年代后期,目前仍是一门发展中的学科,一些定义、概念、内容都需要去进行探索和创立。正因为如此,当我们决定承担编写《环境土壤学》这一任务时,深知工作的艰巨和责任的重大。但所欣慰的是,在各方面的关怀与支持下,经过了两年多的努力,终于完成了预期的目标。

这是一本普通高校本科生和研究生的通用教材,因而在内容的选择与安排上力求基础与提高相结合,在每章末除了给出一些重要的参考文献外,还提出了进一步阅读的文献,以供需要的读者参考。在教学对象的定位上,我们希望从“土壤作为环境要素的中心环节”的观点来考虑这一问题,因而该书所阐述的观点、原理和方法对于所有涉及“土壤与环境”问题的老师和同学都将有一定的参考价值,特别是对完善环境科学、地球科学、生态学和生命科学的教学与科研体系,本书内容均可借鉴。此外,化学学科的老师 and 同学由该书的内容可知,在探索土壤圈中污染物的环境行为时,涉及许多化学原理和方法,它表明化学学科在研究复杂体系中污染物的迁移、转化和归趋中,正发挥着无可替代的作用,亦同时表明环境土壤学中尚有许多问题有待于与包括化学家在内的许多科学家一起去解决。

本书共分 11 章。第一章为绪论,论述了土壤在环境中的作用与地位,阐述了环境土壤学的产生与发展。第二章为土壤的基本组成、性质和分类,这是学习本书所必须具备和掌握的有关土壤性质方面的最基本内容,凡已学习过“土壤学”课程的有关专业的学生可免修该章。第三章为土壤中碳、氮、硫、磷与环境质量,讨论了

土壤有机碳库及其相关的环境影响问题;氮素循环与温室效应、水体富营养化和酸雨等环境问题;土壤中硫的含量、形态,硫在土壤中的吸附解吸、氧化还原及矿化等行为以及土壤的硫素管理与环境质量的关系;土壤中磷的循环与转化,磷肥施用对水体、环境以及对农产品质量的影响等。第四章为土壤-植物系统中的硒、氟和碘及其环境行为,讨论了土壤-植物系统中硒的含量、形态和迁移、硒的健康效应与调节;土壤-植物系统中氟的来源、土壤氟化学、地氟病及其防治;土壤-植物系统中碘的含量与来源、碘缺乏病及其防治等。第五章为土壤重金属元素与环境质量,讨论了土壤中典型重金属元素和稀土元素的来源、形态及其在土壤中的行为与生态、环境效应。第六章为土壤中有有机污染物与环境质量,讨论了土壤中典型有机污染物的主要种类、来源、理化性质、环境行为、生态毒性以及对环境质量的影响。第七章为土壤中的放射性物质与环境,人们对于土壤放射性污染的认识在目前远不如其他污染物那样来得重视,其原因恐与对其危害的严重性认识不足有关;本章主要讨论土壤中的放射性物质及其环境效应,以期加强对土壤放射性物质的污染防治和污染土壤的合理利用。第八章为土壤退化过程与环境质量,从土壤演变的能量观点介绍了土壤退化过程的内在涵义,选择了土壤侵蚀、土地荒漠化、土壤酸化、土壤盐渍化等主要退化过程为例证,介绍它们的成因、过程、影响和环境效应,主要目的是为读者提供一个认识和理解这些过程的轮廓和基本原理。第九章为污染土壤的修复,对土壤修复的概念与分类、污染土壤的物理修复、化学修复、微生物修复、植物修复等进行了讨论,突出了植物修复的优势。污染土壤的修复是土壤环境工程的重要组成部分,但由于本章主要内容偏重于修复原理的讨论,同时篇幅较大,故单独成章。第十章为土壤环境工程,对地下管道的腐蚀与保护、城市污水土地处理、固体废弃物的土地处置等进行了讨论;土壤环境工程是环境土壤学中一个亟待加强的领域。第十一章为环境土壤学研究法,是对前十章内容的补充,凡在前十章中未能包括的某些需要掌握的方法,例如土壤样品的采集、一些典型有机、无机污染物的分析方法、土壤中污染物迁移的相关模型和评价方法等均以实例进行了简要的讨论。

本书由集体写作而成,许多专家参与了初稿的撰写和审阅工作。参加写作的有:第一章,陈怀满;第二章,徐建民、何艳;第三章,张乃明、王慎强;第四章,朱永官、黄益宗、戴九兰;第五章,周东美、郑春荣、张乃明、吴启堂;第六章,蒋新、杨曦、陈怀满;第七章,朱永官、杨俊诚、唐翔宇;第八章,张甘霖;第九章,陈同斌、雷梅、周东美、朱永官;第十章,陈怀满;第十一章,董元华(土壤样品采集和土壤中典型有机污染物分析方法示例)、郑春荣(土壤中典型无机污染物分析方法示例)、安琼(土壤中典型有机污染物分析方法示例)、吴启堂(土壤环境评价示例)。参加有关章节审阅的有(按审阅章节的顺序):周建民、陈志诚、章明奎、邢光熹、潘根兴、龚子同、邹家庆等教授;周东美、董元华研究员审读了部分章节,郑春荣老师参与了各章的审

改工作。全书由陈怀满审阅、定稿。

在成书过程中得到了中国科学院南京土壤研究所、钟山学院(南京)、中国科学院研究生院、中国科学院生态环境研究中心、中国科学院地理与资源研究所、浙江大学、南京大学、云南农业大学、华南农业大学、中国农业科学院原子能研究所等单位的许多老师与朋友的热情支持与帮助;美国北卡大学涂从博士提供了重要的参考文献;科学出版社的谭宏宇编辑给予了热情指导;郑春荣老师完成了全书的计算机绘图;特别是中国科学院南京土壤研究所所长周健民研究员、钟山学院环境工程系主任邹家庆教授、中国科学院南京土壤研究所科技处前处长董元华研究员、高级工程师朱平老师,始终关心该书的写作进程并给予了切实而有效的帮助;中国科学院南京土壤研究所副所长杨林章研究员、研究生部副部长吴雪华老师等,也始终关心该书的写作。对于来自上述的诸多帮助与支持,作者在此一并表示衷心的感谢。

由于水平有限,对于书中的错误和不足之处,切望得到批评指正,以便修正与补充。

陈怀满

2004年盛夏于南京

# 目 录

第一章 绪论	1
第一节 土壤与土壤圈	1
一、土壤	1
二、土壤圈	2
第二节 环境污染与土壤污染	4
一、环境与环境污染	4
二、土壤环境问题和土壤污染	6
第三节 土壤质量及其评估	14
一、土壤质量	14
二、土壤质量的评估	14
三、需要探索的问题	18
第四节 环境科学与环境土壤学	19
一、土壤在环境中的作用与地位	19
二、环境土壤学的产生与研究内容	38
思考题与习题	45
主要参考文献	45
建议进一步阅读的文献	46
第二章 土壤的基本组成、性质和分类	48
第一节 土壤生态系统的基本组成	48
一、土壤矿物质	48
二、土壤有机质	54
三、土壤生物	64
四、土壤水	68
五、土壤空气	76
第二节 土壤性质	78
一、土壤物理性质	78
二、土壤化学性质	92
三、土壤生物学性质	101
第三节 土壤的形成	104

一、土壤形成因素 .....	105
二、土壤形成过程 .....	107
三、土壤剖面分化与特征 .....	110
第四节 土壤分类与分布 .....	111
一、土壤分类概述 .....	111
二、土壤发生分类(中国土壤分类系统) .....	112
三、系统分类(中国土壤系统分类) .....	116
第五节 土壤环境及其功能 .....	118
思考题与习题 .....	119
主要参考文献 .....	119
建议进一步阅读的文献 .....	121
<b>第三章 土壤中碳、氮、硫、磷与环境质量</b> .....	<b>122</b>
第一节 土壤中的碳与环境质量 .....	122
一、土壤有机碳库 .....	122
二、土壤碳的形态与活性 .....	128
三、土壤有机碳的分解与转化 .....	129
四、土壤碳库与甲烷 .....	133
五、全球气候变化对土壤碳循环的影响 .....	136
第二节 土壤氮素与环境质量 .....	138
一、土壤中氮的含量和形态 .....	139
二、氮在土壤中的迁移转化 .....	141
三、土壤氮素管理与环境质量 .....	147
第三节 土壤中硫素与环境质量 .....	152
一、土壤中硫的含量与形态 .....	152
二、硫在土壤中的行为 .....	155
三、硫素循环对环境的影响 .....	160
第四节 土壤中磷素与环境质量 .....	164
一、土壤中磷的含量与形态 .....	165
二、磷在土壤中的迁移转化与固定 .....	167
三、土壤磷素与水体富营养化 .....	170
思考题与习题 .....	172
主要参考文献 .....	173
建议进一步阅读的文献 .....	174
<b>第四章 土壤-植物系统中的硒、氟和碘及其环境行为</b> .....	<b>176</b>
第一节 土壤-植物系统中的硒 .....	176



---

一、土壤中的硒 .....	177
二、植物中硒的含量 .....	183
三、土壤-植物系统中硒的迁移 .....	186
四、硒的健康效应及其调节 .....	188
第二节 土壤-植物系统中的氟 .....	189
一、土壤中氟的含量与来源 .....	190
二、土壤氟的形态 .....	192
三、土-水系统中氟的化学平衡 .....	195
四、土壤氟的生物效应 .....	197
五、土壤-水-植物系统中的氟与地氟病 .....	201
第三节 土壤-植物系统中的碘 .....	203
一、土壤中碘的含量与来源 .....	203
二、影响土壤碘行为的因素 .....	206
三、植物对碘的吸收 .....	209
四、碘缺乏病防治 .....	211
思考题与习题 .....	213
主要参考文献 .....	213
建议进一步阅读的文献 .....	215
<b>第五章 土壤重金属元素与环境质量 .....</b>	<b>216</b>
第一节 土壤中的重金属 .....	216
一、土壤重金属污染及其来源 .....	216
二、土壤中重金属的形态 .....	219
三、控制土壤中重金属溶解度的主要反应 .....	223
第二节 土壤元素背景值和土壤负载容量 .....	237
一、土壤元素背景值 .....	238
二、土壤负载容量 .....	242
第三节 重金属污染对环境的影响 .....	246
一、重金属对土壤肥力的影响 .....	246
二、重金属的植物效应及其影响因素 .....	247
三、重金属对土壤微生物和酶的影响 .....	252
四、重金属对人类健康的影响 .....	255
第四节 稀土元素在土壤中的行为与环境质量 .....	256
一、土壤中稀土元素的来源和含量 .....	256
二、土壤中稀土元素的形态 .....	258

三、稀土元素在土壤中的吸附与解吸 .....	260
四、稀土元素的环境效应 .....	262
第五节 土壤中污染物的交互作用 .....	264
一、土壤、植物系统中的 Pb - Cd 交互作用对植物吸收 Cd 的影响 .....	265
二、交互作用对模式参数的重要性 .....	267
三、土壤中重金属与有机污染物的交互作用 .....	267
思考题与习题 .....	271
主要参考文献 .....	271
建议进一步阅读的文献 .....	273
第六章 土壤中有有机污染物与环境质量 .....	274
第一节 土壤中有有机污染物概述 .....	275
一、农药 .....	275
二、多环芳烃类 .....	279
三、多氯联苯 .....	280
四、二 英 .....	281
五、石油类污染物 .....	283
六、其他重要的有机污染物 .....	283
第二节 土壤中有有机污染物的环境行为 .....	286
一、有机污染物在土壤中的吸附与迁移 .....	286
二、有机污染物在土壤中的转化 .....	292
三、土壤中农药的结合残留 .....	299
第三节 土壤中有有机污染物的生态效应与环境质量 .....	301
一、有机污染物对生物的影响 .....	301
二、农药污染与农产品质量安全 .....	307
第四节 土壤中有有机污染物的研究展望 .....	310
思考题与习题 .....	312
主要参考文献 .....	313
建议进一步阅读的文献 .....	314
第七章 土壤中的放射性物质与环境 .....	315
第一节 土壤中的放射性物质 .....	315
一、放射性和放射性污染 .....	315
二、土壤中放射性物质的来源 .....	318
三、放射性污染物的危害 .....	322
四、放射性核素在土壤中的行为 .....	324

第二节 土壤中放射性核素的植物效应·····	330
一、植物吸收的途径·····	330
二、影响植物根系吸收放射性核素的因素·····	336
三、植物吸收放射性污染物的调控·····	339
第三节 放射性核素在土壤侵蚀研究中的应用·····	341
一、放射性核素示踪土壤侵蚀的基本原理·····	342
二、侵蚀示踪技术的基本方法·····	343
三、侵蚀示踪研究的基本现状和前景·····	344
思考题与习题·····	345
主要参考文献·····	345
建议进一步阅读的文献·····	347
<b>第八章 土壤退化过程与环境质量·····</b>	<b>348</b>
第一节 土壤的自然演变与退化·····	348
一、土壤变化与环境条件的关系·····	349
二、人为导致的土壤退化·····	351
第二节 土壤侵蚀与环境质量·····	353
一、土壤水蚀及其影响因子·····	353
二、土壤水蚀的估计和预测·····	354
三、土壤水蚀对环境质量的影响·····	357
第三节 荒漠化过程中的土壤和环境质量变化·····	363
一、荒漠化及其影响·····	363
二、荒漠化过程的特点和影响因子·····	366
三、荒漠化评价的土壤和环境指标·····	367
第四节 土壤酸化与环境质量·····	369
一、土壤酸化过程的形成和实质·····	370
二、土壤酸化的主要成因·····	375
三、土壤酸化的环境效应·····	379
第五节 土壤盐渍化·····	382
一、土壤盐渍化过程及其影响因子·····	382
二、盐渍化土壤的管理·····	387
思考题与习题·····	391
主要参考文献·····	391
建议进一步阅读的文献·····	395
<b>第九章 污染土壤的修复·····</b>	<b>397</b>
第一节 土壤修复的概念与分类·····	397

---

一、土壤修复的概念	397
二、土壤修复的分类	398
第二节 污染土壤的物理修复	398
一、翻土和客土	398
二、高温热解	399
三、真空/蒸气抽提	400
四、固化/填埋	401
第三节 污染土壤的化学修复	402
一、化学钝化剂及改良剂	403
二、淋洗/萃取	405
三、电动修复	409
第四节 污染土壤的微生物修复	412
一、有机物污染土壤的微生物修复	413
二、重金属污染土壤的微生物修复	415
三、微生物修复技术的优缺点	416
四、原位微生物修复	417
五、异位微生物修复	419
第五节 污染土壤的植物修复	422
一、植物修复技术的概念与分类	422
二、植物修复技术的优缺点	423
三、重金属污染土壤的植物修复	424
四、有机物污染土壤的植物修复	432
五、放射性核素污染土壤的植物修复	435
第六节 污染土壤修复的发展趋势	438
思考题与习题	439
主要参考文献	439
建议进一步阅读的文献	441
第十章 土壤环境工程	442
第一节 地下管道的腐蚀与保护	442
一、金属腐蚀的定义和分类	442
二、土壤中金属的腐蚀原理	443
三、金属在土壤中的腐蚀过程	448
四、影响土壤中金属管道腐蚀的因素	450
五、土壤腐蚀性表征	452
六、地下管道的腐蚀防护	455

第二节 城市污水土地处理	457
一、污水慢速渗滤处理系统	457
二、其他土地处理系统	465
第三节 固体废弃物的土地处置	467
一、固体废物在处置过程中的反应	468
二、固体废物土地处置过程中的环境问题	469
三、固体废弃物的土地填埋	472
四、填埋场终场覆盖系统的构成和稳定化后的土地利用	484
思考题与习题	486
主要参考文献	486
建议进一步阅读的文献	487
第十一章 环境土壤学研究法	488
第一节 土壤样品的采集与制备	488
一、采样方案的拟订	488
二、样品采集与处理	492
三、采样质量保证与控制(QA/QC)	493
第二节 土壤中典型无机污染物的分析方法示例	498
一、样品的制备与分析质量控制	498
二、土壤中总砷的分析	498
三、土壤中镉的分析	502
四、土壤中总铬的分析	505
五、土壤中铜的分析	507
六、土壤总汞的测定	508
七、土壤中总镍的分析	510
八、土壤中铅的分析	511
九、土壤中锌的分析	513
十、土壤氟的测定	514
第三节 土壤典型有机污染物分析方法示例	516
一、土壤多氯联苯气相色谱分析	517
二、水稻土中除草剂丁草胺的测定	519
第四节 土壤环境质量评价方法示例	521
一、土壤环境质量现状评价	521
二、环境质量影响评价	525
三、植物吸收模拟	533
思考题与习题	545

---

主要参考文献	545
建议进一步阅读的文献	547
附表 1 中国土壤元素背景值(A层)	548
附表 2 中国土壤(A层)和世界土壤化学组成的中值	549
附表 3 土壤环境质量标准值	550
附表 4 食品中元素限量标准	551
附表 5 食品中部分有机农药最大残留限量标准	552
附表 6 食品中放射性物质限制浓度标准	553
附表 7 地质年代简表	554

# 第一章 绪 论

## 第一节 土壤与土壤圈

### 一、土 壤

我们生活在地球上,每时每刻都与土壤发生着密切的关系,“土壤”一词在世界上任何民族的语言中均可以找到,但不同学科的科学对什么是土壤却有着各自的观点和认识,工程专家将土壤看作建筑物的基础和工程材料的来源;生态学家从生物地球化学观点出发,认为土壤是地球系统中生物多样性最丰富、能量交换和物质循环最活跃的层面;经典土壤学和农业科学家则强调土壤是植物生长的介质,含有植物生长所必需的营养元素、水分等适宜条件,将土壤定义为“地球陆地表面能生长绿色植物的疏松层,具有不断地、同时地为植物生长提供并协调营养条件和环境条件的能力”;环境科学家认为,土壤是重要的环境要素,是具有吸附、分散、中和、降解环境污染物功能的缓冲带和过滤器。随着科学的发展,人们对土壤的认识和理解也在不断地深化与拓展,运用当代土壤圈物质循环的观点(赵其国 1991,2001,2003;周健民 2003),对土壤的功能、作用等方面的论述更接近于土壤本质的反映,认为它是“地球系统的组成部分,既是该系统的产物,又是该系统的支持者,它支持和调节生物圈中的生物过程,提供植物生长必要的条件;它影响大气圈的化学组成、水分与热量平衡;它影响水圈的化学组成、影响降水在陆地和水体的重新分配;它作为地球的皮肤,对岩石圈有一定的保护作用,而它的性质又受到岩石圈的影响”;土壤除了陆地区域以外,尚包括湿地和沼泽区域及湖泊的底部。由此可以认为土壤具有下列特征:

- 1) 具有生产力 含有植物生长所必需的营养元素、水分等适宜条件;建筑物的基础和工程材料;
- 2) 具有生命力 生物多样性最丰富、能量交换、物质循环最活跃的地球表层;
- 3) 具有环境净化力 是具有吸附、分散、中和、降解环境污染物功能的环境仓;

4) 中心环境要素 土壤是由矿物颗粒、有机质、水、空气和生物组成的地球表层,它是一个开放系统,是自然环境要素的中心环节。

基于上述认识,可将土壤作如下定义,即“土壤是历史自然体,是位于地球陆地表面和浅水域底部的具有生命力、生产力的疏松而不均匀的聚积层,是地球系统的组成部分和调控环境质量的中心要素”。这是一个相对来说比较综合性的定义,较为充分地反映了土壤的本质和特征。

## 二、土壤圈

### (一) 概 念

人们对地球表面的水圈、大气圈、生物圈和岩石圈早已熟悉,而对土壤圈的讨论则是近年来才予以关注。所谓水圈是指地球表面和接近地球表面的各种形态的水的总称,它包括海洋、河流、湖泊、沼泽、冰川以及土壤和岩石孔隙中的地下水、岩浆水、聚合水,生物圈中的体液、细胞内液、生物聚合水化物等,在水循环的作用下,各个特征不同的水体相联系而形成了水圈。大气圈是指包围地球的空气层或大气层的总体。大气是以氮、氧为主的多成分均匀混合气体,按其各个高度的特征可分为若干层次,常用的分层法有:①按温度垂直变化特点分为对流层、平流层、中层和热层;②按大气成分结构分为均质层和非均质层;③按压力特性分为气压层和外大气层(逸散层);④按电离状态分为中性层、电离层和磁层;此外,还可按大气化学成分分出臭氧层。岩石圈是指地球的刚性外壳层,是由一些能够相互独立运动的离散板块构成的。固体地球内部最基本的构造层为地壳、地幔和地核,岩石圈是由地壳和地幔最上部组成的固体地球最外部的圈层,具有较高的刚性和弹性,与土壤圈密切相连,为大气圈和水圈所覆盖,大陆岩石圈的厚度约在100~400 km之间。生物圈是指地球上所有生命与其生存环境的整体,它在地球表面上至平流层,下到十几公里的地壳,形成一个有生物存在的包层。实际上,绝大多数生物生活在陆地之上和海洋表面以下各约100 m厚的范围内,在地球上之所以能够形成生物圈,是因为在这样一个层面里同时具备了生命存在的四个条件:阳光、水、适宜的温度和营养成分。

土壤圈(Pedosphere)于1938年由马特森(S. Matson)提出,它是岩石圈、水圈、生物圈及大气圈在地表或地表附近相互作用的产物。现代土壤学、环境科学和生态学的研究进展加深了对土壤圈本质的理解。可以认为,土壤圈是“覆盖于地球陆地表面和浅水域底部的一种疏松而不均匀的覆盖层及其相关的生态与环境体



系 ;它是地球系统的重要组成部分 ,处于大气圈、水圈、生物圈和岩石圈的界面和中心位置 ,既是它们所长期共同作用的产物 ,又是对这些圈层的支撑” ,它可以表示为 :

$$S_q = f(L, H, B, A, i) \quad (1-1)$$

式中  $S_q$  代表土壤圈 , $L$  代表岩石圈 , $H$  代表水圈 , $B$  代表生物圈 , $A$  代表大气圈 , $i$  表示岩石圈、水圈、生物圈和大气圈之间的交互作用。土壤圈是最活跃与最富生命力的圈层 ,它与其他圈层间进行着永恒的能量与物质交换 ;土壤圈具有记忆块的功能 ,有助于识别过去和现在土壤和环境的变化 ,并有一定的预测性 ;土壤圈具有时空特征 ,其空间特征主要表现在特定条件下土壤的形成过程、土壤类型和性质的差异 ;而时间特征则表现在土壤与生态和环境体系的形成与演变过程之中 ,体现了土壤形成的阶段性 ;同时在空间与时间特征上均体现了生态与环境的演替性 ;土壤形成与演变的时间尺度约  $10^3 \sim 10^6$  a。

## (二) 功 能

从圈层观点出发 ,土壤学不仅仅局限于研究土壤物质的本身 ,而且朝着研究土壤与生存环境及地球圈层间相互关系的方向发展 ,它对人类生存环境及其全球变化的研究有着深刻的影响。按照当前的研究成果 ,土壤圈的功能包括如下几个方面 :

1) 对生物圈 支持和调节生物过程 ,提供植物生长的养分、水分与适宜的物理条件 ,决定自然植被的分布与演替。但土壤圈的各种限制因素对生物也起不良影响。

2) 对大气圈 影响大气圈的化学组成、水分与热量平衡 ,吸收氧气 ,释放  $CO_2$ 、 $CH_4$ 、 $H_2S$  和  $N_2O$  等 ,对全球大气变化有明显影响。

3) 对水圈 影响降水在陆地和水体的重新分配 ,影响水分平衡、分异、转化及水圈的化学组成 ;影响元素的生物地球化学行为。

4) 对岩石圈 作为地球的“皮肤” ,对岩石圈有一定的保护作用 ,可减少各种外营力。

通过上述讨论 ,我们可以认识到土壤和土壤圈两者紧密相连、密不可分 ,但又有着明显的差别 ,前者属于特指的物质 ,是具体的 ;而后者则是指土壤与其生态和环境的整体 ,是宏观的、概念性的 ,强调了与其他圈层的相互关系、相互作用与影响 ,具有环境的整体性。在环境土壤学的学习与研究中应始终贯彻土壤圈的学术思想 ,关注它的整体性、地域差异性、变动性和相对稳定性、资源性及其有限性。

## 第二节 环境污染与土壤污染

### 一、环境与环境污染

#### (一) 环境的涵义

“环境”是相对于中心事物而言的,是指主体周围的空间及空间中存在的事物,在环境科学中,一般认为环境是指围绕着人群的空间,以及其中可以直接或间接影响人类生活和发展的各种自然因素和社会因素的总体,在环境科学和工程研究中主要关心的是自然因素。对环境定义的差异缘于主体的界定,目前有三方面的认识:

1) 认为环境的主体是人,所研究的环境是人类生存的自然环境和社会环境。自然环境在人类出现前就客观存在,是指大气圈、水圈、岩石圈、生物圈、土壤圈等;社会环境则是人类发展的结果,包含人类创造的物质生产和消费体系以及文化体系等。

2) 认为环境的主体是包括人类在内的生物界,“环境”是影响生物生长、繁衍和发展的各种因子组成的整体。人类与生物界的各个物种之间存在相互联系、相互影响和相互制约的关系,共同组成一个整体,体现了生态学的观点。

3) 从实际工作出发,明示环境中应予保护的要素或对象,如大气、水、土、矿藏、森林、草原、名胜古迹、风景游览区、温泉、疗养区、自然保护区、生活居住区等。世界各国环境保护法对环境一词的法律实用对象范围作出了明确的规定,以保证法律的准确实施。

随着可持续发展战略的推进,以生物为中心的环境观逐渐受到人们的重视,而在环境立法和环境管理文件中,大多依据不同的目的和对象而具体规定环境的内涵。

#### (二) 环境污染

环境污染主要是指人类活动所引起的环境质量下降而有害于人类及其他生物的正常生存和发展的现象。自然过程亦会产生环境污染,但人们习惯于自然过程所引起的同类现象,称为自然灾害或环境异常。环境污染的产生有一个从量变到质变的过程,当进入环境中的某种污染物的浓度或总量超过环境自净能力时,就会产生危害。环境污染有不同的类型,按照环境要素可分为大气污染、水体污染、土

壤污染等,按照污染物的性质可分为生物污染、化学污染、物理污染等;按照污染物的形态可分为废气污染、废水污染、固体废物污染、噪声污染、辐射污染等;按照污染产生的原因可分为生产污染和生活污染,生产污染又可分为工业污染、农业污染、交通污染等;按照污染物的分布范围又可分为局部性污染(在面积上小于 $10^2 \text{ km}^2$ )、区域性污染(在面积上小于 $10^6 \text{ km}^2$ )、全球性(按大陆或全球的尺度)污染等。目前环境污染产生的最重要的原因之一是资源的不合理使用,将宝贵的有限资源变为废物并造成环境危害。比较典型的环境事件包括:

### (1) 世界重大公害事件

马斯河谷烟雾事件(1930年12月1~5日,比利时马斯河谷工业区,系二氧化硫、氟化物等有害气体和粉尘对人体的综合作用)、洛杉矶光化学烟雾事件(1943年,美国洛杉矶,以臭氧为主的光化学烟雾)、多诺拉烟雾事件(1948年10月26~31日,美国宾夕法尼亚州多诺拉镇)、伦敦烟雾事件(1952年12月5~8日,英国伦敦市,烟雾中的 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 促使 $\text{SO}_2$ 氧化产生硫酸泡沫,凝结在烟尘或凝源上形成烟雾)、四日市哮喘事件(1961年,日本四日市,重金属微粒与 $\text{SO}_2$ 形成硫酸烟雾)、熊本水俣病事件(1953~1956年,日本熊本县水俣市,含甲基汞的工业废水污染水体,人食用了汞污染的鱼体而中毒)、富山痛痛病事件(1955~1972年,日本富山县神通川流域,工厂含镉废水污染水体和稻米,居民食用含镉米和含镉水而中毒)、爱知米糠油事件(1968年3月,日本北九州市爱知县一带,由于生产米糠油时脱臭工艺中的多氯联苯混入米糠油中,食用后中毒)。

### (2) 酸沉降

1872年英国科学家史密斯在一些工业城市发现雨水的pH偏低,并使用了“酸雨”一词。20世纪60年代“千湖之国”瑞典的3000多湖泊酸度过大,鱼虾绝迹,成为死亡之湖。我国从70年代末也发现有酸雨,且分布区域广泛,成因复杂。酸雨出现的区域近年来基本稳定,主要分布在长江以南、青藏高原以东的广大地区及四川盆地。华中、华南、西南及华东地区是酸雨污染严重的区域,北方局部区域亦有酸雨记载(如青岛市、图们市)。酸雨除对森林、建筑物、古迹等造成损害外,还会使农产品减产。

### (3) 温室效应

1896年瑞典化学家、诺贝尔奖得主阿伦纽斯经过一万次以上的手工计算,认为大气中的大量水蒸气和 $\text{CO}_2$ 能够充分吸收来自地球的热辐射,从而使地球升温(即温室效应)。他当时的结论是,如果大气中的 $\text{CO}_2$ 浓度增加一倍,将会使全球地表平均温度比工业化之前升高约 $5\sim 6^\circ\text{C}$ ,相当接近于当今气候专家们所认定的大气中 $\text{CO}_2$ 浓度倍增所造成的后果,即全球升温 $1.5\sim 4.5^\circ\text{C}$ 。而工业革命之后,大气中 $\text{CO}_2$ 的浓度已增加了25%。温室气体主要有 $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$ 、 $\text{O}_3$ 、 $\text{N}_2\text{O}$ 、CFCs(氯氟烃)等。

#### (4) 臭氧层破坏

是指大气圈中臭氧层出现耗竭而遭受破坏的现象。臭氧层浓度较高的大气层约距地面 10~50 km 范围内,在 25 km 处浓度最大,形成了平均厚度为 3 mm 的臭氧层(在标准条件下压缩),它能吸收太阳紫外线辐射,给地球提供防护紫外线的屏蔽,并将能量贮藏在上层大气层中,起到调节气候的作用。臭氧层的破坏可造成地面过量的紫外线辐射,使平流层温度发生变化,导致地球气候异常、影响植物生长、生态失衡、危害人类健康等后果。

#### (5) 生物多样性减少

生物多样性是指地球上所有生物即植物、动物和微生物及其所构成的综合体。它包括生态系统多样性、物种多样性和遗传多样性三个部分。生物多样性是人类生存发展环境中的各种生命资源的总汇,是未来农业、医学和工业发展的生命资源基础。但随着人口增长和经济开发,环境污染及自然条件的恶化,将加速某些物种的消失速度。中国有高等植物 30 000 种,占世界 10%,居第三位;有脊椎动物 6 347 种,占世界 14%,其中鸟类 1 244 种,鱼类 3 862 种,均居世界前列。属于中国特有的高等植物 17 300 种,脊椎动物 667 种。但随着人口的增长和经济开发的冲击,特别是森林破坏、环境污染,已导致部分生物物种濒临灭绝的境地,有的已经灭绝,数百物种已列入国际濒危物种名单。

#### (6) 资源短缺和水质性缺水

世界淡水资源紧缺,有 43 个国家和地区缺水,占全球陆地面积的 60%,约有 20 亿人用水紧张,10 亿人得不到良好的饮用水。发展中国家大多没有清洁的水源,至少 3/4 的农村人口和 1/5 的城市人口常年不能获得安全卫生的饮用水。中国主要河流的污染情况已相当普遍。

## 二、土壤环境问题和土壤污染

虽然土壤污染及其相关问题是环境土壤学关注的主要内容,但从广义上讲,土壤环境问题还包括土壤荒漠化、盐渍化、侵蚀等退化过程。在 20 世纪,自然土壤的面积有了可观的减少,据 20 世纪 90 年代的统计资料表明,全世界有 15% 的土地(大约  $2.0 \times 10^9 \text{ hm}^2$ ,其中可耕地大约占 10%)在过去的一万年中被人为了诱发的土壤退化所掠夺。因各种不合理的人为活动所引起的土壤和土地退化问题,已严重威胁着世界发展的可持续性。

所谓土壤退化是指在各种自然、特别是人为因素影响下导致土壤生产力、土地利用、环境调控等土壤属性下降或丧失的物理、化学和生物学的过程与后果。土壤的退化有多种动因。土壤的内在质量是五大自然成土因素(母质、气候、生物、地形和时间)长期相互作用的产物,带有明显的响应主导成土因素的物理、化学和生物

学特性,是固有而相对稳定的。人类活动似可看成是土壤质量形成的第六个因素。因此,影响土壤退化和土壤质量变化的因素包括自然的、社会经济的、技术的和文化的因素。土壤退化可由其中的一种或多种因子及其相关过程所引起。土壤质量一方面会因一些自然过程,例如风化、淋溶作用的进行而缓慢改变,另一方面更会因人类活动,加速土壤质量的变化。一般说来,不合理的人为活动,例如矿山开采、毁坏树林、过度放牧、地下水过度开采、农用化学品的过度施用等所引起的土壤退化问题无论在范围还是程度上均比自然因子引起的退化要严重得多。人为活动加速的土壤侵蚀是导致土壤质量下降的最根本的动因之一。由于土壤侵蚀过程的发生与发展,表土中有机质减少,团聚体失稳,土壤板结,从而加剧土壤的风蚀、水蚀作用,降低对污染物的缓冲、中和、降解等净化能力,形成恶性循环。

全球土壤退化问题在热带和亚热带的亚洲和非洲尤为突出,大约 $3.0 \times 10^6 \text{ km}^2$ 的严重退化土壤中有 $1.2 \times 10^6 \text{ km}^2$ 分布在非洲, $1.1 \times 10^6 \text{ km}^2$ 分布于亚洲。我国属强度资源约束型国家,耕地、林地、草地的人均占有量,分别仅为全球人均占有量的1/3、1/5和1/4。另一方面,我国土壤退化问题十分突出,水土流失面积约占国土总面积的38%,耕地中2/3属中低产地(年产量为 $3 \sim 5 \text{ t/hm}^2$ ),土壤养分普遍亏缺。农业环境污染也十分严重,约有1/5的耕地受到了不同来源、不同类型污染物的污染。

### (一) 土壤污染的定义

土壤污染的定义目前尚不统一,一种看法认为,由人类的活动向土壤添加有害化合物,此时土壤即受到了污染,这个定义的关键是存在有可鉴别的人为添加污染物,可视作为“绝对性”定义;另一种是以特定的参照数据来加以判断的,如以背景值加两倍标准差为临界值,若超过这一数值,即认为该土壤为某元素所污染,这可视作为“相对性”定义;第三种定义是不但要看含量的增加,还要看后果,即加入土壤的物质给生态系统造成了危害,此时才能称为污染,这可视作为“综合性”定义。这三种定义的出发点虽然不同,但有一点却是共同的,即认为土壤中某种成份的含量明显高于原有含量时即构成了污染。综上所述,土壤污染就是指人为因素有意或无意地将对人类本身和其他生命体有害的物质施加到土壤中,使其某种成份的含量明显高于原有含量、并引起现存的或潜在的土壤环境质量恶化的现象(陈怀满等 1996)。

### (二) 土壤污染的特点

土壤污染有三大特点。

### (1) 隐蔽性或潜伏性

水体和大气的污染比较直观,严重时通过人的感官即能发现;而土壤污染则往往要通过农作物包括粮食、蔬菜、水果或牧草以及摄食的人或动物的健康状况才能反映出来,从遭受污染到产生恶果有一个逐步积累过程,具有隐蔽性或潜伏性。日本的第二公害病——痛痛病便是一个典型的例证,该病 20 世纪 60 年代发生于富山县神通川流域,直至 70 年代才基本证实其原因之一是当地居民长期食用被含镉废水污染了的土壤所生产的“镉米”所致(重病区大米含镉量平均为 0.527 mg/kg),此时,致害的那个铅锌矿已经开采结束了,其间历经二十余年。

我国张士灌区人和家畜亦受到明显的污染危害,污灌区居民每人每日摄入的 Cd 量达 558  $\mu\text{g}$ , 而对照区仅为 17.6  $\mu\text{g}$ , 灌区摄入量为对照区的 32 倍, Cd 在人体器官中有明显的积累(表 1-1)。灌区家畜脏器中的积累亦十分明显,例如猪肉和猪肾中的含量分别为对照区的 8 倍和 460 倍,这是由于污灌区用作饲料的米糠、稻谷等含有较高的 Cd 所致。

表 1-1 张士灌区人体血、尿、发的 Cd 含量

	血液( $\mu\text{g/L}$ )			尿( $\mu\text{g/L}$ )			发( $\mu\text{g/kg}$ )		
	几何平均值	标准差	p	几何平均值	标准差	p	几何平均值	标准差	p
灌 区	1.06	0.21	< 0.05	13.26	0.37	< 0.05	0.14	0.35	< 0.05
对照区	0.42	0.35		2.13	0.17		0.07	0.42	

(吴燕玉等 1986)

### (2) 不可逆性和长期性

土壤一旦遭到污染后极难恢复,重金属元素对土壤的污染是一个不可逆过程,而许多有机化学物质的污染也需要一个比较长的降解时间,例如 1966 年冬至 1977 年春沈阳-抚顺污水灌区发生的石油、酚类以及后来张士灌区的镉污染,造成大面积的土壤毒化、水稻矮化、稻米异味、含镉量超过食品卫生标准。曾经用了很长时间的艰苦努力,包括施用改良剂、深翻、清灌、客土和选择品种等各种措施,才逐步恢复其部分生产力,付出了大量的劳力和代价。

### (3) 后果的严重性

由于土壤污染的隐蔽性或潜伏性以及它的不可逆性或长期性,因而往往通过食物链危害动物和人体的健康。研究表明,土壤和粮食的污染与一些地区居民肝肿大之间有着明显的剂量-效应关系,污灌引起的污染越严重,人群的肝肿大率越高。一些土壤污染事故严重威胁着粮食生产,三氯乙醛的污染是一个比较典型的事例,它是由于施用含三氯乙醛的废硫酸生产的普通过磷酸钙肥料所引起,其中万亩以上的污染事故在山东、河南、河北、辽宁、苏北、皖北等地曾多次发生,受害品种

包括小麦、花生、玉米等十多种农作物,轻则减产,重则绝收。有的田块毁苗后重新播种多次仍然受害,损失十分惨重。

化学定时炸弹问题是另一种严重后果的例证。20世纪80年代末至90年代初,奥地利人W. M. Stigliani根据环境污染的延缓效应及其危害,用“化学定时炸弹”(Chemical Time Bomb, CTB)的概念来形象化地描述这一过程,其含义是指在一系列因素的影响下,使长期储存于土壤中的化学物质活化,而导致突然爆发的灾害性效应。化学定时炸弹包括两个阶段,即累积阶段(往往经历数十年或数百年)和爆炸阶段(往往在几个月、几年或几十年内造成严重灾害)。

化学物质在土壤中的累积与储存,在一定时间内有时并不表现出它的危害,但当累积储量超过土壤或沉积物承受能力的限度,即超过其负载容量时;或者当气候、土地利用方式发生改变时,就会突然活化,导致严重灾害。来自不同污染源的污染物,开始在土壤或沉积物中仅形成一些局部“热点”,继而伴随工业化进程的加剧,其污染范围逐步扩大,因此化学定时炸弹的影响面可以从局部、区域直至全球规模。由于两个世纪的工业化进程,在中欧、德国、捷克与波兰边界的森林土壤中积累了大量的酸性物质,当森林土壤承受并中和酸性物质的能力达于极限时,土壤pH突然降低至4.2以下,导致大量Al的活化,因而在20世纪80年代初引起大片森林的死亡。

龚子同等(1998)拓展了化学定时炸弹的内涵,详细分析了我国土壤中可能的“化学定时炸弹”,认为存在着地带性和泛地带性的“化学定时炸弹”,前者包括土壤盐渍化、土壤酸化等;后者包括施肥造成的、工业污染造成的,以及特殊成土作用,例如酸性硫酸盐土壤所形成的“化学定时炸弹”。同时,探讨了导致土壤中这些“化学定时炸弹”内在和外在的触爆因素,包括土壤有机质含量的降低、土壤遭受强烈侵蚀,以及阳离子交换容量、pH、氧化还原电位变化等。

### (三) 土壤污染源

可分为天然污染源和人为污染源。天然污染源是指自然界自行向环境排放有害物质或造成有害影响的场所,如正在活动的火山。人为污染源是指人类活动所形成的污染源,是土壤污染研究的主要对象,而在这些污染源中,化学物质对土壤的污染是人们最为关注的。按照污染物进入土壤的途径所划分的土壤污染源可分为污水灌溉、固体废弃物的利用、农药和化肥、大气沉降物等。

#### (1) 污水灌溉

由灌水,特别是污灌常可引起土壤污染。污灌是指利用城市污水、工业废水或混合污水进行农田灌溉。由于在一个相当长的时间内,我国污水的处理率和排放达标率均较低,用这样的污水灌溉后,使一些灌区土壤中有毒有害物质明显累积。

例如,利用含重金属的矿坑水(金属含量平均为 Cu 0.04, Pb 0.47, Zn 3.8, Cd 0.023 mg/L)进行污灌后,土壤 Cu 含量由 31 增至 133 mg/kg; Pb 含量由 44 增到 1 600 mg/kg; Zn 含量由 121 增至 3 700 mg/kg; Cd 由 0.37 增至 12.1 mg/kg。张士灌区在 20 多年的污灌中,污灌面积约达 2 500 hm<sup>2</sup>,镉污染十分严重,其中有约 330 hm<sup>2</sup> 土壤含镉 5~7 mg/kg,稻米含镉 0.4~1.0 mg/kg,最高达 3.4 mg/kg。

### (2) 固体废弃物的利用

固体废弃物包括工业废渣、污泥、城市垃圾等多种来源。由于污泥中含有一定的养分,因而可用来作为肥料使用,城市生活污水处理厂的污泥含氮量为 0.8%~0.9%,含磷量为 0.3%~0.4%,含钾量为 0.2%~0.35%,有机质含量为 16%~20%。但如混入工业废水或工业废水处理厂的污泥,其成分较生活污水污泥要复杂得多,特别是重金属的含量很高。这样的污泥如在农田中施用不当,势必造成土壤污染。一些城市在历史上曾经将大量垃圾运往农村,垃圾中含有的煤灰、砖瓦碎块、玻璃、塑料等都会影响土壤性质。例如 1986 年广州市居民生活垃圾的平均组成为:动植物残体占 28.3%,无机物、煤灰、砖瓦、陶瓷等占 64.1%,纸、纤维、塑料等占 5.2%,金属和玻璃占 2.4%。含这些成分的垃圾长期施用于农田,可逐步破坏土壤的团粒结构和理化性质。同时城市垃圾亦含有一定量的重金属,使土壤中重金属含量随着垃圾施用量的增多而增加(表 1-2)。

表 1-2 施用垃圾对土壤、稻谷中重金属含量(mg/kg)的影响

处 理	Cd	Hg	Cr	Pb	Ni	Cu	Zn
施垃圾肥土壤	1.5	0.07	12.0	82	—	—	92
对 照 土 壤	0.6	0.05	12.0	24	—	—	20
施垃圾肥稻谷	0.033	<0.008	<0.01	0.27	6.27	3.0	16.2
对 照 稻 谷	0.007	<0.008	<0.001	0.18	0.18	2.7	19.0

(吕春元等 1985)

### (3) 农药和化肥的施用

农药在生产、贮存、运输、销售和使用过程中都会产生污染,施在作物上的杀虫剂大约有一半左右流入土壤中。进入土壤中的农药虽然经历着生物、光解和化学降解,但对于像有机氯这样的长效农药来说,那是十分缓慢的。土壤中的农药结合残留问题,更应特别注意,因为它具有更大的潜在危害性。农药在土壤中的残留性与土壤的理化性质和环境条件有着密切的关系,如呋喃丹在灌溉地区的土壤中残留量较低;在腐殖土中的降解速度分别为壤土和砂壤土的 1/2 和 1/3;土壤 pH 越高,其分解越快。

化肥污染一是来自不合理施用和过量施用,促使土壤养分平衡失调。农田大量使用氮肥或由城市和农村生活污水把大量氮素带入土壤后,有的氮可直接从土



壤表面挥发进入大气,有的可经土壤微生物作用转化成氮气和氮氧化物而进入大气层;有的随地表径流和地下水排入水体中。土壤中的 N 和 P 进入地下水可使地下水源受 N、P 污染,从而可造成河川、湖泊、海湾的富营养化,使藻类等水生植物生长过多。二是施用的肥料中含有有害物质,例如前已述及的含三氯乙醛磷肥,它是由含三氯乙醛的废硫酸生产的,当它在土壤中施用后,三氯乙醛转化为三氯乙酸,两者均可给植物造成毒害。磷肥中重金属特别是 Cd 的含量也是一个不容忽视的问题。世界各地磷矿含镉范围一般在 1~110 mg/kg,但也有个别矿高达 980 mg/kg。我国每年随磷肥带入土壤的总 Cd 量是一种潜在的污染源。

#### (4) 大气沉降物

气源重金属微粒是土壤重金属污染的途径之一,它的构成主要是金属飘尘。在金属加工过程中,在交通繁忙的地区,往往伴随有金属尘埃进入大气,其种类视污染源的不同而异。这些飘尘自身降落或随着雨水接触植物体或进入土壤后随之为植物或动物所吸收,在大气污染严重的地区,作物亦有明显的污染(表 1-3)。酸沉降本身既是一种土壤污染源,又可加重其他有毒物质的危害,我国长江以南大部分地区本来就是酸性土壤,在酸雨的作用下,土壤进一步酸化,养分淋溶,有害物质活化,结构破坏,肥力降低,作物受损,从而可破坏土壤生产力。

表 1-3 钢冶炼厂周围水稻中一些元素的含量(mg/kg)

地 点	叶			茎			谷 粒		
	Cu	Pb	As	Cu	Pb	As	Cu	Pb	As
污染区	176	9.7	15.3	48.0	3.5	11.9	24.0	2.7	0.7
参比区	38.4	0.8	0.9	41.1	1.2	0.7	14.2	0.6	痕量

(潘如圭 1984)

由核裂变产生的两个重要的长半衰期放射性元素是<sup>90</sup>Sr(半衰期为 28 a)和<sup>137</sup>Cs(半衰期为 30 a),它们可经由大气沉降而进入土壤,土壤中<sup>90</sup>Sr 的浓度常与当地降雨量成正比。公路两侧土壤中重金属的含量随距离的增加而减少。

此外,尚有多个污染源的同时污染。

### (四) 土壤污染的类型

土壤污染的类型目前并无严格的划分,如从污染物的属性来考虑,一般可分为有机物污染、无机物污染、生物污染和放射性物质的污染。

#### (1) 有机物污染

可分为天然有机污染物和人工合成有机污染物,这里主要是指后者,它包括有

机废弃物(工农业生产及生活废弃物中生物易降解和生物难降解有机毒物)、农药(包括杀虫剂、杀菌剂和除莠剂)等污染。有机污染物进入土壤后,可危及农作物的生长和土壤生物的生存,如稻田因施用含二苯醚的河泥曾造成稻苗大面积死亡,泥鳅、鱖鱼绝迹。人体接触污染土壤后,手脚出现红色皮疹,并有恶心、头昏现象。农药在农业生产上的应用尽管收到了良好的效果,但其残留物却污染了土壤和食物链。进入土壤中的农药主要来自直接施用和叶面喷施,也有一部分来自回归土壤的动植物残体。近年来,塑料地膜地面覆盖栽培技术发展很快,部分地膜弃于田间,已成为一种新的有机污染物。

### (2) 无机物污染

无机污染物有的是随着地壳变迁、火山爆发、岩石风化等天然过程进入土壤,有的是随着人类的生产和消费活动而进入的。采矿、冶炼、机械制造、建筑材料、化工等生产部门,每天都排放大量的无机污染物,包括有害的元素氧化物、酸、碱和盐类等。生活垃圾中的煤渣,也是土壤无机污染物的重要组成部分,一些城市郊区长期、直接施用的结果造成了土壤环境质量的下降。

### (3) 土壤生物污染

是指一个或几个有害的生物种群,从外界环境侵入土壤,大量繁衍,破坏原来的动态平衡,对人类健康和土壤生态系统造成不良影响。造成土壤生物污染的主要物质来源是未经处理的粪便、垃圾、城市生活污水、饲养场和屠宰场的污物等。其中危害最大的是传染病医院未经消毒处理的污水和污物。进入土壤的病原体能在其中生存较长的时间,如痢疾杆菌能在土壤中生存 22~142 天,结核杆菌能生存一年左右,蛔虫卵能生存 315~420 天。土壤生物污染不仅可能危害人体健康,而且有些长期在土壤中存活的植物病原体还能严重地危害植物,造成农业减产。例如,一些植物致病细菌污染土壤后能引起番茄、茄子、马铃薯等植物的青枯病,能引起果树的细菌性溃疡和根癌病。某些致病真菌污染土壤后能引起大白菜、油菜、甘蓝等多种栽培和野生十字花科蔬菜的根肿病,引起茄子、棉花、黄瓜、西瓜等多种植物的枯萎病,菜豆、豇豆等的根腐病,以及小麦、大麦、燕麦、高粱、玉米、谷子的黑穗病等。

### (4) 土壤放射性物质的污染

系指人类活动排放出的放射性污染物,使土壤的放射性水平高于天然本底值。放射性污染物是指各种放射性核素,它的放射性与其化学状态无关。每一种放射性核素都有一定的半衰期,能放射具有一定能量的射线,除了在核反应条件下,任何化学、物理或生化处理都不能改变放射性核素的这一特性。

放射性核素可通过多种途径污染土壤。放射性废水排放到地面上,放射性固体废物埋藏处置在地下,核企业发生放射性排放事故等,都会造成局部地区土壤的严重污染。大气中的放射性沉降,施用含有铀、镭等放射性核素的磷肥和用放射性

污染的河水灌溉农田也会造成土壤放射性污染,这种污染虽然一般程度较轻,但污染的范围较大。

土壤被放射性物质污染后,通过放射性衰变,能产生 $\alpha$ 、 $\beta$ 和 $\gamma$ 射线。这些射线能穿透人体组织,损害细胞或造成外照射损伤,或通过呼吸系统或食物链进入人体,造成内照射损伤。

## (五) 土壤污染的防治

### (1) 土壤污染源的追踪

一般情况下土壤污染主要来自灌溉水、固体废弃物的农业利用以及大气沉降物,因此改进水质和大气质量、坚持灌溉水水质标准、农用污泥标准和其他环境标准并设立防治土壤污染的法规和监督体制等是防止土壤污染的最重要措施,这些对策可在一定程度上控制排入土壤的污染物质,但是在拟定环境标准时,应考虑到土壤污染的特点,就是说,即使污染源的浓度(例如灌溉水)已控制得相当低,但对重金属这类积累性的污染物来说,会逐渐为土壤所富集,所以标准制定的依据应尽量考虑得全面些。

### (2) 监测系统网络的建立

定期对辖区土壤环境质量进行检查,建立系统的档案资料。首先要规定优先检测的土壤污染物和检测标准方法,这方面可参照有关国际组织的建议和我国国情来编制土壤环境污染物的目录,按照优先次序进行调查、研究并制订实施对策。

### (3) 污染土壤的修复

已经污染了的土壤可根据实际情况进行改良,近年来污染土壤的治理方法可归并为四类:① 工程措施,包括客土、换土、去表土、翻土、隔离法(用各种防渗材料,将污染土壤与未污染土壤或水体隔开)、清洗法(用清水或合适的溶剂将污染物洗至土体外,再对污水进行处理)、热处理(将污染土壤加热,使污染物产生热分解)、电动修复(采用电化学方法净化土壤中的污染物)等。工程措施效果好,几乎适用于所有污染土壤,但投资大,成本高。② 生物措施,利用特定的动、植物和微生物吸收移除或降解土壤中的污染物。③ 施用改良剂,通过添加改良剂和抑制剂等来降低土壤中污染物的水溶性、扩散性和生物有效性,加速有机物的分解和使重金属固定在土壤中,从而减少土壤污染的环境风险。这些措施包括促进沉淀作用、加入抑制剂和吸附剂、利用元素间的颀颀作用等。如添加有机质可加速土壤中农药的降解,减少农药的残留量;铁盐可使As(III)氧化成As(V)而吸附于土壤上,从而减少了As对水稻的毒害。施用石灰可减少一些重金属的危害。在化学还原法中,可利用铁屑、硫酸亚铁等将六价铬还原为三价铬,从而减少铬污染的危害。

④ 农业生态工程措施,即通过水、肥管理选择适当的肥料与作物品种来避开食物链的污染。如二苯醚在嫌气条件下稳定,被其污染的土壤可采用耕翻、晒垡等措施来加速分解。可利用元素不同氧化还原状态下的稳定性差异,来调整耕作体系以减少污染,如受汞和砷污染的土壤可种植旱作,受铬污染的土壤可种植水稻。在污染土壤上繁育种子、种经济作物或种树,可切断污染物进入食物链的途径。

## 第三节 土壤质量及其评估

### 一、土壤质量

土壤污染的危害是土壤质量的下降。土壤质量包含了土壤维持生产力、环境净化能力、对人类和动植物健康的保障能力,是指在由土壤所构成的天然或人为控制的生态系统中,土壤所具有的维持生态系统生产力和人与动植物健康而自身不发生退化及其他生态与环境问题的能力,是土壤特定或整体功能的综合体现(周健民 2003,张桃林等 1999)。土壤质量的研究是近年来土壤学和环境科学研究的重要方向。自从 20 世纪 90 年代以来,土壤质量就成为人类所共同关注的热点问题之一,因为一个“清洁”或“健康”的土壤才能持续生产出既丰富又优质的产品,所以人们往往将健康的土壤—健康的生物—健康的人紧密地联系在一起。人类的可持续发展在很大程度上依赖于土壤生产力、生命力和清洁度,即土壤质量的保持和提高。土壤质量不仅考虑土壤的生产性,而且将其与生态系统及环境联系起来,与土壤保护和持续发展联系起来,它反映了土壤生态与环境系统的许多特性和过程的综合结果和总体的面貌。然而,人们对土壤质量的认知目前仍处于发展时期,许多问题尚在讨论之中。

### 二、土壤质量的评估

土壤质量的定义、测量和评估是现代土壤学所面临的主要挑战之一,因为土壤质量是土壤的许多物理、化学和生物学性质,以及形成这些性质的一些重要过程的综合体现,显得十分复杂,目前尚无统一的评估指标或标准。理想的指标应公正、灵敏、有预测能力、有参考阈值,同时,其信息可转化、综合,并易于收集与交流。对土壤质量包含的具体内容,迄今尚无统一的认识,有人将其划分为土壤肥力质量、土壤健康质量和土壤环境质量等三个部分。本书从实用角度出发,将土壤质量的评估分为土壤肥力质量和土壤环境质量(包括土壤健康质量)两个部分,它们之间有着密切的联系和多方面的重叠,但由于评估目的性不同,因而亦有较大的差别。

## (一) 土壤肥力质量

土壤肥力质量是指植物生长所需的养分供应能力和环境条件,也就是土壤的生产能力;对土壤肥力质量评估的指标包括定性描述和定量描述两个方面,在实际工作中应针对特定的土地功能、土地类型和各自的指标体系来进行。一般说来,下面一些因素在表征土壤肥力质量方面具有重要作用:

### (1) 土壤性质

土壤化学性质,例如 pH、阳离子交换容量(CEC)、阴离子交换容量(AEC)、植物养分含量及有效性、盐分含量及组成等;土壤物理性质,例如土壤颗粒分布、结构、容重、孔隙度及其排布、抗风蚀和水蚀性能、团聚体的体积与稳定性、土壤水分、持水性能、入渗速率和入渗容量等;土壤生物学性质,例如有机质的数量与类型,土壤微生物与无脊椎动物的数目、类型和功能,专性呼吸作用强度和酶等。

### (2) 作物

作物生长状况、健壮程度、根系生长模式、作物产量和作物产品营养质量等。植物体内的营养元素的含量与土壤中相应元素的含量有一定的相关性,所以从植物中的营养元素可直观地了解土壤的肥力状况。

### (3) 灌溉水水质

地表水和地下水的水质,包括 pH、矿化度、化学耗氧量(COD)和生物耗氧量(BOD)等。良好的灌溉水质既可满足植物生长所需要的水分,又可改善土壤质量。不良的水质可使土壤盐化或造成污染。

上述参考指标作为土壤肥力质量的体现一般说来均可接受,事实上长期以来已为研究者所采用。问题是在量化方面,如何能客观地反映土壤质量的实际情况尚有许多工作要做。中国耕地土壤有机质的含量与土壤质量的关系分为六级(席承藩 1998),即  $>40$  (g/kg,下同),为一级  $40\sim30$ ,二级  $30\sim20$ ,三级  $20\sim10$ ,四级  $10\sim6$ ,五级  $<6$ ,六级。按此标准,全国水田和旱地土壤有机质的分级,一级占 10.44%,二级为 13.21%,三级为 25.44%,四级为 33.51%,五级为 13.86%,六级为 3.55%。由此可见,我国土壤有机质含量在  $10\sim20$  g/kg 所占比重最大。有人认为,根据我国的实际情况,在制定耕地土壤肥力质量时,有机质可用高、中、低三个等级。河北、山西、河南、安徽、福建、新疆、广东七个省耕地土壤有机质含量平均分别为 12.2, 10.7, 12.2, 14.0, 15.9, 13.9, 14.9 (g/kg) (席承藩 1998), 总体平均值为 13.4 (g/kg), 参考此值,从有机质含量考虑,中国土壤肥力质量可分为高 ( $>20$  g/kg)、中 ( $10\sim20$  g/kg)、低 ( $<10$  g/kg)。上述有机质等级之划分可作为土壤肥力质量表征方法的一个说明,可用相似的方法按照高、中、低的原则,将表征土壤质量的主要性质均赋予其量化指标,同时在肥力指标中如适用最小定律时应予说明。

## (二) 土壤环境质量

土壤环境质量依赖于土壤在自然成土过程中所形成的固有的环境条件、与环境质量有关的元素或化合物的组成与含量,同时应考虑土壤作为次生污染源对整体环境质量的影响。土壤环境质量是指在一定的时间和空间范围内,土壤自身性状对其持续利用以及对其他环境要素,特别是对人类或其他生物的生存、繁衍以及社会经济发展的适宜性,是土壤环境“优劣”的一种概念,它与土壤遭受污染的程度密切相关。本书关注的是土壤环境质量问题,特别是污染程度。很显然,我们必须保持土壤在一种健康或清洁的状态,这样才能使其适用于农业生产,安全而有效地使用废弃物和副产品作为土壤改良剂,同时在土壤由于人为活动而受到污染时,必须进行适当的修复,以减少其自身以及对大气、水和植物等的污染。从环境角度出发,我们首先必须发展一种灵敏而合适的方法来评价土壤环境质量。人们应当认识到,对土壤质量的概念性解释有可能随土地的实际使用状况而变化,对农业和非农业土壤来说也并非总是相同的。对污染土壤来说,对其评价的最重要依据是其质量标准,因而制定合适的、具有法律效力的土壤环境质量标准(强调土壤资源的自身保护和持续利用)和土壤健康质量标准(强调土壤资源的可利用性,即在特定条件、特定用途下所确定的土壤有毒物质的限量或临界含量)应是土壤科学家将其自身研究成果向政府决策和公众政策转化的重要内容,也是土壤质量与环境质量紧密联系的重要环节。

关于土壤环境质量的评价方法一直是环境科学工作者所关注的热点问题之一,因为一个正确的评价方法才能比较客观地反映土壤质量现状。关于土壤环境质量评价方法,曾有许多学者发表过有价值的资料,其中包括指数评价法、模糊判别法、灰色聚类法、T 值分级法等。然而,目前多采用污染指数法,常用的方法有简单指数法、叠加指数法、带有权重的污染指数法、内梅罗(N. L. Nemerow)污染指数法等,有关污染指数法的具体应用可参阅第十一章的有关内容。此节仅对用于重金属复合污染中的综合污染指数法作一简要介绍。

重金属复合污染指标的确定是一个十分困难的工作。离子冲量可在一定条件下用来评价土壤和植物的污染,但当土壤严重污染而植物不能正常生长时,这一方法便不适用。综合污染指数(CPI)用来表征土壤复合污染时较之先前的表征方法有所进展,它同时考虑了土壤元素背景值、土壤元素标准、价态效应等因素,主要包括下列计算过程:

### (1) 计算相对污染当量(RPE)

$$\text{RPE} = \left[ \sum_{i=1}^N (\text{C}_i / \text{C}_i^0)^{1/n} \right] / N \quad (1-2)$$