

# 重金属污染土壤修复技术的现状和展望

——以江西贵溪冶炼厂周边区域土壤修复示范项目为例

Present situation and prospects of technologies for remediation of heavy-metal-contaminated soil around Jiangxi Guixi Smelter



■文、图/周静

图1 江铜贵冶周边修复前的土壤情况

## 一、项目由来

江西铜业集团贵溪冶炼厂(以下简称江铜贵冶)于上世纪80年代初期落户贵溪,由于早期没有合理控制冶炼过程中所产生的废渣、废水和废气的排放,经过30多年的累积,已经给周边环境造成了不同程度的污染,严重影响到周边群众的正常生产和生活。其主要污染物是重金属铜(Cu)和镉(Cd)。2007年6月12日《人民日报》报道了江铜集团贵溪冶炼厂对周边村庄造成的环境污染后,当地政府及江铜集团贵溪冶炼厂高度重视,立即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的地表水、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,调查区域内农田土壤中的Cu的超标率为100%, Cd超标率为87%-100%。

2010年,贵溪市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。2012年初,开始对江铜贵冶周边区域重金属污染土地实施规模化修复治理工程,2014年底项目通过验收。

## 二、修复方案

### (一)修复思路

当前,重金属污染土壤的修复技术主要有客/换土法、土壤淋洗法、稳定化法、电动修复和植物修复等。每种修复技术都有其各自的适用范围和优缺点,修复技术的选择不仅要全面考虑技术的特点,同时还应考虑修复成本、修复目标、未来土地的利用方式、污染物种类、污染程度和修复周期等一系列因素。



图2 耐性植物-巨菌草在钝化材料上调理修复后的污染土壤上的长势

因此,从修复技术本身的特点,并结合修复区当地的经济水平和大面积治理的现实,客土、土壤淋洗、电动修复、固定化和热脱附等技术对于这样一个大面积的污染农田不具有修复的经济性与生态环境可行性。其主要原因是工程量大、成本高、土壤理化性质恶化,修复后不利于农田的利用和作物的生长。鉴于此,该工程提出的修复技术总体思路为“调理-消减-恢复-增效”,具体如下:

(1) 调理:用物理调节+化学改良,调理被污染土壤中重金属的介质环境;

(2) 消减:用物理化学-植物/生物联合的方法,降低污染土壤重金属总量或有效态含量;

(3) 恢复:在调理污染土壤介质环境、降低土壤重金属毒性基础上,联合植物及农艺管理技术,建立植被,逐次恢复污染土壤生态功能;

(4) 增效:增加污染修复区土地的生态效益、经济效益和社会效益。

## (二) 修复目标

鉴于我国目前尚无重金属污染土壤治理的相关评价标准,因此,依据具体可以实现的情况来分级选择确定治理技术目标。本案例中,要在连片集中、面积大(2000多亩)且污染程度不同、资金有限的前提下,使得治理后的土壤特别是重度污染土壤既能达到国家《土地环境质量标准》(GB15618-1995)三级标准,又不影响土壤的农业可利用性的修复目标。相比而言,依据不同地块污染程度,分类选择技术,或降低土壤重金属活性(主要是有效态含量),或降低其向其他介质迁移的环境风险,使污染土壤改良后能够安全利用,更具可行性和实际意义。鉴于此,最终确定的修复目标为:

(1) 重度污染土壤修复后,重金属铜/镉的有效态降低50%;植被逐步恢复,覆盖率不低于85%;区域景观得到显著改善,生态效益显著;

(2) 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);

(3)轻度污染土壤修复后能够选种水稻等粮食作物或纤维、能源等经济作物,且粮食作物可食用部分达到食用标准,经济效益显著(400kg稻谷/亩/季)。

### (三)主要工作内容

(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,探索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。

## 三、修复效果

### (一)环境效益

有效降低了污染土壤中重金属的活性。试验结果表明,所有修复后的土壤样点经0.1mol/LCaCl<sub>2</sub>浸提,有效态Cu和Cd的下降幅度均在50%以上,实现了修复目标。修复材料可将重金属有效固定在土壤本体中,降低重金属污染物向污染主体外的迁移能力,进而减弱重金属通过地表径流和淋溶作用对地表水体和地下水的污染,达到了降低重金属污染物向其他介质迁移的环境风险的目的。

污染土壤中重金属有效态的降低,为植物生长创造了条件。植物的生长为裸露的地表提供了植被覆盖,这样可以固持水土、减少重金属径流和地下水入渗,同时改善和美化了景观。大面积污染农田在施用

改良材料后,种植的巨菌草等植物能够生长,农田植被恢复,有利于昆虫和鸟类的栖息和繁殖以及污染土壤生态系统的恢复,治理区生态效益显著提升。

种植巨菌草的土壤每亩每年可以吸收转移Cu454.3g、Cd9.5g。通过连续多年的吸收转移,最终实现减少土壤中重金属总量的目的。同时,为考察巨菌草作为生物质材料在焚烧过程中可能产生的环境问题,项目对燃烧后巨菌草的灰烬进行重金属总量测定和毒性浸出实验。燃烧后巨菌草灰烬重金属Cu含量为1822.3mg/kg, Cd含量为10.2mg/kg。采用中华人民共和国环境保护行业标准(HJ-T299)对燃烧后的巨菌草灰烬进行毒性浸出实验,浸出液中Cu和Cd含量均低于中华人民共和国《危险废物鉴别标准浸出毒性鉴别(GB 5085.3-2007)》规定的标准。另外,有研究表明,高Cu含量植物燃烧后,底灰中重金属含量占总体的98%,空气挥发和飞灰中仅有2%。可见,巨菌草在生物焚烧中环境风险较低。

### (二)经济效益

采用的物理/化学-植物-农艺联合技术修复重度污染的土壤,与其他修复技术相比成本较低。如固定化方法治理重金属污染土壤,每吨土壤需要90—200美元,土壤淋洗法需要250—500美元,土壤填埋需要100—400美元,本案例中治理每吨土壤(按土壤表层计算)费用为10—20美元。案例中,用改良材料与巨菌草联合治理,巨菌草具有较高的热值和其他多种用途,每亩每年鲜草产量在10—30吨之间,如表1所示。由于生物量大、碳含量高,作为生物质电厂发电的原料,每亩巨菌草生物量相当于2—3吨标煤的发电量。

对于轻度污染的农田区采用单一和复合改良材料钝化土壤重金属活性。如表2所示,修复后水稻每亩产量比对照组分别提高了32.8%和49.4%,且稻米

表1 项目区内不同修复区植物对土壤铜、镉的萃取情况

修复区	植物	鲜重 (吨/亩)	干重 (吨/亩)	Cu含量 (毫克/千克)	Cd含量 (毫克/千克)	Cu总量 (克/亩)	Cd总量 (克/亩)
苏门	巨菌草	35.4	11.9	33.3	0.56	398	6.69
水泉	巨菌草	16.0	2.75	77.3	2.65	213	7.30
九牛岗	巨菌草	11.5	3.48	130	2.74	454	9.54

表2 轻度污染区农田修复前后水稻产量和重金属镉铜含量

处理	有效穗数 (万/亩)	结实率 (%)	千粒重 (克)	产量 (千克)	Cu (毫克/千克)	Cd (毫克/千克)
对照	10.8	92	32.5	337	10.2	0.31
单一改良	16.3	89.5	29.5	448	6.37	0.18
复合改良	19.7	90.56	31	504	8.67	0.16

中的Cu和Cd含量均低于食品中铜、镉国家限量标准 (Cu : 10 mg/kg, Cd : 0.2 mg/kg)。

### (三)社会效益

项目初步建立了大型重金属相关冶炼企业周边土壤污染治理示范工程,取得较好的修复效果,受到国家领导,省、市和县政府的重视和推介,尤其得到当地群众的高度认可,他们认为重度污染的不毛之地在治理过程中能生长有经济价值的植物,在改善环境的同时还给他们带来了收益。另外,在工程实施中,引导和培训了农民运用重金属污染防治技术和技能,培养项目区当地的环保技术与管理队伍,培育了污染治理的企业和产业。

## 四、工程实施中的难点

我国土壤重金属污染修复治理尚以理论探索为主,规模化治理重金属污染土壤技术与工程尚处于起步阶段,成熟的技术工程规模示范很少;修复目标、修复标准、技术路线、成本效益等难以确定和估算,工程实施和管理中存在一些重点和难点需要解决。

### (一)规模化治理技术思路与修复目标选择

与场地污染土壤治理不同,规模化治理重金属污染土壤目标的选择首先要注重土地的利用。修复治理是手段,安全利用才是最终目标,这是由我国国情决定的。尽管当前我们已经具有应用土壤淋洗和客土等技术来降低土壤中重金属总量,使之达到《土壤环境质量标准》(GB15618-1995)标准,但要修复成千上万亩的土壤,使得某种重金属总量降低到一定量值,通过淋洗类似的技术需要巨大资金的支持,而且此类技术处理后的土壤,已无土壤的生态与耕种功能(土壤无生物活性、无可耕性)。针对大面积的污染土地,只有治理后能被安全利用,治理技术才有活力,才会

为农户所接受和认可。本案例,我们在技术研发和社会调研基础上,选择了低成本的农田原位钝化联合植物修复治理技术,将“消减存量”以减存土壤中重金属总量为唯一目标的思路,转变为“降活减存”以降低土壤重金属活性,植物能够生长,恢复土壤生态功能,再通过植物吸收消减总量,以时间换成本,达到利用大面积修复后的耕地,产生效益为主的治理目标。工程案例证明,这一目标现实可行,有技术依据。

### (二)技术路线和工程实施方案的确定

本案例中,由于污染区域面积大、污染程度差异大、土地利用方式不同,因此单一的修复模式和路线并不可行。结合当地的实际情况和前期技术孵化过程,我们将本案例工程的技术路线概括为以下四步。

(1)分区:根据地理位置和空间单元将要治理的2000多亩污染区按地理、地形和耕地利用方式分为若干片区,采用“一区一策”,将治理技术个性化,使治理效果与治理成本理性平衡;

(2)分类:按照土壤中主要重金属污染物类型进行划分进而采取不同的治理技术措施;

(3)分级:按照土壤中主要重金属污染的程度(轻度、中度和重度)划分,采用不同的治理目标和技术方案;

(4)分段:工程实施中,按照先易后难,先选用改良材料配方等关键技术,后采用农艺措施等一般性技术,形成土壤污染治理的“物理+化学-生物/农艺一体化集合技术”。最后将土壤污染修复和耕地综合利用有效结合起来,治理产生效果,耕地产生效益,并将主要技术形成规范,转化为可落地、可复制、可借鉴的治理工程经验。

### (三)污染土壤改良材料与植物的筛选

规模化治理土壤重金属污染工程实施中首先确

定改良材料的种类、配方和用量,即工程化相关参数,其直接关系到工程的主要费用和治理目标的实现效果。该工程实施前,室内培养和温室盆栽实验已发现蒙脱石、凹凸棒石、微纳米羟基磷灰石、磷灰石、木炭、和生物质灰等10多种材料,按照土壤质量的一定比例添加,对土壤中重金属钝化具有一定的效果;按正交实验设计经过田间试验验证,淘汰了蒙脱石、凹凸棒石、铁粉等材料;在考虑到材料成本、来源和施用后的二次污染风险,最终将微纳米羟基磷灰石、磷灰石和生物质灰等按照最佳优化配比,制成一系列配方产品,在田间治理工程施工中直接施用。重金属污染土壤修复植物种类多样,理想的植物应具有大生物量、可富集重金属、安全利用等特点。综合污染区重金属污染的类型、程度和气候特点,经多次对比试验,最终筛选确定以巨菌草、海州香薷、伴矿景天、香根草、香樟、冬青和红叶石楠等为主体的修复植物。

#### (四)治理工程施工、推广和管理难题

与普通建筑工程施工不同,规模化治理土壤重金属污染工程涉及面积千亩或万亩甚至更大范围,最重要的是涉及广大农民的切身利益。引导农民将自家污染的耕地进行治理,需要满足农户利益诉求,合理合法确定污染耕地治理过程及治理后权属利益,征求村干部同意,做到技术监管与培训到位,以及落地的技术、细化的施工方案和正确的工序,同时需要考虑材料和机械进场的天气许可,工程劳务组织以优先使用当地群众劳力,增加污染区群众治污增收能力等,还要控制工程施工和管理成本。本案例中遇到的这些施工和管理类的困难带有普遍性。案例中采取政府推动、村组动员、技术引导、示范引领、成效教育、利益保障等多种带有政策性、情感性、利益保障性的工作办法,解决了治理工程施工、推广和管理中的难题。

## 五、思考与展望

### (一)思考

#### 1. 规模化重金属污染土壤修复现状

目前,我国大规模治理土壤重金属污染在总体形势处于守势,对局部典型地区发生的污染事件被动应对或者应急多,相对缺乏大规模大区域性的“攻坚”和打“歼灭战”治理的准备;在工程治理与修复市场方面逐步兴起,但缺少技术和行业规范;技术治理或修复公司不少,但真正有技术有责任有能力的不多;治

理工程项目设置前期调研不足,影响项目质量;治理目标不明确,实施内容与治理目标关联性差;项目实施周期普遍过短;技术路线模糊,示范或推广性、可复制性差。治理工程的实效与时效关注度不够,后评估少。

#### 2. 技术力量组织

规模化治理土壤重金属污染技术力量组织应考虑3个方面:①进行多学科的综合。包括技术方向,如物理/化学-生物农艺生态综合性系统技术,学科如材料学、化学、物理学、土壤学、环境工程、生态学、农学、生物学、植物营养学、农田水利等;②多维度组合。不同重金属污染(类型、程度)影响不平衡,同一类型重金属污染土壤治理的修复材料、施用时间、田间工程等需要多维度的应用技术验证;技术工程化、规模推进的技术模式等需要多维度组合;③多系统集成。包括土壤重金属污染修复材料系统技术、农田生态系统技术、风险评价系统技术、效益评估系统技术等。

#### 3. 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。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,如将《土壤污染防治行动计划》(简称“土十条”)内容做成展板,向周边居民讲解和展示,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。

#### 4. 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。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。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。

#### 5. 资金来源单一

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,缺乏长久的修复资金或基金保障和分担机制。《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,如土十条强调的“通过政府和社会资本合作(PPP)模式,发挥财政资金撬动功能,带动更多社会资本参与土壤污染防治。加大政府购买服务力度,推动受污染耕地和以政府为责任主体的污染地块治理与修复。积极发展绿色金融,发挥政策性和开发性金融机构引导作用,为重大土壤污染防治项目提供支持。鼓励符合条件的土壤污染治理与修复企业发行股票。探索通过发行债券推进土壤污染治理与修复,在土壤污染综合防治先行区开展试点。有序开展重点行业企业环境污染强制责任保险试点。”最终把市场、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。

#### (二)展望

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,我国应该做到以下几点:


(1)积极开展污染土壤修复技术适应性评价,从政府到市场分类建立土壤重金属污染治理资金投入市场机制,探索“谁投资、谁受益”的土壤治理资金投入市场机制。

(2)分区、分类(土壤污染物类型)、分级(污染程度)制订土壤重金属污染治理战略思路、技术路线,建立土壤污染管理和防治技术支撑体系,编制修复技术指南,制订污染土壤的修复技术、治理目标并开展环境风险与治理效益后评估等。

(3)增强土壤污染治理工程的项目设置科学性,工程项目实施“官-学-研-产”结合,实现以污染土壤安全利用和“边修复、边利用”、“边治理、边受益”等符合我国现阶段国情的修复治理模式。

(4)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。

(5)全国分区域、分类型建立规模化治理重金属污染示范区。在示范区内优化区域性应用技术,集成低成本高效技术体系,创新系统化修复工程;集中展示可组装、可移动技术模式。通过示范区平台,集中攻克形成一批需求迫切的关键成熟技术,研发安全、实用、高效、低廉的修复新技术、新产品和新装备等实用化修复技术体系,形成多样化的修复技术模式;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培养,构建我国主要土壤类型区、重金属污染类型及重点区域土壤环境管理技术体系。

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。

作者单位:中国科学院南京土壤研究所