

# 重金属污染土壤修复技术的选择和面临的问题<sup>①</sup>

## ——以江铜贵冶九牛岗土壤修复示范工程项目为例

周 静<sup>1,2,3</sup>, 崔红标<sup>1,3</sup>, 梁家妮<sup>1</sup>, 徐 磊<sup>1,3</sup>, 祝振球<sup>1,3</sup>, 王兴祥<sup>1</sup>, 崔 键<sup>1</sup>, 尚 健<sup>4</sup>

(1 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008; 2 江西省科学院生物资源研究所, 南昌 330096; 3 中国科学院大学, 北京 100049; 4 宣城市农产品质量安全监管局, 安徽宣城 242000)

**摘 要:** 随着工农业生产和城市化快速推进, 我国工业企业在生产过程中或是搬离城市中心后遗留的污染土壤日趋增多。一批具有高环境风险、影响群众生产、生活乃至社会稳定的污染土地亟待修复治理。本文结合“江铜贵冶九牛岗土壤修复示范项目”, 从污染土壤修复技术的选择和面临的主要问题两个方面进行了探讨, 最后针对中国国情, 对规模化修复治理重金属污染土壤技术的发展趋势提出了展望。

**关键词:** 重金属; 污染土壤; 修复技术; 融资机制; 修复产业

中图分类号: X53

中国是世界上人口最多, 且耕地严重不足的国家。土地污染, 尤其是重金属污染已经成为危害我国土壤环境质量和粮食安全的主要问题<sup>[1-2]</sup>, 其中工业活动造成的污染土地主要是大批重污染企业搬离后遗留厂区, 及企业生产过程中污染了周边区域的土壤。类似土壤被污染的途径主要有以下两种: 一是对废弃物的不当处置; 二是工业生产过程中废物(废水、废渣、废气)的排放<sup>[3]</sup>。由于污染物种类繁多, 如有机、无机、有机-无机和病源性污染物等, 往往会污染土壤和地下水, 进而通过食物链等途径危害人体健康, 甚至引发环境污染事故影响社会稳定<sup>[4]</sup>。如 2006 年, 湖北某房地产建设工地(原武汉市农药厂)在施工中发现该区域土壤存在严重污染, 无法开展施工, 并将当地政府告上法庭, 在当地引起了强烈反响<sup>[5]</sup>。可见, 土壤污染是社会经济发展的产物, 已经成为城市土地开发利用中的环境隐患<sup>[6]</sup>, 因此, 对污染土壤进行风险评估与修复治理显得尤为必要。

当前, 我国土壤重金属污染形势严峻。2005 年 4 月到 2013 年 12 月的全国土壤污染状况调查结果显示, 我国部分地区土壤污染较重, 耕地土壤环境质量堪忧, 工矿业废弃地土壤环境问题突出; 从调查点位情况看, 全国土壤总的点位超标率为 16.1%, 以无机型为主, 占全部超标点位的 82.8%, 主要是 Cd、Hg、

As、Cu、Pb、Cr、Zn、Ni 8 种无机污染物<sup>[7]</sup>。每年因土壤重金属污染而减产粮食约 1 000 万 t, 重金属含量超标粮食达 1 200 万 t, 造成的直接经济损失超过 200 亿元<sup>[8]</sup>。

与一些在污染土壤修复方面已形成较为完善的法规、政策、技术、标准等管理模式的发达国家和地区相比, 我国目前尚未有专门的法律来规范污染土壤的管理和修复问题, 且在污染土壤修复资金来源和管理方面存在很多不足。然而, 在城市对土地的需求迅猛扩张的背景下, 污染土壤的修复已悄然启动。据统计, 截止 2008 年, 经过简单的风险评估和修复后, 我国已从搬迁企业遗留的污染土壤置换约 2 万余 hm<sup>2</sup> 工业用地<sup>[9]</sup>。总体来看, 我国在污染土壤的修复过程中, 仍然存在较多问题亟待解决。本文以“江铜贵冶九牛岗周边区域土壤修复示范项目”为例, 从污染土壤修复技术的选择和面临的问题两个方面进行探讨, 对未来土壤修复技术的发展趋势提出展望, 以期推动我国污染土壤的修复治理事业的发展。

## 1 项目介绍

### 1.1 污染现状

项目位于江西省贵溪市, 属典型的低山丘陵地貌, 土壤类型主要为红壤和水稻土。江西铜业集团贵

基金项目: 中国科学院 STS 项目(KFJ-EW-ST-016)、“973”课题(2013CB934302)、赣鄱人才“555”工程项目和国家科技支撑计划课题(2015BAD05B01)资助。

作者简介: 周静(1963—), 男, 博士, 研究员, 研究方向为重金属污染土壤修复技术。E-mail: zhoujing@issas.ac.cn

溪冶炼厂(以下简称江铜贵冶)于 20 世纪 80 年代初期落户贵溪,由于早期技术上的限制,冶炼过程中所产生的废渣、废水和废气经过多年的排放、累积,造成企业周边土地不同程度的污染,直接影响周边群众生产、生活环境。其主要污染物是重金属 Cu 和 Cd<sup>[10]</sup>。2007 年 6 月 12 日《人民日报》报道江铜集团贵溪冶炼厂对周边村庄环境污染后,引起了当地政府及江铜集团贵溪冶炼厂的高度重视,采取措施积极处置企业周边区域的土壤重金属污染。2008 年,环保部南京环境科学研究所对江铜贵冶周边区域对部分农地地表水、土壤、水稻等进行采样分析,结果表明,对照《食用农产品地环境质量评价标准》(HJ332-2006)中的土壤环境质量评价指标限值,调查区内的农田土壤 Cu 超标率为 100%, Cd 超标率为 87%~100%。

### 1.2 项目产生

2010 年,当地政府将江铜贵冶周边区域九牛岗土壤修复示范项目分别纳入国家《重金属污染综合防治“十二五”规划》和《江西省重金属污染综合防治“十二五”规划》的历史遗留解决试点项目,得到了环保部“国家重金属污染防治专项资金”以及科技部、中科院、当地政府、江铜集团等相关项目资助,于 2011 年开始实施江铜贵冶周边区域重金属污染土地的规模化修复治理工程。

### 1.3 项目主要内容

- 1) 应用重金属 Cu 和 Cd 复合污染土壤分类分级治理的土壤调理(钝化和络合诱导)技术,集成土壤重金属污染的物理/化学-生物联合修复技术,建立具有针对性的化学改良剂-植物-农艺管理的综合修复技术体系。
- 2) 根据土壤污染程度,筛选合适的修复技术和土地利用方式,实行重金属污染土壤修复治理与景观美化、生态建设与经济效益有机结合的治理新模式。
- 3) 建立我国中南地区土壤重金属 Cu 和 Cd 复合污染修复治理示范基地。

## 2 修复技术选择

针对不同的污染土壤,修复技术的选择要结合技术的特点,并充分考虑修复经费的数量、未来土地的利用方式、区域地形和气候特点、污染物种类、污染程度及修复周期等一系列因素<sup>[11-14]</sup>。对于重金属污染土壤,其修复技术主要有客/换土、土壤淋洗、稳定化、电动和植物修复等<sup>[15-32]</sup>。如表 1 所示,对当前几种技术的应用优点、缺点和适宜规模的分析表明每种技术都存在一定的应用局限性,有些甚至有难以克服的难题。对于本项目所在地,其经济发展在国内处于中等水平,因此客土、淋洗和电动修复等技术对于该项目大面积的污染土地不具有经济可行性。

表 1 土壤修复技术应用规模和优缺点  
Table 1 Scales, advantages and disadvantages of soil remediation technologies

修复技术	应用规模	优点	缺点
客/换土法 <sup>[15]</sup>	大规模	灵活、彻底	高成本、占用土地、二次污染
固定化 <sup>[16-17]</sup>	实验室、中试	易操作、灵活	高成本、不彻底
稳定化 <sup>[18-21]</sup>	大规模	易操作、低成本	不彻底
土壤淋洗 <sup>[22-23]</sup>	实验室、中试	灵活、彻底	高成本、二次污染、破坏土壤结构
热解吸 <sup>[24-25]</sup>	实验室、中试	灵活、彻底	高成本、仅适合 Hg/Se/As
电动修复 <sup>[26-27]</sup>	实验室、中试	灵活、彻底	高成本、土壤不均一性
植物修复 <sup>[28-30]</sup>	大规模	环境友好、低成本	周期长、植物吸收专一性
微生物修复 <sup>[31-32]</sup>	实验室	环境友好、低成本	控制和监测难、环境敏感性

修复污染土壤的目的是去除土壤中污染物的含量,或降低其污染物的活性,使之不对人体健康或生态安全构成危害。而修复技术的选择须结合修复目的和目标才能确定下来。当前,我国尚未有与污染土壤相关的修复评价标准,因此修复目标的确定须根据具体情况,具体分析。罗战祥等<sup>[33]</sup>提出修复后的土壤重金属指标 Cd、Hg、As、Cu、Pb、Cr、Zn 和 Ni 达到国家《土地环境质量标准》(GB15618-1995)三级标准。由于重金属不同于有机污染物能被降解,因此在

一些高成本修复技术不适用的情况下,只能依靠植物修复技术降低土壤重金属的总量。然而,植物每年吸收的重金属量仅占土壤中重金属总量很少的一部分,要达到显著降低重金属总量的目标往往需要几年、几十年,甚至上百年的时间。如崔红标等<sup>[34]</sup>通过磷灰石、石灰和木炭的改良促进了黑麦草的生长,但是黑麦草每年吸收的 Cu 总量分别仅有 1 093、2 216 和 1 734 mg/小区(6 m<sup>2</sup>),要将土壤总 Cu 含量由 670 mg/kg 降低到 50 mg/kg 至少要 300 年以上。陈同斌<sup>[35]</sup>认

为即便是轻度污染的地方,要除掉土壤中的重金属最快也要3~5年。同时,在国家“863”计划重点项目《金属矿区及周边重金属污染土壤的联合修复技术与示范》中也提到联合修复技术使重金属有效态含量下降62%~80%。可见,在我国目前的经济和技术条件下,规模化地降低污染土壤重金属总量的修复目标不具有现实性。但是,采用稳定化技术降低重金属活性的技术已经十分成熟,如郝秀珍等<sup>[36]</sup>和崔红标等<sup>[34]</sup>的研究表明,通过施加天然蒙脱石、沸石、磷灰石和石灰能显著降低土壤重金属有效态含量,快速恢复污染土地植被,并显著提高黑麦草的生物量。可见,在当前技术和经济现状下,针对大面积的污染土壤,通过修复措施达到显著降低重金属有效态含量,降低重金属活性更具有科学性和现实性。

因此,该污染土壤的修复目标确定为:重度污染土壤修复后,重金属Cu/Cd的有效态降低50%;植被逐步恢复,覆盖不低于85%;区域景观得到显著改善和美化,生态效益显著;中度污染土壤修复后,能够生长纤维、能源、观赏或经济林木等植物,具有一定的经济效益(500元/(亩·年));轻度污染土壤修复后,能够选种水稻等粮食作物或纤维、能源等多种经济植物,且粮食作物可食用部分达到食用标准,经济效益显著(每季稻谷300kg/亩)<sup>[37]</sup>。

结合当地经济条件与修复技术特点、项目修复目标和修复周期(3年)确定采用稳定化和植物联合修复技术。稳定化和植物修复组合技术具有以下显著的优点。首先,可以通过施加改良剂来降低重金属有效性,为修复植物提供生长条件,通过植被恢复可增加受损生态系统生物多样性及植被结构等<sup>[38]</sup>,并可改善和美化区域景观,具有环境美学;第二,稳定化技术和植物修复技术成本较低,具有经济性;第三,改良剂对重金属的稳定化可以将重金属有效地固定在土体中,从而降低了重金属从土壤向其他环境迁移能力,进而减弱重金属通过地表径流和淋溶作用对地表水和地下水的污染,达到降低重金属污染物环境风险的目的,具有环境安全性。当经济和技术达到一定水平时,可以对被稳定的重金属污染物进行再次处理,达到显著降低污染物浓度,使之符合土壤环境质量标准及环境修复伦理。可见,结合修复目标和当地的经济水平,该组合技术是修复该规模化污染土壤的较佳选择。但是该技术也存在一些问题:稳定化可以降低重金属活性,满足植物生长,但是却降低了植物对重金属的去除效率;植物对重金属的吸收量低,修复的周期较长,且收获的植物还需进一步的无害化处理和资源化利用;用于稳定化的材料仅在一段时间

内(一般是几年)对重金属具有较好的稳定化效果,必须在若干年后重新施用改良剂,以防止重金属的重新活化。然而,该修复项目没有涉及修复植物的后续处理和稳定化效果的跟踪监测计划。因此,相关部门在今后的类似项目规划时应考虑到示范项目的后续服务,如重金属活性监测、修复植物的回收、示范区管理等。同时科技部门依需要研发出修复植物的资源化安全利用技术,孵化后服务于修复行业,完善土壤污染修复产业链。

### 3 面临的问题

由于我国污染土壤的修复事业目前处于起步阶段,基础比较薄弱,一些标准和相关法律等的缺失导致在实际的土壤修复和工程管理中具有很大的困难和挑战。在“江铜贵冶九牛岗土壤修复示范项目”这样一个规模化的污染土壤修复中,遇到的挑战或许带有普遍性,总结如下:

#### 3.1 治理利益博弈

尽管在项目工程启动前已经通过张贴宣传公告、乡镇干部和群众参与式培训和动员会议,并由乡镇干部做好村民工作,然而在项目实施初期大部分群众不愿意配合,出现阻工和怠工的事件。由于遭受污染长达30余年,当地群众已具有一定的环保意识,并能通过以往和专家学者的交流辨别主要污染物的毒性特征。如部分群众通过对作物根系生长缓慢或烂根的现象推测是否是重金属对植物根系的影响,群众也知道受到重金属污染的土壤不能种植粮食和蔬菜,以免造成重金属在人体内的富集。然而,部分群众担心一旦修复好污染的土地,企业不再对被污染的土地进行赔偿个人眼前利益受到影响;另一些群众虽同意修复,但还要求加上土地修复补偿费用。在得到政府和企业承诺将继续赔偿并增加修复工程土地补偿费用以及优先使用当地群众劳动力后,修复工程才得以开展。可见,利益是调节污染土壤修复工程的重要环节,这也是目前我国土壤污染修复事业发展的障碍之一。因此,须加强土壤环境保护宣教工作,提高群众环保意识,强化污染土壤生态修复的舆论引导和环保科普知识宣传及公众参与的方式方法,鼓励群众参与土壤环境保护和污染防治工作。

#### 3.2 投资机制单一

污染土壤修复和管理费用高,只有在充足资金的保证下才能使修复得以实施并达到预期目标。然而,与一些发达国家不同,目前我国污染土壤修复资金的投资机制比较单一,往往由政府主导,企业和开发商承担少部分资金<sup>[39-40]</sup>,缺乏长久的修复资金或基金

保障和分担机制。如本修复项目的资金主要来源于国家财政。这样单一的资金来源无法满足当前我国污染土壤修复的需求。污染土壤的修复是一项耗资巨大的工程,如 20 世纪 70 年代日本富山县花费 33 年,耗资 3.4 亿美元才完成对 863 hm<sup>2</sup>(12 945 亩)农田的土壤修复工作。《全国土壤环境保护“十二五”规划》中指出,“十二五”期间,用于全国污染土壤修复的中央财政资金将达 300 亿元,然而对于大面积的农田土壤修复来说,这些资金显然难以满足需求。因此,我们在污染土壤修复的投融资机制上可进行积极探索,可大力借鉴其他行业资本进入经验以及发达国家的融资机制,如鼓励绿色信贷、充分利用土地流转等政策、建立国家和地方政府的污染土壤修复国家基金,盘活财政、社会资金和国际基金,给予参与治污的企业一定的税收优惠政策,把市场、技术和资本有机的融合,让民间资本可以融入这个领域,变成现实的市场,促进环保产业的快速和健康发展,最终建立一种合理的体制机制,形成以“谁污染、谁治理;谁投资、谁受益”为前提,灵活运用“污染者付费,受益者分担,所有者补偿”的原则,形成“政府主导,市场主体,利益均衡”投资机制,构建多渠道的融资平台和多元化的融资机制<sup>[11,41]</sup>。

### 3.3 修复技术和装备不足

土壤修复技术涉及土壤学、环境科学、环境工程、生态学等十几个学科领域,主要分为原位和异位修复两大类,是环境技术研究的最前沿。当前,我国现有的土壤修复技术大都存在工程技术单一、处理能力有限、成本高等不足,难以满足规模化污染土壤修复需求。如我国当前在修复有机污染和重金属污染土壤时,最常用的措施是客土法置换污染土壤、水泥固化污染物、焚烧或危险废弃物填埋处置,缺乏针对不同污染土壤、不同污染类型的成熟修复技术工艺<sup>[11]</sup>。如本修复工程利用稳定化和植物修复组合技术尽管能降低重金属活性,改善生态景观,降低污染物的环境风险,但是却不能快速地去掉土壤污染物总量。

同时,尽管我们掌握了一些修复技术,但与之相配套的装备(多为进口)缺失阻碍了我国修复技术应用的步伐。如本修复项目中改良剂的施用由于没有配套的设备,只能采取人工撒施的办法。如此,不仅效率低下,还增加了修复的成本以及工人在撒施改良剂时的健康风险。因此,我国需要提高修复技术自主研发能力,加大投入研发安全、实用、高效、低廉的修复新技术、新产品和新装备。

### 3.4 法规和标准不完善

我国目前还没有颁布针对土壤污染的专门法规,

但是随着国内污染土壤修复工作的相继开展,相关技术规范也将逐渐完善。如全国人民代表大会常务委员会于 2004 年 12 月修订了《中华人民共和国固体废物污染环境防治法》,规定了固体废弃物、生活垃圾、一般工业固废管理的要求。2004 年 6 月,原国家环境保护总局发布了《关于切实做好企业搬迁过程中环境污染防治工作的通知》,规定所有产生危险废物的工业企业、实验室和生产经营危险废物的单位,在结束原有生产经营活动、改变原土地使用性质时,必须经具有省级以上质量认证资格的环境监测部门对原址土地进行监测分析,经过对原址土壤进行环境影响分析后,报送省级以上环境保护部门审查,并依据监测评价报告确定土壤功能修复实施方案,其中当地政府环境保护部门负责土壤功能修复工作的监督管理,原生产经营单位负责治理并恢复土壤使用功能。在 2014 年 7 月 1 日,环境保护部实施了针对污染场地的系列环境保护标准:《场地环境调查技术导则》(HJ 25.1-2014)、《场地环境监测技术导则》(HJ 25.2-2014)、《污染场地风险评估技术导则》(HJ 25.3-2014)、《污染场地土壤修复技术导则》(HJ 25.4-2014),该系列标准的实施将进一步规范场地环境监测,加强污染土壤环境监督管理。

然而,这些法律和政策性文件关于污染土壤修复多是原则性规定,分散而不系统,可操作性差,缺乏实施细则来明确污染土壤的管理责任、融资机制、风险评估、评价标准等。如在本项目实施中,我们按照《土壤环境监测技术规范》(HJ/T166-2004)进行布点、采样、分析和测定,但是在对有效性进行评价时缺少相关评价标准。因此,我国在今后的段时间内应该抓紧制订相关法律法规,以明确污染土壤的管理责任、风险评估、融资机制和防治措施等。

此外,我国当前的土壤修复产业中还存在修复目标不明确,缺少顶层设计以及缺乏完善的修复后评价机制等。因此,要改变将单一的环境因子(如某一有机或无机污染物)降低到相应土壤环境质量标准级别以下作为修复目标。应该结合修复区未来的功能定位(农业用地、工业用地或商业用地),以污染土壤能够安全利用、土地可持续发展为终极目标,对制订的修复方案要进行可持续性评估。对于修复后的土壤,尤其是大面积修复治理区,不仅仅只关注是否达到考核目标,还要结合修复目标来考虑污染物的污染负荷指数、生物丰度指数、植被覆盖指数、土地胁迫指数,对整个修复区进行生态功能恢复评估,明确其是否达到预期功能定位的要求。

## 4 展望

总的来看,随着我国城市化进程的加快,越来越多的企业搬迁后留下的污染土地被规划为居住区、商业圈、公共设施场所等。尽管目前我国污染土壤修复产业处于起步阶段,但是正在快速成长,产业链也在逐步形成。随着国家对重金属污染综合防治资金的投入,我国重金属污染土壤的修复事业会迎来一个发展时期。因此,尽管我国污染土壤修复产业处于起步阶段,但发展潜力大。

从我国当前经济和技术发展的水平来看,我国还不具备对规模化重金属污染土壤进行彻底清洁治理的修复技术和经济实力,但是已经具有降低一些严重污染土壤的环境风险的能力。今后一段时期内,我国污染土壤的修复治理工作的重点是实施一批示范工程项目。尤其是对于一些亟待开发并成为城市土地开发利用中有环境隐患的污染土壤,根据轻重缓急采取不同的管理对策,尽可能地降低污染土壤的环境风险。

在污染土壤修复示范工程中,我国应该积极开展污染土壤修复技术适应性评价,解决污染土壤修复资金的融资机制;通过示范工程积累经验,发现不足,有针对性地进行相关修复技术和装备的研发以及人才队伍的培养。最后,在治理模式上积极推进环境污染第三方治理,将污染修复通过公开竞争机制委托给专业化环保企业按照相关标准进行治理,业主与环保监管部门共同监督治理成效。总之,在环保产业的发展中,要积极运用新思维、新观念、新方法,最大化地释放环保市场活力,建立多元化的投融资渠道,发挥市场和政策的作用,实现环保产业的社会化、市场化、专业化发展。

### 参考文献:

- [1] He ZL, Yang XE, Stoffella PJ. The trace elements in agroecosystems and impacts on the environment[J]. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, 2005, 19(2/3): 125-140
- [2] Kumpieni 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
- [3] 谷庆宝, 颜增光, 周友亚, 郭观林, 李发生. 美国超级基金制度及其污染场地环境管理[J]. *环境科学与研究*, 2007, 20(5): 84-88
- [4] 廖晓勇, 崇忠义, 阎秀兰, 赵丹. 城市工业污染场地: 中国环境修复领域的新课题[J]. *环境科学*, 2011, 32(3): 784-794
- [5] 黄迪, 张绍修, 邓洪伟. 刍议我国污染场地修复现状与对策[J]. *四川环境*, 2012, 31: 188-193
- [6] 李梦瑶. 中国污染场地环境管理存在的问题及对策[J]. *中国农学通报*, 2010, 26(24): 338-342
- [7] 人民网. 环保部国土部发布公报称全国 16%土壤面积遭污染[OL]. 2014-4-17. <http://society.people.com.cn/n/2014/0417/c1008-24910096.html>.
- [8] 高翔云, 汤志云, 李建和, 王力. 国内土壤环境污染现状与防治措施[J]. *环境保护*, 2006, (4): 50-531
- [9] 骆永明. 中国土壤环境和土壤修复科学技术研究现状与展望[A]//中国科技协会. 土壤学学科发展报告[C]. 北京: 中国科学技术出版社, 2011, 134-136
- [10] 胡宁静, 李泽琴, 黄朋, 陶成. 贵溪市污灌水田重金属元素的化学形态分布[J]. *农业环境科学学报*, 2004, 23(4): 683-686
- [11] 薛南东, 李发生, 等. 持久性有机污染物(POPs)污染场地风险控制与环境修复[M]. 北京: 环境科学出版社, 2011
- [12] 谷庆宝, 郭观林, 周友亚, 颜增光, 李发生. 污染场地修复技术的分类、应用与筛选方法探讨[J]. *环境科学研究*, 2008, 21(2): 197-202
- [13] 顾继光, 周启星, 王新. 土壤重金属污染的治理途径及其研究进展[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2003, 11(2): 143-151
- [14] Khan FI, Husain T, Hejazil R. An overview and analysis of site remediation technologies[J]. *Journal of Environmental Management*, 2004, 71(2): 95-122
- [15] 李永涛, 吴启堂. 土壤污染治理方法研究[J]. *农业环境保护*, 1997, 16(3): 118-122
- [16] Bhat PN, Ghosh DK, Desai MVN. Immobilisation of beryllium in solid waste (red-mud) by fixation and vitrification[J]. *Waste Management*, 2002, 22(5): 549-556
- [17] Mulligan CN, Yong RN, Gibbs BF. Remediation technologies for metal contaminated soils and groundwater: an evaluation[J]. *Engineering Ecology*, 2001, 60(1/4), 193-207
- [18] Winterhalder K. Environmental degradation and rehabilitation of landscape around Sudbury, a major mining and smelting area[J]. *Environmental Reviews*, 1996, 4(3): 185-224
- [19] Karami N, Clemente R, Moreno-Jimenez E, Lepp NW, Beesley L. Efficiency of green waste compost and biochar soil amendments for reducing lead and copper mobility and uptake to ryegrass[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, 191(1/3): 41-48
- [20] Karin V, Staffan S, Kaia T, Andrey S. Hydroxy- and fluorapatite as sorbents in Cd(II)-Zn (II)-component solutions in the absence/presence of EDTA[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2013, 252/253: 91-98
- [21] Wang YM, Chen, TC, Yeh KJ, Shue MF. Stabilization of an elevated heavy metal contaminated site[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2001, 88(1): 63-74
- [22] 吴龙华, 骆永明. 铜污染土壤修复的有机调控研究. EDTA和低分子有机酸的效应对污染土壤的释放作用[J]. *土壤学报*, 2002, 39 (5): 679-685
- [23] Dermont G, Bergeron M, Mercier G, Richer-Lafleche M. Soil washing for metal removal: A review of physical/chemical technologies and field applications[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, 152(1): 1-31

- [24] Kunkel AM, Seibert JJ, Elliott L J, Kelley R, Katz LE, Pope GA. Remediation of elemental mercury using in situ thermal desorption (ISTD) [J]. *Environmental science & technology*, 2006, 40(7): 2 384–2 389
- [25] Chan TC, Yen JH. On site mercury contaminated soils remediation by using thermal desorption technology[J]. *Journal of Hazardous Materials* 2006, 128(2/3): 208–217
- [26] 仓龙, 周东美, 吴丹亚. 水平交换电场与 EDDS 螯合诱导植物联合修复 Cu/Zn 污染土壤[J]. *土壤学报*, 2009 (4): 729–735
- [27] Gent DB, Bricka RM, Alshwabkeh AN, Larson SL, Fabian G, Granadee S. Bench and field scale evaluation of chromium and cadmium extraction by electrokinetics[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2004, 110(1/2/3): 53–62
- [28] 陈同斌, 韦朝阳, 黄泽春, 黄全飞, 鲁全国. 砷超富集植物蜈蚣草及其对砷的富集特征[J]. *科学通报*, 2002, 47(3): 207–210
- [29] Zhang X, Xia H, Li Z, Zhuang P, Gao B. Potential of four forage grasses in remediation of Cd and Zn contaminated soils[J]. *Bioresource Technology*, 2010, 101(6): 2 063–2 066
- [30] Luo C, Shen Z, Li X, Baker AJM. Enhanced phytoextraction of Pb and other metals from artificially contaminated soils through the combined application of EDTA and EDDS[J]. *Chemosphere*, 2006, 63(10): 1 773–1 784
- [31] Naresh Kumar R, Nagendran R. Changes in nutrient profile of soil subjected to bioleaching for removal of heavy metals using *Acidithiobacillus thiooxidans*[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, 156(1/3): 102–107
- [32] Macy J M, Nunan K, Hagen K D, Dixon DR, Harbour PJ, Cahill M, Sly LI. *Chrysiogenes arsenatis* gen. nov., sp. nov., a new arsenate-respiring bacterium isolated from gold mine wastewater[J]. *International journal of systematic bacteriology*, 1996, 46(4): 1 153–1 157
- [33] 罗战祥, 揭春生, 毛旭东. 重金属污染土壤修复技术应用[J]. *江西化工*, 2012(2): 100–103
- [34] 崔红标, 周静, 杜志敏, 范玉超, 司友斌. 磷灰石等改良剂对重金属铜镉污染土壤的田间修复研究[J]. *土壤*, 2010, 42(4): 611–617
- [35] 李静. 全国 1/6 耕地重金属污染修复污染耕地恐花数万亿[N]. *经济参考报*, 2013-06-17
- [36] 郝秀珍, 周东美, 薛艳, 陈怀满. 天然蒙脱石和沸石改良对黑麦草在铜尾矿砂上生长的影响[J]. *土壤学报*, 2005, 42(3): 434–439
- [37] 周静, 崔红标. 规模化治理土壤重金属污染技术工程应用与展望——以江铜贵冶周边区域九牛岗土壤修复示范工程为例[J]. *中国科学院院刊*, 2014, 29(3): 336–343
- [38] Yang SX, Liao B, Li J, Guo T, Shu WS. Acidification, heavy metal mobility and nutrient accumulation in the soil–plant system of a revegetated acid mine wasteland[J]. *Chemosphere*, 2010, 80(8): 852–859
- [39] 张胜田, 林玉锁. 中国污染场地管理面临的问题及对策[J]. *环境科学与管理*, 2007, 32(6): 5–7
- [40] 谌宏伟, 陈鸿汉, 刘菲, 何江涛, 沈照理, 孙静. 污染场地健康风险评价的实例研究[J]. *地学前缘*, 2006, 13(1): 230–35
- [41] 骆永明. 中国污染场地修复的研究进展、问题与展望[J]. *环境监测管理与技术*, 2011, 23(3): 1–6

## Remediation Technologies and Current Problems of Heavy Metal Contaminated Sites with “Demonstration Project of Soil Remediation on the Periphery of Guixi Smelter” as Example

ZHOU Jing<sup>1,2,3</sup>, CUI Hong-biao<sup>1,3</sup>, LIANG Jia-ni<sup>1</sup>, XU Lei<sup>1,3</sup>, ZHU Zhen-qiu<sup>1,3</sup>,  
WANG Xing-xiang<sup>1</sup>, CUI Jian<sup>1</sup>, SHANG Jian<sup>4</sup>

(1 *Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China*; 2 *Institute of Biological Resource of Jiangxi Academy of Sciences, Nanchang 330096, China*; 3 *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*;  
4 *Xuancheng Agricultural Products Quality Safety Supervision Bureau, Xuancheng, Anhui 242000, China*)

**Abstract:** With the rapid development of industry, agriculture and urbanization, contaminated sites are increasing during industrial production and relocation of industries and enterprises. Remediation of the contaminated soils is required urgently, especially for the sites with high environmental risk, threats to human residence and health, and social stability. In the paper, remediation technologies and current problems were discussed with “Demonstration Project of Soil Remediation on The Periphery of Guixi Smelter” as an example, and the prospects of heavy metal contaminated soil remediation were also discussed.

**Key words:** Heavy metal; Contaminated soil; Remediation technologies; Financing mechanisms; Remediation industry