

# 土壤重金属污染现状与修复技术研究进展

崔德杰,张玉龙

(沈阳农业大学,辽宁 沈阳 110161)

**摘要:**阐述了土壤重金属污染物的来源和重金属污染土壤修复技术研究现状,分析了各种修复技术的优缺点、实用性与发展动态,为土壤重金属污染综合治理与修复提出了新的思路。

**关键词:**土壤污染;重金属;修复技术

中图分类号: X53

文献标识码: A

文章编号: 0564-3945(2004)03-0366-05

土壤是人类赖以生存的主要自然资源之一,也是人类生态环境的重要组成部分。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,目前,全世界平均每年排放 Hg 约 1.5 万吨, Cu 340 万吨, Pb 500 万吨, Mn 1500 万吨, Ni 100 万吨<sup>[1]</sup>。据我国农业部进行的全国污灌区调查,在约 140 万 hm<sup>2</sup> 的污水灌区中,遭受重金属污染的土地面积占污水灌区面积的 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%<sup>[2]</sup>。

土壤重金属污染具有污染物在土壤中移动性差、滞留时间长、不能被微生物降解的特点,并可经水、植物等介质最终影响人类健康。因此,治理和恢复的难度大。本文在讨论土壤重金属污染物来源和分布的基础上,评述土壤重金属污染修复技术研究进展,旨在为重金属污染土壤的有效修复提供科学的依据。

## 1 土壤重金属来源与分布

### 1.1 随着大气沉降进入土壤的重金属

大气中的重金属主要来源于能源、运输、冶金和建筑材料生产产生的气体和粉尘。除汞以外,重金属基本上是以气溶胶的形态进入大气,经过自然沉降和降水进入土壤。据 Lisk 报道,煤含 Ce、Cr、Pb、Hg、Ti 等金属,石油中含有相当量的 Hg (0.02 - 30mg kg<sup>-1</sup>)<sup>[3]</sup>,这类燃料在燃烧时,部分悬浮颗粒和挥发金属随烟尘进入大气,其中 10 - 30% 沉降在距排放源十几公里的范围内,据估计全世界每年约有 1600 吨的汞是通过煤和其它石化燃料燃烧而排放到大气中去的<sup>[4]</sup>。例如比利时每年从大气进入土壤的重金属量就有 Pb 250g hm<sup>-2</sup>、Cd 19g hm<sup>-2</sup>、As 15g hm<sup>-2</sup>、Zn 3750g hm<sup>-2</sup><sup>[3]</sup>。

运输,特别是汽车运输对大气和土壤造成严重污染。主要以 Pb、Zn、Cd、Cr、Cu 等的污染为主。它们来自于含铅汽油的燃烧和汽车轮胎磨损产生的粉尘,据有关材料报导,汽车排放的尾气中含 Pb 量多达 20 - 50μg L<sup>-1</sup>,它们成条带状分布,因距离公路、铁路、城市中心的远近及交通量的大小有明显的差异。

等研究发现在公路两侧 50m 的距离有被污染的痕迹,每月累积的易溶性污染物在 4 - 40g m<sup>-2</sup>。进入环境的强度顺序为: Cu、Pb、Co、Fe 和 Zn<sup>[3]</sup>。在宁—杭公路南京段两侧的土壤形成 Pb、Cr、Co 污染带,且沿公路延长方向分布,自公路两侧污染强度减弱<sup>[5]</sup>。经自然沉降和雨淋沉降进入土壤的重金属污染,与重工业发达程度、城市的人口密度、土地利用、交通发达程度有直接关系,距城市越近污染的程度就越重,污染强弱顺序为: 城市—郊区—农村。

### 1.2 随污水进入土壤的重金属

利用污水灌溉是灌区农业的一项古老的技术,主要是把污水作为灌溉水源来利用。污水按来源和数量可分为城市生活污水、石油化工污水、工业矿山污水和城市混合污水等。生活污水中重金属含量很少,但是,由于我国工业迅速发展,工矿企业污水未经分流处理而排入下水道与生活污水混合排放,从而造成污灌区土壤重金属 Hg、As、Cr、Pb、Cd 等含量逐年增加。淮阳污灌区土壤 Hg、Cd、Cr、Pb、As 等重金属 1995 年已超过警戒线<sup>[6]</sup>。其它灌区部分重金属含量也远远超过当地背景值。

随着污水灌溉而进入土壤的重金属,以不同的方式被土壤截留固定。95% 的 Hg 被土壤矿质胶体和有机质迅速吸附,一般累积在土壤表层,自上而下递减。郑州污水灌区水中 Hg 的浓度达到 0.242mg kg<sup>-1</sup>,而

收稿日期: 2002-11-20

作者简介: 崔德杰(1963-),男,山东莱西人,莱阳农学院教授,在读博士生,研究方向为土壤肥力与环境保护。

土壤 Hg 含量  $0.194\text{mg kg}^{-1}$  就会造成重度污染。污水中的 As 多以 3 价或 5 价状态存在,进入土壤后被铁、铝氢氧化物及硅酸盐粘土矿物吸附,也可以和铁、铝、钙、镁等生成复杂的难溶性砷化合物。而 Cd 很容易被水中的悬浮物吸附,水中 Cd 的含量随着距排污口距离的增加而迅速下降,因此污染的范围较少。Pb 很容易被土壤有机质和粘土矿物吸附。Pb 的迁移性弱,污灌区 Pb 的累积分布特点是离污染源近土壤含量高,距离远则土壤含量低<sup>[7]</sup>。污水中 Cr 有 4 种形态,一般以 3 价和 6 价为主,3 价 Cr 很快被土壤吸附固定,而 6 价 Cr 进入土壤中被有机质还原为 3 价 Cr,随之被吸附固定。因此,污灌区土壤 Cr 会逐年累积。

### 1.3 随固体废弃物进入土壤的重金属

固体废弃物种类繁多,成分复杂,不同种类其危害方式和污染程度不同。其中矿业和工业固体废弃物污染最为严重。这类废弃物在堆放或处理过程中,由于日晒、雨淋、水洗重金属极易移动,以辐射状、漏斗状向周围土壤、水体扩散。沈阳冶炼厂冶炼锌的过程中产生的矿渣主要含 Zn、Cd,1971 年开始堆放在一个洼地场所,其浸入液中 Zn、Cd 含量分别达  $6.6 \times 10^3\text{mg L}^{-1}$  和  $7.5 \times 10\text{mg L}^{-1}$ ,目前已扩散到离堆放场 700m 以外的范围,重金属污染物浓度是以同心圆状分布<sup>[4]</sup>。对武汉市垃圾堆放场,杭州铬渣堆放区附近土壤中重金属含量的研究发现,这些区域土壤中 Cd、Hg、Cr、Cu、Zn、Pb、As 等重金属含量均高于当地土壤背景值<sup>[8-9]</sup>。

有一些固体废弃物被直接或通过加工作为肥料施入土壤,造成土壤重金属污染。如随着我国畜牧生产的发展,产生大量的家畜粪便及动物加工产生的废弃物,这类农业固体废弃物中含有植物所需 N、P、K 和有机质,同时由于饲料中添加了一定量的重金属盐类,因此作为肥料施入土壤增加了土壤 Zn、Mn 等重金属元素的含量。磷石膏属于化肥工业废物,由于其有一定的正磷酸以及不同形态的含磷化合物,并可以改良酸性土壤,从而被大量施入土壤,造成了土壤中 Cr、Pb、Mn、As 含量增加。磷钢渣作为磷源施入土壤时,土壤中发现有 Cr 的累积<sup>[14]</sup>。

随着工业的发展以及城镇环境建设的加快,污水处理正在不断加强。我国现有 80 余座污水处理厂,估计污泥产生量在 400 万吨以上,由于污泥含有较高的有机质和氮、磷养分,因此土壤成为污泥处理的主要场所。一般来说,污泥中 Cr、Pb、Cu、Zn、As 极易超过控制标准。北京褐土施用燕山石化污泥一年后 Hg、Cd 浓度分别达到  $0.94\text{mg kg}^{-1}$ 、 $0.22\text{mg kg}^{-1}$ <sup>[11]</sup>。许多

研究指出,污泥的施用可使土壤重金属含量有不同程度的增加,其增加的幅度与污泥中的重金属含量、污泥的施用量及土壤管理有关。

固体废弃物也可以通过风的传播而使污染范围扩大,土壤中重金属的含量随距污染源的增大而降低。如大冶冶炼厂,每年排放数千吨的粉尘,引起大冶县广大农田的污染,直径 20km 范围内的土壤 Cr、Zn、Pb、Cd 含量均大大高于背景值。

### 1.4 随农用物资进入土壤的重金属

农药、化肥和地膜是重要的农用物资,对农业生产的发展起着重大的推动作用,但长期不合理施用,也可以导致土壤重金属污染。绝大多数的农药为有机化合物,少数为有机—无机化合物或纯矿物质,个别农药在其组成中含有 Hg、As、Cu、Zn 等重金属。如随着西力生消毒种子进入土壤的 Hg 为  $6-9\text{g hm}^{-2}$ ;在农业地区,特别是在西方国家的家庭园林中,由于经常施用含 As 农药,土壤中 As 的残留量明显增加,美国的密执安州土壤中 As 含量达到  $112\text{mg kg}^{-1}$ <sup>[3]</sup>。杀真菌农药常含有 Cu 和 Zn,被大量地用于果树和温室作物,常常会造成土壤 Cu、Zn 累积达到有毒的浓度。如在莫尔达维亚,葡萄生长季节要喷 5-12 次波尔多液或类似的制剂,每年约有 6000-8000 吨的铜施入土壤。

重金属元素是肥料中报道最多的污染物质。氮、钾肥料中重金属含量较低,磷肥中含有较多的有害重金属,复合肥的重金属主要来源于母料及加工流程所带入。肥料中重金属含量一般是磷肥 > 复合肥 > 钾肥 > 氮肥。Cd 是土壤环境中重要的污染元素,随磷肥进入土壤的 Cd 一直受到人们的关注。许多研究表明,随着磷肥及复合肥的大量施用,土壤有效 Cd 的含量不断增加,作物吸收 Cd 量也相应增加。据马耀华等对上海地区菜园土研究发现:施肥后,Cd 的含量从  $0.13\text{mg kg}^{-1}$  上升到  $0.32\text{mg kg}^{-1}$ <sup>[12]</sup>。美国橘园每年施磷量为  $175\text{kg hm}^{-2}$ ,36 年后土壤 Cd 量由  $0.07\text{mg kg}^{-2}$  提高到  $1.0\text{mg kg}^{-1}$ ;新西兰在同一地点施用磷肥 50 年后取土分析,土壤 Cd 含量由  $0.39\text{mg kg}^{-1}$  提高到  $0.85\text{mg kg}^{-1}$ <sup>[13]</sup>。肥料中 Cr、As 元素含量较高,且土壤的环境含量又较低,能引起土壤中 Cr、As 的较快积累。硝酸铵、磷酸铵、复合肥中 As 量可达 50-60  $\text{mg kg}^{-1}$ ,长期施用可造成土壤 As 严重污染<sup>[14]</sup>。近年来,地膜的大面积的推广使用,造成了土壤的白色污染。由于地膜生产过程中加入了含有 Cd、Pb 的热稳定剂,同时也增加了土壤重金属污染。

## 2 土壤重金属污染修复技术

土壤重金属污染具有隐蔽性、长期性和不可逆性

的特点。土壤有害重金属积累到一定程度,不仅会导致土壤退化,农作物产量和品质下降,而且还可以通过径流、淋失作用污染地表水和地下水,恶化水文环境,并可能直接毒害植物或通过食物链途径危害人体健康。目前,世界各国对土壤重金属污染修复技术进行广泛的研究,取得了可喜的进展。具体有如下几种修复措施。

### 2.1 工程措施

主要包括客土、换土和深耕翻土等措施。通过客土、换土和深耕翻土与污土混合,可以降低土壤中重金属的含量,减少重金属对土壤—植物系统产生的毒害,从而使农产品达到食品卫生标准。深耕翻土用于轻度污染的土壤,而客土和换土则是用于重污染区的常见方法,在这方面日本取得了成功的经验。工程措施是比较经典的土壤重金属污染治理措施,它具有彻底、稳定的优点,但实施工程量大、投资费用高,破坏土体结构,引起土壤肥力下降,并且还要对换出的污土进行堆放或处理。

### 2.2 物理化学修复

2.2.1 电动修复 是通过电流的作用,在电场的作用下,土壤中的重金属离子(如 Pb、Cd、Cr、Zn 等)和无机离子以电透渗和电迁移的方式向电极运输<sup>[15]</sup>,然后进行集中收集处理。研究发现,土壤 pH、缓冲性能、土壤组分及污染金属种类会影响修复的效果<sup>[16]</sup>。

该方法特别适合于低渗透的粘土和淤泥土,可以控制污染物的流动方向。在沙土上的实验结果表明,土壤中  $Pb^{2+}$ 、 $Cr^{3+}$  等重金属离子的除去率也可达 90% 以上<sup>[17]</sup>。电动修复是一种原位修复技术,不搅动土层,并可以缩短修复时间,是一种经济可行的修复技术。

2.2.2 电热修复 是利用高频电压产生电磁波,产生热能,对土壤进行加热,使污染物从土壤颗粒内解吸出来,加快一些易挥发性重金属从土壤中分离,从而达到修复的目的。该技术可以修复被 Hg 和 Se 等重金属污染的土壤。另外可以把重金属污染区土壤置于高温高压下,形成玻璃态物质,从而达到从根本上消除土壤重金属污染的目的。

2.2.3 土壤淋洗 土壤固相金属的机制可分为两大类:一是以离子态吸附在土壤组分的表面;二是形成金属化合物的沉淀。土壤淋洗是利用淋洗液把土壤固相中的重金属转移到土壤液相中去,再把富含重金属的废水进一步回收处理的土壤修复方法。该方法的技术关键是寻找一种既能提取各种形态的重金属,又不破坏土壤结构的淋洗液。目前,用于淋洗土壤的淋洗液

较多,包括有机或无机酸、碱、盐和螯合剂。Blaylock 等检验了柠檬酸、苹果酸、乙酸、EDTA、DTPA 对印度芥菜吸收 Cd 和 Pb 的效应。吴龙华研究发现 EDTA 可明显降低土壤对铜的吸收率,吸收率与解吸率与加入的 EDTA 量的对数呈显著负相关<sup>[18]</sup>。土壤淋洗以柱淋洗或堆积淋洗更为实际和经济,这对该修复技术的商业化具有一定的促进作用。

### 2.3 化学修复

化学修复就是向土壤投入改良剂,通过对重金属的吸附、氧化还原、拮抗或沉淀作用,以降低重金属的生物有效性。该技术关键在于选择经济有效的改良剂,常用的改良剂有石灰、沸石、碳酸钙、磷酸盐、硅酸盐和促进还原作用的有机物质,不同改良剂对重金属的作用机理不同。施用石灰或碳酸钙主要是提高土壤 pH 值,促使土壤中 Cd、Cu、Hg、Zn 等元素形成氢氧化物或碳酸盐结合态盐类沉淀。如当土壤  $pH > 6.5$  时, Hg 就能形成氢氧化物或碳酸盐沉淀。廖敏等研究发现,在低石灰水平下,土壤有机质的羟基和羧基与  $OH^-$  反应,促使土壤可变电荷增加,有机结合态的重金属增多,并且  $Cd^{2+}$  与  $CO_3^{2-}$  结合生成难溶于水的  $CdCO_3$ <sup>[19]</sup>。在沈阳张士污灌区的试验表明,每公顷土壤施用 1500 ~ 1875kg 石灰,籽实含镉量下降 50%<sup>[20]</sup>。关于磷酸盐和硅酸盐固化土壤重金属的技术研究报告较多,一般认为该物质可使土壤中重金属形成难溶性的沉淀。如向土壤中投放硅酸盐钢渣,对 Cd、Ni、Zn 离子具有吸附和共沉淀作用。水田土壤中的 Cd 可以磷酸镉的形式沉淀,磷酸汞的溶解度也很小。沸石是碱金属或碱土金属的水化铝硅酸盐晶体,含有大量的三维晶体结构和很强的离子交换能力,从而能通过离子交换吸附和专性吸附降低土壤中重金属的有效性。有机物可促使重金属以硫化物的形式沉淀,同时有机物中的腐殖酸能与重金属离子形成络合或螯合物以降低其活性。有人研究指出,利用一些对人体无害或有益的金属元素的拮抗作用,也可以减少土壤中重金属元素的有效性。

化学修复是在土壤原位上进行的,简单易行。但并不是一种永久的修复措施,因为它只改变了重金属在土壤中存在的形态,金属元素仍保留在土壤中,容易再度活化危害植物。

### 2.4 生物修复

生物修复是利用生物技术治理污染土壤的一种新方法。利用生物削减、净化土壤中的重金属或降低重金属毒性。由于该方法效果好,易于操作,日益受到人们的重视,成为污染土壤修复研究的热点。

2.4.1 植物修复技术 是一种利用自然生长或遗传培育植物修复重金属污染土壤的技术。根据其作用过程和机理,重金属污染土壤的植物修复技术可分为植物提取、植物挥发和植物稳定三种类型<sup>[21]</sup>。

(1)植物提取 即利用重金属超积累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。目前已发现有 700 多种超积累重金属植物,积累 Cr、Co、Ni、Cu、Pb 的量一般在 0.1% 以上, Mn、Zn 可达到 1% 以上<sup>[22]</sup>。遏蓝菜属是一种已被鉴定的 Zn 和 Cd 超积累植物, Baker 和 McGrath 研究发现,土壤含 Zn 444 mg kg<sup>-1</sup> 时,遏蓝菜地上部 Zn 的含量可达到土壤的 16 倍。柳属的某些物种能大量富集 Cd; 印度芥菜对 Cd、Ni、Zn、Cu 富集可分别达到 58、52、31、17 和 7 倍<sup>[23]</sup>; 芥子草等对 Se、Pb、Cr、Cd、Ni、Zn、Cu 具有较强的累积能力; Robinson 报告了高生物量 Ni 超积累植物,吸收提取 Ni 量可达 168 kg hm<sup>-2</sup><sup>[21]</sup>; 高山萤属类可吸收高浓度的 Cu、Co、Mn、Pb、Se、Cd 和 Zn。我国学者对植物提取也进行了一些研究,如在我国南方发现一批 As 超积累植物<sup>[24]</sup>; 刘云国等利用 10 种超积累植物对 Cd 污染土壤进行修复研究<sup>[26]</sup>; 蒋先军等发现,印度芥菜对 Cu、Zn、Pb 污染的土壤有良好修复效果<sup>[25]</sup>。

(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%<sup>[27]</sup>。挥发态的 Se 主要是通过植物体内的 ATP 硫化酶的作用,还原为可挥发的 CH<sub>3</sub>SeCH<sub>3</sub> 和 CH<sub>3</sub>SeSeCH<sub>3</sub>; Meagher 等把细菌体中的 Hg 还原酶基因导入芥子科植物,获得耐 Hg 转基因植物,该植物能从土壤中吸收 Hg 并将其还原为挥发性单质 Hg<sup>[28]</sup>。

(3)植物稳定 利用耐重金属植物或超积累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积累、沉淀或根表吸收来加强土壤中重金属的固化。如,植物根系分泌物能改变土壤根际环境,可使多价态的 Cr、Hg、As 的价态和形态发生改变,影响其毒性效应。植物的根毛可直接从土壤交换吸附重金属增加根表固定<sup>[21]</sup>。

2.4.2 微生物修复技术 微生物在修复被重金属污染的土壤方面具有独特的作用。其主要作用原理是:微生物可以降低土壤中重金属的毒性;微生物可以吸附积累重金属;微生物可以改变根际微环境,从而提高

植物对重金属的吸收,挥发或固定效率<sup>[29]</sup>。如动胶菌、蓝细菌、硫酸还原菌及某些藻类,能够产生胞外聚合物与重金属离子形成络合物; Macaskie 等分离的柠檬酸菌,分解有机质产生的 HPO<sub>4</sub><sup>3-</sup> 与 Cd 形成 CdHPO<sub>4</sub> 沉淀;李志超发现有些微生物能把剧毒的甲基汞降解为毒性小、可挥发的单质 Hg; Frankenberg 等以 Se 的微生物甲基化作为基础进行原位生物修复<sup>[30]</sup>。耿春女等利用菌根吸收和固定重金属 Fe、Mn、Zn、Cu 取得了良好的效果<sup>[31]</sup>。

## 2.5 农业生态修复

农业生态修复主要包括两个方面:一是农艺修复措施。包括改变耕作制度,调整作物品种,种植不进入食物链的植物,选择能降低土壤重金属污染的化肥,或增施能够固定重金属的有机肥等措施,来降低土壤重金属污染。二是生态修复。通过调节诸如土壤水分、土壤养分、土壤 pH 值和土壤氧化还原状况及气温、湿度等生态因子,实现对污染物所处环境介质的调控。我国在这一方面研究较多<sup>[32-34]</sup>,并取得了一定的成效。但利用该技术修复污染土壤周期长,效果不显著。

## 3 土壤重金属污染修复技术研究展望

采用工程、物理化学和化学方法修复重金属污染土壤,具有一定的局限性,难以大规模处理污染土壤,并且能导致土壤结构破坏,生物活性下降和土壤肥力退化。农业生态措施又存在周期长,效果不显著的特点。生物修复是一项新兴的高效修复技术,具有良好的社会、生态综合效益,并且易被大众接受。因此,具有广阔的应用前景。以下几个方面将成为该领域研究的重点。

(1)超积累植物筛选与培育。超积累植物是在重金属胁迫条件下的一种适应性突变体,往往生长缓慢,生物量低,气候环境适应性差,具有很强的富集专一性。因此,筛选、培育吸收能力强,同时能吸收多种重金属元素,且生物量大的植物是生物修复的一项重要任务。

(2)分子生物学和基因工程技术的应用。随着分子生物技术迅猛发展,将筛选、培育出的超积累植物和微生物基因导入生物量大、生长速度快、适应性强的植物中去已成为现实,因此,利用分子生物技术提高植物修复的实用性方面将取得突破性进展。

(3)生物修复综合技术的研究。重金属污染土壤的修复是一个系统工程,单一的修复技术很难达到预期效果,必须以植物修复为主,辅以化学、微生物及农业生态措施,增加重金属的生物有效性,促进植物的生

长和吸收,从而提高植物修复的综合效率。因此,生物修复综合技术将是今后重金属污染土壤修复技术的主要研究方向。

### 参考文献:

- [1] 周泽义. 中国蔬菜重金属污染及控制[J]. 资源生态环境网络研究动态,1999,10(3):21-27.
- [2] 陈志良,仇荣亮. 重金属污染土壤的修复技术[J]. 环境保护,2002,29(6):21-23.
- [3] 杨景辉. 土壤污染与防治[M]. 北京:科学出版社,1995.
- [4] 李天杰. 土壤环境化学[M]. 北京:高等教育出版社,1995,112-113.
- [5] 张书海,林树生. 交通干线铅污染对两侧土壤和蔬菜的影响[J]. 环境监测管理与技术,2000,12(3):22-28.
- [6] 张书海,沈跃文. 污灌区重金属污染对土壤的危害[J]. 环境监测管理与技术,2000,12(2):22-24.
- [7] 符建荣. 土壤中铅的积累及污染的农业防治[J]. 农业环境保护,1993,12(5):35-42.
- [8] 方满,刘洪海. 武汉市垃圾堆放场重金属污染调查及控制途径[J]. 中国环境科学,1998,8(4):54-59.
- [9] 潘海峰. 铬渣堆存区土壤重金属污染评价[J]. 环境与开发,1994,9(2):268-270.
- [10] 王凯荣. 我国农田镉污染现状及其治理利用对策[J]. 农业环境保护,1997,16(6):274-278.
- [11] 杨居荣. 北京地区土壤重金属容量的研究[J]. 环境科学学报,1984,4(2):76-79.
- [12] 马耀华,刘树应. 环境土壤学[M]. 西安:陕西科学技术出版社,1998,178-207.
- [13] Taylor M D. Accumulation of cadmium derived from fertilizers in New Zealand [J]. Soil Sci. Total Environ, 1997, 208:123-126.
- [14] 王焕校. 污染生态学[M]. 北京:高等教育出版社,2000,188-213.
- [15] Probststein R F, Hick R E. Removal of contaminants from soils by electric fields [J]. Science, 1993, 260:498-503.
- [16] Kawachi T, Kubo H. Model experimental study on the migration behavior of heavy metals in electokinetic remediation process for contaminated soil [J]. Soil Sci. Plant Nutr, 1999, 45(2):259-268.
- [17] 郑喜坤,鲁安怀,等. 土壤重金属污染现状与防治方法[J]. 土壤与环境,2002,11(1):79-84.
- [18] 吴龙华,骆永明,等. 铜污染土壤修复的有机调控研究 [J], 相容性有机物和 EDTA 对污染土壤的释放作用. 土壤,2000,32(2):62-70.
- [19] 廖敏,等. 重金属在土水系统中的迁移特征[J]. 土壤学报,1998,35(2):179-184.
- [20] 陈怀满,等. 中国土壤重金属污染现状与防治对策[J]. AMBIO: 人类环境杂志,1999,28(2):130-134.
- [21] 张丛,等. 污染土壤生物修复技术[M]. 北京:中国环境科学出版社,2000.
- [22] 孙波,等. 超积累植物吸收金属机理的研究进展[J]. 土壤,1999,31(3):113-119.
- [23] NANDA KUMAR P. B. A. Phytoextraction: the use of plants to remove heavy metals from soil. Environ [J]. Sci. & Technol. 1995, 29(5):1232-1238.
- [24] Chen T B and Wei C Y. Arsenic hyperaccumulation in some plant species in south China [M]. Proceedings of Soil - Rem. 2000, 2000, 194-195.
- [25] 蒋先军,等. 重金属污染土壤的植物修复研究[J]. 土壤,2000,32(2):71-74.
- [26] 刘云国,等. 土壤镉污染生物整治研究[J]. 湖南大学学报,2000,27(3):34-38.
- [27] 韩润平,等. 用植物消除土壤中的重金属[J]. 江苏环境科技,2000,13(1):28-29.
- [28] Meagher R B, etc. Engineering phytoremediation of mercury pollution in soil and water using bacterial genes [A]. phycoremediation of contaminated soil and water 2000, 201-219.
- [29] 王建林等. 水稻根际中铁的形态转化[J]. 土壤学报,1992,29(4):358-363.
- [30] 滕云,等. 重金属污染土壤的微生物生态效应及其修复研究进展[J]. 土壤与环境,2002,11(1):85-89.
- [31] 耿春女,等. 菌根生物修复技术在沈抚污水灌区的应用前景[J]. 环境污染治理技术与设备,2002,3(7):51-55.
- [32] 丁园. 重金属污染土壤的治理方法[J]. 环境与开发,2000,15(2):25-28.
- [33] 王新. 不同作物对重金属复合污染物吸收特征研究[J]. 农业环境保护,1998,17(5):193-196.
- [34] 蒋玉根. 农艺措施对降低污染土壤重金属活性的影响[J]. 土壤,2002,34(3):145-147.

## Current Situation of Soil Contamination by Heavy Metals and Research Advances on the Remediation Techniques

CUI De-jie, ZHANG Yu-long

(Shenyang Agriculture University, Shenyang 110161, China)

**Abstract:** We reviewed the source of heavy metal contamination in soil and the current situation of the study on remediation techniques, analysed the advantages, disadvantages, feasibility and future reach trends of each remedial techniques. More effective approaches of comprehensive remediation of heavy metals polluted soil were shown.

**Key Words:** Soil pollution; Heavy metal; Remediation technique