



国家火炬计划“污染土壤修复技术及产业化”立项项目

污染土壤修复 技术与应用

崔龙哲 李社锋 主编

WURAN TURANG XIUFU JISHU YU YINGYONG



化学工业出版社



国家火炬计划“污染土壤修复技术及产业化”立项项目

污染土壤修复 技术与应用

崔龙哲 李社锋 主编



化学工业出版社

· 北京 ·

《污染土壤修复技术与应用》在介绍土壤污染的特点和修复原理、土壤污染政策法规标准的基础上，依次介绍了土壤污染调查与风险评价、污染物在土壤中的迁移和转化、污染土壤物理化学修复技术、污染土壤生物修复、污染场地土壤修复工程实施与管理等内容，编写中注意理论与实际相结合，以使本书内容具有更强的指导性。最后一章介绍了我国污染土壤修复面临的问题和发展趋势，对土壤修复科研工作者具有一定参考价值。

本书可供环境类专业本科生、研究生、科研工作者和相关从业者使用、参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

污染土壤修复技术与应用/崔龙哲, 李社锋主编.

—北京: 化学工业出版社, 2016.10

ISBN 978-7-122-28062-6

I. ①污… II. ①崔…②李… III. ①污染土壤-修
复 IV. ①X53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 217613 号

责任编辑: 宋林青

文字编辑: 汲永臻

责任校对: 宋 夏

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: 北京市振南印刷有限责任公司

装 订: 北京国马印刷厂

787mm×1092mm 1/16 印张 24 $\frac{1}{4}$ 字数 618 千字 2016 年 11 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: 78.00 元

版权所有 违者必究

《污染土壤修复技术与应用》编写组

主 编 崔龙哲 李社锋

副主编 王文坦 王松波 宋自新 吴俊峰

编 者

武汉都市环保工程技术股份有限公司 朱文渊

中南民族大学 张胜花

武汉都市环保工程技术股份有限公司 邵 雁

中南民族大学 吴来燕

武汉市科学技术局（市知识产权局） 黄 凰

中南民族大学 陈 柯

武汉都市环保工程技术股份有限公司 肖国俊

中南民族大学 马海清

武汉都市环保工程技术股份有限公司 刘更生

中南民族大学 刘 瑾

前言

土壤资源是人类生活和生产最基本、最广泛、最重要的自然资源之一，是地球上陆地生态系统的重要组成部分。土壤环境是由植物和土壤生物及其生存环境要素，包括土壤矿物质、有机质、土壤空气和土壤水构成的一个有机统一整体，是90%污染物的最终受体，比如大气污染造成的污染物沉降、污水的灌溉和下渗、固体废弃物的填埋，“受害者”都是土壤。土壤污染源复杂，污染物种类繁多。近30年来，随着我国工业化、城市化、农业高度集约化的快速发展，土壤环境污染日益加剧，并呈现出多样化的特点。我国土壤污染点位在增加，污染范围在扩大，污染物种类在增多，出现了复合型、混合型的高风险区域，呈现出城郊向农村延伸、局部向流域及区域蔓延的趋势，形成了点源与面源污染共存，工矿企业排放、肥药污染、种植养殖业污染与生活污染叠加，多种污染物相互复合、混合的态势。土壤环境污染已对粮食及食品安全、饮用水安全、区域生态安全、人居环境健康、全球气候变化以及经济社会可持续发展构成了严重威胁。近年来，我国一些地方的土壤污染危害事件暴露出我国土壤污染问题不容忽视。国内在污染土壤修复技术方面的研究从20世纪70年代就已经开始，当时以农业修复措施的研究为主。随着时间的推移，其他修复技术的研究（如化学修复和物理修复技术等）也逐渐展开。到了20世纪末，污染土壤的生物修复技术研究在我国也迅速开展起来。总体而言，虽然我国在土壤修复技术研究方面取得了可喜的进展，但在修复技术研究的广度和深度方面与发达国家尚有一定差距，特别是工程修复方面差距较大。

本书在编撰、审阅和出版过程中，得到了武汉都市环保工程技术股份有限公司领导的关怀和支持。同时，韩国全北大学校丁泰燮教授，湖北省环境科学研究院蔡俊雄教授、余江研究员，韩国西海环境科学研究院申哲昊博士，韩国LG环境安洪逸博士等众多朋友和家人也给予了鼎力相助。编者在进行土壤污染修复的研究实践活动中，得到了国家火炬计划项目“污染土壤修复技术及产业化”（2013GH061656）、湖北省普通高等学校战略性新兴产业（支柱）产业人才培养计划、湖北省2015年科技创新战略团队项目（鄂组办[2016]20号）、中国中冶“三五”重大科技专项（0012012010）、武汉市青年科技晨光计划项目（2015070404010208）等的大力支持，在此一并深致谢忱。我们编撰本书的初衷是将研究成果，工程实践经验及有关资料等通过综合归纳供同行朋友参考，希望对大家的工作有所帮助。

本书在编写过程中，除了编写团队的研究成果之外，还参考了很多国外专家学者的研究成果和专业资料，在此一并表示感谢。由于时间仓促，本书中难免有疏漏和不妥之处，请读者朋友们不吝指正。

中南民族大学 崔龙哲
武汉都市环保工程技术股份有限公司 李社锋
2016年6月

目录

第1章 概论 / 1

1.1 土壤及其组成、性质和功能	1
1.1.1 土壤	1
1.1.2 土壤的组成	1
1.1.3 土壤的性质	4
1.1.4 土壤环境质量及其功能	8
1.2 土壤污染	9
1.2.1 土壤污染的定义与特点	9
1.2.2 土壤污染物	10
1.2.3 土壤污染物的来源	13
1.2.4 土壤污染典型事件	16
1.2.5 我国土壤污染概况	19
1.3 土壤污染修复技术	23
1.3.1 土壤污染修复概述	23
1.3.2 土壤污染修复技术	24
1.3.3 土壤污染修复技术的研究及应用	26
1.3.4 土壤污染修复技术的发展趋势	32
参考文献	33

第2章 土壤污染政策法规标准 / 35

2.1 政策概况	35
2.2 土壤污染法律法规	37
2.2.1 土壤污染防治法律制度的概念	37
2.2.2 国外土壤污染防治法律	37
2.2.3 我国现行土壤污染防治法律制度	40
2.3 土壤质量相关标准	45
2.3.1 国外土壤环境质量标准概况	46
2.3.2 我国土壤环境质量标准概况	50
2.3.3 我国土壤环境质量标准存在的问题	55
2.4 我国土壤污染的导则与指南	57
2.4.1 污染场地术语	57
2.4.2 工业企业场地环境调查评估与修复工作指南	65
2.4.3 地下水环境状况调查评价工作指南	66
参考文献	67

第3章 土壤污染调查与风险评价 / 68

3.1 土壤污染调查	68
3.1.1 土壤调查概述	68
3.1.2 土壤环境监测	71
3.1.3 土壤污染生态毒理诊断	77
3.1.4 土壤调查的国内外研究进展	79
3.2 土壤污染风险评价与管理	79
3.2.1 风险评价概述	79
3.2.2 土壤污染的生态风险评价及管理	82
3.2.3 土壤污染的健康风险评价	93
3.2.4 国内外污染土壤风险评估进展	102
3.3 重金属污染土壤的风险评价	104
3.3.1 风险评价基本框架	104
3.3.2 土壤重金属污染途径与暴露分析	104
3.3.3 生态风险评价	107
3.3.4 人体健康风险评价	108
3.3.5 土壤重金属风险评估研究现状	109
3.4 有机物污染土壤的风险评价——以农药为例	109
3.4.1 风险评价基本框架	109
3.4.2 土壤农药污染途径与暴露分析	111
3.4.3 生态风险评价	113
3.4.4 人体健康风险评价	118
3.5 污染土壤防范及国内外土壤管理	119
3.5.1 减少危害的防范措施	119
3.5.2 应急措施预案	121
3.5.3 国外污染土壤管理	121
3.5.4 对中国污染土壤管理的启示	128
参考文献	128

第4章 污染物在土壤中的迁移和转化 / 131

4.1 污染物在土壤中的形态	131
4.1.1 土壤中重金属的形态	131
4.1.2 土壤中有机污染物的形态	133
4.1.3 典型重金属在土壤中的形态与分布	134
4.1.4 典型有机污染物在土壤中的形态与分布	137
4.2 污染物在土壤中的迁移	141
4.2.1 机械迁移	141
4.2.2 物理-化学迁移	141
4.2.3 生物迁移	141

4.3	污染物在土壤中的转化	141
4.3.1	物理转化	141
4.3.2	化学转化	142
4.3.3	生物转化	142
4.4	影响污染物在土壤中转化的因素	143
4.4.1	影响重金属在土壤中转化的因素	143
4.4.2	影响有机污染物在土壤中转化的因素	144
4.5	典型重金属在土壤中的迁移与转化	146
4.5.1	汞在土壤环境中的迁移转化	146
4.5.2	砷在土壤环境中的迁移转化	147
4.5.3	铅在土壤环境中的迁移转化	148
4.5.4	镉在土壤环境中的迁移转化	149
4.5.5	铬在土壤环境中的迁移转化	151
4.6	典型有机污染物在土壤中的迁移转化	152
4.6.1	有机氯农药	152
4.6.2	有机磷农药	154
4.6.3	多环芳烃	156
4.6.4	石油烃	158
4.6.5	多氯联苯	158
	参考文献	161

第 5 章 污染土壤物理化学修复技术 / 163

5.1	土壤气相抽提技术	163
5.1.1	基本原理	163
5.1.2	系统构成	164
5.1.3	影响因素	165
5.1.4	适用性	168
5.1.5	费用	170
5.1.6	应用概况与理论研究进展	170
5.1.7	气相抽提增强技术	170
5.2	土壤淋洗技术	175
5.2.1	基本原理	175
5.2.2	技术分类	175
5.2.3	影响因素	178
5.2.4	适用性	181
5.3	电动修复技术	181
5.3.1	基本原理	181
5.3.2	系统构成	182
5.3.3	影响因素	184
5.3.4	适用性	187
5.3.5	改进技术工艺	187

5.4	化学氧化技术	190
5.4.1	技术概要	190
5.4.2	系统构成和主要设备	191
5.4.3	影响因素	192
5.4.4	常用氧化剂	193
5.4.5	适用性	195
5.5	溶剂萃取技术	195
5.5.1	基本原理	195
5.5.2	系统构成	197
5.5.3	影响因素	197
5.5.4	适用性	197
5.5.5	工艺举例	199
5.6	固化/稳定化技术	199
5.6.1	基本原理	200
5.6.2	常用系统	202
5.6.3	影响因素	204
5.6.4	固化/稳定化工艺	205
5.6.5	技术应用	206
5.6.6	固化/稳定化优缺点	209
5.7	热脱附技术	209
5.7.1	基本原理	210
5.7.2	系统构成和主要设备	212
5.7.3	影响因素	213
5.7.4	适用性	214
5.7.5	热脱附技术的工程应用	214
5.8	水泥窑协同处置技术	214
5.8.1	基本原理	214
5.8.2	系统构成和主要设备	215
5.8.3	影响因素	215
5.8.4	水泥窑协同处置技术工艺	216
5.8.5	技术应用	217
5.9	其他物理化学修复技术	217
5.9.1	物理分离技术	217
5.9.2	阻隔填埋技术	219
5.9.3	可渗透反应墙技术	220
	参考文献	221

第 6 章 污染土壤生物修复 / 223

6.1	生物修复简介	223
6.2	微生物修复	225
6.2.1	重金属污染土壤的微生物修复	226

6.2.2	有机污染土壤的微生物修复	231
6.3	植物修复	241
6.3.1	重金属污染土壤的植物修复	242
6.3.2	有机污染土壤的植物修复	250
参考文献	256

第 7 章 污染场地土壤修复工程实施与管理 / 259

7.1	污染场地土壤修复工程实施的特点与影响因素	259
7.1.1	修复工程实施的特点	259
7.1.2	修复工程实施的影响因素	260
7.2	修复工程实施流程与工作内容	261
7.2.1	实施流程	261
7.2.2	工作内容	263
7.3	土壤修复工程技术筛选及方案制订	278
7.3.1	目的及意义	278
7.3.2	基本原则	278
7.3.3	工作程序和内容	279
7.3.4	确定修复策略及修复模式	280
7.3.5	修复技术筛选与评估	282
7.3.6	形成修复技术备选方案与方案比选	296
7.3.7	制订环境管理计划	309
7.3.8	编制修复方案	310
7.4	土壤修复工程实施过程中的仪器设备	311
7.4.1	现场检测仪器设备	311
7.4.2	实验室仪器设备	314
7.4.3	工程修复设备	322
7.5	土壤修复工程实施过程中的药剂	334
7.5.1	稳定固化药剂	334
7.5.2	化学淋洗药剂	335
7.5.3	化学氧化还原药剂	336
7.5.4	生物修复药剂	336
7.6	土壤修复工程项目管理	338
7.6.1	项目组织结构	338
7.6.2	施工组织及过程管理	338
7.6.3	安全保障	342
7.6.4	二次污染控制	342
7.6.5	监理	342
7.7	典型案例——广州某工业退役地块固体废物污染治理项目典型案例	343
7.7.1	项目基本情况	343
7.7.2	场地状况	344
7.7.3	治理修复	346

7.7.4	修复环境监理	355
7.7.5	修复验收	358
7.7.6	案例特色	360
7.7.7	案例总结	362
参考文献		362

第 8 章 展望 / 364

8.1	我国土壤修复行业面临的主要问题	364
8.1.1	土壤污染详细情况有待进一步摸清	364
8.1.2	土壤污染防治政策、法规、标准亟须完善	364
8.1.3	土壤污染防治与修复技术研究基础薄弱	364
8.1.4	土壤污染修复设备化、工程化、产业化研究滞后	365
8.1.5	土壤污染防治与修复资金不明确	365
8.1.6	土壤环境保护管理体制不完善	365
8.1.7	土壤环境保护产业化链条尚未形成	365
8.2	我国污染土壤修复的技术局限性	365
8.3	我国污染土壤修复的技术发展趋势	367
8.3.1	向绿色与环境友好的土壤生物修复技术发展	367
8.3.2	从单项向协同、联合的土壤综合修复技术发展	367
8.3.3	从异位向原位的土壤修复技术发展	367
8.3.4	基于环境功能修复材料的土壤修复技术发展	368
8.3.5	基于设备化的快速场地污染土壤修复技术发展	368
8.3.6	从土壤修复向土壤-水体联合修复	368
8.3.7	从点源污染场地修复向流域生态修复发展	368
8.3.8	土壤修复决策支持系统及后评估技术发展	369
8.4	我国污染土壤修复商业模式建议	369
8.4.1	第三方治理和 PPP 模式	369
8.4.2	几种土壤修复商业模式建议	369
8.5	我国土壤修复行业代表性单位介绍	371
8.5.1	中国科学院沈阳应用生态研究所	372
8.5.2	中国科学院南京土壤研究所	372
8.5.3	中国环境科学研究院土壤污染与控制研究室	372
8.5.4	上海市环境科学研究院固体废物与土壤环境研究所	373
8.5.5	武汉都市环保工程技术股份有限公司	373
8.5.6	北京建工环境修复有限责任公司	374
8.5.7	中节能大地环境修复有限公司	374
8.5.8	上田环境修复股份有限公司	374
8.6	我国土壤修复工作展望	375
参考文献		376

1.1 土壤及其组成、性质和功能

1.1.1 土壤

《说文解字》中记载：“土，地之吐生万物者也；壤，柔土也，无块曰壤。”有植物生长的地方称作“土”，而“壤”是柔软、疏松的土。土壤是能够生长植物的疏松多孔物质层。《周礼》中写道：“万物自生焉则曰土，以人所耕而树艺焉则曰壤”，即“土”通过人们的改良利用和精耕细作而成为“壤”。国际标准化组织（ISO）将土壤定义为具有矿物质、有机质、水分、空气和生命有机体的地球表层物质。

土壤是地球的“皮肤”，地球表面形成的土壤圈占据着重要的地理空间位置，它处于大气圈、水圈、岩石圈和生物圈相互交接的部位，是连接各种自然地理要素的枢纽，是连接有机界和无机界的重要界面。土壤圈与其他圈层之间进行着物质和能量的交换，成为与人类关系最密切的环境要素。

土壤既具有资源的属性，也具有环境属性和生命属性，土壤是人类生存与发展的最基本环境要素。马克思在其《资本论》中就指出“土壤是世代相传的，人类所不能转让的生存条件和再生产条件”。

人类的工农业生产活动不仅影响土壤的形成过程和方向，也直接改变土壤的基本物理、化学和生物特性，土壤环境的变化更是影响全球的环境变化。如今，土壤已成为地球陆地生态系统的重要基础，全球土壤变化越来越影响着人类生存的条件。

1.1.2 土壤的组成

土壤由固态、液态和气态物质组成（图 1-1）。

固态物质包括矿物质、有机质和微生物，约占土壤体积的 50%。土壤的矿物质是指含钾、钙、钠、镁、铁、铝等元素的硅酸盐、氧化物、硫化物、磷酸盐。土壤中有机物质分为枯枝落叶或动物尸体的残落物和腐殖质两大类，其中以腐殖质最为重要，占有有机物质的 70%~90%，它是由碳、氢、氧、氮和少量硫元素组成的具有多种官能团的天然络合剂。

液态物质由水分构成，约占土壤体积的 20%~30%，主要存在于土壤孔隙中，可以分为束缚水和自由水两种：前者是受土粒间的吸力所阻，难以在土壤中移动的水分；后者是在

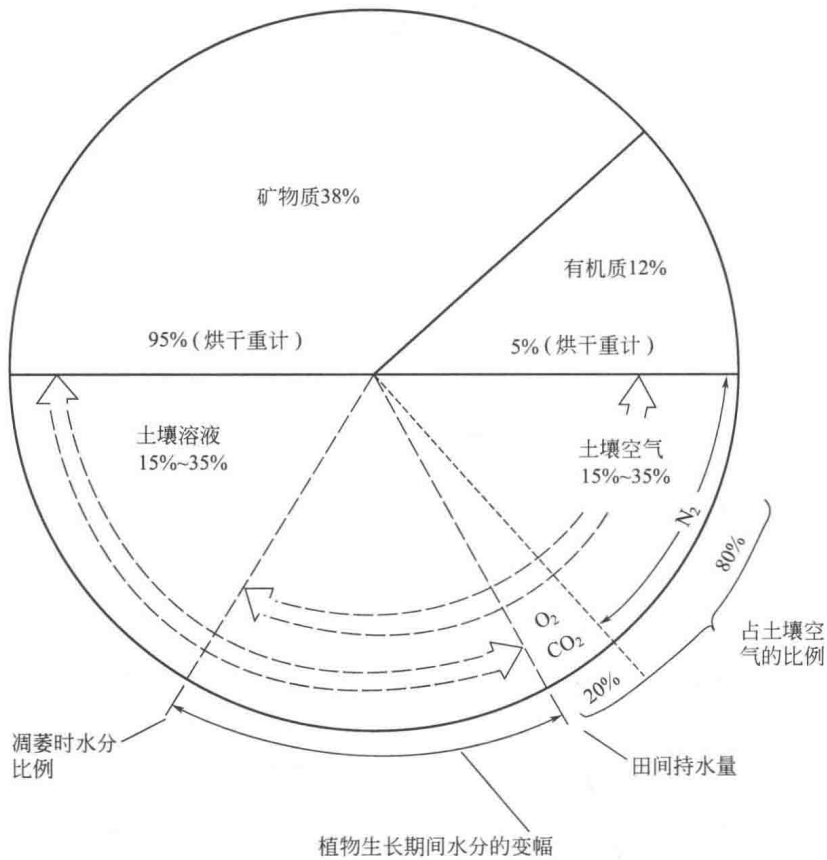


图 1-1 土壤三相物质组成示意

土壤中自由移动的水分。

气态物质存在于未被水分占据的土壤空隙中，约占土壤体积的 20%~30%。土壤气态物质来自大气，但由于生物活动的影响，它与大气的组分有差异，通常表现为湿度较高、CO₂ 含量较高、O₂ 含量较低。

组成土壤的固态、液态和气态物质都有其独特的作用，各组分之间又相互影响、相互反应，形成许多土壤特性。土壤的组成和性质，不仅影响土壤的生产能力，而且通过物理、化学和生物过程，影响土壤的环境净化功能并最终直接或间接地影响人类健康。

1.1.2.1 土壤矿物质

土壤矿物质是土壤的主要组成物质，构成了土壤的“骨骼”，按成因可分为原生矿物和次生矿物两大类。

(1) 原生矿物

土壤原生矿物是指各种岩石受到不同程度的物理风化后而未经化学风化的碎屑物，其原来的化学组成和结晶构造均未改变。土壤的粉砂粒和砂粒几乎全是原生矿物。土壤原生矿物的种类主要有：硅酸盐类、铝硅酸盐类矿物，如长石、云母、辉石、角闪石和橄榄石等；氧化物类矿物，如石英、金红石、锆石、电气石等；硫化物，如黄铁矿等；磷酸盐类矿物，如氟磷灰石。它们是土壤中各种化学元素的最初来源。

(2) 次生矿物

土壤次生矿物是由原生矿物经风化和成土过程后重新形成的新矿物，其化学组成和构造

都发生改变而不同于原生矿物。土壤次生矿物分为三类：简单盐类、次生氧化物类和次生铝硅酸盐类。次生（主要是铁、铝）氧化物类和次生铝硅酸盐类是土壤矿物质中最细小的部分（粒径小于 $2\mu\text{m}$ ），如高岭石、蒙脱石、伊利石、绿泥石、针铁矿、三水铝石等，具有胶体性质，常称为黏土矿物。

次生矿物是土壤黏粒和土壤胶体的组成部分，土壤的很多物理性质和化学性质，如黏性、吸附性等都与次生矿物有关，土壤的这些物理化学性质不仅影响植物对土壤养分的吸收，而且对土壤中的重金属、农药等污染物质的迁移转化和有效性也产生重要的影响。

(3) 土壤矿物质的主要组成元素

土壤中元素的平均含量与地壳中各元素的克拉克值相似。地壳中已知的 90 多种元素土壤中都存在，包括含量较多的十余种元素，如氧、硅、铝、铁、钙、镁、钠、钾、磷、锰、钛、硫等，以及一些微量元素，如锌、硼、铜、钼等。从含量看，前四种元素所占的比例最多，若以 SiO_2 、 Al_2O_3 和 Fe_2O_3 氧化物形式而言，三者之和占土壤矿物部分的 75%。

1. 1. 2. 2 土壤有机质

土壤有机质概指土壤中动植物残体、微生物体及其分解和合成的物质，是土壤的固相组成部分。土壤有机质在土壤中的数量虽少，但对土壤的理化性质影响极大，而且又是植物和微生物生命活动所需养分和能量的源泉。

土壤有机质包括两大类。第一类为非特殊性有机质，主要是原始组织，包括高等植物未分解和半分解的根、茎、叶以及动物分解原始植物组织后向土壤提供的排泄物和动物死亡之后的尸体等。这些物质被各种类型的土壤微生物分解转化，形成土壤物质的一部分。因此，土壤植物和动物不仅是各种土壤微生物营养的最初来源，也是土壤有机部分的最初来源。这类有机质主要累积于土壤的表层，约占土壤有机部分总量的 10%~15%。第二类为土壤腐殖质 (humus)，是土壤中特殊的、其性质在原有动植物残体的基础上发生了很大改变的有机物质，占土壤有机质的 85%~90%。腐殖质是一种复杂化合物的混合物，通常呈黑色或棕色，胶体状。它具有比土壤无机组成中黏粒更强的吸持水分和养分离子的能力，因此少量的腐殖质就能显著提高土壤的生产力。土壤腐殖质对土壤物理化学性质和微生物活动的影响，不仅对减少进入土壤中的污染物质的危害起到巨大的作用，而且对全球碳的平衡和转化也有很大的作用。

土壤有机质组成十分复杂，按化学组成可以分为碳水化合物，含氮化合物，木质素，含磷、含硫化合物以及脂肪，蜡质，单宁，树脂等。

1. 1. 2. 3 土壤水分与土壤溶液

土壤水分和土壤空气同时存在于土壤孔隙之中，土壤孔隙若未充满水分则必然存在土壤空气，反之亦然，两者彼此消长。

土壤水分是土壤的重要组成成分之一。它不仅是植物生长必不可少的因子，而且可与可溶性盐构成土壤溶液，成为向植物供给养分和与其他环境因子进行化学反应和物质交换的介质。土壤水分主导着离子的交换、物质的溶解与沉淀、化合和分解等，是生命必需元素和污染物迁移转化的重要影响因素。土壤水分主要来自于大气降水、灌溉水、地下水。土壤水分的消耗形式主要有土壤蒸发、植物吸收和蒸腾、水分渗漏和径流损失等。按水分的存在形态和运动形式，土壤水分可划分为吸湿水、毛管水和重力水等。

土壤水溶解土壤中各种可溶性物质后，便成为土壤溶液。土壤溶液主要由自然降水中所

带的可溶物，如 CO_2 、 O_2 、 HNO_3 、 HNO_2 及微量的 NH_3 等和土壤中存在其他可溶性物质，如钾盐、钠盐、硝酸盐、氯化物、硫化物以及腐殖质中的胡敏酸、富里酸等构成。由于环境污染的影响，土壤溶液中也进入了一些污染物质。

土壤溶液的成分和浓度经常处于变化之中。土壤溶液的成分和浓度取决于土壤水分、土壤固体物质和土壤微生物三者之间的相互作用，它们使溶液的成分、浓度不断发生改变。在潮湿多雨地区，由于水分多，土壤溶液浓度较小，土壤溶液中有机化合物所占比例大；在干旱地区，矿物质风化淋溶作用弱，矿物质含量高，土壤溶液浓度大。此外，土壤温度升高会使许多无机盐类的溶解度增加，使土壤溶液浓度加大；土壤微生物活动也直接影响着土壤溶液的成分和浓度，微生物分解有机质，可使土壤中 CO_2 的含量增加，导致土壤溶液中碳酸的浓度也随之增大。

由于土壤溶液实际上是由多种弱酸（或弱碱）及其盐类构成的缓冲体系，因此，土壤具有缓冲能力，能够缓解酸碱污染物对植物和微生物生长的影响。

1.1.2.4 土壤空气

土壤空气来源于大气，它存在于未被水分占据的孔隙中，但其性质与大气明显不同。由于土壤生物生命活动和气体交换的影响，土壤空气中 CO_2 的含量比大气高，而 O_2 的含量比大气低。土壤空气中 CO_2 的含量一般为 $0.15\% \sim 0.65\%$ ，是大气中 CO_2 含量（ 0.035% ）的十倍至数百倍。 O_2 在大气中约占 21% ，而在土壤空气中仅占 $10\% \sim 20\%$ ，在通气极端不良的条件下可低于 10% 。另外，土壤空气中的水汽含量大于 70% ，远比大气高，土壤空气湿度一般接近 100% 。在土壤中，由于有机质的嫌气分解，还可能产生 CH_4 、 H_2 等气体。土壤空气中还经常有 NH_3 存在，但含量不高。

土壤空气对植物种子发芽、根系发育、微生物活动及养分的转化有很大的影响。一方面，它是土壤肥力因素之一，土壤中空气的状况直接影响土壤性质和植物的生长；另一方面，它影响污染物在土壤中的迁移转化，影响植物生长和作物品质，如土壤中氧气含量影响土壤氧化还原电位，对土壤污染物的转化产生重要影响。土壤空气的成分还直接影响与之相接触的大气的成分，甚至影响居民区室内空气的成分，从而通过呼吸系统影响人类的健康。

1.1.2.5 土壤生物

土壤区别于岩石的主要特点之一，就是在土壤中生活着一个生物群体。生物不但积极参与岩石的风化作用，并且是成土作用的主导因素。土壤生物是土壤的重要组成成分和影响物质能量转化的重要因素。这个生物群体，特别是微生物群落，是净化土壤有机污染的主力军。

土壤生物可分为两大类：微生物区系和动物区系。土壤中包含细菌、放线菌、真菌与藻类四种重要的微生物类群。土壤微生物的数量十分庞大。微生物参与下的氮、碳、硫、磷等环境污染物质的转化对环境自净功能起重要作用。土壤动物包括原生动物、蠕虫动物（线虫类和蚯蚓等）、节肢动物（蚁类、蜈蚣、螨虫等）、腹足动物（蜗牛等）以及栖居土壤的脊椎动物。

1.1.3 土壤的性质

不同土壤类型，具有不同的物理特性（土壤质地、土壤孔性、土壤水分特性、通气性、力学特性和适耕性）、化学特性（胶体特性、吸附性、酸碱性、土壤氧化还原性、配位反

应)、生物学特性(酶、微生物、土壤动物)。污染物进入土壤后,土壤中的黏粒矿物对污染物发生吸附解吸作用,土壤有机质、土壤中的酸碱性、氧化还原状况等都会影响土壤中污染物的毒性,同一种污染物在不同类型土壤中的环境危害差别很大,这与水、气环境明显不同。

1.1.3.1 土壤的物理性质

土壤是一个极其复杂的、含有三相物质的分散系统。它的固体基质包括大小、形状和排列不同的土粒。这些土粒的相互排列和组织,决定着土壤结构与孔隙的特征,水和空气就在孔隙中保存和传导。土壤的三相物质的组成和它们之间强烈的相互作用表现出土壤的各种物理性质,如土壤质地、结构、孔隙、通气、温度、热量、可塑性、膨胀和收缩等。

(1) 土壤质地

土壤由大小不同的土粒按不同的比例组合而成。土壤不同的颗粒其成分和性质不一样,一般来说,土粒越细,所含的养分越多,但污染元素的含量也越多。土壤中各粒级土粒含量的相对比例或重量比称为土壤质地。依土粒粒径的大小,土粒可以分为4个级别:石砾(粒径大于2mm)、砂粒(粒径为2~0.05mm)、粉砂(粒径为0.05~0.002mm)和黏粒(粒径小于0.002mm)。一般来说,土壤的质地可以归纳为砂质、黏质和壤质三类。砂质土是以砂粒为主的土壤,砂粒含量通常在70%以上;黏质土壤中黏粒的含量一般不低于40%;壤质土可以看做是砂粒、粉砂粒和黏粒三者按比例上均不占绝对优势的一类混合土壤。

中国土壤质地分类见表1-1。

表 1-1 中国土壤质地分类

质地组成	质地名称	颗粒组成/%		
		砂粒 (1~0.05mm)	粗粉粒 (0.05~0.01mm)	细黏土(<0.001mm)
砂土	极重砂土	>80		<30
	重砂土	70~80		
	中砂土	60~70		
	轻砂土	50~60		
壤土	砂粉土	≥20	≥40	<30
	粉土	<20		
	砂壤	≥20 <20	<40	
黏土	轻黏土			30~35
	中黏土			35~40
	重黏土			40~60
	极重黏土			>60

土壤质地可在一定程度上反映土壤的矿物组成和化学组成,不同质地的土壤,土壤的孔隙率、通气性、透水性和吸附性等性质明显不一样,这些性质不仅影响土壤的保水和蓄肥能力,而且影响土壤的自净能力和土壤中微生物的活性和有机物含量,继而对土壤的环境状况产生影响。不仅如此,裸露的土壤表面还是空气颗粒物的重要来源,土壤颗粒越细,越容易造成扬尘,从而加重空气污染,危害人类健康。空气可吸入颗粒物主要来源于土壤。

① 砂土 黏粒含量少,砂粒含量占优势,通气性、透水性强,分子吸附、化学吸附及交换作用弱,对进入土壤中的污染物的吸附能力弱,保存的少,同时由于通气孔隙大,污染物容易随水淋溶、迁移。沙质土类的优点是污染物容易从土壤表层淋溶至下层,减轻表层土污染物的数量和危害,缺点是有可能进一步污染地下水,造成二次污染。

② 黏土 其颗粒细小,含黏粒多,比表面积大,较黏重,大孔隙少,通气透水性差。由于黏质土富含黏粒,土壤物理吸附、化学吸附及离子交换作用强,具有较强保肥、保水性能,同时也可将进入土壤中的各类污染物质以分子、离子形态吸附固定于土壤颗粒,增加了污染物转移的难度。在黏土中加入砂粒,可增加土壤通气孔隙,减少对污染物的分子吸附,提高淋溶的强度,促进污染物的转移。

③ 壤土 其性质介于黏土和砂土之间。其性状差异取决于壤土中砂、黏粒含量比例,黏粒含量多,性质偏于黏土类,砂粒含量多则偏于砂土类。

(2) 土壤孔隙

土粒与土粒之间、结构体与结构体之间通过点、面接触关系,形成大小不等的空间,土壤中的这些空间称为土壤孔隙。土壤孔隙的形状是复杂多样的,人们通常把土壤这种多孔的性质称为土壤孔隙性。土壤孔隙性决定着土壤的水分和空气状况,并对土壤的水、肥、气、热及耕作性能都有较大的影响,所以它是土壤的重要属性。

土壤孔隙性取决于土壤的质地、结构和有机质的含量等。不同土壤的孔隙性质差别很大。一般说来,砂土中孔隙的体积占单位体积土壤的百分比为 30%~45%,壤土为 40%~50%,黏土为 45%~60%,结构良好的表土高达 55%~65%,甚至在 70%以上。

土壤的孔隙性状对进入土壤污染物的过滤截留、物理和化学吸附、化学分解、微生物降解等有重要影响。在利用污水灌溉的地区,若土壤通气孔隙大,好气性微生物活动强烈,可以加速污水中有机物质分解,较快地转化为无机物,如 CO_2 、 NH_3 、硝酸盐和磷酸盐等。通气孔隙量大,土壤下渗强度大,渗透量大,土壤土层的有机、无机污染物容易被淋溶,从而进入地下水造成污染。

(3) 土壤结构

自然界的土壤,往往不是以单粒状态存在,而是形成大小不同、形态各异的团聚体,这些团聚体或颗粒就是各种土壤结构。土壤结构是土壤中固体颗粒的空间排列方式。根据土壤的结构形状和大小,土壤中结构体可归纳为块状结构体、核状结构体、片状结构体、柱状结构体、团粒结构体等。

① 块状结构体 近似立方体形,长、宽、高大体相等(一般大于 3cm),边面棱角不很明显。该结构容易在质地黏重而缺乏有机质的土壤中生成,特别是在土壤过湿或过干时最容易形成;由于相互支撑,会增大孔隙,造成水分快速蒸发,不利于植物生长繁育。

② 核状结构体 与块状结构体类似,但体积比块状结构小,长、宽、高在 1~3cm,边面棱角明显。该结构多以石灰或铁质作为胶结剂,在结构面上有胶膜出现,因此具有稳定水分的作用,容易在质地黏重和缺乏有机质的土壤中形成。

③ 片状结构体 呈扁平状,长度和宽度比厚度长,界面呈水平薄片状。这种结构往往是由于流水沉积作用或某些机械压力造成的,不利于通气透水,容易造成土壤干旱,水土流失。农田犁耕层、森林的灰化层、园林压实的土壤均属此类。

④ 柱状结构体 呈立柱状,其中棱角明显有定形的称为棱柱状结构体。棱角不明显无定形的称为拟柱状结构体。其特点是土体直立、结构体横截面大小不一、坚硬、内部无效孔隙占优势、植物的根系难以介入、通气不良、结构体之间有很大的裂隙、既漏水又漏肥。常见于半干旱地带的表下层,以碱土、碱化土表下层或黏重土壤心土层最为典型。

⑤ 团粒结构体 通常指土壤中近乎球状的小团聚体,其直径为 0.25~10mm,具有水稳定性,对土壤肥力具有良好作用。农林业生产中最理想的团粒粒径为 2~3mm。这种结构体一般存在于腐殖质较多、植物生长茂盛的表土层中,是最适宜植物生长的土壤结构体