

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

ZHONGJINSHU WURAN TURANG SHENGWU XIUFU JISHU

重金属污染土壤 生物修复技术

元琳◎著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

重金属污染土壤生物修复技术

元琳 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

· 北京 ·

内 容 提 要

本书全面地讨论了重金属对土壤的污染状况以及各种修复技术。全书共八章,主要包括:土壤重金属污染现状、土壤重金属元素背景值和环境容量、土壤重金属污染的植物修复技术、土壤重金属污染的动物修复技术、土壤重金属污染的微生物修复技术、土壤重金属污染强化修复技术、土壤重金属污染的丛枝菌根真菌修复技术和展望。

本书可作为环境专业的参考用书,也可以作为从事环保研究的科研人员和工程技术人员的参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

重金属污染土壤生物修复技术 / 亓琳著. — 北京:
中国水利水电出版社, 2017.12
ISBN 978-7-5170-6118-2

I. ①重… II. ①亓… III. ①土壤污染-重金属污染
-生态恢复-研究 IV. ①X53

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第305377号

责任编辑:陈 洁 封面设计:王 伟

书 名	重金属污染土壤生物修复技术 ZHONGJINSHU WURAN TURANG SHENGWU XIUFU JISHU
作 者	亓琳 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: mchannel@263.net (万水) sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)、82562819 (万水)
经 售	全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	北京万水电子信息有限公司
印 刷	三河市天润建兴印务有限公司
规 格	170mm×240mm 16 开本 12.75 印张 223 千字
版 次	2018 年 1 月第 1 版 2018 年 1 月第 1 次印刷
册 数	0001-2000 册
定 价	52.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

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。土壤污染对人类的危害性极大，它不仅直接导致粮食的减产，而且通过食物链影响人体健康。此外，土壤中的污染物通过地下水的污染以及污染物的转移构成对人类生存环境多个层面上的不良胁迫和危害。

20世纪60年代，从发达国家如荷兰、美国，因为化学废弃物的倾倒导致严重的土壤污染开始至今，土壤污染问题已遍及世界五大洲，主要集中在欧洲，其次是亚洲和美洲。在我国，随着工农业生产和乡镇企业及农村城镇化的迅速发展，土壤环境污染问题已越来越严重！我国国家环境保护部和国土资源部于2014年5月联合发布的《全国土壤污染状况调查公报》表明，全国土壤环境状况总体不容乐观，土壤污染总的超标率为16.1%，其中耕地的超标率达到19.4%，总体上以无机污染为主，无机污染物超标点位数占全部超标点位的82.8%。其中，城市和工业场地污染严重，重金属矿区问题突出，尤以土壤重金属镉污染问题最为突出。此外，区域性和流域性污染态势恶化，高强度人为活动地区的土壤环境复合污染问题尤为严峻。土壤环境质量直接关系到农产品的安全。中国由于土壤污染每年生产的重金属污染粮食多达 1.2×10^7 t；全国出产的主要农产品中，农药残留超标率高达16%~20%，PAHs超标率高达20%以上。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。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与治理。2016年5月，国务院正式颁布《土壤污染防治行动计划（国发[2016]31号）》，这是中国土壤修复事业发展的重要里程碑。

污染土壤生物修复是当今环境保护领域技术发展的热点领域，也是最具

挑战的研究方向之一。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。

全书共八章,主要包括:土壤重金属污染现状、土壤重金属元素背景值和环境容量、土壤重金属污染的植物修复技术、土壤重金属污染的动物修复技术、土壤重金属污染的微生物修复技术、土壤重金属污染强化修复技术、土壤重金属污染的丛枝菌根真菌修复技术和展望。

本书在撰写过程中,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,书中难免有疏漏和不妥之处,请读者朋友们不吝指正。

作 者

2017年10月

目 录

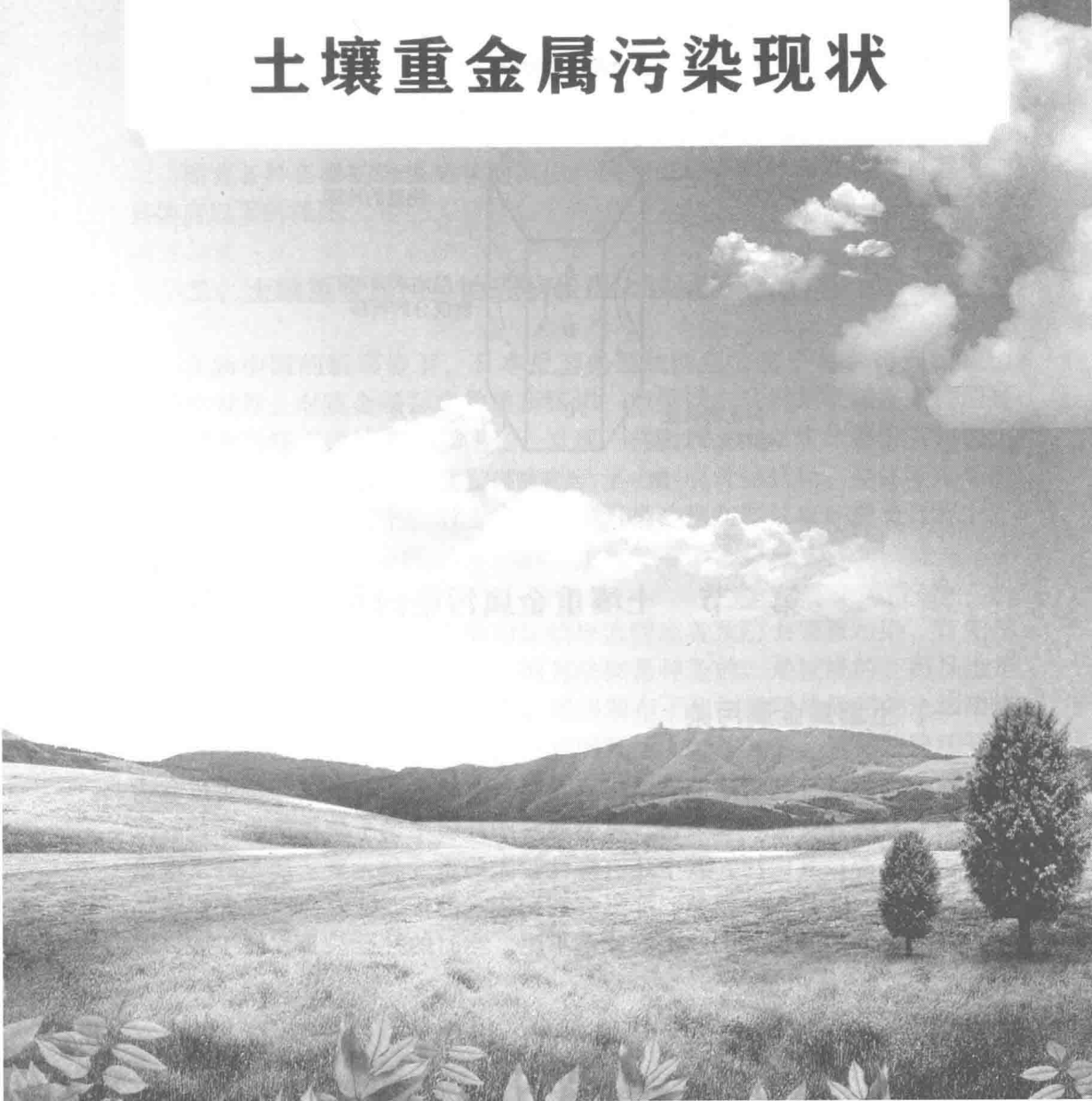
前言

第一章 土壤重金属污染现状·····	1
第一节 土壤重金属污染问题·····	2
第二节 土壤重金属污染治理与修复研究进展·····	5
第三节 土壤重金属的来源和危害·····	9
第四节 五毒金属的性质和危害·····	15
第五节 五毒金属在土壤中的迁移和转化·····	20
第二章 土壤重金属元素背景值和环境容量·····	27
第一节 土壤重金属元素环境背景值·····	28
第二节 土壤重金属元素环境容量·····	40
第三节 土壤环境质量与重金属污染判别·····	47
第三章 土壤重金属污染的植物修复技术·····	51
第一节 重金属对植物的毒性效应·····	52
第二节 植物修复的概念与特点·····	53
第三节 植物修复的原理与方法·····	54
第四节 环境条件对植物修复的影响·····	65
第五节 植物修复重金属污染土壤应用实例·····	71
第四章 土壤重金属污染的动物修复技术·····	75
第一节 动物修复原理·····	76
第二节 污染物对土壤动物的生态毒理作用·····	79
第三节 蚯蚓对污染土壤修复的原理·····	83
第五章 土壤重金属污染的微生物修复技术·····	87
第一节 重金属污染对土壤微生物的影响·····	88
第二节 微生物修复·····	90

第三节 微生物-植物联合修复	107
第六章 土壤重金属污染强化修复技术	111
第一节 土壤重金属污染物理修复	112
第二节 土壤重金属污染化学修复	127
第三节 土壤重金属污染农艺措施	135
第七章 土壤重金属污染的丛枝菌根真菌修复技术	141
第一节 丛枝菌根真菌概述	142
第二节 丛枝菌根-植物联合修复	152
第三节 丛枝菌根对多环芳烃污染土壤的修复	164
第八章 展望	175
第一节 我国土壤修复行业面临的主要问题	176
第二节 我国污染土壤修复的技术局限性	178
第三节 我国污染土壤修复的技术发展趋势	180
第四节 我国污染土壤修复商业模式建议	185
第五节 我国土壤修复工作展望	189
参考文献	191

第一章

土壤重金属污染现状



在自然界中，土壤是人类生存环境中重要的组成部分，也是人类赖以生存的物质基础，土壤是珍贵的，是不可再生资源。但是随着人类文明的进步、经济技术的发展，土壤受到很严重的污染。

首先，土壤的性质包括吸附性、酸碱性等因素制约着黏粒矿物质的发育过程，土壤是由固、液、气三相物质组成的，其中固相物质占土壤总面积的一半儿以上，所以固相的形状也就影响了土壤的形状。

其次，土壤的结构是制约着土壤的类型、数量、排列方式以及稳定性的综合特性，其中包含了土壤结构和土壤环境结构两个部分，其相互制约、相互影响着。

最后，土壤的环境结构是一个复杂多变的环境要素，分为单个土体和三维层次的土体结构，如图1-1所示是把土壤分为不同层次的结构图。

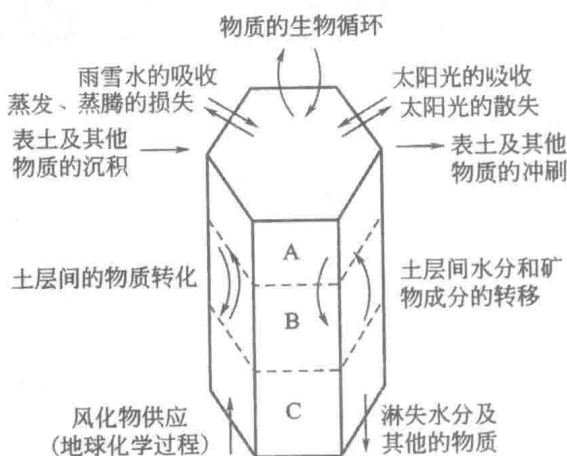


图1-1 土层结构图

第一节 土壤重金属污染问题

一、土壤重金属污染

在化学领域，元素周期表中金属元素密度 >5 的所有金属，都可以称为重金属。从另外一个领域来讲，重金属对于环境中的土壤污染也是比较严重的，其来源极其广泛，其中还有毒性较大的重金属元素。最早的土壤重金属污染发生在日本的领域，那里有铜矿废水的排入使农田以及农作物坏死，最严重的是农田周围的土壤寸草不生。当时的社会只是发展工业，对

工业中的废气、废渣以及废水能给生态造成的伤害从来没有估算过。当时在日本，有了公害事件，其中最为典型的是“骨痛病”和“水俣病”。公害事件的发生，使人们意识到对土壤环境的保护，以及防御重金属污染土壤的重要性，也有研究人员将分析、调查结果、解决方案，以及对农作物的伤害做出了一系列的报告，也成为当时科学领域的热门话题之一。

土壤重金属污染只是人类的日常活动以及土壤里的微量元素已经超过了土壤含量的背景值，而且还在不断地积累，导致了含量超高。但是土壤重金属污染来源也包含了工业上的排放、农业上的排放（农药）、日常生活的排放，还有来自自然界的原因，都会导致土壤微量元素的超高标准。虽然污染种类多种多样，但是主要来讲分为三个方面，一个方面来自于工业方面，各个工矿企业向土壤输入了大量的有害物质；另外一个方面就是农业上的，主要是对农作物施肥、喷药以及污水灌溉等，农业对土壤的污染是日积月累的；第三个方面就是人类生活垃圾的排放，以及人类活动也影响着土壤的污染情况。

随着各种各样的奇怪病状的发生，国家也对土壤的污染越来越重视，具体有以下的概述。

二、土壤重金属污染治理初步提上议事日程

在新中国的新形势下，日本最为典型的两起公害事件，得到了我国乃至全世界，对重金属污染的重新认识，但是这个认识是个循序渐进的过程。随着研究实践的进一步调查，发现一些金属元素对农作物没有伤害，但是对人体是有伤害的，食量过多的话还会引起骨骼软化、身体萎缩等病状。在国家高度重视下，对土壤的金属污染治理初步议事已提交日程上，具体有以下几方面的表现。

（一）启动立法工作

如果想全方位地、具有最明显效果治理或者预防土壤被污染，首先是要立法部门颁布有关法律条文，因为法律是神圣的，是权威的，而且也是具有威严的。截止到2012年年底，我国颁布了和污染环境等相关法律法规已有几十部之多，如《中华人民共和国环境保护法》等。这些法律法规的颁布，在一定程度上起着积极的作用，但是到目前为止，对于重金属污染防治体系的建立还不够全面，有关规定比较分散，主要是我国缺少对重金属污染预防的专项立法等。

（二）完善土壤环境保护的相关标准规范

为了弥补法律上的缺陷，我国对于土壤环境的保护启动了首个对于展览会使用土地的标准规范，主要是针对土壤质量的检测，此标准规范主要是起预防作用，预防环境污染问题，传播身体健康知识，维护生态平衡，以及确保展览会建设用地对环境安全保护。此项目也起到了对于环境保护的检测作用。总之，比较贴近人类的日常生活，而且还能贯彻到生活当中，宣传保护环境人人有责的作用。

（三）警钟的敲响

一些污染事件，不只是在外国，我国也有多起事件发生。例如，在我国南部地区发生了砷污染事件，随后就有血铅事件的发生，给人们造成了极大的伤害和阴影。实际这些重金属污染，给我们敲了警钟，同时也是给人类对大自然的保护发出了警告信号，所以，保护环境，保护土壤不受污染已经是迫在眉睫。

（四）国家对于土壤重金属污染问题引起重视

近几年来，重金属污染问题已经进入了领导人的视线，不仅把重金属污染工作作为重点的监督对象，还把重金属污染的隐患彻查清楚，进行防御。截止到2010年，我国采集土壤和农产品的样品二十多万个，报告获得的有效数据将近五百万个，建成了土壤污染问题的数据库，并组织全国对土壤问题状况进行调查、报告等一系列的工作。

（五）运筹帷幄，规划先行

由于土壤污染数据库的建立，对于那些有严重污染的工业（有严重的排放超标）直接关闭，进行整改，在“十二五”规划中，主要内容就是防御工作，预防为主，对工业进行大力调整。随后环境保护部门还发布了对于环境保护标准的修订版本，其重要内容有：以保护人体健康为目标，进一步控制有毒有害物质为指标，对土壤污染进行评估，初步建立工业污染场地的环境风险管理与污染控制标准体系。

（六）政府对土壤保护工作的重视

国家就土壤保护问题召开了国务院常务的会议，主要是针对土壤进行保护和综合治理开展工作。主要目标就是保土壤环境、保证农产品的安全和人们的身体健康状况，建设良好的人们居住环境；其对构建土壤检测的漏洞进行完善，主要任务就是加快国家土壤保护体系的建立，逐步完善土壤质量，主要任务如图1-2所示。

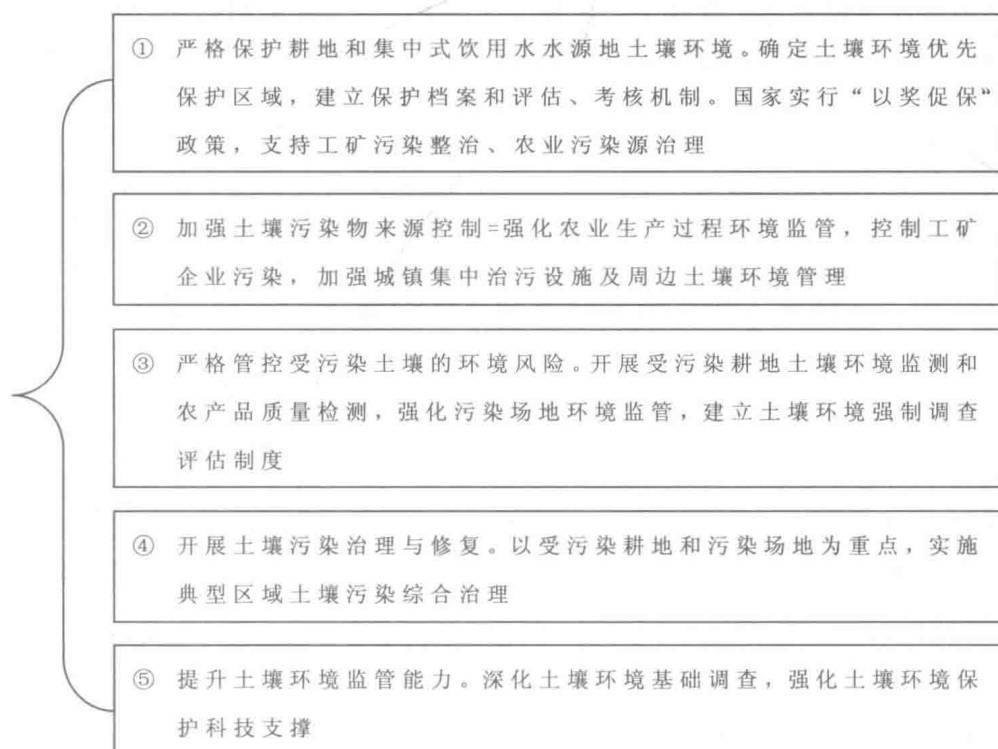


图1-2 土壤环境保护的任务

会议要求，土壤环境保护是人人有责的任务，充分发挥市场的作用，吸引更多的人群关注环境保护的重要性。

第二节 土壤重金属污染治理与修复研究进展

一、土壤重金属污染治理与修复概述

就目前来讲，重金属污染较严重，而且每年呈递增的趋势，其后果会导致粮食产量问题，以及人类身体健康问题，同时也加剧了我国人耕土地面积减少问题。针对重金属污染面积大，多数土壤处于中低污染问题上没法彻底处理，我国处理污染技术落后，其中最关键的就是基础研究不足。

针对重金属的污染治理，国内外专家开展了大量的基础研究以及大量的实践应用，对于治理问题提出两个治理方法，分别是原位治理和异位治理。原位治理就是利用化学和生物等措施改变重金污染的有效迁移，这种

方法最为经济适用,受到广大环境学家的关注。异位治理的环境风险低,见效快,但是对环境的扰动性比较大。

土壤重金属污染的修复是指将被污染的土壤中添加一种/多种活性物质,使其和土壤的成分产生化学反应,改变了重金属元素的赋存状态,同时也降低了那些金属的有毒性质。接下来重点讲解土壤重金属污染的修复研究问题。

二、土壤重金属污染的修复技术研究发展

重金属的性质,具有隐蔽性和长期性,危害特点是有毒重金属在土壤积累到一定程度后,就会危及土壤的退化,农作物产量下降,农作物的质量问题也受到影响,还会影响河流和地表水。人们食用地表水和农作物,身体健康也会受到影响。目前,随着多次对土壤问题的研究,修复土壤问题技术也在不断的发展,并取得了一定的成果。其具体的修复措施具体如下所示。

(一) 工程方面措施

工程方面的措施主要是针对土壤方面的翻动,降低土壤的重金属含量,减少重金属对植物的有害影响。客土和换土是主要针对重污染的区域常用的一种方法,是从日本引进过来的先进技术,翻土是一种常用的工程方面的措施,主要只是针对中低度污染区域使用的,降低有害物质的含量,剩下的是让土壤自己去“消化”。此种措施主要优点是稳定性高,主要缺点就是耗资大、实施的工程也大,而且还会破坏土壤的本来的结构,引起土壤肥力的下降。

(二) 物理修复

物理修复主要包含了电动修复、电热修复和土壤淋洗等方面。具体讲解如图1-3所示。

(三) 化学修复

化学修复是指在土壤里添加改良剂使其吸收,用以降低重金属的生物有效性。该技术主要是选择经济有效的改良剂,因为不同的改良剂对重金属的机理是不同的,有些是为了调节土壤中的酸碱中和度,有些改良剂是为了降低土壤中的重金属元素,有些改良剂则是调节土壤的机制问题,总之,在使用改良剂之前要对土壤进行分析,选择合适的改良剂才是最重要的选择。在整个研究过程中,发现如果添加了对人体无害的或有益于重金属元素拮抗的物质,也可以减少重金属的污染突然问题,这样的方法直接在土壤里进行,简单易行。所以,通过化学修复土壤问题,也是方便可行

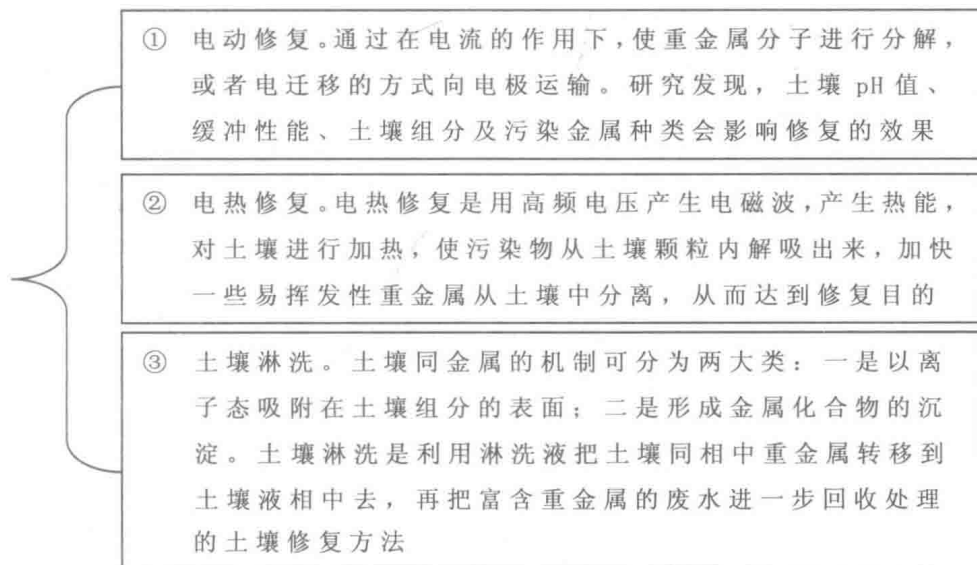


图1-3 物理修复土壤的方式

的,以防土壤的有害物质危害到农作物。

(四) 生物修复

此种修复方法是利用生物技术来治理土壤里的有害物质,使其降低有毒元素或者消减重金属的有毒物质,起到净化土壤的作用,此种方法使用简单,效果好,得到广大人民的欢迎。具体的修复技术分为植物修复技术和微生物修复技术两类,具体如下所示。

1. 植物修复技术的概述

此种技术是利用植物和重金属的过程,是利用重金属富有超级强的植物吸收性质,植物将其吸收在土壤中,并运转成其他植物或者对土壤无污染的元素。美国科学家经过试验研究表明,其实际上就是指将某种特定的具有抗毒性质的植物种植在重金属污染区域里,因为这些植物具有特殊的吸收效果,等这些植物吸收到一定程度之后,再将这些植物迁移到其他地方,妥善处理。随着经济技术的发展,目前该技术已经到了可以净化土壤里的成分的程度,并产生了良好的效果,对于生物防污染的开发具有很高的价值中植物的修复技术主要是根据自然的正常生长和遗传培育实现的,其中可以分为三种类型,如图1-4所示。

2. 微生物修复技术

微生物修复技术在土壤重金属污染方面具有独特的技术。其主要原理有:可以改善土壤重金属污染的环境,降低土壤重金属中的有毒元素,调节土壤的酸碱程度,对于某些重金属具有一定的吸附作用。

- 
- ① 植物提取。即利用重金属超富集植物从土壤中吸取金属污染物，随后收割地上部并进行集中处理，连续种植该植物，达到降低或去除土壤重金属污染的目的
 - ② 植物挥发。其机理是利用植物根系吸收金属，将其转化为气态物质挥发到大气中，以降低土壤污染。目前研究较多的是 Hg 和 Se。湿地上的某些植物可清除土壤中的 Se，其中单质占 75%，挥发态占 20%~25%。该植物能从土壤中吸收 Hg 并将其还原为挥发性单质 Hg
 - ③ 植物稳定。利用耐重金属植物或超富集植物降低重金属的活性，从而减少重金属被淋洗到地下水或通过空气扩散进一步污染环境的可能性。其机理主要是通过金属在根部的富集、沉淀或根表吸收来加强土壤中重金属的固化。实际上，此种方法与植物挥发技术类似，区别在于植物挥发技术将污染毒迁出土壤，而植物稳定技术只是将其转化为相对环境友好的形态

图1-4 植物修复的分类

（五）农业生态修复

农业生态方面的修复技术主要包括两个方面。一是农耕方面的技术。主要指经常改变农耕作物的品种，种植不进入食物链的植物，降低对化肥的使用率，或者多增施有机化肥，这样可以降解土壤里的重金属污染的程度。另一方面就是生态修复。主要是起到调节的作用，如调节土壤中的酸碱程度，土壤的养分来对土壤重金属调控。这两个方面起到了一定的积极作用，但是效果周期长，不是马上就能见到效果，所以，需要一定的耐心才能看到农业生态修复的成果。

（六）植物-微生物联合修复

为了弥补各种修复技术上的漏洞，好多科学家将植物-微生物组合起来进行研究。结果表明，此种修复技术可以除去土壤中多种金属有毒元素，并且在短期时间内就可以提供，效果也是明显的。这就把植物的作用和微生物的作用合并在一起，发挥了最大的效果，微生物可以促进植物对重金属的吸收，同时也可以促进植物的生长，植物中的细菌对重金属吸附、调节等。

利用微生物和植物对重金属污染土壤进行修复具有高效的作用。到目前为止，此技术主要是对植物的根系和微生物的宿主植物进行研究，在土壤中，植物也是选择合适的环境，进行对重金属的吸附，发挥其作用，

如果遇到土壤环境不适合植物的生长,就不能发挥作用,甚至植物也会死掉,所以此种技术具有不稳定性。由于植物内部结构比较复杂,对于这方面的报道和路径还是比较少,植物病害防治与生物修复目前只能从根系起到很好的效果,国内外的专家们还在对这些方面进行研究,相信在不久的将来会有很好的成果。

第三节 土壤重金属的来源和危害

土壤重金属污染的来源很广泛,具体来讲主要分为两大部分。第一,就是人为的原因,人类无休止地向大自然排放有害物质,不光是土壤受到了污染,大自然的生态平衡也被破坏;第二,就是土壤本身含有大量的金属元素,不同的金属元素,长年累月也会对土壤造成污染危害。本节针对土壤重金属的来源主要分为一般重金属的来源和五毒重金属的来源,分析其造成的危害。

一、重金属的一般来源

(一) 大气沉降中的重金属

大气中的沉降来源有很多种方式,如工业生产排放的物质,人们生活中的汽车尾气排放,一些橡皮制造而成的物体在磨损时产生的大量有害气体和粉尘等。这些主要分布在工矿业或者工厂甚至是公路两旁,经过大雨冲刷就会渗入到土壤里。其实跟我们生活息息相关的是汽油的燃烧,因为汽油的燃烧会产生大量的铅元素,而汽车轮胎的磨损会产生大量的锌元素的粉尘,对于道路而言,两旁就是有害气体沉降最多的位置,再通过自然沉降和雨淋沉降,就会沉降在土壤里,进而影响土壤的结构变化,最后是土壤的污染。

此外,大气沉降的污染还和人口分布密度有关,人口分布越密集,污染得就会越厉害,相反就会污染得少,因为人口密度越大,人们的生活活动越多,从而造成了大气沉降的污染;还有一种就是大气中的汞元素也会影响土壤里汞离子,使其增高。

(二) 农业的来源

农业的来源主要是对农作物施肥、打农药的过程中产生的,主要来源于化学有害元素铅、汞、镉、砷等,这些元素都会在实施的过程中沉降在

土壤里，从而打破了土壤本来的结构，或者增加了突然的元素，使其受到污染，更严重的是使土壤退化。所以国家倡导使用有机化肥，这样可以防护土壤受到污染。

（三）污水灌溉

污水灌溉的来源主要是生活污水、商业污水、工业废水的排放，用来加工处理过的污水进行农作物、森林或者草地灌溉，不仅污染土壤环境，还对身体有害。污水灌溉的密集型主要是分布在人口分布密集、工厂、矿业附近，远离这些地方的土壤没有受到污染。据测定，污水中含有较多氮、磷、钾、锌、镁等多种养分，有丰富的有机质悬浮物，所以污水灌溉的稻田，节省肥料，降低成本，而且土壤肥力不断提高。近年来，污染灌溉的使用率挺高，甚至是遍布各地，目前也受到国家的重视，正在把控和处理污水灌溉问题。

（四）污泥农用

对污泥大量使用是因为污泥中含有较高的有机物质，所以污泥农用可以减少对农作物的施肥，也减少了正常的开支和成本；但同时存在有害元素，如重金属中的汞。污泥农用的危害有：使土壤中的重金属物质不断提高；污泥施肥可以导致土壤重金属含量的增加；重金属严重超标就会影响农作物的生长，结果导致农作物的污染。污泥农用有优点也有缺点，如果想用城市污水、污泥改良土壤，这种方法是不可行的。

（五）含重金属固体废弃物堆积

这种来源主要是对废弃物没有很好地处理，其种类繁多，危害方式和污染程度不一样，污染的范围一般是在废弃物堆积的地方为中心，向四周扩散，由于废弃物的种类不一样，其所含的重金属不一样，所以有些是重度污染，有些是中度或者轻度污染。所以，在我们生活、工业操作时都要对废弃物、垃圾进行归类。

（六）金属矿山酸性废水污染

这种污染方式主要是对工矿业的开采、冶炼的废渣和矿渣的排放，使含有酸性的元素随着废弃物排出去，或者通过降雨使之带入水环境直接进入土壤里。这样的污染有两种途径，一种是直接污染，另外一种就是间接污染，一般来讲，工业污染严重，市区污染高于农村或者郊区，表层土壤污染市区和工矿业是最严重的，有些废弃物随着河流进行污染，从河流的上游直接污染到下游一带，再加上大气干湿沉降为主要来源的土壤重金属污染就有很强的叠加性。