2013，32(3):409-417

农业环境科学学报 ***Journal of Agro-Environment Science***

2013 年 3 月

重金属污染土壤修复技术及其修复实践

黄益宗 1，郝晓伟 1，雷 鸣 2，铁柏清 2

1.中国科学院生态环境研究中心，北京 100085；2.湖南农业大学资源环境学院，长沙 410128）

摘 要：近年来我国重金属污染事件频发，严重影响广大群众的身体健康，土壤重金属污染与防治成为人们关注的环境问题之一。 作者结合多年的工作经验，综述了近年来国内外有关重金属污染土壤修复技术的研究进展，包括物理/化学修复技术、生物修复技 术和农业生态修复技术等，对每种技术的基本修复原理、技术特点和应用范围进行了讨论。同时，对国内外典型的重金属污染土壤 修复工程实践进行了介绍，以期为重金属污染土壤的修复提供借鉴和参考。

关键词：土壤；重金属；农田；修复技术；修复实践

中图分类号：X53 文献标志码:A 文章编号：1672-2043（2013）03-0409-09 doi:10.11654/jaes.2013.03.001

The Remediation Technology and Remediation Practice of Heavy Metals-Contaminated Soil

HUANG Yi-zong1, HAO Xiao-wei1, LEI Ming2, TIE Bo-qing2

(1. Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 2. College of Resources and En－ vironment, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China)

Abstract：In recent years heavy metal pollution incidents happened frequently in our country, and they had serious impact on human health. How to control heavy metals-contaminated soil becomes one of the noted environmental problems. The present paper aims to provide a criti－ cal review on the remediation technology of soils contaminated by heavy metals, including physical / chemical remediation, bioremediation and agricultural ecological restoration technologies, and each kind of technology's remedial principle, technical characteristics and applica－ tion range are discussed. At the same time, the domestic and foreign typical remediation practices of heavy metals-contaminated soil are in－ troduced, in order to provide the reference for the remediation of heavy metals-contaminated soil in China.

Keywords：soil; heavy metal; cropland; remediation technology; remediation practice

随着工业化和城市化的飞速发展，土壤重金属污 染已成为不容忽视的突出环境问题。我国受 Cd、As、 Pb、Hg、Zn 等重金属污染的耕地面积近 2000 万 hm2， 约占总耕地面积的五分之一［1］。土壤重金属污染有人 为原因和自然原因两种，人类活动是土壤重金属污染 的主要成因。土壤重金属污染的自然来源主要是岩石 风化和火山喷发等自然地质活动，土壤重金属污染的 人为来源主要为矿产开采、金属冶炼、化工、煤燃烧、

收稿日期：2013－01－10

基金项目：国家重金属污染治理专项“广西环江县大环江流域土壤重 金属污染治理工程项目”和国家水体污染控制与治理科技 重大专项（2009ZX07212-001-05 资助

作者简介：黄益宗（1970—），男，广西南宁人，博士，副研，主要从事重

金属污染修复研究。E-mail: hyz@ rcees.ac.cn 汽车尾气排放、生活废水排放、污泥使用、污水灌溉、 农药和化肥施用、大气沉降等。由于矿产开采和冶炼 三废”的排放，导致湖南省湘江流域和资江流域土壤 重金属 Cd、As、Pb、Zn 和 Cu 污染比较严重，并产生严 重的生态环境风险［2-3］。沈阳张士地区 30 多年的工业 污水灌溉导致了土壤中严重的Cd污染，且在停耕10 年后土壤中 Cd 的移动性和生物有效性仍很高［4］。朱 桂芬等对河南省新乡市寺庄顶污灌区土壤重金属含 量进行调查，发现土壤中 Cd、Ni、Zn 和 Cu 的含量严 重超标，分别是国家土壤环境二级标准的 108.85、 19.94、9.33 和 1.46 倍［5］。重金属污染对人体健康的危 害主要是“三致”（致癌、致疾、致突变）。以重金属镉为 例，长期接触一定剂量的镉会造成肾脏损害，进而导 致骨质疏松和软化。1931 年发生在日本富山县的“痛410 痛病”是镉中毒的典型案例。近年来，我国重金属污染 事件频发，如 2005 年的广东北江韶关段镉严重超标 事件，2006年的湘江湖南株洲段镉污染事故，2009 年 的湖南省浏阳市镉污染事故，2009 年陕西凤翔县数 百名儿童血铅超标、湖南武冈市数百名儿童血铅超 标、广东清远市数十名儿童铅中毒，2011 年云南曲靖 铬污染事件，2012 年广西河池龙江河镉污染事件等。

有毒重金属在土壤污染过程中具有隐蔽性、长期 性、不可降解和不可逆转性的特点，它们不仅导致土 壤肥力与作物产量、品质下降，还易引发地下水污染， 并通过食物链途径在植物、动物和人体内累积。因此， 土壤系统中重金属的污染和防治一直是国内外研究 的热点和难点。重金属污染土壤的修复主要基于两种 策略：一是去除化，将重金属从土壤中去除，达到清洁 土壤的目的；二是固定化，将重金属固定在土壤中限 制其释放，从而降低其风险。重金属污染土壤的修复 是指利用物理、化学和生物的方法将土壤中的重金属 清除出土体或将其固定在土壤中降低其迁移性和生 物有效性，降低重金属的健康风险和环境风险。近年 来重金属污染土壤的修复技术研究取得了长足发展， 按照工艺原理主要归纳为三类：物理/化学修复、生物 修复和农业生态修复。本文结合我们多年来的工作基 础，系统地介绍重金属污染土壤修复的不同技术，以 及近年来国内外修复重金属污染土壤的一些重要实 践，为以后的土壤修复工作提供有益借鉴。

1. 物理/化学修复技术

物理/化学修复技术主要基于土壤理化性质和重 金属的不同特性，通过物理/化学手段来分离或固定 土壤中的重金属，达到清洁土壤和降低污染物环境风 险和健康风险的技术手段。物理/化学技术实施方便 灵活，周期较短，适用于多种重金属的处理，在重金属 污染土壤的工程修复中得到广泛应用，但该技术实施 的工程量较大，实施成本较高，在一定程度上限制其 推广应用。

* 1. 客土、换土、去表土、深耕翻土法

此类方法适合于小面积污染土壤的治理。客土法 是在污染土壤表层加入非污染土壤，或将非污染土壤 与污染土壤混匀，使得重金属浓度降低到临界危害浓 度以下，从而达到减轻危害的目的。换土法是将污染 土壤部分或全部换去，换入非污染土壤。客土或换土 的厚度应大于土壤耕层厚度。去表土是根据重金属污 染表层土的特性，耕作活化下层的土壤。深耕翻土是

农业环境科学学报.第32卷第***3***期 翻动土壤上下土层，使得重金属在更大范围内扩散， 浓度降低到可承受的范围。这些方法最初在英国、荷 兰、美国等国家被采用，达到了降低污染物危害的目 的，是一种切实有效的治理方法。但该方法需耗费大 量的人力、财力和物力，成本较高，且未能从根本上清 除重金属，存在占用土地、渗漏和二次污染等问题，因 此不是一种理想的治理土壤重金属污染的方法。

农业环境科学学报

* 1. 土壤淋洗

土壤淋洗是指用淋洗剂去除土壤中重金属污染 物的过程，选择高效的淋洗助剂是淋洗成功的关键。 淋洗法可用于大面积、重度污染土壤的治理，尤其是 在轻质土和砂质土中效果较好，但对渗透系数很低的 土壤效果不太好。影响土壤淋洗效果的因素主要有淋 洗剂种类、淋洗浓度、土壤性质、污染程度、污染物在 土壤中的形态等。研究结果表明，以15 mmol EDTA・ kg-1 土壤的比率淋洗Cu污染土壤(400 mg Cu-kg-), 总Cu含量降低41%，主要淋洗形态是碳酸盐结合 态、铁锰氧化物结合态和有机物结合态[6]。土壤淋洗后 淋洗液的处理是一个关键的技术问题，转移络合、离 子置换和电化学法是目前主要采取的技术手段。 Pociecha 和 Lestan 采用电凝固法从 EDTA 淋洗污染 土壤的淋洗液中回收重金属，发现该方法可以去除污 染土壤中53%的Pb、6%的Zn和52%的Cd[7]o 土壤 淋洗需添加昂贵的淋洗液，且淋洗液对地下水也有污 染风险；另一方面，淋洗液在淋洗土壤重金属的同时 也将植物必需的Ca和Mg等营养元素淋洗出根际, 造成植物营养元素的缺失。

* 1. 热解吸法

热解吸技术是采用直接或间接的方式对重金属 污染土壤进行连续加热，温度到达一定的临界温度时 土壤中的某些重金属(如 Hg、e和AS将挥发，收集 该挥发产物进行集中处理，从而达到清除土壤重金属 污染物目的的技术。Kunkel等的研究表明，在温度低 于土壤沸点的条件下原位热解吸技术可以去除污染 土壤中 99.8%的 Hg[8]。 热解吸技术的一大缺陷是耗 能，加热土壤必须要消耗大量的能量，提高了修复的 成本。 Navarro 等的研究表明，可以采用天然太阳能来 热解吸污染土壤中的Hg和As[9]，这样可以解决能源 消耗的问题。热解吸技术的另一个问题是挥发污染物 的收集和处置问题，这方面还需要进行大量的科学研 究工作。

* 1. 玻璃化技术

玻璃化技术指将重金属污染土壤置于高温高压

的环境下，待其冷却后形成坚硬的玻璃体物质，这时 土壤重金属被固定，从而达到阻抗重金属迁移目的的 技术。玻璃化技术最早在核废料处理方面应用，但是 由于该技术需要消耗大量的电能，其成本较高而没有 得到广泛的应用。玻璃化技术形成的玻璃类物质结构 稳定很难被降解，这使得玻璃化技术实现了对土壤重 金属的永久固定。

1.5 电动修复

电动修复是指向重金属污染土壤中插入电极施 加直流电压导致重金属离子在电场作用下进行电迁 移、电渗流、电泳等过程，使其在电极附近富集进而从 溶液中导出并进行适当的物理或化学处理，实现污染 土壤清洁的技术。电动修复是由美国路易斯安那州立 大学研究出的一种净化土壤污染的原位修复技术，在 欧美一些国家发展较快，已进入商业化阶段。胡宏韬 等采用电动方法来修复Zn和Cu单一污染的土壤， 结果表明阳极附近土壤的 Zn 和 Cu 去除率分别达到 74.3%和 71.1%［10］。有人采用电动修复技术对木材防 腐剂铬化砷酸铜(CCA污染土壤进行修复，可以去除 65%的Cu、2%的Cr和77%的As［11］。土壤中添加辅 助试剂可增强土壤重金属的溶解性，从而提高电动修 复的效率。添加络合剂(EDTA和柠檬酸等可以提高 电动修复对Cr和Pb等重金属的修复效果［12］。电动修 复技术目前还主要停留在实验室研究阶段，在污染场 地的应用案例比较少，加强电动修复技术在污染场地 的应用将是今后的主要研究工作。

1.6 固化/稳定化

固化/稳定化是指向重金属污染土壤中加入某一 类或几类固化/稳定化药剂，通过物理/化学过程防止 或降低土壤中有毒重金属释放的一组技术。固化是通 过添加药剂将土壤中的有毒重金属包被起来，形成相 对稳定性的形态，限制土壤重金属的释放；稳定化是 在土壤中添加稳定化药剂，通过对重金属的吸附、沉 淀(共沉淀)、络合作用来降低重金属在土壤中的迁移 性和生物有效性。固化/稳定化的效应一般统称为钝 化。重金属被固化/稳定化后，不但可以减少其向土壤 深层和地下水的迁移，而且可以降低重金属在作物中 的积累，减少重金属通过食物链传递对生物和人体的 危害。重金属固化/稳定化的关键是选择合适的具有 固化/稳定化作用的药剂，药剂的选择一般要满足以 下几个方面的要求：(1)药剂本身不含重金属或含量 很低，不存在二次污染的风险；(2)药剂获得或制备成 本较低；(3)药剂对重金属的固化/稳定化显著且持续 性强。土壤中重金属固化/稳定化的关键是选择一种 经济有效的药剂，有研究报道石灰、磷灰石、沸石、铁 锰氧化物、硅酸盐、海泡石、赤泥、骨炭、堆肥、钢渣、蒙 脱石、凹凸棒石和蛭石等可以有效地固化/稳定化土 壤中的重金属，降低重金属的生物有效性［13-19］。钝化技 术需要考虑土壤重金属的污染程度和土壤本身的性 质等因素再选出合理的钝化药剂，并计算出钝化药剂 的用量。在工程上广泛应用的钝化药剂一般为工业副 产物，故钝化技术的成本较低，但钝化技术并未将重 金属从土壤中根本清除，因此需要进行长期的监测以 防止重金属再次活化。

1.7 离子拮抗技术

土壤中某些重金属离子间存在拮抗作用，当土壤 中某种重金属元素浓度过高时，可以向土壤中加入少 许对作物危害较轻的拮抗性重金属元素，进而减少该 重金属对作物的毒害作用，达到降低重金属生物毒性 的目的。在土壤中添加少量的Se抑制了蜈蚣草对Cu 和Zn的吸收,Se与Cu和Zn表现为拮抗作用㈣。Zn 和Cd具有相似的化学性质和地球化学行为,Zn具有 拮抗植物吸收 Cd 的作用。向 Cd 污染土壤中加入适 量的Zn，可以减少植物对Cd的吸收积累［21］。

1. 生物修复技术

重金属污染土壤的生物修复(Bioremediation)是指 利用动物、微生物或植物的生命代谢活动，削减土壤 环境中的重金属含量或通过改变重金属在土壤中的 化学形态从而降低其毒性。已有研究表明，土壤动物 如蚯蚓 生命代谢活动对外界条件的依赖度很高，不 适宜用来去除土壤中的重金属。这里的生物修复主要 包括植物修复和微生物修复，这种技术主要通过两种 途径来达到对土壤重金属的净化作用：(1 通过生物 作用改变重金属在土壤中的化学形态，使重金属固定 或解毒，降低其在土壤环境中的移动性和生物可利用 性；(2 通过生物吸收、代谢达到对重金属的削减、净 化与固定作用。生物修复技术主要包括植物修复技术 和微生物修复技术，其修复效果好、投资小、费用低、 易于管理与操作、不产生二次污染，因而日益受到人 们的重视，成为重金属污染土壤修复的研究热点。

2.1 植物修复技术

广义的植物修复技术(Phytoremediation)是指利 用植物提取、吸收、分解、转化和固定土壤、沉积物、污 泥、地表水及地下水中有毒有害污染物技术的总称。植 物修复技术不仅包括对污染物的吸收和去除，也包括

农业环境科学学报

412

对污染物的原位固定和转化，即植物提取技术、植物固 定技术、根系过滤技术、植物挥发技术和根际降解技 术。 与重金属污染土壤有关的植物修复技术主要包括 植物提取、植物固定和植物挥发。 植物修复过程是土 壤、植物、根际微生物综合作用的效应，修复过程受植 物种类、土壤理化性质、根际微生物等多种因素控制。

植物提取（Phytoextraction是指利用超积累植物 吸收污染土壤中的重金属并在地上部积累，收割植物 地上部分从而达到去除污染物的目的。植物提取分为 两类,一类是持续型植物萃取（Continuous phytoextrac­tion ，直接选用超富集植物吸收积累土壤中的重金 属；另一类是诱导性植物提取 （Induced phytoexrac- tion ，在种植超积累植物的同时添加某些可以活化土 壤重金属的物质，提高植物萃取重金属的效率。 超积 累植物（Hyperaccumulatoi）是指相对于普通植物能从 土壤或水体中吸收富集高含量的重金属，并具有将重 金属从植株的地下部向地上部大量转运的特殊能力， 表现出很高的富集系数。 超富集植物的界定一般有 3 个：（1 植物地上部重金属浓度积累达到一定临界值； （2 生物富集系数（地上部重金属浓度/土壤重金属浓 度 >1；（3 转运系数（地上部重金属浓度/地下部重金 属浓度 >1。 植物提取技术的关键是超富集植物的筛 选，目前世界上发现超富集植物 400 多种。 关于植物 提取技术的研究近年来成为科学界的研究热点，在实 际污染场地的工程应用中也得到了推广应用。凤尾蕨 属的蜈蚣草*（Pteris vittata* L）是世界上首次发现的As 超富集植物㈣,对As具有超强的富集能力，通过刈割 可以提高其对砷的去除能力。陈同斌等已在湖南郴州 建立了世界上第一个砷污染土壤的植物修复工程示 范基地。后来相关调查和试验研究发现凤尾蕨属的大 叶井 口边草*（Pteris cretica* L）和粉叶蕨*（Pityrogramma calomelanos* 也是砷的超富集植物［23］。 中科院华南植 物园张杏峰等开展牧草对重金属污染土壤修复潜力 的研究，发现杂交狼尾草*（Pennisetum americanum*（L） *Leeke* X *P. purpureum Schumach）*和热研 11 号黑籽雀 稗*（Paspalum atratum cv. Reyan* No. 11）可作为植物提 取技术的优良草种，前者可修复Cd和Zn污染土壤， 后者可修复Cd污染土壤叫研究表明EDTA和EDDS 是强化植物提取重金属的高效螯合剂，添加EDTA可 导致龙葵叶部、茎部和根部Zn浓度分别提高231%、 93%和81%；添加EDDS导致龙葵叶部、茎部和根部 Zn 积累浓度分别提高 140%、124%和 104%［25］。 此外， 天然螯合剂柠檬酸、草酸、酒石酸等也可以提高植物

第32卷第3期 提取重金属的效率。

植物固定（Phytostabilization）是指利用植物根系 固定土壤重金属的过程。 重金属被根系吸收积累或者 吸附在根系表面，也可通过根系分泌物在根际中被固 定。 此外，植物根际微生物（细菌和放线菌 通过改变 根际土壤性质（如 pH 和 Eh 而影响重金属在根际的 化学形态，也有利于降低重金属对植物根系的毒性［26］。 植物固定可降低土壤中重金属的移动性和生物有效 性，阻止重金属向地下水和空气的迁移及其在食物链 的传递。植物固定技术并非真正意义上从土壤中去除 重金属，只是将重金属固定在植物根部或根际土壤 中，因此开展修复土壤的长期监测是必须的。 植物固 定对干旱、半干旱区的尾矿堆置地修复具有广阔的应 用前景，可以实现此类污染场地的植被重建［27］。 串叶 松香草*（Silphium perfoliatum Linn）*可应用于Cd污染 土壤的修复［28］。

植物挥发（Phytovolatilization）是指利用植物根系 分泌的一些特殊物质或微生物使土壤中的 Se、Hg、As 等转化为挥发形态以去除其污染的一种方法。植物挥 发技术适用于修复那些Se、Hg、As污染的土壤。在Se污 染土壤中种植芥菜可以通过挥发形式去除土壤Se㈣。洋 麻可使土壤中三价硒转化为挥发性的甲基硒从而达 到去除的目的［30］。 种植烟草可以使土壤中的汞转化为 气态的汞而把土壤中的汞去除创。气态Se、Hg、As等 挥发到大气中易引发二次污染，因此要妥善处置植物 挥发产生的有害气体。

植物修复技术较传统的物理、化学修复技术具有 技术和经济上的双重优势，主要体现在以下几个方 面：（1 可以同时对污染土壤及其周边污染水体进行 修复；（2 成本低廉，而且可以通过后置处理进行重金 属回收；（3 具有环境净化和美化作用，社会可接受程 度高；（4 种植植物可提高土壤的有机质含量和土壤 肥力。 但是植物修复技术也有缺点，如植物对重金属 污染物的耐性有限，植物修复只适用于中等污染程度 的土壤修复；土壤重金属污染往往是几种金属的复合 污染，一种植物一般只能修复某一种重金属污染的土 壤，而且有可能活化土壤中的其他重金属；超富集植 物个体矮小，生长缓慢，修复土壤周期较长，难以满足 快速修复污染土壤的要求。 目前，基因工程技术可以 克服上述植物修复技术上的某些弱点，但采用基因工 程技术培育转基因植物用于重金属污染土壤的修复 尚处于比较有争议的阶段，转基因植物容易诱发物种 入侵、杂交繁殖等生态安全问题［32］。

2.2 微生物修复技术

土壤中微生物数量众多，某些微生物如细菌、真 菌和藻类对重金属具有吸附、沉淀、氧化-还原等作 用，从而降低污染土壤中重金属的毒性。细胞壁是细 菌和重金属直接接触的部位，富含羧基阴离子和磷酸 阴离子，易结合环境中活性金属阳离子到其表面。细 菌及其代谢产物对溶解态的金属离子具有较强的活 化能力，也可以吸附固定土壤中的重金属。研究发现 从香蒲*(Typha latifolia*根际中分离出的一些菌株能 钝化固定土壤中的Cu和Cd,降低它们在土壤中的可 交换态含量［33］。有研究报道［34］，在土壤中接种某菌株， 利用其在底物诱导下产生的酶化作用，分解产生 CO23- 从而矿化固结在土壤中的有效态重金属，使其沉积为 稳定态的碳酸盐。

根际中菌根真菌对于提高植物对重金属的抗性 和提高修复效率具有重要作用。菌根真菌可通过分泌 根系分泌物改变重金属在根际中的存在形态，进而降 低重金属的植物毒性和生物有效性。接种菌根真菌可 提高蜈蚣草对土壤中 As 的提取效率。菌根真菌 *Glomus mosseae* 可以改变水稻根部细胞细胞壁的组 成，降低水稻地上部对Cu的吸收积累，增强水稻对 Cu 的抗性［35］。盆栽试验和田间试验的结果表明，接种 丛枝真菌极大地提高了鬼针草和龙珠果对污染土壤 中Cu、Pb和Zn的吸收积累㈣。接种不同种类的菌根 真菌对植物吸收重金属的作用不同，某些菌种有利于 提高植物对重金属的吸收从而提高植物的提取效率， 而某些菌种则抑制植物对重金属的吸收，提高植物对 重金属的抗性，因此要根据不同的目的来合理选择菌 根菌种。菌根修复(微生物修复)是植物-微生物联合 修复的一种，菌根修复的关键仍是植物修复，筛选出 优良的菌种并在植物修复中应用是今后微生物修复 发展的方向。

1. 农业生态修复技术

农业生态修复技术是因地制宜地调整一些耕作 管理制度以及在污染土壤中种植不进入食物链的植 物等，从而改变土壤重金属的活性，降低其生物有效 性，减少重金属从土壤向作物的转移，达到减轻重金 属危害目的的技术。农业措施主要包括控制土壤水 分、改变耕作制度、农药和肥料的合理施用、调整作物 种类等。

3.1 控制土壤水分、调节土壤 Eh 值

土壤重金属的活性受土壤氧化还原状态影响较 大，一些金属在不同的氧化还原状态下表现出不同的 毒性和迁移性。三价As比五价As毒性更高,而六价Cr 比三价Cr毒性高。在氧化状态下，土壤中的As **(III)** 被氧化为As **(V)**，迁移性和生物有效性降低;Cr **(III)** 被氧化为C**r (V)**，迁移性和生物有效性提高,对生物 和人类的健康风险也随之提高。土壤水分是控制土壤 氧化还原状态的一个主要因子，通过控制土壤水分可 以起到降低重金属危害的目的。还原状态下土壤中的 大部分重金属容易形成硫化物沉淀，从而降低重金属 的移动性和生物有效性。水田在灌溉时因水层覆盖易 于形成还原性环境,SO2-被还原为S2-,重金属容易形 成溶解性很低的硫化物沉淀。由此可见，可以通过灌 溉等措施来调节土壤的氧化还原状况，进而降低重金 属在土壤-植物系统中的迁移。

1. 化肥、有机肥和农药的合理施用

施用肥料和农药是农业生产中最基本的农业措 施，也是引起土壤重金属污染的一个来源。可以从以 下两个方面来降低肥料和农药施用对土壤重金属污 染的负荷：一方面，通过改进化肥和农药的生产工艺， 最大程度地降低化肥和农药产品本身的重金属含量; 另一方面，指导农民合理施用化肥和农药，在土壤肥 力调查的基础上通过科学的测土配方施肥和合理的 农药施用不仅增强土壤肥力、 提高作物的防病害能 力，还有利于调控土壤中重金属的环境行为。以施氮 肥为例，不同形态的氮肥对土壤吸附解吸重金属的影 响不同何，当植物吸收NH+和NO-时，根系分泌不同 的离子，吸收NH+-N时引起H+的分泌，造成根际周 围酸化，而吸收NO--N时植物分泌OH-,造成根际环 境碱化。对于大多数重金属污染土壤来说，施用硝态 氮肥可以有效地降低重金属的迁移和生物毒性。有研 究表明，施用有机肥在提高土壤有机质的同时也吸附 或络合固定了土壤中的重金属，从而降低了土壤中重 金属的毒性和生物有效性。但也有研究表明在土壤中 施用有机肥会提高土壤中重金属的活性，从而提高重 金属的环境风险。有机物料加入土壤后，因不同的腐 解和矿物作用导致其对重金属的螯合固定产生不同 的作用。

1. 改变耕作制度和调整作物种类

改变耕作制度和调整作物种类是降低重金属污 染风险的有效措施，在污染土壤中种植对金属具有抗 性且不进入食物链的植物品种可以明显地降低重金 属的环境风险和健康风险。在污染严重的地区种植超 富集植物，通过连续种植收割将重金属移出污染区，

农业环境科学学报

第32卷第3期

414 杜绝重金属再次进入污染地区；在轻污染的地区，种 植重金属耐性植物，减少重金属在植物可食器官的累 积，从而保障农产品的质量安全。

1. 重金属污染土壤修复实践

Madej6n等在西班牙Guadiamar河附近的一块污 染土壤进行了 6 年施用生物固体堆肥、风化褐煤和糖 酸盐等改良剂的大田试验，发现一些改良剂处理可显 著地降低土壤中重金属的有效态含量，从而降低土壤 重金属的污染风险［38］。 在矿区土壤中，采用原位化学 固定技术和植物修复技术相结合的方式，可以促进这 些地区植被的恢复，这些措施均可以降低土壤重金属 的淋溶损失和径流损失。 在加拿大的 Sudbury 市，受 到矿产开发和冶炼的影响，约30 km2 土壤遭受重金 属的严重污染，植被寸草不生，通过添加生石灰和有 机肥，成功地使该地区植被得到较好的恢复［39］。 植物 修复比常规技术治理成本低，据国外报道，对一块污 染土地进行5年的治理，采用植物修复技术的费用为 25万美元，而常规的治理技术需要66万美元［40］。 近 20 多年来，发达国家纷纷围绕矿区污染土地的植物 修复技术进行大量的研发工作，并且在工程应用方面 也取得显著成效，使某些植物修复技术开始进入产业 化推广应用阶段。 2000年在北美和欧洲植物修复技 术就占到 4亿美元的市场，2005年仅美国植物修复 技术的市场将达到 25 亿美元［41］。 预期在不久的将来， 该技术有望形成一个具有巨大增长潜力的新型环保 产业。

据不完全统计［1］，我 国 受 到 Cd、 As、 Pb、 Hg、 Zn 等 重金属污染的耕地近2000万hm2，约占总耕地面积 的1/5,其中镉污染耕地1.33万hm2,涉及11个省25 个地区；被汞污染3.2万hm2,涉及15个省21个地 区。国内已经在重金属污染土壤修复方面进行了一定 的工作。 1999年中国科学院地理科学与资源研究所 环境修复中心陈同斌领导的研究组在中国本土发现 世界上第一种砷的超富集植物———蜈蚣草后，研究开 发出植物修复成套技术，包括超富集植物育种、栽培、 管理、施肥、微生物和化学调控剂等配套措施或优化 工艺等，在湖南郴州、浙江富阳和广东乐昌的As、Cu、 Pb污染土壤上建立了 3个植物修复示范工程。其中， 湖南郴州砷污染土壤植物修复示范工程已稳定运行 5年以上，在砷污染土壤的植物修复和砷富集技术方 面取得突破［42-43］。 华南农业大学吴启堂教授的研究组 利用超富集Cd和Zn的植物东南景天、石灰、过磷酸

钙和废料碳酸钙对农田重金属污染土壤进行植物-化 学联合修复,使作物籽粒中Cd、Zn和Cu含量降低到

了国家食品卫生标准允许的含量水平［44-46］。 一些研究 者利用苎麻对重金属污染土壤进行修复，取得了较好 的效果［47-48］。另外，我国的其他一些高校和研究所如中 国科学院南京土壤研究所、中国科学院沈阳应用生态 所、中山大学、浙江大学等均开展了大量的重金属污 染土壤修复工作［49］。

目前本文作者和湖南农业大学等单位承担了国 家水体污染控制与治理科技重大专项“湘江水环境重

金属污染整治关键技术研究与综合示范”的一个子课 题研究，负责湘江流域重金属面源污染控制技术的工 作，研发了许多有效的重金属污染土壤修复技术，并 开展了重金属污染土壤的修复示范工作和尾矿区的 生态恢复等工作（图 1~图 2 。在其中的一个施用硅钙



图 1 湖南省株洲市某地重金属污染土壤生物炭修复

技术研发的田间实验

Figure 1 Field experiment for application of biochar in paddy field contaminated by heavy metals in some areas in Zhuzhou City, Hunan Province



图2湖南省株洲市某地重金属污染土壤钝化剂修复示范区

Figure 2 A demonstration plot for application of passivating agent in paddy field contaminated by heavy metals in some areas in Zhuzhou City, Hunan Province

肥和石灰的3.33 hm2水稻的示范工作中，2011—2012 年稻谷增产 49.8%~51.4%;水稻糙米 Cd 含量降低 56.6%~63.8%;示范区排水 Cd 浓度降低 54.7%（未发 表的数据 。在湘江流域重金属污染土壤添加生物炭 的示范工作中，发现土壤中 Cd、Zn 和 Pb 的 NH4NO3 提取态含量分别比对照降低 66%~90%、73%~92%和 74%~91%；生物炭添加显著地降低了 Cd在水稻铁 膜、根系、茎叶、稻壳和籽粒中的含量，水稻籽粒Cd 含量降低 26%~71%[50]。

2011—2012 年我们还参加了由陈同斌研究员作 为主要技术指导者的我国第一个土壤重金属污染治 理专项“广西环江县大环江流域土壤重金属污染治 理工程项目”的研究，作者主要负责其中的一个子课 题“农田重金属污染土壤的钝化剂应用研究”，在广 西环江县大田中开展 0.8 hm2 水稻田和 0.7 hm2 甘蔗 地的重金属污染防治的示范工作，探索出有效的治 理土壤重金属的化学-植物联合修复技术（图3-图



广酋环;T毛南族自洽县大环江阿该域 土堀重金属污染治理工程项目技术示范基地

血虛人，鼻同fll 研見员

軽材艰工大字

中SI科学険亚憶带衣业生杏研究所 华肩衣业大学

中国科琴隱注；5耳；境侨究中右 广药自歯毎眛境监損I中心站

图3广西环江县大环江流域土壤重金属污染治理

工程项目示范基地

Figure 3 Pollution control project demonstration base for soil contaminated by heavy metals in Huanjiang county, Guangxi



图 4 广西环江县重金属污染水稻田的钝化剂施用示范地

Figure 4 A demonstration plot for application of passivating agent in paddy field contaminated by heavy metals in Huanjiang county, Guangxi



图 5 广西环江县重金属污染甘蔗地的钝化剂施用示范地 Figure 5 A demonstration plot for application of passivating agent in sugarcane field contaminated by heavy metals in

Huanjiang county, Guangxi

1. 。我们的结果表明，重金属污染农田土壤中添加赤 泥、骨炭、海泡石和石灰等改良剂可显著地降低 Cd、

As向稻谷和甘蔗中迁移和积累，减少重金属对人体 健康的危害。

5 研究展望

近年来我国已经发生多起重大的重金属污染事 件，严重威胁人民群众的生命健康。土壤重金属污染 与农产品安全息息相关，并通过土气、土水界面与大 气环境和水环境相关联。开展土壤重金属污染的修复 技术研究，对于促进农产品质量安全，保障广大人民 群众的生命健康具有重大意义。重金属污染土壤的修 复技术主要包括物理/化学技术、生物技术、农业生态 技术。重金属污染土壤修复工程实践经过多年的发 展，取得了长足的进步。但是，由于土壤重金属污染问 题的严重性和复杂性，污染土壤修复的效果离人们的 期望值相差还比较远。因此，今后还需要继续研发高 效的、低成本的、实用的土壤修复技术，尤其要把这些 技术应用到大田生产实践中进行验证、推广。在一些 重金属低污染的农田中，研发修复技术时还要兼顾不 改变当地的种植习惯，尽量在治理重金属污染土壤时 不显著影响粮食的生产，从而充分调动农民参与治理 的积极性。

参考文献：

1. 陈怀满.环境土壤学[M].北京：科学出版社,2005.

CHEN H M. Environment pedology[M]. Beijing：Science Press, 2005.

1. 刘春早, 黄益宗, 雷 鸣, 等. 湘江流域土壤重金属污染及其生态环 境风险评价[J]・环境科学,2012,33 （1 ：263-268.

LIU C Z, HUANG Y Z, LEI M, et al. Soil contamination and assessment of heavy metals of Xiangjiang river basin [ J ] . Environmental Science , 2012, 33(1 ：263-268.

1. 刘春早，黄益宗，雷 鸣,等•重金属污染评价方法(TCLP评价资江 流域土壤重金属生态风险[J].环境化学,2011,30 (9 ： 1582-1589.

LIU C Z, HUANG Y Z, LEI M, et al. Assessment of ecological risks of heavy metal contaminated soils in the Zijiang river region by toxicity characteristic leaching procedure[J]. Environmental Chemistry , 2011 , 30(9 ：1582-1589.

1. 梁彦秋,潘 伟,刘婷婷,等.沈阳张士污灌区土壤重金属元素形态 分析[J]・环境科学与管理,2006, 31 ：43-45.

LIANG Y Q, PAN W, LIU T T, et al. Speciation of heavy metals in soil from Zhangshi soil of Shenyang contaminated by industrial wastewater [J]. Environmental Science and Management, 2006, 31： 43-45.

1. 朱桂芬, 张春燕, 王建玲, 等. 新乡市寺庄顶污灌区土壤及小麦重金 属污染特征的研究J].农业环境科学学报,2009, 28：263-268.

ZHU G F, ZHANG C Y, WANG J L, et al. Investigation of heavy metal pollution in soil and wheat grains in sewage - irrigated area in Sizhuangding Xinxiang city[J]. Journal of Agro-Environment Science , 2009, 28： 263-268.

1. Udovic M, Lestan D. Fractionation and bioavailability of Cu in soil re－ mediated by EDTA leaching and processed by earthworms(Lumbricus terrestris L. [J]. Environ Sci Pollut Res, 2010, 17 (3 ：561-570.
2. Pociecha M, Lestan D. Using electrocoagulation for metal and chelant separation from washing solution after EDTA leaching of Pb, Zn and Cd contaminated soil[J]. J Hazard Mater, 2010, 174(1-3 ： 670-678.
3. Kunkel A M, Seibert J J, Elliott L J, et al. Remediation of elemental mercury using in situ thermal desorption(ISTD [J]. Environ Sci Tech－ nol, 2006, 40(7 ： 2384-2389.
4. Navarro A, Canadas I, Martinez D, et al. Application of solar thermal desorption to remediation of mercury-contaminated soils[J]. Soil Energy, 2009, 83(8 ：1405-1414.
5. 胡宏韬•铜污染土壤电动修复研究[J].环境工程学报,2009,3 (11 : 2091-2094.

HU H T. Experimental study on electrokinetic remediation of copper contaminated soil[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering , 2009, 3(11 ： 2091-2094.

1. Buchireddy P R, Bricka R M, Gent D B. Electrokinetic remediation of wood preservative contaminated soil containing copper, chromium, and arsenic[J]. J Hazard Mater, 2009, 162(1 ： 490-497.
2. 方一丰，郑余阳，唐 娜，等.EDTA强化电动修复土壤铅污染[J]. 农业环境科学学报,2008,27(2 ：612-616.

FANG Y F, ZHANG Y Y, TANG N, et al. EDTA enhenced electrore － mediation of lead-contaminated soil[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2008, 27(2 ：612-616.

1. Kumpiene J, Lagerkvist A, Maurice C. Stabilization of As, Cr, Cu, Pb and Zn in soil using amendments： A review[J]. Waste Management, 2008, 28(1 ： 215-225.
2. 高卫国,黄益宗,孙晋伟,等.赤泥和堆肥对土壤锌形态转化的影响 [J].农业环境科学学报,2008, 27(3 ：879-883.

GAO W G, HUANG Y Z, SUN J W, et al. Effects of compost and red mud on the transformation of Zn speciation in soil[J]. Journal of Agro-

Environment Science, 2008, 27(3 ： 879-883.

1. Hao X W, Huang Y Z, Cui Y S. Effect of bone char addition on the fractionation and bio-accessibility of Pb and Zn in combined contami － nated soil[J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(2 ： 118-122.
2. 郝晓伟，黄益宗,崔岩山，等•赤泥和骨炭对污染土壤As化学形态 及其生物可给性的影响[J].环境化学,2010, 29(3 ：383-387.

HAO X W, HUANG Y Z, CUI Y S, et al. Effects of red mud and bone char addition on fractionation and bio -accessibility of arsenic in con － taminated soil[J]. Environmental Chemistry, 2010, 29(3 ： 383-387.

1. Huang Y Z, Hao X W. Effect of red mud addition on the fractionation and bio-accessibility of Pb, Zn and As in combined contaminated soil [J]. Chemistry and Ecology, 2012, 28(1 ： 37-48.
2. Zheng R L, Cai C, Liang J H, et al. The effects of biochars from rice residue on the formation of iron plaque and the accumulation of Cd, Zn, Pb, As in rice(Oryza sativa L. seedlings [J]. Chemosphere, 2012, 89 (7 ： 856-862.
3. 郝汉舟,陈同斌,靳孟贵,等.重金属污染土壤稳定/固化修复技术 研究进展[J].应用生态学报,2011, 22(3 ： 816-824.

HAO H Z, CHEN T B, JIN M G. Recent advance in solidification/stabi－ lization technology for the remediation of heavy metals -contaminated soil[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22(3 ： 816-824.

1. Feng R, Wei C, Tu S, et al. Effects of Se on the uptake of essential ele－ ments in Pteris vittata L. [J]. Plant and Soil, 2009, 325 (1 -2, Sp. Iss. SI ：123-132.
2. 周启星，吴燕玉，熊先哲•重金属Cd-Zn对水稻的复合污染和生态 效应[J].应用生态学报,1994,5(4)：38-441.

ZHOU Q X, WU Y Y, XIONG X Z. Compound pollution of Cd and Zn and its ecological effect on rice plant[J]. Chinese Journal of Applied E－ cology, 1994, 5(4 ：438-441.

1. Chen T B, Wei C Y, Huang Z C, et al. Arsenic hyperaccumulator Pteris vittata L. and its arsenic accumulation[J]. Chin Sci Bull, 2002, 47(11 ： 902-905.
2. 韦朝阳,陈同斌,黄泽春,等.大叶井口边草———一种新发现的富 集砷的植物[J].生态学报,2002, 22(5 ：777-778.

WEI C Y, CHEN T B, HUANG Z C, et al. Cretan Brake (Pteris cretica L. ： An arsenic-accumulating plant[J]. Acta Ecologica Sinica, 2002, 22 (5 ： 777-778.

1. Zhang X, Xia H, Li Z, et al. Potential of four forage grasses in remedia － tion of Cd and Zn contaminated soils[J]. Bioresour Technol, 2010, 101 (6 ： 2063-2066.
2. Marques A, Oliveira R, Samardjieva K, et al. EDDS and EDTA -en－ hanced zinc accumulation by solanum nigrum inoculated with arbus － cular mycorrhizal fungi grown in contaminated soil[J]. Chemosphere, 2008, 70(6 ：1002-1014.
3. Vangronsveld J, Herzig R, Weyens N, et al. Phytoremediation of con － taminated soils and groundwater ： Lessons from the field[J]. Environ－ mental Science and Pollution Research, 2009, 16： 765-794.
4. Mendez M, Maier R. Phytostabilization of mine tailings in arid and semiarid environments:An emerging remediation technology [J]. Envi － ronmental Health Perspectives, 2008, 116： 278-283.
5. Zhang X, Xia H, Li Z, et al. Potential of four forage grasses in remedia － tion of Cd and Zn contaminated soils [J]. Bioresource Technology , 2010b, 101： 2063-2066.
6. Banuelos G, Cardon G, Mackey B, et al. Boron and selenium removal in boron-laden soils by four sprinkler irrigated plant species[J]. Journal of Environmental Quality , 1993, 22： 786-792.
7. Banuelos G, Ajwa H, Mackey B, et al. Evaluation of different plant species used for phytoremediation of high soil selenium [ J ] . Journal of Environmental Quality , 1997, 26： 639-646.
8. Meagher R. Phytoremediation of toxic elemental and organic pollutants [J]. Current Opinion in Plant Biology , 2000, 3： 53-162.
9. Marques A, Rangel A, Castro P M L. Remediation of heavy metal con **－** taminated soils： phytoremediation as a potentially promising clean -up technology[J]. Critical Reviews in Environmental Science and Technol － ogy, 2009, 39： 622-654.
10. Tiwari S, Kumari B, Singh S. Evaluation of metal mobility/immobility in fly ash induced by bacterial strains isolated from the rhizospheric zone of Typha latifolia growing on fly ash dumps[J]. Bioresource Technology, 2008, 99： 305-1310.
11. 王瑞兴, 钱春香, 吴 淼, 等. 微生物矿化固结土壤中重金属研究 [J]. 功能材料, 2007, 38： 523-1526.

WANG Rui -xing, QIAN Chun -xiang, WU Miao, et al. Study on heavy metals in soil mineralized by bacteria[J]. Journal of Functional Materi － als, 2007, 38： 523-1526.

1. Heggo A, Angle J, Chaney R. Effects of vesicular -arbuscular mycor **－** rhizal fungi on heavy metal uptake by soybeans[J]. Soil Biology and Bio － chemistry, 1990, 22： 865-869.
2. Tseng C C, Wang J Y, Yang L. Accumulation of copper, lead, and zinc by in situ plants inoculated with AM fungi in multicontaminated soil[J]. Commun Soil Sci Plant Anal , 2009, 40(21-22)： 3367-3386.
3. 徐明岗,刘 平,宋正国, 等.施肥对污染土壤中重金属行为影响的 研究进展[J].农业环境科学学报,2006, 25 (1 ：328-333.

XU M G, LIU P, SONG Z G, et al. Progress in fertilization on behavior of heavy metals in contaminated soils[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2006, 25(1 ： 328-333.

1. Madej**6**n P, P**e**rez -de -Mora A, Burgos P, et al. Do amended, polluted soils require re-treatment for sustainable risk reduction?Evidence from field experiments[J]. Geoderma, 2010, 159： 174-181.
2. Winterhalder K. Environmental degradation and rehabilitation of the landscape around Sudbury, a major mining and smelting area[J]. Envi－ ron Rev, 1996, 4(3 ： 185-224.
3. Schnoor J L. Emerging chemical contaminants[J]. Environmental Sci－ ence and Technology, 2003, 37(21 ： 375-388.
4. Glass D J. Economic potential of phytoremediation//Phytoremedation of Toxic Matels： Using Plants to Clean-up the Environment[M]. New York： John Willey & Sons, 2000： 15-31.
5. Chen T B, Fan Z L, Lei M, et al. Effect of phosphorus on arsenic accu**－**

mulation in As -hyperaccumulator Pteris vittata L. and its implication

[J]. Chinese Science Bulletin, 2002a, 47(22 ： 1876-1879.

1. 廖晓勇,陈同斌,阎秀兰,等.提高植物修复效率的技术途径与强化

措施[J].环境科学学报,2007, 27 (6 ：81-893.

LIAO X Y, CHEN T B, YAN X L, et al. Enhancement of heavy metal removal in phytoremediation of soils contaminated with heavy metals[J].

Acta Scientiae Circumstantiae, 2007, 27(6 ： 881-893.

1. 郭晓方, 卫泽斌, 谢方文, 等. 过磷酸钙与石灰混施对污染农田低累 积玉米生长和重金属含量的影响[J].环境工程学报,2012, 6 (4 : 1374-1380.

GUO X F, WEI Z B, XIE F W, et al. Effect of lime and superphosphate on maize production and heavy metals uptake by low -accumulating maize[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2012, 6(4 ： 1374-1380.

1. 黑 亮，吴启堂,龙新宪，等•东南景天和玉米套种对Zn污染污泥 的处理效应[J].环境科学，2007, 28 (4 ：852-858.

HEI L, WU Q T, LONG X X, et al. Effect of Co-planting of Sedum al－ fredii and Zea mays on Zn -contaminated sewage sludge[J]. Environ－ mental Science, 2007, 28(4 ： 852-858.

1. 郭晓方, 卫泽斌, 周健利, 等. 废料碳酸钙对低累积作物玉米吸收重 金属的影响：田间实例研究J]. 土壤学报,2010,47⑤：88-895.

Guo X F, Wei Z B, Zhou J L, et al. Effect of waste -CaCO 3 on heavy metals uptake of low-accumulating maize： Field study[J]. Acta Pedolog－ ica Sinica, 2010, 47(5 ： 888-895.

1. 王凯荣，龚惠群•苎麻对土壤Cd的吸收及其生物净化效应[J].环 境科学学报,1998,18(5 ：510-516.

WANG K R, GONG H Q. Absorption and the effect of cleaning up of ramie(B. nivea(L . gaud on soil cadmium[J]. Acta Scientiae Circum－ stantiae, 1998, 18(5 ： 510-516.

1. 佘 玮, 揭雨成, 邢虎成, 等. 湖南冷水江锑矿区苎麻对重金属的吸 收和富集特性[J].农业环境科学学报,2010, 29 (1) ：91-96.

SHE W, JIE Y C, XING H C, et al. Uptake and accumulation of heavy metal by ramie(Boehmeria nivea growing on antimony mining area in Lengshuijiang City of Hunan Province[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2010, 29(1 ： 91-96.

1. 仇荣亮, 仇 浩, 雷 梅, 等. 矿山及周边地区多金属污染土壤修复 研究进展[J].农业环境科学学报,2009, 28 (6 ： 1085-1091.

QIU R L, QIU H, LEI M, et al. Advances in research on remediation of multi-metal contaminated soil in mine and surrounding area[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2009, 28(6 ： 1085-1091.

1. 郑瑞伦•生物炭对污染/退化土壤的修复研究[R].中国科学院生态 环境研究中心博士后出站报告, 2012.

ZHENG R L. Application of biochar in pollution and degradation soil [R]. Postdoctoral Report of Research Center for Eco -Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, 2012.