

# 污染土壤 修复原理与方法

周启星 宋玉芳 等著



科学出版社  
www.sciencep.com

# 污染土壤修复原理与方法

周启星 宋玉芳 等著

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书系统地论述了污染土壤修复的基本原理与基础理论,全面地介绍了污染土壤修复的各种方法与技术及其进展,比较详细地分析了现有方法所存在的技术问题与局限性,并对今后解决问题的办法与发展前景进行了展望。主要内容包括:污染土壤诊断及其方法,土壤污染风险评价与管理,污染土壤的植物修复、生物修复、化学修复、物理修复,污染土壤修复标准,污染土壤修复的技术再造与展望等。

本书可供环境科学与工程科研工作者、环保管理人员和技术人员参考,也可作为大专院校环境科学、环境工程、生态学、土地管理、水文学、土壤学、微生物学和植物学等专业师生的教材与参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

污染土壤修复原理与方法/周启星,宋玉芳等著. —北京:科学出版社,2004

ISBN 7-03-012517-7

I. 污… II. ①周… ②宋… III. 污染土壤—修复 IV. X53

中国版本图书馆CIP数据核字(2003)第117559号

策划编辑:李 锋 朱 丽/文案编辑:吴伶伶 王国华  
责任校对:柏连海/责任印制:钱玉芬/封面设计:王 浩

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>

新蕾印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2004年2月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2004年2月第一次印刷 印张: 37 1/4

印数: 1—2 500 字数: 716 000

定价: 75.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈新欣〉)

**Remediation of Contaminated Soils:  
Principles and Methods**

**By**  
**Qixing Zhou and Yufang Song et al.**

**Science Press**  
Beijing, China

## 编 委 会

主 编 周启星

副主编 宋玉芳

编 委 (以姓氏笔画为序)

于 颖 马奇英 (Lena Q Ma) 王 新

王 慧 王美娥 华 涛 刘 宛 朱永官

刘登义 李培军 宋玉芳 杨肖娥 周启星

陆贻通 唐世荣 魏树和

## 序

污染土壤修复是当前环境科学新的学科生长点。在西方发达国家,随着点源污染逐渐得到有效的治理,面源污染的控制成为环境保护迫切的和首要的工作,而污染的土壤是最为重要的环境面污染源。为了根治这一面污染源,污染土壤修复技术在近十年内得到了迅速发展。可以说,污染土壤修复的研究,已经成为当前环境科学与工程研究领域最为重要的研究方向之一。

污染土壤修复的研究还是土壤科学由以研究土壤肥力为主的农业土壤学阶段进入到全面研究土壤环境问题的环境土壤学阶段并走向成熟的重要标志。由于农业生产力的迅速提高,许多国家粮食的数量安全得到了有效保证,而粮食的质量安全则逐渐出现了问题。特别是农业土壤环境不仅受到工业的污染,还受到农业自身的污染。在这种形势下,土壤科学家会同地质科学、海洋科学、大气科学和水科学等领域的广大科技工作者,从土壤化学、土壤物理、土壤地理和土壤生物学等各个方面对土壤环境问题进行了研究,近年来尤其重视污染土壤的修复,开展了许多相关的研究,使污染土壤修复的研究成为环境土壤学的热点问题之一。

在中国,随着乡镇企业和农村城镇化的迅速发展,农业环境污染特别是土壤环境污染问题已越来越突出!为了解决中国的土壤污染与农产品安全这一实际问题,大量污染土壤需要修复与治理。然而,与污水的处理和污染水体的修复相比,污染土壤的修复由于土壤的不均一性和介质的多样性等特点更具有挑战性和不定性,其治理的难度也相应加大。因此,污染土壤修复迫切需要一本从理论与方法上具有指导意义的著作出版,来推动中国该领域研究的不断深入与向前发展。

中国科学院沈阳应用生态研究所暨中国科学院陆地生态过程重点实验室在土壤-植物系统污染生态学研究方面具有三十多年的学科积累。在近十年里,一批年轻科技工作者,结合国家科技攻关项目、国家自然科学基金项目、中国科学院知识创新工程和“百人计划”项目以及中英、中德、中美等国际合作项目,在污染土壤的植物修复、微生物修复以及物理、化学修复原理与方法等方面,取得了一系列研究进展。为了促进该领域的研究工作进一步深入开展,他们决定出版两部承上启下的著作。该部著作强调、突出原理与方法以及国内外最新研究进展与动态,另一部著作将突出这些方法的实际应用与在中国的实践。两者相互补充,既具有一定的相关性又各自有侧重点及特色,以供读者鉴识与择用。

中国工程院院士 孙铁珩

2003年8月16日于沈阳

## 前 言

在中国,随着工农业生产的发展,农业环境污染特别是土壤环境污染问题已越来越突出。全国受重金属污染的耕地多达 2000 万  $\text{hm}^2$ ,受各种有机污染物或化学品污染的农田总计 6000 多万  $\text{hm}^2$ 。土壤环境质量直接关系到农产品的安全。由于土壤大面积污染,中国每年出产重金属污染的粮食多达 1200 万 t;全国出产的主要农产品中,农药残留超标率高达 16%~20%,问题非常严重,中国农产品已经缺乏安全保障。在许多重点地区,土壤及地下水污染已经导致癌症等疾病的发病率和死亡率明显高于没有污染的对照区数倍到十多倍。进入 WTO 后,土壤污染已成为限制中国农产品国际贸易和社会经济可持续发展的重大障碍之一,污染土壤迫切需要修复、治理。

污染土壤的修复是当今环境科学的热点领域,也是最具挑战性的研究方向之一。可以预见,中国今后将开展大量相关研究,以解决土壤污染与农产品安全这一实际问题。为了促进该领域研究工作的深入开展,作者根据近 5 年来已有的工作基础,特别是结合中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-SW-416)、中国科学院“引进国外杰出人才”百人计划项目(污染生态化学)、国家 973 项目(G1999011808)和中国科学院沈阳应用生态研究所创新重大项目(污染土壤复合污染的生态过程研究)等资助下的项目以及以中国科学院陆地生态过程重点实验室、中国科学院沈阳应用生态研究所与沈阳大学联合环境工程重点实验室(沈阳环境工程辽宁省重点实验室)为依托的项目所取得的研究进展,并融合查阅到的大量国外资料,历经 4 年的时间,终于完成了本书的写作。

本书共分 10 章。第一、十章从理论上论述了污染土壤修复的必要性及相关的基本原理与基础理论,指出了现有方法存在的问题与技术局限性,从技术再造的角度对今后的污染土壤修复工作进行了展望;第二、三和九章为污染土壤修复前或修复后所需要的方法与标准体系,包括污染土壤诊断及其方法、土壤污染风险评估与管理与污染土壤修复标准;第四至八章为污染土壤修复过程中涉及的各种先进方法或技术,包括污染土壤的植物修复、生物修复、化学修复和物理修复以及污染土壤修复生态工程。

本书各章分工为:周启星,第一、八至十章;宋玉芳,第二章;王美娥、周启星,第三章;魏树和、周启星、宋玉芳,第四章;宋玉芳、周启星,第五章;于颖、周启星,第六章;华涛、周启星、于颖,第七章。除此之外,主编周启星同志还在本书的统一编排、文字校对、图表设计、内容增删以及最后定稿等方面

做了大量工作。孙铁珩院士、王文兴院士对本书有关章节提出了一些宝贵意见，未参与具体写作的几位编委则从不同学科角度对本书相关章节提出了一些建议，在此一并深表谢意。

我们殷切希望广大读者和有关专家对本书提出批评指正，愿本书成为读者的良师益友，从而共同推动污染土壤修复研究领域向前发展。



# 目 录

序

前言

第一章 绪论	1
第一节 土地与土壤环境	1
一、土地及其可持续利用	1
二、土壤环境及其保护	3
第二节 土地污染及其来源	4
一、土地污染的定义	4
二、土地污染的基本方式	5
三、土地污染物及污染源	6
第三节 土壤环境污染及中国所面临的问题	14
一、土壤环境污染的特点	14
二、土壤环境污染的危害	16
三、土壤环境污染与新型疾病的发生	18
四、中国土壤环境污染现状与趋势	20
第四节 污染土壤修复的意义及技术的发展	22
一、土壤环境污染控制措施	22
二、污染土壤修复的意义	23
三、污染土壤修复技术的发展	24
四、技术创新评估及经济考虑	39
主要参考文献	42
第二章 污染土壤诊断及其方法	43
第一节 污染土壤诊断及其意义	43
一、污染土壤诊断的概念	43
二、污染土壤诊断	44
三、快速诊断与长期诊断	47
四、土壤污染诊断的意义与作用	48
第二节 土壤污染生态毒理学诊断	49
一、概述	49

二、生态毒理学诊断原理 .....	54
三、生态毒理诊断对生物修复的意义 .....	60
<b>第三节 污染生态毒理诊断方法</b> .....	63
一、高等植物毒性试验与特殊毒性试验法 .....	64
二、敏感动物指示法 .....	70
三、敏感微生物诊断法 .....	76
四、生物标记法 .....	78
五、其他诊断方法 .....	80
<b>主要参考文献</b> .....	82
<b>第三章 土壤污染风险评价与管理</b> .....	87
<b>第一节 生态风险评价与管理</b> .....	87
一、概述 .....	87
二、不良生态效应识别 .....	89
三、剂量-效应分析 .....	90
四、生态暴露评估 .....	92
五、风险表征及一般方法 .....	94
六、生态风险管理 .....	97
<b>第二节 健康风险评价与管理</b> .....	98
一、概述 .....	98
二、健康危害判定 .....	99
三、剂量-健康危害分析 .....	99
四、暴露评估 .....	102
五、健康风险表征 .....	104
六、健康风险管理 .....	106
<b>第三节 重金属污染土壤的风险评价与管理</b> .....	106
一、风险评价基本框架 .....	106
二、土壤重金属污染途径与暴露分析 .....	107
三、生态风险评价 .....	111
四、人体健康风险评价 .....	114
<b>第四节 农药污染土壤的风险评价与管理</b> .....	115
一、风险评价基本框架 .....	115
二、土壤农药污染途径与暴露分析 .....	117
三、生态风险评价 .....	121
四、人体健康风险评价 .....	126

第五节 减少危害的防范措施与应急计划 .....	129
一、重要性与必要性 .....	129
二、减少危害的防范措施 .....	129
三、应急措施预案 .....	131
主要参考文献 .....	132
第四章 污染土壤的植物修复 .....	134
第一节 概述 .....	134
一、植物修复的基本概念 .....	134
二、植物修复的定义 .....	135
三、吸收、排泄与积累的关系 .....	136
四、超积累植物 .....	139
五、植物修复基本类型 .....	141
六、植物修复的优势与特点 .....	143
七、植物修复局限性及尚待解决的问题 .....	144
第二节 技术可行性 .....	145
一、一般性分析 .....	146
二、生物量处理 .....	148
三、技术强化 .....	151
第三节 植物根际圈及根分泌物的作用 .....	154
一、概述 .....	154
二、根分泌物及其在污染土壤修复过程中的作用 .....	167
第四节 修复植物的筛选与性能改进 .....	171
一、筛选条件与过程 .....	171
二、修复植物的性能改进 .....	172
第五节 重金属的植物修复 .....	175
一、重金属污染特点 .....	176
二、重金属对植物的伤害及机理 .....	178
三、植物对重金属的抗性机制 .....	180
四、重金属的植物提取修复 .....	182
五、重金属的植物挥发修复 .....	186
六、重金属的植物稳定修复 .....	187
第六节 有机污染物的植物修复 .....	187
一、有机污染物的植物降解 .....	188
二、多环芳烃污染土壤的植物修复 .....	189

第七节 排异作物的概念及其利用 .....	200
一、排异作物的概念 .....	200
二、排异性与避性、耐性和抗性的关系 .....	201
主要参考文献 .....	202
<b>第五章 污染土壤的生物修复 .....</b>	<b>206</b>
<b>第一节 微生物在生物修复过程中的作用 .....</b>	<b>206</b>
一、污染物的微生物分解与固定 .....	206
二、微生物基础代谢活动的变异 .....	208
三、微生物的营养需求 .....	210
四、微生物活性及其生态指示 .....	211
五、土著微生物的适应性 .....	212
<b>第二节 生物修复有效性的影响因素分析 .....</b>	<b>215</b>
一、污染物种类与浓度的影响 .....	215
二、影响污染物生物降解的物理化学因素 .....	218
三、影响污染物生物降解的生物因素 .....	218
<b>第三节 生物修复的场地条件 .....</b>	<b>219</b>
一、场地基本要求 .....	219
二、自然生物修复及其场地条件 .....	222
三、工程生物修复及其场地条件 .....	224
<b>第四节 生物修复过程的评价 .....</b>	<b>225</b>
一、样品测定 .....	227
二、细菌总数 .....	227
三、原生动动物数 .....	230
四、细菌活性率 .....	231
五、细菌的适应性 .....	232
六、无机碳浓度 .....	232
<b>第五节 原位生物修复 .....</b>	<b>233</b>
一、生物净化与生物修复 .....	233
二、微生物的原位修复 .....	233
三、原位生物降解示范技术 .....	235
四、原位生物修复的环境条件 .....	236
五、污水的生态处理与原位生物修复 .....	236
<b>第六节 异位生物修复 .....</b>	<b>245</b>
一、异位生物修复主要形式 .....	245

二、一些相关的异位生物修复 .....	246
第七节 生物修复应注意的几个重要问题 .....	248
一、生物修复技术难以去除的污染物 .....	248
二、表面活性剂对有机污染物生物降解的影响 .....	253
三、生物有效性及其改善 .....	257
四、生物进化及其利用 .....	258
主要参考文献 .....	259
第六章 污染土壤的化学修复 .....	263
第一节 原位化学淋洗技术 .....	263
一、概述 .....	263
二、适用范围 .....	265
三、淋洗系统及其设备组成 .....	268
四、系统设计 .....	271
五、冲洗助剂的应用 .....	276
六、应用实例 .....	279
第二节 异位化学淋洗技术 .....	280
一、设计原理与目标 .....	281
二、适用范围 .....	282
三、装备要求 .....	284
四、应用实例 .....	285
第三节 溶剂浸提技术 .....	287
一、系统组成与技术优势 .....	288
二、适用范围 .....	290
三、应用举例 .....	291
第四节 原位化学氧化修复技术 .....	291
一、氧化剂及其分散技术 .....	293
二、 $H_2O_2$ 作为氧化剂的化学氧化修复技术 .....	296
三、 $K_2MnO_4$ 作为氧化剂的化学氧化修复技术 .....	299
四、 $O_3$ 作为氧化剂的化学氧化修复技术 .....	299
五、原位化学氧化修复技术应用实例 .....	300
第五节 原位化学还原与还原脱氯修复技术 .....	301
一、还原剂 .....	302
二、系统设计 .....	305
三、原位化学反应处理墙 .....	307

四、应用实例 .....	314
第六节 土壤性能改良技术 .....	317
一、施用改良剂 .....	318
二、调节土壤 $Eh$ .....	322
三、土壤性能改良技术处理实例 .....	323
第七节 化学修复技术展望 .....	324
主要参考文献 .....	325
<b>第七章 污染土壤的物理修复 .....</b>	<b>330</b>
第一节 物理分离修复技术 .....	330
一、技术原理与过程 .....	330
二、物理分离修复方法 .....	332
三、应用实例分析 .....	341
第二节 土壤蒸气浸提修复技术 .....	344
一、概述 .....	344
二、原位土壤蒸气浸提技术 .....	346
三、异位土壤蒸气浸提技术 .....	348
四、多相浸提技术 .....	349
五、压裂修复技术 .....	354
第三节 固化/稳定化土壤修复技术 .....	356
一、概述 .....	356
二、技术优势与影响因素 .....	358
三、异位固化/稳定化 .....	359
四、原位固化/稳定化 .....	361
五、需要注意的设计问题 .....	362
六、应用情况 .....	363
第四节 玻璃化修复技术 .....	365
一、原位玻璃化技术 .....	365
二、异位玻璃化技术 .....	367
第五节 热力学修复技术 .....	369
一、高温原位加热修复技术 .....	369
二、低温原位加热修复技术 .....	371
三、原位电磁波加热修复技术 .....	373
第六节 热解吸修复技术 .....	376
一、热解吸系统 .....	376

二、系统设计及其考虑因素	386
三、应用热解吸系统应考虑的问题	395
四、热解吸系统的适用范围	397
五、应用实例	399
<b>第七节 电动力学修复技术</b>	<b>400</b>
一、概述	400
二、技术原理	401
三、技术优势与限制因素	402
四、电动力学技术的应用	403
<b>第八节 冰冻修复技术</b>	<b>404</b>
一、概述	404
二、适用范围与限制因素	405
三、值得关注的设计问题	406
四、研究实例	407
<b>主要参考文献</b>	<b>408</b>
<b>第八章 污染土壤修复生态工程</b>	<b>412</b>
<b>第一节 基本原理与方法</b>	<b>412</b>
一、概述	412
二、技术目标	413
三、生态围隔阻控三要素	414
四、系统影响因素	415
五、系统寿命与监测维修	416
<b>第二节 生态覆盖系统</b>	<b>417</b>
一、技术目标与功能	418
二、覆盖材料	419
三、生态设计原理	423
四、以土壤为基础的生态覆盖系统设计实例	428
<b>第三节 垂直阻控系统</b>	<b>432</b>
一、一般功能	433
二、基本类型	435
三、生态设计与构建	437
四、泥浆墙性能影响因素	438
<b>第四节 水平阻控系统</b>	<b>440</b>
一、基本功能	440

二、主要类型 .....	441
三、生态设计与构建 .....	441
第五节 水力学措施与生态工程的完善 .....	443
一、地下水位调控 .....	443
二、牵制污染斑块 .....	444
三、水力学调控 .....	444
主要参考文献 .....	445
<b>第九章 污染土壤修复标准</b> .....	446
第一节 技术清洁水平 .....	446
一、修复技术水平 .....	446
二、仪器可检出水平 .....	447
第二节 环境背景水平 .....	453
一、土壤环境背景 .....	453
二、与污染土壤修复基准的关系 .....	455
第三节 法规可调控清洁水平 .....	457
一、国内现有环境立法 .....	457
二、国外和一些国际组织有关环境法规 .....	468
第四节 国外一些发达国家的土壤基准与标准 .....	516
一、前苏联及俄罗斯的土壤环境标准体系 .....	516
二、荷兰的土壤质量目标值与调解值 .....	517
三、英国的指导性土壤基准与标准 .....	522
四、丹麦的土壤质量“三合一”标准 .....	525
五、法国土壤保护指导值 .....	531
六、瑞典污染土壤修复综合体系 .....	537
七、新西兰污染土壤修复基准与标准 .....	550
八、日本的土壤保护及其标准 .....	552
主要参考文献 .....	554
<b>第十章 污染土壤修复的技术再造与展望</b> .....	556
第一节 相关领域技术现状 .....	556
一、概述 .....	556
二、生态化学修复 .....	557
第二节 存在问题与技术局限性 .....	558
一、存在问题 .....	558
二、技术局限性 .....	560



第三节 解决办法与发展前景 .....	563
一、研究与发展、市场定位和技术实施的关系 .....	563
二、技术再造 .....	564
三、研究展望 .....	565
主要参考文献 .....	567