

土壤污染 生态修复实验技术

王友保 主编



科学出版社

土壤污染生态修复实验技术

王友保 主编



科学出版社

北京

内 容 简 介

本书系统介绍了我国目前土壤污染与生态修复研究现状,并从土壤和植物样品的采集和制备、土壤基本理化因子分析、植物对环境污染的耐性与可塑性、植物根系分泌物的研究、植物体内重金属含量及富集测定、土壤动物分析、土壤酶活性与土壤呼吸强度的测定、土壤重金属形态分布和吸附解吸特性检测、土壤微生物分析等方面介绍目前土壤污染与生态修复研究的一些实验技术。

本书可作为土壤学、生态学、生物学、环境学、地学、林学、园艺学等专业教学科研人员的参考用书,也可供其他相关科技工作者参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

土壤污染生态修复实验技术/王友保主编. —北京:科学出版社, 2018.11

ISBN 978-7-03-059678-9

I. ①土… II. ①王… III. ①土壤污染—修复—实验技术 IV. ①X53-33

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第263780号

责任编辑:胡凯 许蕾 沈旭/责任校对:张怡君

责任印制:张伟/封面设计:许瑞

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>

北京九州迅驰传媒文化有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018年11月第一版 开本:787×1092 1/16

2018年11月第一次印刷 印张:10 1/2

字数:249 000

定价:59.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

近年来，伴随着城市化进程的加速和工农业的飞速发展，土壤污染问题日益突出，污染土壤的监测和修复得到了人们越来越多的关注。在治理和监测土壤污染这个问题上，除了传统的物理和化学方法之外，人们也在极力寻找新的解决方法和途径，希望使发展与环境保护二者相协调。随着污染生态学和恢复生态学的发展，其基本原理在自然科学多个领域都得到了广泛的应用。由此应用污染生态学和恢复生态学的理论和方法来解决土壤污染问题也越来越被人们重视。

本书力求简明扼要，通俗易懂，系统介绍了我国目前土壤污染与生态修复研究现状，并从土壤和植物样品的采集和制备、土壤基本理化因子分析、土壤重金属形态分布和吸附解吸特性检测、土壤酶活性与土壤呼吸强度、植物对土壤污染的耐性与可塑性、植物根系分泌物采集与鉴定、植物体内重金属含量及富集测定、土壤动物分析、土壤微生物分析等多角度，给出一些土壤污染与生态修复研究的常用实验研究技术。在编写过程中，我们特别突出了实验技术在日常研究中的可行性，以扩大其应用范围。

本书由王友保主持编写，张杰、黄永杰、潘芳慧、于培鑫、孙玉洁、赵旭、陈丽娟、胡丹丹等参加了部分章节的编写工作，最后全书由王友保统稿。本书参考和引用了大量国内外的论文、教材和专著等，主要文献列于文后。

由于我们的水平和能力有限，书中疏漏和不当之处在所难免，敬请广大同行专家和读者批评指正。

王友保

2018年4月

目 录

前言

第 1 章 土壤污染与生态修复现状	1
1.1 土壤污染类型与污染现状	1
1.1.1 土壤污染的主要来源	1
1.1.2 土壤污染的类型及特点	2
1.1.3 土壤污染的危害	6
1.2 土壤污染修复及其发展	9
1.2.1 土壤污染的修复技术	9
1.2.2 土壤污染修复的发展趋势	17
1.2.3 土壤污染防治的其他建议	18
第 2 章 样品的采集和制备技术	20
2.1 土壤样品的采集和制备	20
2.1.1 土壤样品的采集	20
2.1.2 土壤样品的制备和保存	23
2.2 植物样品的采集和制备	25
2.2.1 植物样品的采集	25
2.2.2 植物样品的制备	26
2.2.3 植物样品的保存	27
第 3 章 土壤理化性质分析实验技术	29
3.1 土壤水分测定	29
3.1.1 烘干法	29
3.1.2 酒精燃烧法	30
3.1.3 土壤墒情的鉴别	30
3.2 土壤质地的测定	31
3.2.1 比重计速测法	31
3.2.2 土壤质地手测法(野外快速测定)	36
3.3 土壤容重和孔隙度的测算	36
3.3.1 土壤容重的测定	36
3.3.2 毛管孔隙度的测定	39
3.4 土壤结构性状与土壤团聚体组成的测定	40
3.4.1 土壤结构的类型	40
3.4.2 土壤结构的观测	41
3.4.3 土壤团聚体快速测定方法	43

3.5	土壤有机质的测定 (重铬酸钾容量法-外加热法)	44
3.6	土壤中氮 (全氮和有效氮) 的测定	46
3.6.1	土壤全氮的测定 (半微量凯氏法)	46
3.6.2	土壤有效氮 (水解氮) 的测定 (碱解扩散法)	49
3.7	土壤中磷 (全磷和速效磷) 的测定	50
3.7.1	土壤全磷的测定 ($\text{HClO}_4\text{-H}_2\text{SO}_4$ 法)	50
3.7.2	中性和石灰性土壤速效磷的测定 (碳酸氢钠法)	52
3.7.3	酸性土壤速效磷的测定 ($\text{NH}_4\text{F-HCl}$ 法)	54
3.8	土壤中钾 (全钾和速效钾) 的测定	55
3.8.1	土壤全钾的测定 (NaOH 熔融-火焰光度计法)	55
3.8.2	土壤速效钾的测定 (醋酸铵-火焰光度计法)	57
3.9	其他土壤因子的测定	58
3.9.1	土壤 pH 的测定 (电位法)	58
3.9.2	土壤氧化还原电位的测定 (电位法)	59
3.9.3	土壤水溶性盐总量测定 (电导法)	61
第 4 章	土壤重金属的形态分布与吸附特性	63
4.1	土壤样品的消化与重金属含量测定	63
4.1.1	土壤样品的消化	63
4.1.2	土壤重金属含量检测的常用方法	64
4.1.3	土壤重金属全量的火焰原子吸收分光光度法测定	67
4.2	土壤重金属的形态分布	68
4.2.1	Tessier 连续提取法	69
4.2.2	BCR 连续提取法	71
4.3	土壤重金属的生物有效性	72
4.3.1	土壤重金属生物有效性的表征	73
4.3.2	二乙三胺五乙酸 (DTPA) 提取法	74
4.3.3	盐酸 (HCl) 提取法	75
4.3.4	乙二胺四乙酸二钠 (EDTA-2Na) 提取法	75
4.4	土壤对重金属的吸附、解吸特性	76
4.4.1	吸附与解吸热力学	76
4.4.2	吸附与解吸动力学	78
第 5 章	土壤酶活性与土壤呼吸强度的测定	80
5.1	土壤蔗糖酶活性测定	80
5.1.1	土壤蔗糖酶活性的比色法测定	81
5.1.2	土壤蔗糖酶活性的滴定法测定	81
5.2	土壤过氧化氢酶活性的测定	82
5.2.1	土壤过氧化氢酶活性的容量法测定	82
5.2.2	土壤过氧化氢酶活性的紫外分光光度法测定	83

5.3	土壤脲酶活性的测定	84
5.3.1	土壤脲酶活性的比色法测定	84
5.3.2	土壤脲酶动力学参数的测定	86
5.4	土壤磷酸酶活性测定	89
5.5	土壤淀粉酶活性的测定	90
5.6	土壤多酚氧化酶的活性测定	91
5.7	土壤蛋白酶的活性的测定	92
5.8	土壤呼吸强度的测定	93
5.8.1	土壤呼吸的实验室测定	94
5.8.2	土壤呼吸的野外现场测定	95
第 6 章	植物对土壤污染的耐性与可塑性研究	96
6.1	植物的耐性指标分析	96
6.1.1	对植物种子萌发的影响	96
6.1.2	植物生长指标的测定	98
6.1.3	植物常见生理生化指标的测定	99
6.1.4	植物几种抗氧化物酶活性的测定	107
6.2	重金属胁迫下植物体的可塑性响应	113
6.2.1	植物光合作用及光能利用效率对重金属胁迫的可塑性响应	113
6.2.2	植物蒸腾作用及水分利用效率对重金属胁迫的可塑性响应	114
6.3	重金属在植物体内的迁移、积累和分布研究	115
6.3.1	植物体内重金属含量的测定	115
6.3.2	重金属在植物亚细胞中的分布	116
6.3.3	重金属在植物体内的形态分布	117
6.3.4	植物对重金属的迁移、转运和富集系数的计算	118
6.4	植物根系分泌物的采集与鉴定	119
6.4.1	根系分泌物的收集及纯化	119
6.4.2	根系分泌物的鉴定	121
第 7 章	土壤动物分析实验技术	122
7.1	土壤动物样品的采集	122
7.1.1	土壤动物的采样方法	122
7.1.2	土壤动物的分离方法	122
7.1.3	土壤动物的分类鉴定	123
7.2	大型土壤动物分析	124
7.2.1	土壤动物组成的统计方法	124
7.2.2	土壤动物类群结构特征分析方法	125
7.2.3	土壤动物富集系数的计算方法	127
7.2.4	相关的数据统计分析方法及软件	127
7.3	土壤线虫分析	128

7.3.1	离心浮选法	128
7.3.2	贝尔曼漏斗法	128
7.3.3	浅盘法	128
7.3.4	土壤线虫功能类群的鉴定方法	129
第8章	土壤微生物分析实验技术	133
8.1	土壤微生物的分离和纯化	133
8.1.1	培养基的制备与微生物的培养	133
8.1.2	土壤微生物的分离与纯化	138
8.2	土壤微生物数量的计数	139
8.2.1	土壤微生物数量的平板培养计数	139
8.2.2	土壤微生物的直接观察	140
8.3	土壤微生物生物量的测定	141
8.3.1	氯仿熏蒸提取法	141
8.3.2	液态氯仿熏蒸-水浴法	144
8.3.3	总磷脂脂肪酸法	145
8.4	土壤微生物的形态学检查	147
8.4.1	不染色标本的检查	147
8.4.2	染色标本的检查	148
8.5	土壤微生物 16S rDNA 的 PCR-DGGE 分析	149
8.5.1	土壤微生物 16S rDNA 的 PCR-DGGE 分析的基本流程	149
8.5.2	土壤样品总 DNA 提取的常用方法	152
	主要参考文献	154

第 1 章 土壤污染与生态修复现状

土壤，是生态环境的重要组成部分，是地球的重要资源，是人类生存和发展的基础，与人类活动紧密相关。然而，土壤污染问题日益突出，尤其在人类活动影响强烈区域受污染的土壤对环境和健康已造成不同程度的损害。土壤污染主要是由于人类活动产生的污染物进入土壤并积累到一定程度，引起土壤质量恶化。具体来说，污染物是指与人为活动有关的各种对人体和生物有害的物质，诸如重金属、化学农药、放射性物质、病原菌等。除了直接污染外，自然界一些其他的污染也可能成为土壤污染的来源。在治理和预防土壤污染之前，了解土壤污染物的来源，有助于快速有效地了解土壤污染现状。一般情况下，土壤污染的来源主要分自然来源和人为来源两大类。在自然条件下，有时也会出现土壤污染，例如，强烈的火山喷发造成土壤污染，含有重金属或放射性元素的矿床的风化分解作用也可使附近土壤遭受污染。而人为来源主要包括工业污染源、农业污染源、生物污染源、交通运输污染源、日常生活污染源等。

1.1 土壤污染类型与污染现状

1.1.1 土壤污染的主要来源

1. 工业污染源

现代化发展的进程中，工业生产排放的废水、废气和废渣（工业“三废”）中含有多种污染物，其浓度高、危害性大。一般工业区周围数千米至数十千米范围内的土壤污染是由工业“三废”直接引起的。但工业“三废”还能间接造成数十千米范围以外的土壤污染。如部分工业废渣往往以肥料形式施入农田，工业废水往往以灌溉形式排向农田，这些做法容易引起大面积的农田污染。又如我国现代煤化工行业排放的大量污染物带来的生态环境污染问题日益显著，煤化工过程产生的“三废”中聚集了许多有害的重金属元素，通过不同途径、方式汇集在周边土壤环境中，对生态环境和人体健康产生危害。不仅如此，工业污染物通过长期作用，在土壤中不断积累，使土壤污染更加严重。工业发达国家的研究表明，近 100~150 年来，土壤（尤其是城市地区土壤）的多环芳烃(PAHs)浓度在不断增加，土壤已经成为 PAHs 的一个重要的汇；与国外研究比较，我国化工区土壤中 PAHs 处于中高等污染水平。

2. 农业污染源

农业生产活动引发的土壤污染问题也十分普遍。首先，污水灌溉是造成耕地土壤污染的主要原因之一，这里的灌溉水主要包括生活污水、工业废水或受污染的江河湖水。其次，农药、化肥、农膜等的使用也可能造成土壤污染。如在喷洒农药时，一部分药水

直接落入土壤表面，另一部分则通过作物落叶、降雨形式归入土壤，由于其具有较高的稳定性和持久性，降解速度非常缓慢，一般喷洒过农药的土壤都含有较高的残留物。又如，长期使用大量的化肥，会使土壤板结，土壤结构变差；可能引起土壤有机质的下降，土壤肥力反而降低；导致土壤中有益微生物数量的减少；化肥成分中含有的污染成分会对土壤产生相应的污染。据统计，我国农用磷肥施用量逐年增加，近 30 年累计施用量达到 1.63 亿吨，通过施用磷肥带入到耕地土壤中的镉总量估计高达数百吨。在农业生产过程中，各种农用塑料薄膜被广泛用于大棚、地膜覆盖，由于管理不善不能将之完全回收，大量残膜碎片散落田间，造成农田“白色污染”。这种固体污染物不易被土壤微生物分解。此外，污水处理厂排放的污泥被施用于农田，也可能引起农田污染。据统计显示，截至 2010 年底，全国污水处理能力达到 1.25 亿立方米/日，年产生含水率 80% 的污泥约 3000 万吨，而农田施用污水处理厂的污泥量约占总量的 45%，污泥中含有重金属、多氯联苯、二噁英等多种污染物。

3. 生物污染源

生活污水和人畜粪便中含有许多植物需要的养分，用生活污水灌田或使用粪肥一般会使农作物增产。但这些废水、废物等进入农田，沉积于土壤中，势必造成土壤污染。生活污水、被污染的河水和人畜粪便中大多含有致病的各种病原菌和寄生虫等，用这种未经处理的肥源施于土壤，会使土壤发生严重的生物污染。这类病原菌、寄生虫的生物种群，从外界环境侵入土壤后会大量繁衍，土壤原来的生态平衡被破坏，对人体和生态系统产生不良的影响。

4. 其他污染源

除了上述污染源的影响外，土壤污染还包括其他来源，诸如交通污染源、生活垃圾污染源等。交通污染与生活垃圾污染均是城市土壤重金属污染的主要来源之一。张磊等(2004)在《中国城市土壤重金属污染研究现状及对策》一文中就明确提到汽车尾气排放、生活垃圾渗出，是中国城市土壤重金属污染的主要来源。近些年来，我国机动车辆的数量猛增，城市交通尾气排放已经成为最大且严重的污染源，危害人类健康，影响人类生活。汽车尾气中不仅含铅及其化合物等有毒物质，还含有 SO_2 等酸性物质，超过一定浓度范围时就会导致“酸雨”的形成，造成土壤酸化和土壤铅污染的累积，影响农作物和森林的生长。居民排出的废物——生活垃圾的数量也在不断增加。目前城市生活垃圾的收集、转运及处置过程还不够完善，其综合利用方式还没有引起人们的足够重视，一部分农田依然受到生活垃圾的污染。

1.1.2 土壤污染的类型及特点

众所周知，土壤污染是全球三大环境要素（大气、水体、土壤）的污染问题之一。土壤是生物和人类赖以生存和生活的重要环境。随着我国工业化的发展、城市化进程的深入，土壤环境污染问题不断加剧。土壤环境质量变化是比较大的，土壤环境污染物种类和数量也不断增加，发生污染的地域和规模在逐渐扩大，危害也进一步加深。

1. 土壤污染的类型

土壤污染是指人类活动所产生的污染物通过各种途径进入土壤，其数量和速度超过了土壤的容纳和净化能力，继而使土壤的性质、组成及性状等发生变化，使污染物的积累过程逐渐占据优势，严重破坏了土壤的自然生态平衡，并导致土壤的自然功能失调、土壤质量恶化的现象。土壤生产力下降成为土壤污染的明显标志。土壤污染物主要是那些能够进入土壤并影响土壤的理化性质和组成物而导致土壤的自然功能失调、土壤质量恶化的物质。其种类繁多，既有化学污染物，也有物理污染物、生物污染物和放射污染物等，其中以土壤的化学污染物最为普遍、严重和复杂。按污染物的性质一般可以将土壤污染分为四类：重金属污染、有机物污染、放射性元素污染和病原微生物污染。

1) 重金属污染

土壤中的微量重金属主要来源于原生岩石，但人为活动促进了这些微量重金属向土壤中的迁移（废水、废气、废渣），当土壤中的重金属积累到一定数值，超过土壤自净能力，将导致土壤出现重金属污染。

事实上，重金属污染并不是近代才发生的，早在数千年前，原始而高污染的冶炼铜技术已导致古罗马和古代中国的许多铜冶炼基地出现较为严重的大气和土壤的铜污染。近年来，随着工业、城市污染的加剧和农用化学物质种类、数量的增加，土壤重金属污染日益严重，污染程度在加剧，面积也在逐年扩大，使得重金属污染成为影响生态系统的重要污染类型，重金属污染和中毒事件进一步蔓延。

土壤中重金属污染物的滞留时间长、移动性差，难被微生物降解，且易被生物富集，并可经水、植物等介质最终影响人类健康。所以，土壤一旦被重金属污染，其自然净化过程和人工治理都非常困难。重金属进入土壤的一条途径是随大气沉降落入土壤，主要有汞、铜、锌、铬、镍、钴等，另一条重要途径是使用含有重金属的废水灌溉农田。2000年，我国对30万 hm^2 基本农田保护区土壤有害重金属抽样监测发现，其中3.6万 hm^2 土壤重金属超标，超标率达12.1%。据调查，中国约有10%的耕地受重金属污染，其中镉、砷污染的比例最大（虽然砷不是金属，但因其化学性质和环境行为与重金属相似，通常也归并于重金属的研究范畴），占受污染耕地的40%。据农业部进行的全国污灌区调查，在约140万 hm^2 的污灌区中，遭受重金属污染的土地面积占污灌区面积的64.8%，其中轻度污染的占46.7%，中度污染的占9.7%，严重污染的占8.4%。我国大多数城市近郊土壤都已受到不同程度的污染，农田中镉、铬、砷、铅、锌等重金属含量严重超标。特别是在一些大中城市近郊，部分农田土壤镉和汞污染严重，其含量达到背景值的5倍甚至60倍。如我国辽宁省葫芦岛锌厂附近土壤镉含量最高达33.07 mg/kg ；而在我国湖南宝山矿区，有些表层土壤镉的含量甚至达到了2587 mg/kg 。

2) 有机物污染

土壤有机物污染已成为国际关注的一个焦点。有机物对土壤环境的危害作用较大，尤其是那些难降解的有机化合物。有机物成分进入土壤的形式主要有农药施用、污水灌溉、污泥和废弃物的土地处置和利用，以及污染物泄漏等。化学农药在土壤有机污染物中占据了很大比重。目前大量使用的化学农药有50~60种，其中主要包括有机磷农药、

有机氯农药、氨基甲酸酯类、苯氧羧酸类、苯酚、胺类。此外，石油、多环芳烃、多氯联苯、甲烷、有害微生物等，也是土壤中常见的有机污染物。这些有毒、有害的有机化合物就好像是“化学定时炸弹”，不断积累，在一定条件下或积累到一定时间后就可能给整个生态系统带来灾难性的后果。农药在土壤中受物理、化学和微生物的作用，按照其被分解的难易程度可分为两类：易分解类，如有机磷制剂；难分解类，如有机氯、有机汞制剂等。中国农药生产量居世界第二位，但产品结构不合理，质量较低，产品中杀虫剂占 70%，杀虫剂中有机磷农药占 70%，有机磷农药中高毒品种占 70%，致使大量农药残留，带来严重的土壤污染。近 30 年来，我国粮食增产了 87.4%，而农药产量翻了近百倍。农药的施用量达到了 2.67kg/(年·人)，这其中仅有 0.1% 左右可以作用于目标病虫。从 20 世纪 90 年代以来，国内相继开展了一些关于土壤中 PAHs 来源和分布的研究，结果表明天津表土中 PAHs 为 839ng/g，沈阳污灌土中 PAHs 总量为 8.6~3881ng/g，珠江三角洲区域农业土壤中 PAHs 总量为 42~3077ng/g。

3) 放射性元素污染

随着核技术在工业、农业、医疗、地质、科研等各领域的广泛应用，越来越多的放射性污染物进入土壤，污染土壤环境。一般放射性元素主要来自大气层核试验的沉降物，以及原子能和平利用过程中所排放的各种废气、废水和废渣，这些含有放射性元素的物质不可避免地随自然沉降、雨水冲刷和废弃物堆放过程影响土壤。土壤一旦被放射性物质污染就很难自动消除，只能通过自然衰变为稳定的元素来消除元素的放射性。放射性污染物质进入土壤后，在土壤中积累，可以通过食物链方式进入人体，从而损伤人体组织细胞，引起肿瘤、白血病和遗传障碍等多种疾病。研究结果已经表明，氡的辐射危害占人体所受的全部辐射危害的 55% 以上，诱发肺癌的潜伏期大多都在 15 年以上，我国每年因氡致癌约 5 万例。

4) 病原微生物污染

生物污染物一般是指那些带有一定危害性质的病菌的垃圾与卫生单位排放的污水、废物等，该类污染物中常常含有病原微生物，导致土壤质量恶化。土壤中的病原微生物主要包括病原菌和病毒等，主要来源于人畜的粪便及用于灌溉的污水（未经处理的生活污水，特别是医院污水等）。病原微生物一旦从外界进入土壤就会大量繁殖而引起土壤质量下降，使生态平衡遭到破坏，生物出现病变或死亡。人类若直接接触含有病原微生物的土壤，可能会对健康带来影响，若食用被污染的蔬菜、水果等，则间接受到污染。

5) 其他污染类型

根据污染物进入土壤的方式，土壤污染大致可分为三种：水体污染型、大气污染型、固体废弃物污染型。①水污染造成的土壤污染主要是由污水灌溉造成的污染。由于长期的污水灌溉，尤其是污水只通过简单处理、处理不达标的情况下，对绿地、林带等进行直接灌溉，而导致土壤以及作物系统被污染，其分布特点是：沿河流或干支渠呈枝形片状分布。由于污染物大多以污水灌溉形式从地表进入土壤，所以污染物一般集中在土壤表层。但是随着污灌时间的延续，某些污染物可自上而下向土壤深处迁移，直至到达地下水层。②大气污染造成的土壤污染主要是由工业或民用燃烧排放的废气、磷肥厂的含氟废气、汽车尾气等，这些含重金属的粉尘以气溶胶的形式排向大气，经自然沉降和降

水进入土壤，导致土壤污染。其污染特点是以大气污染源为中心呈环状或带状分布，长轴沿主风向伸长。污染物质主要集中在土壤表层，耕作土壤则集中于耕层，主要污染物是大气中的二氧化硫、氮氧化物和颗粒物等。污染的面积、程度和扩散的距离取决于污染物质的种类、性质、排放量、排放形式及风力大小等。③固体废弃物包括工业废渣、污泥和城市垃圾等多种来源。在土壤表面堆放或处理、处置固体废弃物，不仅需要占用大量耕地，而且可通过大气扩散或降水淋滤，使周围地区的土壤受到污染。各类金属矿场开采的尾矿废弃物、重金属冶炼厂的矿渣更易使周围的土壤受到污染。其污染特征属点源污染，主要造成土壤环境的重金属污染，以及油类、病原菌和某些有毒有害有机物的污染。

土壤污染的发生往往是多源性质的。上述土壤污染类型是相互联系的，它们在一定条件下可以相互转化。对于一个地区或区域的土壤来说，可能是以某一污染类型或某几种污染类型为主。

2. 土壤污染的特点

1) 隐蔽性和滞后性

大气、水或固体废弃物等污染一般都比较直观，通过感官就能直接被人们察觉。土壤污染不同于这些污染，一般需要通过土壤样品进行专门的分析化验和农作物的残留检测，甚至通过研究对人畜健康状况的影响才能确定是否被污染，也即土壤污染具有典型的隐蔽性。同时，土壤污染从产生污染到出现问题通常会滞后很长的时间，即滞后性。因此土壤污染问题一般都不大容易受到重视。20世纪70年代，欧美一些国家因为工业化的发展、人类对土地资源的过度开发、土壤污染的隐蔽性和滞后性等一系列原因，相继爆发了拉夫运河事件、荷兰鹿特丹附近的Lekkerkerk事件和密苏里时代海滩事件等，从此土壤污染逐渐引起了社会的关注。

2) 积累性和地域性

污染物质在土壤中并非像在大气和水体中那样容易迁移、扩散和稀释，而是表现出一定的积累性，所以在检测土壤污染时常常报道出污染物严重超标的结果。土壤污染会因污染物和污染环境的不同表现出不同的状态，使土壤污染具有很强的地域性。相关的案例分析显示，德国在工业化过程中形成的受污染的土地形式多种多样，截至2000年，德国登记注册的污染场地超过了 3.6×10^5 个，因土壤污染的积累性和地域性导致污染种类复杂，污染程度严重。

3) 不可逆性

对于重金属和某些有机物来说，由于它们的特性原因，对土壤的污染基本上是一个不可逆转的过程，即这些污染一旦形成，在很长的时间段内，都不会随着时间的流逝而降解或消失，需要漫长的时间作用和不断的人工治理才能使其被降解。例如，对马来西亚大约230个垃圾填埋场的跟踪研究显示，每个垃圾填埋场的占地约 $15 \sim 20 \text{hm}^2$ ，且这些填埋场都已被废弃了，但随着时间的延长，这些填埋场的垃圾不仅没有被消除，反而侵蚀地下水，引发了新的水污染问题。

4) 难治理性

土壤污染具有隐蔽性、滞后性、积累性、不可逆性，进而使得其表现出难治理性的特点。切断污染源之后，通过稀释和自净化作用来消除土壤污染往往很难使土壤恢复，其他治理技术也可能见效较慢。因此，治理污染土壤通常需要消耗大量的人力和物力，所花费的成本较高，治理周期较长，治理难度大。如 1975 年的京都铬渣污染事件引起了日本对城市土地污染的重视，由于之后也发现了很多重金属污染事件，日本开始通过各种手段来治理这类受污染的土地，但直至今日，日本受污染的地区也没有完全治理干净。

1.1.3 土壤污染的危害

1. 直接经济损失

中国土壤污染的总体形势相当严峻。据估算，全国每年因重金属污染的粮食达 1200 万吨，造成的直接经济损失超过 200 亿元。不仅如此，因土壤污染每年造成的粮食减产也相当严重。有人计算过，全国每年由于耕地污染而造成的粮食减产达到 $1.25 \times 10^9 \text{kg}$ ，同时，污染粮食达 $2.5 \times 10^9 \text{kg}$ 以上，按粮食的市场价格 1.23 元/kg 计算，每年因土壤污染导致粮食减产的损失为 15.4 亿元。土壤污染已对中国的生态环境、农业可持续发展和居民健康构成重大威胁。要将土壤恢复到受污染前的状态，必然要进行土壤修复，所需的资金非常惊人。通过保守测算，即每公顷的修复资金最低需要 9 万元，那么总资金需求为 1400 多亿元。根据《全国土壤环境保护“十二五”规划》，“十二五”期间用于全国污染土壤修复的中央财政资金为 300 亿元，与 1400 多亿元相差甚远。不仅如此，经济欠发达的农村地区土地污染也相当严重。如高奇等（2014）通过污染损失模型估算认为，复垦村庄重金属的污染，对于复垦后耕地每年造成的损失为 4.37 万元。

2. 食品安全问题

土壤重金属不能为土壤微生物所分解，却易于积累、转化为毒性更大的甲基化合物，被植物吸收，对食品安全构成严重威胁。中国工程院院士罗锡文表示，因土壤污染导致的食品安全问题日益严峻，全国 3 亿亩耕地正在受到重金属的威胁，约占全国农田总数的 1/6，而广东省未受重金属污染的耕地仅有 11% 左右。有资料报道，华南地区有的城市 50% 的农地遭受镉、砷、铜、锌等多种重金属污染；长江三角洲一些地区有万亩连片农田受镉、铅、砷、铜、锌等多种重金属污染，致使 10% 的土壤基本丧失生产力，也曾发生千亩稻田被铜金属污染的中毒事件。2008 年，福建沿海地区 10 条主要河流布点采集的 185 件水稻样品，结果有 16.8% 的样品铅超标，11.4% 的样品镉超标，这些超标的样品主要集中在漳州、福州、福清等工业发达的城市周边地区。

土壤污染造成国内外的食物品质下降。在日本，很多城市郊区的蔬菜良田被工业废气、废水、废渣所污染，耕作层内的镉、铜等重金属大量积累，致使蔬菜产品内的重金属含量严重超标，消费者因重金属污染导致的慢性中毒现象时有发生；在澳大利亚，耕地土壤镉含量为 $0.11 \sim 6.37 \text{mg/kg}$ ，约 10% 的蔬菜超过澳大利亚食品标准 ($\leq 0.05 \text{mg/kg}$ 鲜

重);在瑞士,农田污灌造成土壤镉、铜、锌的累积,甜菜、莴苣、马铃薯和花生受到重金属污染。而在我国,镉污染耕地约 1.33 万 hm^2 ,涉及 11 个省 25 个地区,被汞污染的耕地有 3.2 万 hm^2 ,涉及 15 个省 21 个地区。沈阳张士灌区是污染面积最大、污染最严重的镉污染区之一,面积约 2500 多 hm^2 ,监测结果表明灌区糙米含镉量最高达 2.6mg/kg,超出标准的 13 倍;近年来,重庆地区的土壤、植物含汞量明显增长,蔬菜样品中汞超标率达 28%;云南昆明的安宁、西山、官渡,楚雄的禄丰,怒江的兰坪,稻米中不同程度地出现了汞超标(其最高含量超过标准 8.2 倍)、铅超标(其最高含量超过标准 2.5 倍)和镉超标(其最高含量超过标准 1.6 倍)现象。此外,分析结果显示云南通海、呈贡、建水、官渡、元谋、东川等地蔬菜品种,包括花菜、白菜、黄瓜、芹菜、茄子、番茄、青辣椒、洋葱、莲花白等,汞超标(最高含量超标 3.9 倍)、镉超标(最高含量超标 1.5 倍)现象也时有发生。畜禽类产品中也出现重金属含量严重超标情况,其中猪肉中铅含量超标(最高含量超标 2.1 倍)、鸡肉中铅含量超标(最高含量超标 0.4 倍)和砷含量超标(最高含量超标 0.4 倍)现象并不鲜见,甚至鸡蛋都有类似的重金属超标现象。

土壤重金属污染影响食品安全的主要途径包括:①土壤中的污染物(如重金属)通过地下水途径间接影响食物。尽管土壤能够强烈地吸附重金属,但土壤中的重金属仍然有部分通过渗滤和淋溶作用进入地表水或地下水中,食用这类受污染的水制成的食物或直接饮用这类受污染的水,人体健康会受到威胁。②土壤中的重金属通过粮食和蔬菜吸收并积累。植物在受重金属污染土壤上的生长,虽然能够通过根系分泌物等保护机制来排斥重金属,但这种保护作用往往是有限度的,特别是当重金属能在作物或品种体内富集,并在农作物的可食部分积累,就能够直接进入食品,使食品中的重金属含量超标。③食草动物摄食了富集在植物体内的重金属。虽然某些植物并不是人类食物的直接来源,但却是某些动物如牛、羊、猪等的饲料来源,通过生物放大作用,重金属在动物体内富集,使食品受重金属污染。

3. 人体健康问题

对人体健康产生严重威胁的土壤污染物主要包括有毒化学物,如镉、铅等重金属和农药等有机化合物,以及病原体(包括病毒、细菌、寄生虫等)等。目前,重金属污染是对人类健康威胁最大的十大污染之一。世界范围内由土壤重金属污染引起的疾病相当普遍,在我国一些地区已经出现严重的由于重金属污染而引起的公害病的威胁。一般土壤中的病原体可以通过直接接触传播疾病,但土壤污染物对人体健康的影响主要是间接的,即农作物从土壤中吸收、积累污染物造成食品不安全,影响人体健康;或者土壤中的污染物通过雨水的冲刷、携带和下渗污染地下水和地面水,再危害人体健康。土壤污染对人体健康的影响具体包括以下几个方面:

(1)土壤重金属污染已成为严重威胁人体健康的主要因素之一。重金属进入人体后,不易排泄,逐渐蓄积,当超过人体的生理负荷时,就会引起生理功能改变,导致急慢性疾病或产生远期危害。其危害主要有慢性中毒、致癌、致畸、变态反应以及对免疫功能产生影响。例如,在日本,曾因食用受重金属汞污染的鱼而出现了震惊世界的水俣病,因食用受重金属镉污染的大米出现“痛痛病”;在瑞典,曾发现在排放镉、铅、砷的冶炼

厂工作的女工,其自然流产率和胎儿畸形率均明显升高;在我国,松花江流域地区也因鱼体重金属汞含量偏高,导致当地居民体内含汞量升高,出现了幼儿痴呆。据估计,每年污水排放的重金属镉约 770 吨,从而引起农田污染,大米中含镉量大大地超出卫生标准,有的污染区居民每日摄入重金属镉的量比非污染区高 30 多倍,给人们的健康带来极大威胁。国家环境保护部 2009 年的数据显示,重金属污染事件已致 4035 人血铅超标、182 人镉超标。此外,因土壤重金属污染导致的慢性镉、砷、铅、汞中毒在我国各地区蔓延扩展。例如,在贵州赫章、江西赣州、广西桂林、湖南衡东、广东马坝和辽宁沈阳的张士地区,农作物镉含量已经严重超标,有 10% 的居民出现腰背、四肢、骨关节疼痛等症状和镉生化指标异常;广东连南、云南个旧和湖南石门等老矿区,有 10%~30% 的居民出现皮肤色素沉着、角化过度、手足发绀、腹泻等慢性砷中毒症状;广东省韶关市曲江区、湖北省枝江市和云南省红河州有色金属工业园等工矿地区农作物、蔬菜铅含量超标,对当地儿童的身高、体重、智商、卟啉代谢和免疫功能等产生负面影响;贵州的万山等地区的粮食、蔬菜和水中的汞含量严重超标,约 50% 以上居民出现感觉障碍、运动失调、视野狭窄等中毒体征。

(2) 土壤有机物污染对人类健康的影响,尤其是农药残留物对人体的危害十分严重。农作物会从土壤中吸收农药残留物,在体内积累,并以食物链方式危害人体。长期食用受污染的粮食、果蔬,残留农药在人体内蓄积到一定程度后,会直接危及人体的神经系统和肝肾等重要器官,导致一些疾病,如癌症、动脉硬化、心血管病、胎儿畸形、死胎、早夭、早衰等,严重时甚至引起急性中毒而死亡。尽管有机氯农药已禁用了近 20 年,土壤中的残留量也已大大降低,但检出率仍很高。在我国长江中下游地区曾用五氯酚钠防治血吸虫病,但其中的杂质二噁英已造成区域性污染,如洞庭湖、鄱阳湖底泥中的二噁英含量相当高。由于长江三角洲工业生产规模和乡镇城市化的快速发展,该地区还检测出 16 种多环芳烃类物质和 100 多种多氯联苯及 10 余种毒性较强的持久性有机污染物。这些有机污染物具有很强的致癌、致畸、致突变性(“三致”作用),对人类健康构成威胁甚至是伤害。

(3) 土壤放射性污染与生物性传染病对人类的威胁。放射性污染物质能够在土壤中不断地积累,通过植物吸收和富集,以食物链的方式进入人体,可造成头昏、疲乏无力、脱发、白细胞量变,甚至导致癌变的发生,后果不堪设想。另外,受生活污水、某些工业废水及人畜粪便污染的土壤会引发生物性传染病。这些污染物中含有大量的虫卵、细菌、病毒,在土壤中能存活很长时间。人类被这些生物污染物感染,可能会引发某些疾病。

4. 其他环境问题

土壤受到污染后可能会引发大气污染、地表水污染、地下水污染和生态系统退化等其他环境问题。从生态系统方法论来看,生物、土壤与环境是一个密切联系的整体。在土壤生态系统中,土壤生物间、土壤生物与土壤非生命环境间的相互作用的差异性,都会影响土壤生物群落结构的差异性及其变异性。譬如森林土壤生物群落与草原土壤生物群落或沙漠生物群落在结构上就具有完全不同的面貌。土壤生态系统中,物质能量主要是沿着土壤—绿色植物—草食动物—食肉动物—人类这样的食物链逐级传递的,最后再

经分解回流到土壤环境中去。在这个系统中，土壤是基础，是根本，是一切陆生生物，包括人类赖以生存发展的物质基础。当土壤受到污染，与之相关的土壤生物群落自然也会受到污染的影响。土壤污染也会破坏其他环境元素，导致生态系统退化。

1.2 土壤污染修复及其发展

1.2.1 土壤污染的修复技术

污染土壤修复是指利用物理、化学或生物的方法，转移、吸收、降解和转化土壤中的污染物，使其浓度降低到可接受的水平，或将有毒有害污染物转化为无害物质的过程。

根据污染土壤的治理途径不同，可以将土壤污染的修复分为去污染化和稳定化。去污染化是将污染物从土壤之中清除；稳定化是指通过改变污染物在土壤中的存在形态等途径使其固定，将污染物的活性降低，减少其在土壤中的迁移性和生物可利用性。

根据污染土壤修复的场地和修复方式不同，可以将土壤污染的修复分为原位修复和异位修复。原位土壤修复指不移动受污染的土壤，直接在发生污染的场地对其进行就地修复或处理的土壤修复技术，具有投资低、对周围环境影响小的特点，不需要建设昂贵的地面环境工程基础设施和远程运输，操作维护起来比较简单。土壤原位修复需要因地制宜，实施过程中，要充分结合工期、污染情况、地质条件、地面设施等。异位土壤修复是指将受污染的土壤从发生污染的位置挖出，在原场址范围内或经过运输后再进行治理的技术。异位修复适用于处理污染浓度较高、风险较大且污染土壤量不是很大的场地，可以选择直接有效的技术方法集中处理污染土壤，处理效率高，易于监控，监测成本相对较低，系统处理的预测性高于原位修复。但开展异位修复，需要将污染土壤运输至处理场地，增加了运输成本，同时，挖掘、运输和转移过程中污染物也存在扩散的风险，因此必须严格控制污染物的扩散，防止次生危害的发生。近年来，原位修复展现出越来越旺盛的生命力。在美国超级基金支持的修复计划中，原位修复技术所占比例呈明显上升的趋势，其平均百分比从20世纪80年代后期的不到30%，上升到90年代后期的50%以上。这一方面和原位修复对场地生态环境的扰动和破坏较小有关，也和在面对较大面积污染土壤的修复时，采用异位修复需要挖掘大量土壤并进行处理，工程造价太高有关。

根据污染土壤修复原理的不同，可以将土壤污染的修复分为物理修复、化学修复和生物修复等类型。

1. 物理修复

物理修复技术是指通过各种物理过程将污染物固定或从土壤中去、分离的技术，使土壤恢复可利用价值的方法。物理修复是最常用的土壤修复方法，广泛应用于各种污染土壤。当土壤污染时，物理修复方法常常是首先考虑的方法。在修复过程中，一般依据土壤质地、通透性和污染物类型等的不同，以及土壤修复后的可利用性，选择不同的物理修复技术。常用的物理修复包括直接换土法、热化学修复、微波加热等，主要方法如下：