



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*

文 / 周 静^{1,2} 崔红标^{1,2,3}

1 中国科学院南京土壤研究所 南京 210008

2 国家红壤改良工程技术研究中心,中国科学院红壤生态实验站 鹰潭 335211

3 中国科学院大学 北京 100049

【摘要】 文章以江西贵溪市贵冶周边重金属重度污染土壤修复示范工程为案例,分析了规模化治理重金属污染土壤思路与技术的选择、工程取得的成效及工程实施中的重点与难点,对未来规模化治理土壤重金属污染技术工程提出展望。

【关键词】 土壤, 重金属污染, 修复, 示范工程

DOI 10.3969/j.issn.1000-3045.2014.03.011

近年来,我国土壤重金属污染事件频发,对经济发展,生态环境,食品安全,国民健康,甚至对社会稳定、政治安定等构成威胁。2011年环保部周生贤部长向全国人大报告我国环境污染状况时提到,我国受污染耕地约1.5亿亩。2013年底,国土资源部王世元副部长在土地调查新闻发布会上引述环保部土壤状况调查的数据时指出,我国内地中重度污染耕地约5 000万亩。2000年农业部在对全国450万亩基本农田保护区及20万吨粮食抽查发现,重金属超标率大于10%,而污灌区农田土壤重金属污染问题更为严重。我国土壤重金属污染区域分散于全国各省,且呈区域性分布。郭朝辉^[1]等研究发现,湖南省部分矿区农田土壤中汞、砷、铅和镉含量是健康土壤重金属含量的数百倍,因而造成了农作物的重金属污染。原国家环保总

局土壤调查结果显示,广东省珠江三角洲近40%的农田菜地土壤被重金属污染,其中10%属严重超标。江西省受重金属污染的耕地约占全省总耕地面积的14.2%,尤以选矿区与冶炼厂周边区域重金属污染最严重。

2014年3月,李克强总理在《政府工作报告》中强调“实施土壤修复工程。整治农业面源污染,建设美丽乡村。我们要像对贫困宣战一样,坚决向污染宣战。”中央一号文件也强调“启动重金属污染耕地修复试点”,同时国家“十二五”规划中有300亿元重金属污染综合防治资金的投入。由此可见,我国政府极为重视土壤重金属污染治理工作,相关工作面临新的机遇与挑战。

土壤重金属污染具有隐蔽性、潜伏性、不可逆性和长期性的特点,严重威胁我国生态环境、粮食

* 基金项目:国家重金属污染防治专项资金(GXHBTRXF2011-01)、国家“973”课题(2013CB934302)、国家科技支撑计划课题(2011BAD41B01)、中科院院地合作项目“能源植物在铜矿废弃地修复中应用及稳定重金属研究”和赣鄱英才“555”工程项目
修改稿收到日期:2014年4月29日

安全和人体健康。因此,如何规模化修复重金属污染土壤,已成为我国当前及今后一段时期环境修复面临的重要课题之一。当前,亟需发展和推广一种操作简单、成本低、环境友好的适合规模化修复重金属污染土壤的技术。

本文主要以江西省贵溪市贵冶周边重金属污染土壤修复示范工程为案例,分析规模化修复重金属污染土壤技术的选择、工程实施中的重点与难点,并对规模化修复重金属污染土壤技术工程提出展望,旨在为我国农田重金属污染修复技术工程和管理提供参考。

1 技术选择

1.1 思路选择

江西省贵溪市贵溪冶炼厂周边土壤受重金属污染严重,一些地方寸草不长,农田被迫废弃。土壤中铜、镉含量等超过我国土壤环境质量标准数倍以上。尼梅罗综合污染指数评价表明,大部分属于重度污染,生产的糙米和蔬菜中镉含量超标,周边村民多人血镉超标。重金属污染一度成为贵冶周边社会不稳定因素之一。《人民日报》、《人民网》等多次报道反映贵冶周边重金属污染情况。由于污染重,面积广,已严重影响了区域经济社会稳定和人民身体健康,并影响鄱阳湖区及长江流域生态安全,引起中央和江西省委省政府高度重视。如何治理,技术思路是关键。由于我国人多地少,土地资源紧张,大面积重金属超标或污染的耕地不可能弃之不用,污染耕地安全有效利用是符合国情的合理选择,如何选择有效治理技术是亟待解决的现实问题。

当前,按照修复原理,重金属污染土壤的修复技术分为物理技术、化学技术和生物技术等,具体主要有客土、土壤淋洗、固定化、稳定化、电动修复、热脱附和植物修复

等。每种修复技术都有其各自的适用性和优缺点,修复技术的选择不仅要全面考虑技术的特点,同时还应充分考虑修复成本、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。因此,从修复技术本身的特点,并结合修复区当地的经济发展水平和大面积治理现实,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,修复后不利于农田利用和作物生长。

鉴于此,该工程提出了调理-消减-恢复-增效的修复技术总体思路:(1)调理:用物理调节+化学改良,调理被污染土壤中重金属介质环境;(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。

1.2 分级制订治理目标

围绕上述治理技术思路,选择建立治理工程目标,然后选定技术方案。鉴于我国目前尚无重金属污染土壤治理的法定目标及相关评价标准,因此,我们依据具体可以实现的情况来分级选择确定治理技术目标。罗战祥等^[2]提出该区域重金属污染土壤的修复目标为:使修复后的土壤重金属指标镉(Cd)、汞(Hg)、砷(As)、铜(Cu)、铅(Pb)、铬(Cr)、锌(Zn)和镍(Ni)达到国家《土地环境质量标准》(GB15618-1995)三级标准。本案例中,要在连片集中且不同田块,污染程度不同、资金有限的前提下,一次性治理污染面积达2 000多亩,使得治理后的土壤特别是重度污染土壤既能达到三级标准,又不影响土壤的农业可利用性,短时间内很难实



中国科学院

现。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,更具实际意义。鉴于此,我们确定了治理目标:(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,覆盖不低于85%;区域景观得到显著改善和美化,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、能源等经济植物,且粮食作物可食用部分达到食用标准,经济效益显著(400公斤稻谷/亩/季)。

1.3 确定治理技术方案

基于以上讨论,围绕治理目标和技术思路,结合项目资金,选择治理的主要技术方案:物理/化学-植物-农艺调控联合技术。主要包括田间灌溉与排水沟网,翻耕土壤调节土壤结构,施用降低土壤重金属铜镉等有效态含量的无机或有机-无机结合型改良材料,旋耕土壤与改良修复材料深度混匀,清水平衡,种植有一定经济效益的重金属耐性植物等。

当前,修复土壤重金属污染的物理/化学技术研究相对成熟,其主要机理是利用改良剂吸附、络合、沉淀或共沉淀来降低土壤中水溶态和离子交换态重金属含量,达到降低重金属活性目的^[3]。本课题组在该区域重度污染土壤上前期进行的试验研究表明,通过施加微米羟基磷灰石、磷灰石和沸石等矿物材料能显著降低土壤重金属铜、镉等有效态含量,降低重金属对植物根系毒害,使寸草不长的污染农田植物能够生长。

案例中的工程技术方案的选择依据前期大量的室内研究和田间试验验证。从2006年开始,我们采集污染区土壤在室内进行修复培养研究,到温室盆栽水稻、黑麦草、巨菌草等植物进行试验,再到案例区内的污染田块进行验证试验,直到2012年进行大规模的技术示范工程。从研究到技术再到示范工程过程为:室内培养→温室盆栽→

田间验证→示范工程,前后用了8年多时间,为的是考察改良材料在污染土壤修复过程中的适用性、经济性和长效性;修复植物对区域内气候适应性、对土壤重金属的耐性及富集能力、生物量与生态功能、安全利用、经济效益或能否带动产业的发展。最终确定以微米羟基磷灰石、普通磷灰石粉、石灰和生物质灰等按比例组合的改良材料,并联合巨菌草、海州香薷、香根草、伴矿景天、香樟、冬青和红叶石楠等植物,辅以一定的物理和农艺措施形成一个能够规模化修复重度重金属污染土壤的技术——物理/化学-植物-农艺调控联合治理技术。

2 成效

示范工程于2012年1月全面实施,现已完成项目区2 111.7亩连片污染土壤修复治理,取得显著的环境效益、经济效益和社会效益。

2.1 环境效益

有效降低了污染土壤重金属活性(0.1 mol/L CaCl_2 提取)。如表1所示,所有样点修复后土壤0.1mol/L CaCl_2 浸提有效态Cu和Cd的下降幅度均达50%以上,实现了修复目标。其中有效态Cu含量降幅为51.8%—95.2%,且主要降幅集中在60%—90%之间;有效态Cd含量降幅为50.7%—74.5%,且主要集中在50%—60%之间。结果表明,修复改良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降低,为植物生长创造了条件。特别是一些寸草不长的重度污染区内。植物的生长为裸露的地表提供了植被覆盖,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。

表 1 修复前后土壤中铜、镉有效态含量变化

编号	修复区	修复前(mg/kg)		修复后(mg/kg)		降幅%	
		有效态 Cu	有效态 Cd	有效态 Cu	有效态 Cd	Cu	Cd
SM01	苏门	152.0	1.0	68.0	0.4	55.3	64.3
SM03	苏门	105.5	0.3	31.0	0.1	70.6	59.9
SM17	苏门	154.3	0.8	11.9	0.3	92.3	60.5
SJ01	沈家	125.0	0.2	38.1	0.1	69.5	55.6
SJ05	沈家	69.0	0.2	7.9	0.1	88.6	52.6
YS02	印石	41.8	0.4	15.4	0.2	63.1	53.8
YS04	印石	14.3	0.5	2.9	0.2	80.0	67.9
JN04	九牛	203.4	0.7	9.8	0.3	95.2	52.2
JN07	九牛	51.0	1.8	8.0	0.5	84.3	74.5
JN10	九牛	122.0	0.8	58.8	0.3	51.8	61.3
SQ03	水泉	27.7	0.9	10.1	0.4	63.6	53.1
SQ05	水泉	53.2	0.6	21.4	0.3	59.8	60.4
ZJ01	周家	14.8	0.4	6.1	0.2	58.8	50.7
ZJ06	周家	3.3	0.1	0.7	0.1	78.8	51.6
JJ02	蒋家	12.3	0.2	2.0	0.1	84.1	55.9
WJF01	王家畈	32.7	0.7	6.8	0.3	79.1	59.5
WJF02	王家畈	12.6	0.5	1.1	0.2	90.9	52.4
ZS06	竹山	118.8	1.7	43.1	0.7	63.7	61.7

如表 2 所示,项目区内种植的巨菌草每亩每年可以吸收转移 Cu 454.3 g、Cd 9.5 g。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能源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 1 822.3 mg/kg,Cd 含量为 10.2 mg/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,不属于危险废弃物。另外,有研究表明^[4],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。

2.2 经济效益

采用的物理/化学-植物-农艺联合技术修复规模成片的重金属污染土壤,与其他修复技术相比,特别是对于重度污染的土壤,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^[5],本案治理每吨土壤(按土壤表层计算)费用为 10—20 美元。案例中,

表2 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 (t/亩)	干重 (t/亩)	Cu 含量 (mg/kg)	Cd 含量 (mg/kg)	Cu 总量 (g/亩)	Cd 总量 (g/亩)
苏门	巨菌草	35.4	11.9	33.3	0.6	398.4	6.7
水泉	巨菌草	16.0	2.8	77.3	2.6	213.3	7.3
九牛岗	巨菌草	11.5	3.5	130.4	2.7	454.3	9.5
九牛岗	香根草	1.1	0.6	274.3	2.6	162.2	1.6
九牛岗	海州香薷	2.2	0.9	411.2	3.6	378.3	3.4
九牛岗	伴矿景天	2.6	0.3	103.2	52.6	29.0	14.8

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2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3所示,修复后使水稻每亩产量比对照分别提高了32.8%和49.4%,且稻米中的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)。

2.3 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、市和县委的重视和推介,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。期间,江西德兴、弋阳、乐平、湖北大冶、江苏苏州等地环保和农业行业官员到现场观摩,江西省委省政府在项目示范区召开了“全省重金属污染治理现场观摩推进会”,江西省省长鹿心社在现场就工程实施效果予以充分肯定,并称该工程抓住了区域污染治理的龙头。同时,省领导也认为工程发挥了“三解脱、四赢得”的作用,即,解脱了群众,污染区群众生产环境与生活质量显著改善,解脱了企业,群众因污染干扰企业生产程序的事件得到缓解,解脱了政府,政府解脱了涉污企业和因污染而上访群众之间长期以来的纠纷和矛盾而形成的压力;群众赢得了民生,环境赢得了改善,政府赢得了民心,企业赢得了效益。江西省两任省委

表3 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 (g)	产量 (kg/亩)	Cu (mg/kg)	Cd (mg/kg)
对照	10.8	92.0	32.5	337.4	10.2	0.3
单一改良	16.3	89.5	29.5	448.2	6.37	0.2
复合改良	19.7	90.6	31.0	504.1	8.67	0.2

书记苏荣和强卫均到工程现场调研过,认为贵冶周边重金属污染治理工程的模式很值得在其他地方推广。

3 工程实施中的重点与难点

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、治理标准、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。

3.1 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,再通过植物吸收减存总量,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与思路。这一目标现实可行,也有技术依据,被工程实施成效所证明,是我国首例提出以降低土壤重金属有效态量值为治理目标的工程案例。

3.2 技术路线和工程实施方案的确定

在前期技术孵化过程中,我们将本案例工程的技术路线概括为:(1)分区:根据地理位置和空间单元将要治理的2 000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。

3.3 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、铁粉、猪粪和生物质灰等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、石灰、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



中国科学院

点。综合污染区重金属污染的类型和气候特点,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。

3.4 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,合理合情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。可见,治理工程的施工和管理艰辛困难。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、利益保障性的工作方法,解决了治理工程施工、推广和管理中的难题。

4 思考与展望

4.1 思考

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有点热,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。

同时,土壤重金属污染连片治理要回答3个关联问题:(1)土壤污染物定量化量值与真实污染程度定性化的判别问题,回答什么程度污染必须

修复治理。因为就不同区域不同类型的土壤重金属污染而言,重金属不超标土壤可能生产超标作物,一些重金属总量超标的土壤不一定生产超标作物,关键是如何正确界定土壤污染物量值、污染程度与人体健康安全之间的关系;(2)消减与增效,回答污染土壤治理的方法、思路与目的性问题,规模化治理土壤重金属污染,应以治理后土地的安全利用、植物/农作物安全生长和人类安全生产为首要目标,工程治理中要将治理成本与安全利用和效益达到理性平衡点;(3)目标与风险,回答治理耕地效果科学评价、评估,将目标合理值、风险评估指标、技术导则联合起来统筹考量。

4.2 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。

4.3 建议

(1)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。

(2)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;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。

(3)从政府到市场分类建立土壤重金属污染治理资金投融资机制,探索“谁投资、谁受益”的土壤治理资金投入市场机制。

(4)增强土壤污染治理工程的项目设置科学合理性,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。

致谢 感谢梁家妮、王兴祥、周东美、林先贵、司友斌、项艳、吴龙华、周建军、周桔等诸位老师在项目实施中的贡献及文章修改中提供了宝贵意见!

参考文献

- 1 郭朝晖, 宋杰, 陈彩等. 有色矿业区耕作土壤, 蔬菜和大米中重金属污染. 生态环境, 2007, 16(4): 1144-1148.
- 2 罗战祥, 揭春生, 毛旭东. 重金属污染土壤修复技术应用. 江西化工, 2010, (2): 100-103.
- 3 Kumpiene J, Lagerkvist A, Maurice C. Stabilization of As, Cr, Cu, Pb and Zn in soil using amendments - A review. Waste Manage, 2008, 28(1): 215-225.
- 4 Chalot M, Blaudez D, Rogaume Y et al. Fate of trace elements during the combustion of phytoremediation wood. Environ Sci Technol, 2012, 46(24): 13361-13369.
- 5 Guo G L, Zhou Q X, Ma L Q. Availability and assessment of fixing additives for the in situ remediation of heavy metal contaminated soils: a review. Environ Monit Assess, 2006, 116(1-3): 513-528.

Engineering and Prospect for Remediating Large-scale Arable Land Contaminated by Heavy Metals with “Demonstration Project of Soil Remediation on the Periphery of Guixi Semlter” as example

Zhou Jing^{1,2} Cui Hongbiao^{1,2,3}

(1 Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China;

2 National Engineering and Research Technology Center for Red Soil Improvement, Red Soil Ecological Experiment Station, Chinese Academy of Sciences, Yingtan 335211, China;

3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract Based on the “demonstration project of soil remediation on the periphery of Guixi Semlter”, we mainly discussed the remediation technology for large-scale arable land contaminated by heavy metals, and the achievements of the project. Moreover, the emphases and difficulties during implementing the project were also discussed. At last, we prospected a series of strategies for the future development of large-scale arable land contaminated by heavy metals.

Keywords soil, heavy metal pollution, remediation, demonstration project

周 静 中科院南京土壤所研究员, 博士生导师。近年来主要从事土壤污染修复领域技术研究和工程示范工作。主持建立了目前国内修复面积最大的重金属污染土壤修复示范工程, 效果受到当地干群和环保部门的赞誉及国务院领导的关注。E-mail: zhoujing@issas.ac.cn

(相关图片请见封二)

