



我国土壤重金属污染 现状及治理战略*

文 / 周建军 周 桔 冯仁国
中国科学院科技促进发展局 北京 100864

【摘 要】我国土壤重金属污染形势严峻。根据我国土壤污染现实状况,开展土壤重金属污染防控和修复工作,保障生态环境与食品安全,已成为国家重大现实需求。文章根据我国土壤重金属污染治理现状和中科院前期的良好工作基础,从政府推动、科技驱动、工程示范和产业带动方面提出了我国土壤重金属污染治理的战略思考。

【关键词】 重金属污染, 土壤, 修复治理, 综合示范

DOI 10.3969/j.issn.1000-3045.2014.03.008

我国土壤重金属污染形势严峻。近年来,我国土壤重金属污染事件频发,不仅对耕地与农产品质量构成严重威胁,还直接损害了民众身体健康,影响社会稳定^[1]。国务院批复的《重金属污染综合防治“十二五”规划》、近期印发的《国务院办公厅关于印发近期土壤环境保护和综合治理工作安排的通知》(国办发〔2013〕7号)和《国务院关于加快发展节能环保产业的意见》(国发〔2013〕30号)中,都明确提出了攻克污染土壤修复技术和加强试点示范的要求。建设土壤重金属污染治理试点示范工程,加强修复技术体系研究和推广应用,防控和修复土壤重金属污染,提高土壤环境质量,保障生态环境与食品安全,已成为国家重大现实需求。

* 修改稿收到日期:2014年4月22日

1 我国土壤重金属污染现状

1.1 关于重金属污染

重金属种类。导致土壤环境产生污染的重金属主要有汞(Hg)、镉(Cd)、铅(Pb)、准金属砷(As)等生物毒性显著的元素,也包括有一定毒性的锌(Zn)、铜(Cu)、钴(Co)等常见元素。重金属在土壤中不能为微生物分解,因而会在土壤中不断积累,影响土壤性质,甚至可以转化为毒性更大的烷基化合物,被植物和其他生物吸收、富集,进而通过食物链在人、畜体内蓄积,直接影响植物、动物甚至人类健康。

土壤吸附。重金属进入土壤后,可被土壤胶体吸附,与土壤的无机物、有机物形成配合物,或与土壤中其他物质形成难溶盐,或被植物或其他生物吸收。重金属在土壤



中国科学院

中的迁移和转化主要控制过程为吸附,影响吸附的主要因素是重金属的性质和土壤环境的性质。重金属在土壤中的活动很大程度上取决于其是否被土壤胶体所吸附以及吸附的牢固程度。沉淀和溶解是重金属在土壤中迁移的重要方式,其迁移能力可直观地以重金属化合物在土壤溶液中的溶解度来衡量,即溶解度大者迁移能力大,溶解度小者迁移能力小。土壤的pH值直接影响重金属的溶解度和沉淀规律,一般而言,pH值降低,重金属溶解度增加;在碱性条件下,它们将以氢氧化物的形式析出,也可能以难溶的碳酸盐和磷酸盐的形态存在。同时,土壤的氧化还原状况也会影响重金属的存在状态,使重金属的溶解度和毒性等发生变化。

修复技术。重金属在土壤中的迁移和转化特点,决定了土壤重金属污染的修复治理方式方法。广义的土壤修复技术不仅是去除土壤中的污染物,还包括转化土壤中污染物的形态,降低其生物有效性和迁移性,消减土壤中的污染物对周边环境和人体健康造成的风险。常见的修复方法有工程物理技术、玻璃化技术、电动修复、电磁修复等物理修复技术,化学钝化技术、土壤淋洗技术等化学修复技术,以及微生物修复技术和植物修复技术^[2]等。不同环境土壤特点、不同污染种类以及不同污染程度的重金属污染治理,需要选择相应的修复技术体系。不同的修复技术其修复效率和修复成本也不同。

重金属污染是我国主要的土壤环境污染问题。我国受镉、砷、汞、铜、锌等重金属污染的耕地约有1.5亿亩,每年因重金属污染(如“镉米”、“砷米”等)的粮食达1 000多万吨,造成的直接经济损失200余亿元^[3]。

重金属在体内的积累会严重影响人体健康。始于1955年的日本富山县神通川流域骨痛病事件,即是因铅、锌炼厂排放含镉废水污染,公众食用含镉稻米和含镉水而中毒。在我国贵州赫章、江西赣州、广西桂林、湖南衡东、广东马坝和辽宁

张士地区,农作物镉含量超标,10%以上居民已出现不同程度腰背、四肢、骨关节疼痛等症状。

我国是人均耕地资源短缺的国家,为保证粮食安全问题,国家正下大力气坚守18亿亩耕地红线。及早实施重金属污染土壤的修复治理,可解决因受重金属等污染而产生的污染耕地抛荒问题,维护我国的粮食安全。

1.2 重金属污染成因、类型与修复潜力

污染成因。土壤重金属污染来源有金属矿山开采冶炼、化学工业生产、重金属农药、污水灌溉和化肥施用以及高地质背景值等,其中有色金属矿业采选和冶炼所排放的含重金属废气沉降、废水灌溉,以及废渣等固体废料溶蚀扩散进入土壤等是重金属污染的主要途径。矿冶活动导致周边及下游江河沿岸土壤重金属大量积累,在地理空间上沿重金属矿冶活动地区呈流域性或典型区域性分布。我国土壤重金属污染区域相对集中于云南、贵州、广西等西南地区,江西、湖南等华中地区,以及珠三角和长三角等地区。

污染类型。这些典型区域土壤重金属污染类型多样,主要以镉、砷、铅、铜、铬、汞等为主,不同区域间因来源不同又呈现一定的差异性,但从整体而言,以镉-铜、砷-镉-铅等为主的多种重金属元素复合污染,代表了我国主要的土壤重金属污染类型。随着我国经济社会快速发展,总体上,从城市、城郊到农村,从偏远的矿区到周边及流域,土壤污染的类型在增多,面积在扩大,程度在提高,危害在加剧。我国耕地及工矿场地土壤环境质量状况令人担忧。

修复潜力。我国约1.5亿亩的重金属污染土壤,地域上大部分分布于南方亚热带水热资源丰富地区。修复治理后的土壤具有巨大的利用潜力。中度和轻度污染的土壤修复后,单位面积粮食(水稻)产量可以提高10%以上,种植业还可得到发展;重度污染的土壤修复治理后,土壤生态功能得到恢复,通过适当利用,每亩农田每年可以产生1 000元左右的产值。全国污染土壤全部治理

修复后,每年可以为国家增加粮食产量,同时有助于改善和维护污染区域民众健康。土壤污染是事关农业、农村、全民健康和国家安全根本利益的大事,其修复治理可形成巨大的经济、社会和生态效益。

2 我国土壤重金属污染修复治理存在的问题

我国未来经济发展仍将保持较高的增长速度,随着工业化、城镇化的加快推进,可以预计,一定时期内重金属等污染物排放仍将保持一定的增长势头,我国土壤重金属污染形势将越发严峻。若不加以有效遏制、控制和修复,付出的环境与生态代价将更大,损害食品安全和公众健康的问题将更突出。目前,关于我国土壤重金属污染修复治理存在以下主要问题。

2.1 治理示范规模小、试点少

目前,国内不同部门在土壤重金属污染修复治理方面积极开展工作,在局部地区取得了明显的修复治理效果,但因多方面因素,大部分限于小规模、试验性示范,不足以有效遏制土壤重金属污染恶化的趋势,要将其实际应用推广还需要进一步示范实践。只有建设大规模的连片治理综合示范区,开展具有规模示范意义的规范化技术体系和修复模式示范,方能充分展示土壤重金属污染治理的技术发展趋势与社会推广前景。以区域性、流域性土壤污染综合防治、工矿污染场地风险控制和土壤环境质量修复改善为重点,选取已对生态环境安全及人民身体健康造成严重威胁并产生严重后果的典型重金属污染农田、区域与场地,如污灌区、矿山、冶炼厂、电子垃圾拆解区等,多部门联合,集中力量开展综合治理示范,形成特色模式,是土壤重金属污染治理修复工作面临的紧迫问题。

2.2 缺少符合我国土壤重金属污染特征的“分类分区”治理技术模式

我国污染土壤防治工作处于起步阶段,“十一五”进步明显,但在修复技术、装备及规模化应用上还存在较大差距,技术支撑能力不足,基础研究与应用技术研究衔接不够,技术研究尚未形成完备体系,系统性、集成性的土壤重金属污染治理修复和资源化利用技术体系不够完善。整体而言,自主研发技术成果不能完全满足土壤重金属修复的现实需求。尤其针对不同土地利用方式、重金属污染类型及污染程度,还需加强物理稳定、植物净化、工程控制等联合修复和后评估技术等,研发并大力推广含稀有、贵金属的矿山尾矿或工业废弃物资源化回收利用的绿色环保技术。同时,我国土壤重金属污染区域特征明显,土壤属性差异大,相应的重金属污染物类型多样,污染治理技术与模式在不同区域、不同污染物类型及不同土地利用方式上实用效果差异显著。重金属污染治理必须考虑区域特点,在修复治理中充分体现“一区一策”的治理理念。

2.3 土壤重金属污染修复技术工程化、技术(装备)产业化亟待加强

国内现有的土壤重金属污染修复治理工作尚缺少修复技术的产业化目标,缺乏跨部门、行业,包括企业的联动,难以形成成本低、环境友好、市场竞争力强的土壤修复产品,以及操作方便的技术和设备。污染修复治理须以产业化为目标,联合部门、行业和企业,共同研制低成本、环境友好型、物理、化学和生物联合、支撑污染土壤快速修复的工程设备和核心产品,建立土壤修复技术创新团队和孵化基地,建设土壤修复产业技术平台与联盟,切实改善土壤环境质量,提高重金属污染土壤修复技术与模式的工程化程度,体现技术的明确工程指标,推动



中国科学院

修复治理技术和机械设备的配套与可植入性,进而促进土壤修复产业的培育和发展。

2.4 土壤重金属污染标准需进一步修订

合理的土壤重金属污染标准是确定土壤重金属污染状况和评价污染土壤修复效果的基础。我国现行的土壤环境质量标准已不适应当前土壤环境管理的需求。亟需制订并尽快出台分区、分类、分级的国家土壤环境质量标准体系,科学建立不同区域的土壤环境重金属质量标准;分类建立自然土壤、农业土壤、居住、商业及工业建设用地土壤的重金属质量标准等。

3 中科院工作基础

中科院在土壤环境保护领域开展研究工作的有南京土壤所、地理科学与资源所、沈阳应用生态所、亚热带农业生态所、地球化学所等10余个研究所,20世纪90年代依托南京土壤所成立了全球土壤修复网络-亚洲中心。针对土壤重金属污染治理修复,中科院在国内率先开展了相关理论与技术研究工作。近年来,通过与地方政府紧密合作,在广西环江流域、河南济源、云南个旧和会泽、江铜贵冶周边区域、湖南湘江流域等我国土壤重金属污染典型区域,开展了一定规模的连片修复试点工程,为我国土壤重金属污染修复提供了治理示范。

3.1 广西环江砷污染农田土壤修复治理工程

中科院地理科学与资源所等筛选出砷超富集植物蜈蚣草^[4],以此为基础建立了重金属植物萃取修复技术、植物阻隔技术、间套作修复模式、植物-物理-化学联合修复技术等污染土壤成套关键修复技术,具有低成本、易操作、不产生二次污染等特点,是不破坏土壤性质的绿色修复技术(图1)。在广西环江连片修复砷污染农田1280亩,建立了国际上第一个砷污染土壤植物连片修复工程,5年间每公顷去除砷35千克。修复农田产出的桑叶和蚕丝的重金属含量均符合相关标准,玉米、水稻、



图1 蜈蚣草修复污染农田(萃取土壤重金属)

甘蔗平均增产154%、30%、105%,玉米籽粒中砷含量下降39%,产品质量达到《粮食卫生标准》(GB 2715-2005)的要求。该项工作推动了我国农田土壤修复技术的大规模产业化应用,先后受到环保部、科技部、国土部及广西壮族自治区的广泛关注。2012年,环保部组织各省环保厅在环江县召开了“全国农田土壤修复现场会”。

3.2 江西贵冶镉铜污染农田土壤修复治理工程

中科院南京土壤所针对江铜集团贵溪冶炼厂周边土壤污染特征(贵溪冶炼厂是世界上单体规模最大铜冶炼厂,周边土壤受到重金属铜镉等污染,农田废弃),研发了物理/化学-生物(植物/微生物)-农艺联合修复技术^[5,6],建立了我国目前一次性修复面积(2075亩)最大的重金属污染土壤修复示范工程。示范区污染土壤重金属总量或有效态含量大幅降低,土壤镉、铜有效态分别降低了51.5%和48.7%。寸草不长的重度污染区植被开始逐渐恢复、土壤质量有所提升,种植的巨菌草等耐性植物(非粮生物质能源)、海州香薷等超积累植物取得很好的效果,中轻度污染区作物产量和品质提高、产值增加。时任江西省委书记苏荣、江西省省长鹿心社等在示范区召开了全省重金属污染治理现场会,充分肯定了示范效果。环保部等组织多批专家到示范区现场调研,给予积极评价。

3.3 湖南湘江流域镉铅污染土壤修复治理工程

中科院亚热带农业生态所自20世纪80年代

中期开始,致力于湖南省的农田重金属污染综合防治与示范推广工作,全面实施农产品产地分类管理,对未受污染的产地强化保护与管理;对受污染的产地,根据不同污染程度,选择适宜的技术措施,或改革种植模式,或选种作物品种,或进行土壤修复治理^[7]。分别在株洲马家河镇、安化715矿区、郴州苏仙区、嘉禾陶家河流域镉、砷、铅等重金属污染典型地区建立了长期研究与示范基地。“镉米”风波发生以来,该所创建的“VIP”稻米降镉技术模式(即选种低镉累积水稻品种(Variety),改革稻田灌溉(Irrigation)方式,施用生石灰调节土壤酸度pH值),已在衡东、长沙、湘阴、桃江、赫山5区县分别建立了千亩中稻示范片。

此外,中科院还先后在湖南石门、郴州、株洲,云南个旧和会泽,河南济源,贵州万山,广西河池,广东大宝山,辽宁沈阳,浙江富阳和台州等地的镉、砷、铜、锌、铅、汞等重金属污染土壤治理修复中,与30余家企业合作,建立了60余个示范基地,累积修复污染土地逾10万亩。建立了面向产业化的示范工程,创建了“边生产、边修复”的技术模式。这些成果受到当地农民的欢迎,得到了部门和地方政府的高度评价。尤其对示范工程的长期治理效果进行了分析评估,建立的技术体系已具备推广应用需求,为我国土壤重金属污染修复提供了参考。

4 我国土壤重金属污染治理战略思考

4.1 政府推动,加强环境监管保护和加大治理力度

对重金属污染环境的有效治理,政府发挥着污染监管、环境保护、综合治理、产业促进等重要作用,相关政策措施对环境修复产业的发展具有深刻影响。在监管方面,根据相关环境保护标准,加强工农业生产过程监

管,对相关企业排放物及矿产资源开发活动区域周边环境质量开展污染物监测与专项执法检查,加强对存储设施、治污设施、处理设施及其周边环境的管理,并加强整治;在未受污染的环境保护方面,在保护区域内严格产业环境准入,对未污染土壤加强保护,从严管控污水灌溉和污泥农用,防止对耕地和水源地造成新污染,加强环境风险管控;在治理方面,对被污染耕地实施分类管理,重金属轻度污染土壤采取农艺调控、非粮作物修复等措施,确保耕地安全生产,重金属重度污染土壤,根据利用价值,采取物理化学修复或制定种植结构调整、退耕还林还草等措施;在产业促进方面,积极联合国家相关部门和科研院所开展修复试点示范与区域重金属土壤污染综合治理,鼓励重金属污染土壤修复治理相关科技成果在地方企业的转移转化,引导和鼓励企业资金投入土壤环境保护和综合治理,加强政策引导,吸引社会资金投入,开辟多元化投资渠道,鼓励企业开展修复技术集成和设备研发,承担土壤污染修复项目,推动土壤修复产业发展。

4.2 科技驱动,加强技术集成与创新研究

重金属污染治理,需要具备对应全污染链条各环节的完整技术体系。在源头控制上,发展废气、废水、废渣的清洁处理与资源化利用技术;在路径截断方面,结合工程措施发展污染阻断和拦截技术;在土壤治理环节,需要发展各种减量灭活的修复治理技术体系。目前,无论是生物措施、化学措施还是工程措施,治理技术尚显单一,需组织研究力量进行系统化集成研发,并对处于研究阶段的措施进行工程化改造。同时,还需要借鉴、引进国外环保方面的先进理念和经验,集成创新污染治理各环节、不同污染类型的治理技术体系,提高修复效率,降低修复成本,为土壤重金属污染治理提供高效的



中国科学院

科技手段。此外,通过系统化研究,为分区、分类、分级的国家土壤环境质量标准体系制定、环境风险评估体系建立以及环境修复相关的分级管理和推广应用治理技术体系构建等提供支撑。

4.3 示范先行,加强土壤重金属污染治理综合示范区建设

土壤环境修复需要国家相关政策的扶持,需要法律法规的规范,更需要国家环保部门、地方政府、企业之间的密切配合,建立创新联盟,共同开展协同创新,形成因地制宜的修复技术体系和科学合理的治理模式。根据现阶段我国土壤重金属污染治理现状,应探索“边生产、边治理”的修复模式,衔接地方规划和部门重大工程,选择危害严重、影响较大的污染流域或典型区域,如广西环江、江西贵溪、湖南石门和长株潭等,以成熟技术成果的规模化工程示范为切入点,以污染土壤的安全利用为目的,将经济、生态和社会效益统一,合理设计污染修复技术体系,建立重金属污染土壤修复技术综合性试验示范区,搭建土壤重金属污染修复的网络化监测体系、公共检测与中试服务系统、各类集成技术成果综合展示平台。在示范工作中集成创新并展示因地制宜的系统性解决方案,建立全国影响力的土壤重金属污染治理示范样板,以点带面,引领和推动全国重金属污染土壤的修复治理工作。

4.4 市场带动,探索产业化修复治理模式

我国土壤污染治理的任务艰巨,同时,环境修复市场有着巨大的成长空间。实现连片重金属污染土壤的清洁与安全生产,需要相关技术的工程化、规模化和产业化。尤其还需大力提高技术装备、产品、服务水平,特别在土壤中重金属稳定与固化技术、受污染土壤的低成本、高效率的生物修复技术、修复治理工程化设计、二次污染处理与资源化利用等方面,加强面向产业化发展的重点研

发,实施产业化工程示范并加快推广应用,联合环保企业介入,共同发展相应的稳定性好、可靠性高的修复产品。土壤重金属污染修复治理工作,应进一步明晰产业化目标,加强跨部门、行业,包括企业的联动,形成成本低、环境友好、市场竞争力强的土壤修复产品以及操作方便的技术和设备。近期,在国家相关部门和地方政府的支持下,可通过产学研联合实施重点区域重金属污染土壤修复治理的重点示范工程工作,发挥技术主导优势,利用国家和相关部门的倾斜性政策,吸引社会多元投入,促进污染控制、环境修复、污染物资源化利用等成套技术在全类企业的转移转化,形成清晰的商业模式,实现技术成果的商品化和规模产业化,在修复过程中发展环境修复产业和服务业,通过产业发展最终实现我国土壤重金属污染现状的根本好转。

致谢 感谢周静、陈同斌、骆永明、黄道友、郭书海、雷梅、蔡立、吴龙华、周东美、王兴祥、叶树峰、郑建中、肖唐付、滕应等诸位老师提供的资料与文献。

参考文献

- 1 中国工程院,环境保护部等. 中国环境宏观战略研究. 北京: 中国环境科学出版社, 2011.
- 2 骆永明. 中国主要土壤环境问题与对策. 南京: 河海大学出版社, 2008.
- 3 中国科学院学部. 我国土壤重金属污染问题与治理对策. 2013.
- 4 谢景千, 雷梅, 陈同斌等. 蜈蚣草对污染土壤中砷、铅、锌、铜的原位去除效果. 环境科学报, 2010, 30(1): 165-171.
- 5 周东美, 王玉军, 郝秀玲等. 铜矿区重金属污染分异规律初步研究. 农业环境保护, 2002, 21(3): 225-227.
- 6 杜志敏, 郝建设, 周静等. 四种改良剂对铜和镉复合污染土壤的田间原位修复研究. 土壤学报, 2012, 49(3): 508-517.
- 7 黄道友, 陈惠萍, 龚高堂等. 湖南省主要类型水稻土镉污染改良利用研究. 农业现代化研究, 2000, 21(6): 364-370.

(转至 350 页)