第**36**卷第**12M**期 **Vol.36 No.12M**

**2013** 年 **12** 月 **Environmental Science & Technology Dec. 2013**

李秀悌，顾圣啸，郑文杰，等.重金属污染土壤修复技术研究进展**［J］.**环境科学与技术，**2013,36 （12M） ：03-208. Li X iu-ti, Gu Sheng-xiao, Zheng Wen-jie,,et al. Rremediation technologiesofsoilcontaminatedby heavymetals: areview［J］. EnvironmentalScience&Technology，2013，36（12M） ：203-208.**

重金属污染土壤修复技术研究进展

李秀悌 1， 顾圣啸 1， 郑文杰 1， 姚志通 2\*

（1. 浙江自然博物馆，浙江 杭州 310014； 2. 杭州电子科技大学材料与环境工程学院，浙江 杭州 310018）

摘 要：随着工业化和城市化的加快，我国面临的土壤环境安全问题日益严峻。文章在分析当前土壤污染现状基础上，重点介绍了重 金属污染土壤的修复技术，包括物理修复、化学修复和生物修复法等，并对各种修复方法的基本原理、主要优缺点及其发展趋势进行了概 述，为国内这一领域的工作开展提供借鉴参考。

关键词：污染土壤； 重金属； 修复技术； 环境安全

中图分类号：X53 文献标志码:A doi: 10.3969/j.issn.1003-6504.2013.12M.041 文章编号：1003—6504（2013）12M—0203—06

Remediation Technologies of Soil Contaminated by Heavy Metals:A Review

LI Xiu—ti1, GU Sheng—xiao1, ZHENG Wen—jie1, YAO Zhi—tong2\*

(1. Zhejiang Museum of Natrual History, Hangzhou 310014, China;

2. Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China)

**Abstract**：The environmental safety of soil has become severe in China with the boost of industrialization and urbanization. In this work, on the basis of investigating the status of soil contaminated in China, the remediation technologies, including physical remediation, chemical remediation and biological remediation were focused. The remediation principles, strong and drawback, developing trend were reviewed in order to supply reference to the study in this field.

**Key words**：Contaminated soil; heavy metals; remediation technology; environmental safety

《环境科学与技术》编辑部：（网址） **http//fjks.ch inajournaLnetcn** （电话）**027-87643502** （电子信箱 **hjkxyjs@ 126.com** 收稿日期：2013—05—20；修回 2013—08—15

基金项目：浙江省自然科学基金1Q13B070005

作者简介:李秀悌（1984-）, 女,馆员，博士，开究方向为岩石矿物，电话）0571-88212936 （电子信箱）leetiti@163.com。

土壤是人类赖以生存和发展的重要物质基础，但 是随着工业化、城市化的快速推进，我国面临的土壤 环境安全问题日益严峻。据不完全统计，目前全国受 污染耕地约0.1亿hm2，污水灌溉污染耕地216.7 hm2,固体废弃物堆存占地和毁田13.33万hm2,合计 约占耕地总面积的 1/10 以上。由于各种工业废水、废 气、畜禽粪便、化肥农药、污水灌溉和污泥农用等均成 为土壤重金属的污染源［1］,土壤重金属污染日益成为 污染面广、危害严重的环境问题之一。2000 年中国环 境状况公报显示［2］,对 30 万 hm2 基本农田保护区土壤 有害重金属抽样监测,其中 3.6 万 hm2 土壤重金属超 标,超标率达 12.1%。2009 年中国食品安全高层论坛 报告数据表明,我国 1/6 耕地受重金属污染,污染土壤 面积至少2 000万hm2。因重金属造成的水体和土壤 污染已对我国的生态环境、食品安全和农业可持续发 展构成严重威胁。

土壤重金属污染具有隐蔽性、积累性、不可逆性

和长期性,对土壤重金属污染的防治不仅要控制污染 源,还要加强污染土壤的修复［3］。 欧美国家已投入大量 人力物力进行污染土壤的修复［4］。 1980 年美国国会通 过了综合环境响应、补偿和义务法（CERCLA）,即超基 金计划,以保护人类身体健康和最大限度地修复由于 危险废物失控所造成的环境污染；同时有许多法律法 规，如资源保护与恢复法（RCRA）、超基金修订和补充 法案（SARA）等从各方面强调了土壤修复方面的行为 准则。1982—2002 财政年度,美国超级基金已修复的场 地土壤达到约 1 835 万 m3。 英国也于 1990 年通过了 环境保护法（Environmental Protection Act，其中第二 部分中明确规定应遵循污染者责任原则，即任何把污 染物排放到土壤表面和地下的个人和单位，都有修复 土地并支付费用的责任和义务。 此外，英国还发布了 《英国指导潜在污染土地恢复手册》将化工、煤焦化、 木材加工等企业和机构的所在地列为潜在污染场地。 与欧美等发达国家相比，我国在污染土壤修复方面的

研究与投入还远远不够。

土壤修复技术是一项涵盖环境、化学、材料、生物 和地质等多学科的综合技术。土壤修复技术种类繁 多，根据采用方法和原理的不同，可分为物理修复法、 化学修复法和生物修复法［5］等。根据修复实施场址的 不同，又可分为原位修复和异位修复。重金属污染土 壤修复的原理可概括为两类：一是改变重金属在土壤 中的存在形态，使其固定从而降低其在环境中的迁移 和生物可利用性；二是将重金属从土壤中去除，使其 存留浓度接近或达到背景值［6-7］。

1. 物理修复
   1. 换土法

换土法即是用清洁土壤替换或部分替换污染上 壤，以稀释污染物浓度，增加土壤环境容量，从而达到 修复土壤的目的［4,8］。换土法又细分为换土、翻土和客 土 3 种 。（1）换土是将污染土壤取走，换入新土 。该法 适用于小面积污染土壤的治理，同时对替换出的土壤 应妥善处理，防止二次污染。（2）翻土即是深翻土壤， 使聚集在土壤表层的污染物分散到深层，达到稀释和 自然降解的目的。台湾曾采用表层30 cm受污染土壤 与下层30~150 cm的土壤加以混合，即以5倍稀释的 方法对桃圆县中福地区镉、铅污染土壤进行修复。通 过稀释，原来中低污染浓度的镉（1~5 mg/kg和铅（40~ 200 mg/kg可稀释至标准以下（其中Cd<1 mg/kg, Pb< 40 mg/kg。通过连续4期水稻试种，稻米中镉的含量 均符合卫生安全标准，可恢复为农地使用。（3 客土是 向污染土壤中加入大量清洁土壤，覆盖在污染土壤表 层或混匀，使污染物浓度降低。 加入的清洁土壤应尽 量选择粘重或有机质含量较高的土壤，以增加土壤环 境容量，增强土壤自净能力。 换土法能有效地将污染 土壤与生态系统隔离，从而减少对环境的影响，但是 该方法工程量较大，费用较高，适于小面积、严重污染 土壤［3］。

* 1. 热 脱 附 法

热脱附是利用污染物的热挥发性，采用蒸汽、微 波、红外辐射等加热方法将污染土壤加热，使土壤中 的挥发性污染物如Hg、As等挥发，同时利用系统的 真空负压或者载气将挥发态重金属收集，从而达到去 除土壤中重金属的目的［9］。 根据温度的不同，传统热脱 附可分为高温（320~560 °C 和低温脱附（90~320 °C 。 以热脱附为基础的热处理技术，通常包括土壤预处 理、旋转炉热处理及出口气体处理等3个阶段。 热脱 附处理工艺简单，可运用现有成熟技术，具有设备可 移动性、修复后土壤可再利用等优点。 美国一家汞回 收服务公司已成功将该技术应用于现场治理，并开展 了商业化服务。 到目前为止，此项技术已成功处理了 2 300多t被汞污染土壤，修复后土壤中汞含量达到 了背景值«1 mg/kg。从2002-2005财政年度,美国超 级基金中有 1%的污染源控制处理工程采取了热脱附 技术。 但是诸如相关设备价格昂贵、脱附时间过长等 问题尚未得到很好解决，限制了热脱附技术在污染土 壤修复中的应用［10］。

1. 化学修复
   1. 化学淋洗

化学淋洗是利用清水、化学试剂或其它可能把污 染物从土壤中淋洗出来的流体，甚至是气体［11-12］冲洗 土壤，通过离子交换、沉淀、吸附或螯合等作用把土壤 中的重金属转移至液相，然后对淋洗液进一步处理回 收重金属，淋洗液可循环利用。 化学淋洗的主要技术 手段在于向污染土壤中注入溶剂或化学助剂，因此提 高污染土壤中污染物的溶解性和在液相中的可迁移 性是实施该技术的关键。 目前所用的淋洗剂主要包括 无机淋洗剂、螯合剂和表面活性剂等。 Tokunage 等［13］ 考察了 HF、H3PO4、H2SO4 等多种无机酸对模拟高浓度 砷（2 830 mg/kg 污染土壤的清洗效果。 研究发现，采 用 9.4%的 H3PO4 清洗 6 h 后， As 去除率达到 99.9%； 采用浓度低于10%的H2SO4也可获得高于80%的去 除率*。*Alam等网利用磷酸钾和磷酸钠清洗污染土壤中 的砷，研究发现钾盐较钠盐更为有效，最佳的清洗条 件为:磷酸钾浓度300 mmol/L，温度40 °C，pH 6.0。淋 洗剂中，EDTA能在较宽pH范围内与大多数重金属 形成稳定复合物，不但能溶解不溶性的重金属化合 物，还可解吸被土壤吸附的重金属，是一种有效的淋 洗剂。刘云国等［15］研究发现,EDTA对Pb、Cd的萃取 率最高可达 79.74%和 59.62%，酸性过强的土壤易使 EDTA发生质子化，从而降低其萃取能力。另外值得 注意的是，由于土壤中可能同时存在多种污染物，单 独使用一种清洗剂往往去除效果不理想，这就需要联 合使用或依次使用多种清洗剂。Lee等冋采用0.2 mol/L 柠檬酸清洗含砷河流底砂，清洗1 h后,As去除率大 于95%；当混合0.2 mol/L的KH2PO4清洗时,As去除 率提升至 100%。 Abumaizar 等［17］研究表明，将 0.01 mol/L 的 Na2-EDTA 和 0.1 mol/L Na2S2O5 混合使用， 对土壤中的铅、 锌，尤其是锌的去除率有显著提高。 Ehsan等冋研究显示，采用10%（W/V）的环糊精结合少 量EDTA可提高污染土壤中大部分重金属的提取率。 但类似EDTA的螯合剂不但价格昂贵,而且生物降解 性较差。 为提高清洗土壤中残留清洗液的生物降解 性，降低土壤二次污染风险，近年来出现了采用生物 试剂进行重金属的淋洗。 Kos 等［19］采用生物可降解螯 合剂乙二胺二琥珀酸（EDDS处理高浓度铅（1 350 mg/kg污染土壤。Hong等㈣利用皂角苷清洗3种不 同土壤中的重金属，其中对Cd、Zn的去除率分别为 90%~100%和 85%~98%。 李光德等［21］研究了茶皂素对 污染土壤中重金属的去除作用，结果表明:采用质量 分数7%的茶皂素溶液作淋洗液,Pb、Cd、Zn和Cu的 去除率分别为 6.74%、42.38%、13.07%、8.75%。 茶皂素 淋洗能有效去除酸溶态和可还原态重金属，大大降低 重金属的环境风险。

* 1. 化学固定

化学固定是在污染土壤中加入化学试剂或化学 材料，并利用它们与重金属之间形成不溶性或移动性 差、 毒性小的物质来降低其在土壤中的生物有效性， 减少其向水体、植物及其它环境介质的迁移，实现污 染土壤的修复［3］。 目前使用的改良材料包括有黏土矿物、 多种金属氧化物、有机质、生物材料等。Hodson等㈣利 用主要化学成分为Caio（PO4）6OH2的骨粉对土壤中的铅、 锌进行固定。 研究结果表明，土壤中的铅、锌与磷发生 化学键合作用；培养后土壤pH明显升高，使用0.01 mol/L CaCb和二乙烯三胺五乙酸（DTPA提取重金 属的有效态量明显减少。 廖立兵等［23］以海泡石、膨润 土和生石灰为改良材料，对湖南株洲地区重金属元素 Cd、Pb污染农田土壤进行了室内修复实验。与未修复 土壤进行对比，小白菜中Cd含量降低61%, Pb含量 降低46%。 研究认为，改性材料通过孔道吸附、表面吸 附和层间阳离子的交换作用吸附Cd、Pb,以及通过提 高土壤pH,使Cd、Pb发生沉淀或共沉淀，降低其生物 有效性和迁移性的途径对土壤进行修复。 律琳琳等［24］ 研究了钠基膨润土、膨润土、沸石和硅藻土对模拟Cd 的污染土壤的改良效果。 结果表明，矿物材料添加量 分别为20、30、50、40 g/kg时，土壤有效态Cd含量较 对照组分别降低了 21.40% 、27.63% 、27.24% 和 32.30%。范迪富等［25］利用凹凸棒石粘土对八卦洲Cd 含量超标的土壤进行了修复研究。 结果表明，施加适 量的凹凸棒石能使芦蒿中Cd含量降低46%,并且土 质及农产品的产量均未受到不良影响。 张丽洁等［26］研 究了糠醛渣、磷矿粉、风化煤3 种修复剂对重金属复 合污染土壤的化学固定效果。结果表明，3种修复剂都 可在一定程度上降低复合污染土壤中的Cu、Zn、Pb、 Cd含量，其中以风化煤降低土壤有效态Zn、Cu的效 果较好，磷矿粉处理修复Pb的效果最好,3种修复剂 对重金属复合污染土壤的修复效果以Cd较好,Zn次 之，对 Pb 的修复效果较差。 化学固定为低浓度污染土 壤的修复提供了可能，但固定在土壤中的重金属可能 随环境条件的改变，生物有效性也发生变化［27］。 另外， 修复剂的使用将在一定程度上改变土壤结构，同时对 土壤微生物也可能产生一定的影响。

* 1. 电动修复

电动修复是一种新型土壤修复技术［28］，主要是通 过在污染土壤两侧施加电压形成电场梯度，污染物通 过电迁移、 电渗流或电泳途径被带到两极处理室中， 并通过进一步处理从而实现污染土壤的修复［29-30］。 该 技术适于低渗透性土壤，具有易安装、易操作、成本较 低等优点［31-32］，且不破坏原有自然环境［33-35］，从而实现 在环境修复的同时，最大限度地保护原有生态环境［36］。 但是直接的原位电动修复不能很好地控制土壤体系 pH,处理效率往往较低。经改进,主要有采用阴阳极施 加缓冲液控制pH,利用离子交换膜控制土壤体系 pH,施加络合剂加强迁移，阴阳极液混合中和控制pH 和极性切换控制pH等网。另外还有与其它方法联用 去除重金属，如电动力和铁PRB技术联合修复倒、电 动-氧化还原联合处理法［39］、电动-生物联合修复［40］等。

* 1. 玻璃化技术

玻璃化技术是将污染土壤在1 400~2 000 高温 下熔化，在熔融过程中有机物挥发或被分解，产生的 水蒸气和热解产物收集后由尾气处理系统处理后排 放。 熔化物冷却后形成岩石状玻璃体将重金属等无机 污染物包裹，使其失去迁移性。AMEC环境与工程服 务公司称，这种玻璃体的强度比混凝土高 10倍。 异位 进行玻璃化处理时，可采用多种方式提供热能，包括 化石燃料燃烧或以电极直接加热等方式，再以电弧、 电浆及微波方式导热。 原位处理时，可将电极棒以等 距离矩阵插入待处理区域的土壤中加热。 该技术能从 根本上消除重金属污染，见效快，但相对比较复杂，实 际应用过程中会出现难以达到统一的熔化及地下水 渗透等问题；此外，熔化过程需消耗大量能量维持高 温过程，导致成本高，应用受到限制［41］。

1. 生物修复
   1. 植物修复

植物修复是利用植物对土壤中的污染物进行固 定、吸收，以清除土壤环境中的污染物或使其有害性 得以降低或消失。 植物稳定、植物挥发和植物提取是 植物修复的 3种主要类型［42］。

* + 1. 植物稳定

植物通过根部吸收、 沉淀或还原将重金属固定， 降低土壤中重金属的移动性和生物可利用性，并防止 其进入地下水和食物链［43］。 植物稳定修复的作用之一 是通过根部积累、 沉淀或根表吸收来固定重金属,如 植物可通过分泌磷酸盐与铅结合成难溶的磷酸铅,使 铅固化而降低铅的毒性；二是保护污染土壤不受风 蚀、水蚀,减少重金属污染地下水和向四周迁移。 这类 植物一般具有两个特征：一是能在高浓度重金属污染 土壤生长；二是根系发达、分泌物能够固定重金属。 植 物稳定只是暂时将重金属固定,当土壤环境条件发生 变化时重金属的生物可利用性可能会发生改变。

* + 1. 植物挥发

利用植物根系分泌的一些特殊物质使土壤中重 金属转化为可挥发态,或者植物将重金属吸收后将其 转化为气态物质释放到大气中,从而达到净化土壤的 目的［44］。 目前研究较多的是重金属 Hg。 有研究利用植 物挥发去除环境中的汞,即将细菌体内的汞还原酶基 因转入芥子科 Arabidopsis 植物中,这一基因在该植物 体内表达,将植物从环境中吸收的汞还原为单质汞, 使其转变为气体挥发［45］。 这一方法适用于挥发性污染 物,应用范围很小,并且将污染物转移到大气中对人 类和生物有一定的风险,因此应用受到限制［46］。

* + 1. 植物吸收

利用耐受并能积累重金属的植物吸收土壤环境 中的金属,并将其转移、贮存在植物体的地上部分。 研 究不同植物对重金属的吸收特性,筛选出超量积累植 物是该技术的关键。 根据美国能源部规定,筛选超富 集植物应具有如下几个特性：(1)在污染物浓度较低时 也具有较高的积累效率；(2)能在体内积累高浓度的污 染物；(3)能同时积累多种重金属；(4)生长快、生物量 大；(5)具有抗病虫能力［46］。 王新等［47］研究了紫花苜蓿 对重金属污染土壤修复的能力,结果表明：紫花苜蓿 对重金属吸收系数大小依次为 Cd>Zn>Cu>Pb。 紫花 苜蓿对 Cd 污染土壤具有一定的修复能力。 杨胜香［48］ 在 Mn、Pb、Cd、Cu 等重金属严重污染的八一矿区研究 发现，大叶桉*(Eucalyptus robusta* 和细叶桉*(Eucalyp­tus tereticorniS*在当地生长良好且对Mn有较好的富 集作用,树体中 Cr、Cd 含量均较高,远远超过正常值 物含量上限。 Turan 等［49］研究了不同 EDTA 添加量(0、 3、6、12 mmol/kg)对加拿大双低黄籽油菜(*Brassica napus* L.)和印度芥菜型油菜*(Brassica juncea* L.)对污 染土壤中 Cd、Cu、Pb 和 Zn 提取效果的影响,结果表 明：添加 EDTA 可以增加重金属的生物有效性和植物 吸收量,加拿大双低黄籽油菜对重金属的提取效果较 好。

3.2 微生物修复

微生物虽不能降解和破坏重金属,但可通过改变 其物化特性而影响重金属在环境中的迁移与转化。 微 生物修复的机理包括胞外络合、沉淀、氧化还原反应 和胞内积累等。Bosecker画研究利用微生物淋洗来清 除土壤中的重金属。 菌根作为直接连接植物根系和土 壤的微生物,菌根真菌能改变植物对重金属的吸收和 转移。 Khan 等［51］探讨了植物、菌根和植物螯合肽对土 壤重金属去除的影响,其中生物转化是微生物降低土 壤重金属典型的重要机理。 Sriprang 等［52］研究了豆科 植物和基因工程根瘤菌共生体对重金属污染土壤的 修复,结果发现共生体对 Cd 的吸收明显增加,而对 Cu 的吸收增加不明显。 Abalel-Aziz 等［53］指出,在施用 污泥的土壤中,接种菌根能显著增加植物的生长、根 瘤数和重量,提高植物体内 N、P、Zn、Mn、Cu 等的含 量，降低土壤的重金属质量分数。J ones等网研究发现， 当以 1、10、100 mg/kg Cd 加入土壤中时,菌根化植物 吸收 Cd 的量比非菌根化植物分别高90%、127%和 131%。 很明显,菌根化植物对重金属有很强的吸收能 力。Noyd等［55］把菌根真菌根内球囊霉(*Glomusin- traradices*)和近明球囊霉(*Glomusclaroideum* )接种到牧 草上,成功地恢复了矿渣地的植被,达到了修复和复 垦的目的。

堆肥主要是通过高度腐殖质化的有机质和丰富 的微生物与重金属产生一系列氧化还原、吸附和沉淀 作用达到原位修复重金属污染土壤的目的。 黄启飞等［56］ 通过模拟土培试验研究了垃圾堆肥对铬污染土壤中 有效铬含量的影响、铬的形态变化,结果表明：垃圾堆 肥可显著减少铬污染土壤中有效铬含量,垃圾堆肥主 要是促进水溶态铬向结晶形沉淀态铬转化。 微生物修 复易受各种环境因素如温度、氧气、水分、H的影响。 微生物修复在具体实践中也有一定的局限性,如某些 微生物只能降解特定类型污染物；微生物/酶制剂可能 带来次生污染问题,并对自然生态过程产生一定影 响；加入到修复现场环境中的微生物可能由于竞争或 难以适应环境而导致作用结果与实验结果有较大出 入。

1. 动物修复 动物修复是利用土壤环境中的某些低等动物(如 蚯蚓 能吸收重金属这一特性,通过习居的动物或投 放高富集动物对土壤重金属进行吸收、 降解或转移, 以去除重金属或抑制其毒性。 动物修复在国外有较长 研究历史,国内研究则处于摸索阶段。 Wang 等［57］研究 表明,在较低 Cu 浓度(100、200、400 mg/kg 污染条件 下,蚯蚓活动、覆草及其相互作用可提高黑麦草对 Cu 的吸收。 寇永纲等［58］通过测定重金属污染土壤中不同 铅浓度梯度下蚯蚓在培养期内对铅富集量的研究发 现,蚯蚓对铅有较强的富集作用,且随铅浓度的增加, 蚯蚓体内的富集量也增加。 伏小勇等[59]研究了微小双 胸蚯蚓*(Bimastus parvuS*对模拟受污土壤中重金属 Cu、Zn、Pb、Hg 的富集，结果表明:蚯蚓对各种重金 属的富集量随着培养时间的增加而变化，且对不同重 金属最大富集量的出现时间也不相同。 与 Cu、Zn、Pb 的富集量相比，蚯蚓对Hg没有明显的富集作用。在其 耐受浓度范围内，蚯蚓对重金属的富集量随着重金属 浓度的增加而增加，且蚯蚓对重金属的吸收顺序为: Zn>Cu>Pb>Hg。2010 年,浙江台州市采用动植物修复 对温岭市废旧金属拆解加工业污染土壤(主要是 Cd、 Cu、Pb 等重金属 开展修复，其中的动物修复法即是 往土壤中投放一种特殊蚯蚓。预计2 a后，该区域土质 可达到农用地土壤质量标准。
2. 小结

目前我国土壤修复技术的研发还处于单一和实 验阶段，缺乏技术集成装备和实际工程化应用。 今后 在污染土壤修复尤其是重金属污染土壤修复方面，需 大力开展污染土壤的风险评估，加强污染土壤修复技 术及其机理的研究，例如采用分子生物学和基因工程 技术培养、筛选超级累植物和高转化微生物，制备、筛 选优良改良材料；同时要不断完善我国土壤环境管理 的法律法规，建立适应国情的土壤修复标准和技术规 范，推动污染土壤修复技术的产业化和市场化发展， 保障人居环境安全和人体健康。

[参考文献]

1. Nicholson F A, Smith S R, Alloway B J, et al. An inventory of heavy metals inputs to agricultural soils in England and Wales [J]. Science of the Total Environment, 2003, 311 (1/2/3): 205­219.
2. 中华人民共和国环境保护部. 2000 年中国环境状况公报 [R/OL] <http://jcs.mep.gov.cn/hjzl/zkgb/2000/.2002/11/25>.
3. 周东美, 郝秀珍, 薛艳, 等. 污染土壤的修复技术研究进展 [J]. 生态环境, 2004, 13(2): 234-242.
4. 钱暑强，刘铮.污染土壤修复技术介绍J].化工进展,2000(4): 10-12, 20.
5. 周启星.污染土壤修复的技术再造与展望J].环境污染治理 技术与设备, 2002, 3(8): 36-40.
6. 丁竹红, 胡忻, 尹大强. 螯合剂在重金属污染土壤修复中应 用研究进展[J].生态环境学报,2009, 18(2): 777-782.
7. 夏星辉，陈静生.土壤重金属污染治理方法研究进展[J].环 境科学, 1997, 18(3): 72-76.
8. 张云峰，盛金聪,陆秋艳.污染土壤修复技术的研究进展[J]. 甘肃农业科技, 2004(10): 36-38.
9. 李杰, 张国宁, 李勇. 持久性有毒物质污染土壤修复技术研 究进展[J].河北环境科学,2010 (S): 65-68.
10. Aresta M, Dibenedetto A, Fragale C, et al. Thermal desorp－ tion of polychlorobiphenyls from contaminated soils and their hydrodechlorination using Pd - and Rh -supported catalysts [J]. Chemosphere, 2008, 70(6): 1052-1058.
11. Tampouris S, Papassiopi N, Paspaliaris I. Removal of con－ taminant metals from fine grained soils, using agglomeration, chloride solutions and pile leaching techniques[J]. Journal of Hazardous Materials, 2001, 84(2/3): 297-319.
12. 欧阳勋，陈家玮，张小岗.超临界CO2流体萃取土壤中污染 物的应用研究进展[J].地质通报,2010, 29(11): 1655-1661.
13. Tokunaga S, Hakuta T. Acid washing and stabilization of an artificial arsenic-contaminated soi[J]. Chemosphere, 2002, 46 (1): 31-38.
14. Alam MG M, Tokunaga S, Maekawa T. Extraction of arsenic in a synthetic arsenic contaminated soil using phosphate [J]. Chemosphere, 2001, 43(8): 1035-1041.
15. 刘云国,黄宝荣,练湘津,等.重金属污染土壤化学萃取修 复技术影响因素分析[J].湖南大学学报：自然科学版,2005, 32(1): 95-98.
16. LeeM, Paik I S, Do W, et al. Soil washing of As-contaminat－ ed stream sediments in the vicinity of an abandoned mine in Korea[J]. Environmental Geochemistry and Health, 2007, 29 (4): 319-329.
17. Abumaizar R J, Smith E H. Heavy metal contaminants re－ moval by soil washing[J]. Journal of Hazardous Materials, 1999, 70(1/2): 71-86.
18. Ehsan S, Prasher S O, Marshall W D. Simultaneous mobiliza－ tion of heavy metals and polychlorinated biphenyl (PCB) compounds from soil with cyclodextrin and EDTA in admix－ ture[J]. Chemosphere, 2007, 68(1): 150-158.
19. Kos B, Domen L. Induced phytoextraction/soil washing of lead using biodegradable chelate and permeable barriers [J]. Environ Sci Technol, 2003, 37: 624-629.
20. Hong K J, Tokunaga S, Kajiuchi T. Evaluation of remediation process with plant-derived biosurfactant for recovery of heavy metals from contaminated soils[J]. Chemosphere,2002, 49(4): 379-387.
21. 李光德,张中文,敬佩,等.茶皂素对潮土重金属污染的淋 洗修复作用[J].农业工程学报,2009, 25(10): 231-235.
22. Hodson M E, Valsami-Jones 魪. Bonemeal additions as a re－ mediation treatment for metal contaminated soil [J] . Environ Sci Technol, 2000, 34(16): 3501-3507.
23. 廖立兵, 姜浩, 何茂乾, 等. 矿物改良剂在重金属污染土壤 修复中的应用[J].矿物学报,2010(S1): 162.
24. 律琳琳，金美玉，李博文，等.4种矿物材料改良Cd污染土 壤的研究[J].河北农业大学学报,2009, 32(1): 1-5.
25. 范迪富, 黄顺生, 廖启林, 等. 不同量剂凹凸棒石粘土对镉 污染菜地的修复实验[J].江苏地质,2007, 31(4): 323-328.
26. 张丽洁, 张瑜, 刘德辉. 土壤重金属复合污染的化学固定修 复研究[J]. 土壤,2009, 41(3): 420-424.
27. Bolan N S, Adriano D C, Duraisamy P, et al. Immobilization and phytoavailability of cadmium in variable charge soils. Ill. Effect of biosolid compost addition[J]. Plant and Soil, 2003,

256(1): 231-241.

1. 罗启仕, 张锡辉, 王慧, 等. 土壤中 2, 4-二氯酚在非均匀电 动力学作用下的迁移[J].环境科学学报,2004, 24(6): 1104- 1109.
2. Acar Y B, Alshawabkeh A N. Principles of electrokinetic re－ mediation[J]. Environmental Science and Technology, 1993, 27: 2638-2647.
3. Swartzbaugh J T, Weisman A, Gabrera-Guzman D. The use of electrokinetics for hazardous waste site remediation [J]. Journal of Air and Waste Management Association, 1990, 40 (12): 1670-1677.
4. Virkutyte J, Sillanpaa M, Latostemaa P. Electrokinetic soil re－ mediation-critical overview[J]. The Science of the Total En－ vironment, 2002, 289(113): 97-121.
5. 徐泉, 黄星发, 程炯佳, 等. 电动力学及其联用技术降解污 染土壤中持久性有机污染物的研究进展[J].环境科学,2006, 27(11): 2363-2368.
6. Alshawabkeh A N, Bricka M. Basics and application of elec－ trokinetics remediation [M]. 〃Wise D L, Trantolo D J, Ci­chon E J, et al. Remediation engineering of contaminated Soils. New York: Marcel Dekker Inc, 2000: 95-111.
7. Page M M, Page C L. Elcetroremediation of contaminated soils[J]. J Environ Eng, 2002, 128(3): 208-219.
8. 张锡辉, 王慧, 罗启仕. 电动力学技术在受污染地下水和土 壤修复中新进展[J].水科学进展,2001, 12(2): 249-255.
9. 罗启仕, 张锡辉, 王慧, 等. 非均匀电动力学修复技术对土 壤性质的影响[J].环境污染治理技术与设备,2004,5(4):40-

45.

1. 王慧, 马建伟, 范向宇, 等. 重金属污染土壤的电动原位修 复技术研究[J].生态环境,2007, 16(1): 223-227.
2. 张瑞华，孙红文.电动力和铁PRB技术联合修复铬(VI)污染 土壤[J].环境科学,2007, 28(5): 1131-1136.
3. Cox C D, Shoesmith M A, Ghosh M M. Electrokinetic reme­diation of mercury-contaminated soil using iodine/iodide lix- iviant[J]. Environmental Science and Technology,1996,30(6): 1933-1938.
4. 俞一统, 田光明, 和苗苗. 两种生物沥滤-电动修复联合技 术的比较[J].环境科学学报,2009, 29(1): 163-168.
5. 付建华.我国土壤修复的研究现状[A]. 2008年中国环境科 学学会学术年会优秀论文集[C]. 2008: 1056-1060.
6. 沈振国，陈怀满.土壤重金属污染生物修复的研究进展[J]. 农村生态环境, 2000, 16(2): 39-44.
7. 王海峰, 赵保卫, 徐瑾, 等. 重金属污染土壤修复技术及其 研究进展[J].环境科学与管理,2009, 34(11): 15-20.
8. Watanabe M E. Phytoremediation on the brink of commer­cialization[J]. Environmental Science & Technology, 1997,31 (4): 182-186.
9. Bizily S P, Rugh C L, Summers A O, et al. Phytoremediation of methylmercury pollution: merB expression in Arabidopsis thaliana confers resistance to organomercurials [J] . Proc Natl Acad Sci USA, 1999, 96(12): 6808-6813.
10. 王建龙，文湘华.现代环境生物技术[M].北京：清华大学出 版社, 2001: 316.
11. 王新, 贾永锋. 紫花苜蓿对土壤重金属富集及污染修复的 潜力[J]. 土壤通报,2009, 40(4): 932-935.
12. 杨胜香. 广西锰矿废弃地重金属污染评价及生态恢复研究 [D]. 南宁: 广西师范大学, 2007.
13. Turan M, EsringuA. Phytoremediation based on canola (Brassica napus L.) and Indian mustard (Brassica juncea L.) planted on spiked soil by aliquot amount of Cd, Cu, Pb, and Zn[J]. Plant Soil Environ, 2007, 53(1): 7-15.
14. Bosecker K. Microbial leaching in environmental clean -up programmes[J]. Hydrometallurgy, 2001, 59(2/3): 245-248.
15. Khan A G, Kuek L, Chaudhry T M, et al. Roles of plants, mycorrhizae and phytochelators in heavy metal contaminated land reclamation[J]. Cehmosphere, 2000, 41(1/2): 197-207.
16. Sriprang R, Hoyashi M, Yamashita M, et al. A novel bioeme­diation system for heavy metals using the symbiosis between leguminous plant and genetically engineering rhizobia [J]. Journal of Biotechnology, 2002, 99(3): 279-293.
17. Abalel -Aziz R A, Radwan S M A, Dahdon M S. Reducing the metals toxicity in sludge amended soil using VA mycor- rhizae[J]. Egypt J Microbiol, 1997, 32(2): 217-234.
18. Jones E J, Leyval C. Uptake of 109Cd by roots and hyphae of a Glomus with high and low concentration of cadmium[J]. New Phytol, 1997, 135(2): 353-360.
19. Noyd R K, Pfleger F L, Norland M R. Field response to added organic matter, arbuscular mycorrhizal fungi, and fertilizer in reclamation of taconite iron ore tailing[J].Plant and Soil,1996, 179: 89-97.
20. 黄启飞, 高定, 丁德蓉, 等. 垃圾堆肥对铬污染土壤的修复 机理研究[J]. 土壤与环境,2001, 10(3): 176-180.
21. Wang D D, Li H X, Hu F, et al. Role of earthworm-straw in­teractions on phytoremediation of Cu contaminated soil by ryegrass[J]. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(4): 1292-1298.
22. 寇永纲, 伏小勇, 侯培强. 蚯蚓对重金属污染土壤中铅的富 集研究[J].环境科学与管理,2008, 33(1): 62-64, 73.
23. 伏小勇, 秦赏, 杨柳, 等. 蚯蚓对土壤中重金属的富集作用 研究[J].农业环境科学学报,2009, 28(1): 78-83.