

# 环境土壤学

HUANJING TURANG XUE

陈怀满 主编



科学出版社

[www.sciencep.com](http://www.sciencep.com)

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:连乘亮  
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)

2005 年 2 月第一次印刷 印张: 35  $\frac{3}{4}$

印数: 1—3 200 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;涉及土壤与水和大气质量的关系,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,磷肥施用于水体、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建民研究员、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、环境污染	4
三、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>	122
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>	176
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
<b>第六章 土壤中有机污染物与环境质量·····</b>	<b>274</b>
第一节 土壤中有机污染物概述·····	275
一、农药·····	275
二、多环芳烃类·····	279
三、多氯联苯·····	280
四、二噁英·····	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
<b>第七章 土壤中的放射性物质与环境·····</b>	<b>315</b>
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
<b>第十章 土壤环境工程.....</b>	<b>442</b>
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
<b>第十一章 环境土壤学研究法</b>	<b>488</b>
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,按其在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