

doi:10.3969/j.issn.1007-7545.2021.03.001

我国有色金属工业土壤重金属 污染防治的现状与对策

王妍

(中国环境保护产业协会,北京 100037)

摘要:我国是有色金属生产大国。有色金属产业发展带来的环境问题,特别是土壤重金属污染的防治,是土壤污染防治中的重点领域。目前,我国就土壤重金属污染防治出台了一系列法规政策,对有色金属工业土壤重金属污染防治工作提出了具体要求。但是,总体看来,我国有色金属工业土壤重金属污染防治工作仍然面临着严峻的形势。进一步贯彻相关法规政策,建立健全体制机制,促进相关领域技术创新,通过机制推动促进产业发展等,均是“十四五”时期该领域发展中应当重视的问题。

关键词:有色金属工业;土壤重金属污染;防治

中图分类号:X53

文献标志码:A

文章编号:1007-7545(2021)03-0001-09

Status and Countermeasures on Soil Heavy Metals Pollution Control in Nonferrous Metals Industry in China

WANG Yan

(China Association of Environmental Protection Industry, Beijing 100037, China)

Abstract: China is a large nonferrous metals producer. Environmental problems caused by development of nonferrous metals industry, especially prevention and control of soil heavy metals pollution, are the key areas in prevention and control of soil pollution. At present, China has issued a series of laws and policies on prevention and control of soil heavy metals pollution, and put forward specific requirements for prevention and control of soil heavy metals pollution in nonferrous metals industry. However, on the whole, the prevention and control of soil heavy metals pollution in nonferrous metals industry is still facing a grim situation in China. To further implement relevant laws and policies, establish and improve system and mechanism, promote technological innovation in related fields, and promote industrial development through the mechanism are key issues that should be paid attention to in the development of this field during the “14th Five-year Plan” period.

Key words: nonferrous metals industry; heavy metals pollution in soil; prevention and control

有色金属是国民经济建设和社会发展的物质基础,是提升国家综合实力和保障国家安全的关键性战略资源。我国有色金属矿产资源丰富,已形成包括采矿、选矿及冶炼等在内的完整的产业体系。

2019年,我国十种主要有色金属产量达到5 865.96万t^[1],连续18年稳居世界首位。然而,有色金属资源开发与利用规模的扩大,一方面促进了和社会的发展,增加了社会财富,另一方面也带来了日益

收稿日期:2021-01-04

作者简介:王妍(1984-),女,甘肃张掖人,硕士,高级工程师

严重的环境问题。据统计,每生产1 t金属,要从矿山平均开采110 t矿石^[2],采、选、冶过程中产出大量废水、废气和固体废弃物,以重金属元素为主的污染物通过废气、废水的排放以及固体废弃物的堆放进入土壤,使得土壤成为有色金属工业污染物排放的最终载体。由于重金属在土壤中不易被微生物降解,滞留时间长,并可经食物链最终影响人类健康,因此采取措施对有色金属工业造成的土壤重金属污染进行防治是极其必要的。本文对我国有色金属工业土壤重金属污染及防治的现状进行综述,并在此基础上梳理问题,提出对策。

1 我国有色金属工业土壤重金属污染防治现状

1.1 有色金属工业土壤污染现状及特点^[3-11]

2014年4月17日,原环境保护部及原国土资源部联合发布了《全国土壤污染状况调查公报》,对我国首次全国土壤污染状况调查结果进行了公告。《公报》显示^[3]，“全国土壤环境状况总体不容乐观,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,工矿业、农业等人为活动以及土壤环境背景值高是造成土壤污染或超标的主要原因。土壤污染或超标的主要是土壤环境背景值高以及工矿业、农业等人为活动造成的”。全国土壤污染物以无机型为主(主要是镉、汞、砷、铜、铅、铬、锌、镍8种),占全部超标点位的82.8%。“在调查的690家重污染企业用地及周边的5846个土壤点位中,超标点位占36.3%,主要涉及黑色金属、有色金属、皮革制品、造纸、石油煤炭、化工医药、化纤橡塑、矿物制品、金属制品、电力等行业;在调查的81块工业废弃地的775个土壤点位中,超标点位占34.9%,主要污染物为锌、汞、铅、铬、砷和多环芳烃,主要涉及化工业、矿业、冶金业等行业;另外,在调查的70个矿区的1672个土壤点位中,超标点位占33.4%,主要污染物为镉、铅、砷及多环芳烃,其中有色金属矿区周边土壤镉、砷、铅等污染较为严重。”^[3]

我国有色金属工业所涉土壤环境状况总体不容乐观,相关企业的运行已经对周边的土壤环境造成污染。

1.1.1 污染来源

除本身由于地球化学作用而可能造成背景值偏高外,其它有色金属工业周边环境土壤中的重金属则主要来源于矿产开采、洗选、运输、冶炼等过程中废气、废水的排放及固体废弃物的堆放。

1)通过固体废物堆积进入到土壤

矿山采选及冶炼过程中将产生大量固体废物,如废石、尾矿、冶炼渣等,由于我国有色金属矿产具有中低品位资源多、复杂共生矿多等特点,且采出矿石的品位越来越低,采选及冶炼过程中将产生大量的固体废物。据统计,2018年有色金属行业产生一般工业固体废物4.8亿t,约占全国一般工业固体废物产生量的14.7%,产生危险废物721万t,占全国危险废物产生量的10%以上,其中冶炼环节产生危险废物584万t,约占81%左右。数量如此庞大的固体废物,如堆放处置不当,经过长期的自然氧化、雨水淋滤等物理、化学和生物作用,将会释放大量的有毒有害的重金属元素,并进入到土壤和水体中,给周围土壤环境带来严重污染。

2)通过废水进入到土壤

有色金属矿山采选及冶炼产生的矿井涌水、废石场淋溶水、选矿废水、地面冲洗水、尾矿库排水及冶炼废水等一般为酸性含重金属废水,在事故工况或未达标排放的情况下通过地面漫流、垂直入渗进入土壤,从而造成矿区及周边土壤污染。

3)随着大气沉降进入到土壤

露天采矿及地下开采的钻孔、爆破、矿石的装载运输过程产生的粉尘,堆放的尾矿库、废石场和废渣随风产生的扬尘以及选矿厂、冶炼厂等有组织排放的废气中均含有大量的重金属元素,可自然沉降至地表土壤并通过降雨淋溶进入土壤。

1.1.2 污染特点

1)很难通过直觉感受发现,需要对土壤及农作物样品进行检测,有时还要对人和动物健康状况进行诊断后才能确定,隐蔽性强。

2)重金属元素在土壤中难以迁移、扩散和稀释,易于在土壤中不断累积而超标。

3)当重金属元素在土壤中的含量超过一定程度时,就会造成土壤性能和结构的变化,很难靠稀释作用和自净作用来消除,具有难治理的特性。

4)有色金属矿多为多金属伴生矿,同时,受选冶过程中采用化学药剂的影响,所造成的污染大多数为重金属之间以及重金属—有机物之间构成的复合污染。

1.1.3 污染产生的危害

1)重金属在土壤中蓄积到一定程度会破坏植物正常的生长代谢功能,使植物的发育受到抑制,甚至出现大面积的死亡现象。

2)重金属可以通过食物链在人体中富集,对人

体健康造成极大危害。

3) 重金属会减少土壤系统的生物多样性,降低土壤中的微生物量,从而影响土壤结构和功能的稳定。

1.2 有色金属工业土壤污染防治制度体系^[12-15]

随着环境形势的日益严峻,近年来国家逐渐加大对土壤污染的监管力度和对相关污染治理与修复的支持力度。“十三五”期间,关于土壤污染防治的法律法规、政策、标准等的制度建设也取得了重大进展,日益健全、完善的法律法规、标准体系和逐步落地的政策支持促使有色金属工业土壤污染防治工作更加规范有序。

2016年5月,国务院发布《土壤污染防治行动计划》(以下简称“土十条”),确定了“十三五”乃至更长一段时期我国土壤污染防治的指导思想、原则和防治任务,通过开展土壤污染调查、推进污染防治立法、开展污染治理与修复、加强目标考核等10个方面的规定和要求,全面提升我国土壤污染防治工作能力。“土十条”确定有色金属矿采选、冶炼行业为土壤污染重点监管对象,并提出包括在特定区域禁止或严控新建企业,现有企业加快提标升级改造,建立调查评估制度,每年开展土壤环境监测,严防矿产资源开发污染土壤,加强重金属污染防控,全面整治尾矿、赤泥、冶炼渣等堆存场所在内的多项管控措施。

根据“土十条”关于“推进土壤污染防治立法、建立健全法规标准体系”的相关要求,2016年以来,我国先后印发了《污染地块土壤环境管理办法》《工矿用地土壤环境管理办法》《农用地土壤环境管理办法》,并试行《土壤环境质量建设用地土壤污染风险管控标准》与《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准》,进一步加强了政府对企业土壤污染的管控力度。同时,还发布了《农用地土壤环境质量类别划分技术指南》《建设用地土壤环境调查评估技术指南》《环境影响评价技术导则土壤环境(试行)》《污染地块风险管控与土壤修复效果评估技术导则》《地下储罐等设施防止泄露、渗透技术指南》《工矿用地土壤污染隐患排查技术指南》等文件,为相关行业土壤污染防治提出了技术指导。

2019年伊始,我国土壤修复行业迎来了里程碑事件,即《中华人民共和国土壤污染防治法》(以下简称“《土壤污染防治法》”)正式颁布实施。《土壤污染防治法》突出“以提高环境质量为核心,实行最严格的环境保护制度”,将立法作为解决土壤污染问题的根本性措施,立足于我国发展阶段的实际,着眼于国

家长远利益,为进一步完善生态环境保护法律、标准体系,推进土壤污染防治工作规范有序发展提供了强有力的制度保障。

《土壤污染防治法》实施两年来,土壤污染防治管理工作取得了长足发展,2019年以来相继出台多项配套政策、标准、规范。其中,《土壤污染防治专项资金管理办法》《土壤污染防治基金管理办法》等文件的出台,为土壤污染防治提供了资金支持,将有利于推动相关工作尽快开展;《污染地块地下水修复和风险管控技术导则》《受污染耕地治理与修复导则》《建设用地土壤污染风险管控和修复监测技术导则》《建设用地土壤污染状况调查技术导则》《建设用地土壤修复技术导则》《建设用地土壤污染风险评估技术导则》等系列国家环境标准的制修订进一步规范了土壤修复各阶段工作的实施。

关于矿山修复,2019年12月,自然资源部发布《关于探索利用市场化方式推进矿山生态修复的意见》,针对矿山生态修复历史欠账多、现实矛盾多、投入不足等突出问题,提出要吸引各方投入,推行市场化运作、科学化治理的模式,推进矿山生态修复,这也必将有力带动包括有色金属矿在内的各类矿山的生态修复进程。

总体来看,我国土壤污染防治在宏观层面的法律法规、政策、标准体系不断完善,对于有色金属工业土壤污染防治工作起到了较好的引导和规范作用。

1.3 有色金属工业土壤污染防治技术^[16-32]

1.3.1 物理法

物理法是利用污染物的物理性状,借助机械分离、挥发、电解和解吸等物理方法减少、消除、稳定、转化土壤中重金属污染物的技术及方法。常见的物理法有:

1) 客土法

主要是通过将被污染的土壤覆盖或者与被重金属污染的土壤混合,将上下土层翻动混合均匀,或者用未被重金属污染的土壤替换被污染的土壤等手段,降低被污染的土壤中的重金属污染物浓度。这些措施的优点在于方法成熟,主要缺点是修复成本高,污染物并未得到完全清除,以及可能造成二次污染等问题。

2) 电动修复法

电动修复法是利用电渗透、电迁移、电泳等重金属的主要迁移方式,通过梯度电压促进土壤中金属离子迁移,然后经过沉淀、抽离或者离子交换等方

式,清除土壤中的重金属污染物。电动修复技术具有成本低廉、效果较好的优点。但是,该技术也存在去除速率易受到荷电性质、金属浓度、荷电数量、土壤空隙水电流密度、界面化学性质等因素影响的缺陷。

3)热处理法

热处理法主要是利用重金属的挥发性,利用热传导或者辐射等加热方式使重金属与土壤分离。这种方法通常应用在熔点较低、挥发性较强的重金属污染治理当中。该技术的主要问题为易使土壤有机质和土壤水遭到破坏,且工程量较大、耗能较多。

4)玻璃化技术

通过加热使污染的土壤熔化,土壤冷却后凝固成玻璃状结构。通常条件下,玻璃非常稳定,一般的试剂难以破坏它的结构,对某些特殊重金属(如放射性废物)具有较强的适用性。但玻璃化技术熔化过程需要消耗大量的电能,成本较高,工艺较为复杂。

1.3.2 化学法

化学法主要是向土壤中添加固定剂、淋洗剂等,与重金属发生反应,进而达到修复重金属污染的目的。该种方法的效率较高、修复范围广,相应的成本也较高,且容易造成二次污染。常见的化学法有:

1)化学固化法

化学固化是通过加入固化剂改变土壤的理化性质,增强土壤对重金属污染物的吸附或者沉淀作用来降低其可移动性,从而防止重金属元素向更深层的土壤或者向地下水进行迁移的方法。化学固化法的常用原材料包括石灰、磷肥、含铁氧化物等。使用化学固化法可以降低重金属污染物的去除成本,但是污染物仍然存在于土壤中,土壤无法恢复到原始的状态。

2)淋洗法

土壤淋洗法的原理,是通过提取剂把土壤中的重金属元素提取到土壤淋洗液中,经过清水洗涤去除掉相应的提取剂,再将处理后的土壤放入到原位,并对废水进行回收利用。目前,主要的提取剂有硝酸、盐酸、磷酸、EDTA和DTPA等。

3)有机质改良

有机质改良主要是指借助腐殖质与金属离子发生络合反应,促使重金属污染物沉淀、降低金属的生物有效性。常用的腐殖质有胡敏酸、氨基酸、富里酸及一些杂环化合物。有机质改良的优点在于处理过

程不会产生新的污染物。

1.3.3 生物法

生物法是利用生物对环境中的污染物进行降解,包括植物修复法、微生物修复法、动物修复法等,具有成本低、易操作、无二次污染等优点。

1)植物修复法

植物修复是利用植物根系吸收水分和营养的过程来固定、清除、修复重金属污染物的方法。按照修复机理和过程可分为植物固定、植物挥发、植物提取、根际过滤等。

植物固定是通过耐重金属植物及其根系微生物的分泌作用螯合、沉淀土壤中的重金属,以降低其生物有效性和移动性,达到固定或者隔绝重金属进入水体和食物链的途径和可能性。植物固定法在铅污染土壤修复方面效果较为显著。

植物挥发主要是利用植物使重金属转变成可挥发的形态,从植物和土壤表面挥发,从而降低土壤重金属污染程度的方法。该方法主要适用于去除汞等可挥发的重金属元素。植物挥发技术面临的主要问题是,将重金属转移到大气中,容易造成其他环境污染问题。

植物提取是利用重金属超富集植物,从土壤中提取重金属污染物,然后通过收割植物地上部分的方式进行集中处理。目前已知的重金属超富集植物大部分生长缓慢、产量较小,很难实现规模化种植,无法满足大面积污染土壤修复要求。

根际过滤工艺则是利用植物根系过滤积淀水体中的重金属污染物。适合于根际过滤技术的植物通常根系发达,对重金属吸附能力强。常见的植物有浮萍、水葫芦、宽叶香蒲、芦苇等。

2)微生物修复法

微生物修复法是利用微生物的吸附、富集和氧化还原作用降低土壤中重金属的含量或者改变重金属的形态,降低土壤中重金属的毒性。微生物具有种类多、个体小、繁殖快、适应性强、易变异的特点,修复时不会影响土壤结构特征,更能够实现原位修复。但是,微生物的活性受环境条件变化的影响明显,若微生物大面积死亡,其所吸附的重金属元素会被重新释放到土壤当中,最终破坏重金属土壤污染的控制和处理效果。

3)动物修复法

动物修复技术主要是利用动物在土壤中生长、繁殖等活动对重金属污染物进行转化和富集,最终通过对动物的收集、处理,从而降低土壤中重

金属污染物的含量。目前常用的有蚯蚓、蜘蛛、线虫、老鼠等对重金属有较强耐受能力和富集能力的动物。

1.4 有色金属工业土壤污染防治市场状况^[33]

1.4.1 资金投入

为贯彻落实“土十条”,中央财政设立土壤污染防治专项资金(以下简称“专项资金”),支持土壤污染状况调查、风险管控、监测评估、监督管理、治理修复等工作。“十三五”期间共计下达专项资金259.13亿元。其中2016年68.75亿元、2017年65.38亿元、2018年35亿元、2019年50亿元、2020年40亿元。中央专项资金的投入将带动地方和社会资金投入土壤污染防治领域,扩大行业资金来源和规模。2020年专项资金分配额度超过2亿元的省区由多至少依次为湖南、湖北、广西、贵州、浙江、广东、河北、云南。此八省区资金总和达到近28.0亿元,占全国专项资金总额度的近70.0%。从专项资金分配区域看,2020年专项资金重点支持的省区主要分布在华中、西南、华南等有色矿产丰富、重金属污染严重且环境较为敏感的区域,这与2018年、2019年的资金分配情况基本一致,专项资金的持续注入体现了国家对解决重点行业、重点区域环境问题的重视与支持。

除中央支持外,2020年1月17日发布的《土壤污染防治基金管理办法》(财资环[2020]2号)明确了省、自治区、直辖市、计划单列市级财政可以单独出资或者与社会资本共同出资设立,采用股权投资等市场化方式设立政府投资基金,主要用于农用地土壤污染防治和土壤污染责任人或者土地使用权人无法认定的土壤污染风险管控和修复,这将促使该部分搁置项目陆续得到释放,修复市场资金短缺的情况有望逐步得到缓解。

1.4.2 市场状况

根据中国环境保护产业协会监测,2020年全国正式启动土壤污染防治项目3918项(仅为已招标项目),总项目金额约为302.75亿元。其中,矿山治理项目数量为1251个(图1),占全国启动项目数量的31.9%,项目金额为184.01亿元,占全国启动项目总金额的60.8%,无论是项目数还是金额都位列第一,超过了工业场地修复和农地修复,较2019年也有较大提升。矿山治理项目场地多属于有色金属采、选、冶行业,以重金属污染和矿山酸性排水污染为主,治理内容以生态修复和废渣等污染治理为主。

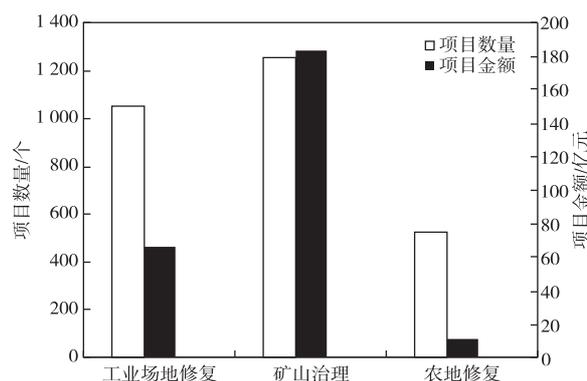


图1 2020年土壤修复项目主要类型分布及项目金额

Fig. 1 Distributions of main types and project amounts of soil remediation projects in 2020

2020年的矿山治理项目中,咨询服务项目368个,占全国启动项目数量的29.4%,总项目金额为14.82亿元,占全国矿山治理项目总金额的8.1%;修复工程项目数量为883个,占全国矿山治理项目数量的70.6%,项目金额为169.19亿元,占全国启动项目总金额的91.9%,两者的资金分配比接近1:9。矿山治理的咨询项目及工程项目相辅相成,其市场走向基本一致,在咨询项目的基础上,紧跟着修复工程的落地实施。

通过对2020年的矿山治理项目来源进行分析,发现项目来源较为单一,约77.0%的项目由政府及职能部门(含各级人民政府、自然资源局、生态环境局等)直接参与,13.8%的项目为政府通过土地储备中心、城投/城建公司间接参与,1.4%的项目为地产开发商投资,而责任企业负责治理的项目仅为7.7%。可以看出,矿山治理项目目前依然主要为政府及相关部门主导。

2 我国有色金属工业土壤污染防治存在的问题及建议

2.1 我国有色金属土壤污染防治存在的问题^[34-38]

1) 管理体系有待进一步完善

从宏观层面来看,近年来,我国土壤污染防治的法规和政策体系不断完善,主体责任、修复标准和相关配套措施等方面的规定越来越明确。然而,就单个行业来看,我国有色金属工业污染土壤治理在管理体系方面还存在过于粗狂、不够精细化的问题。土壤修复是一项综合性的治理工程,有色金属土壤污染的修复更是受到金属类别、土质环境、土地用途

等方面因素的影响。因此,需要对不同地区的有色金属土壤污染问题进行详细的研究,制定完善的治理规划和政策措施。但是,从目前的实践来看,在各地的修复项目进行过程中尚未能完全体现差异化的特征,仍然存在一刀切式单一修复目标的做法,难免出现修复不到位或者过度修复的情形。可见,法规政策、标准的细化及落实仍然是今后关注的重点,是加强我国有色金属工业污染土壤治理在管理体系建设的重要内容。

2) 技术创新能力亟待提高

我国土壤修复的研究工作虽然起步较晚,但是经过多年的发展,取得了不小的成绩。但是总体来讲,尚存在创新成果转化率、原创性技术少、核心技术创造不足等问题。尤其是,在有色金属工业污染土壤治理方面,修复技术不够成熟、修复技术类型单一、自主研发能力不足问题仍然十分突出,创新水平难以满足日益增长的产业发展和治理需求。除了治理修复以外,污染形成机制、监测预警、安全利用等方面的技术、材料和装备的创造和研发,亦是该领域未来技术创新应予关注的重点。

3) 土壤污染防治资金不足

可以预见,国家政策的密集出台及净土保卫战的实施将会不断推进我国土壤污染防治工作的开展。但是,资金来源单一、资金不足的问题,仍然是阻碍我国土壤污染防治的重要因素。目前,土壤修复资金主要以政府直接或间接出资为主。但是,相对于项目的巨额投资而言,政府财政无法长期承担这项巨大的开支。尽管各地已经开展了一些利用社会资本、与第三方合作开展土壤修复等工作,但目前尚处于摸索阶段,难以满足国内土壤污染防治的巨大资金需求。

2.2 我国有色金属工业土壤污染防治发展建议

1) 进一步完善管理体系

严格遵守《土壤污染防治法》等有关土壤污染防治法律法规的规定,扎实推进净土保卫战。进一步加强土壤环境管理的支持力度,在机构组建、人员编制和基础能力建设方面加强投入,探索更加符合我国国情的土壤污染防治管理体系。鼓励环境管理部门在详细的土壤质量研究和分析的基础上,研究各地区、各行业的主要污染物和其他污染因素,制定适合本地、本行业实际情况和发展需求当的治理措施。同时,贯彻绿色可持续修复理念,制定政策时要统筹考虑修复本身所带来的二次影响,包括资源和能源的消耗、二次污染等问题。

2) 积极促进技术创新

加强有色金属工业土壤污染治理技术、材料和设备的研发。一方面,要加强对现有治理技术的完善;另一方面,还应加强对多元化修复技术应用的研究,促进技术的耦合应用。在技术创新的过程中,还要全面考虑生产安全、生态安全、产业发展、循环利用等因素,开展清洁生产技术的研发,促进有色金属开发和污染治理的可持续发展。此外,还需关注智能化技术的发展,探讨大数据、物联网、人工智能等新技术在有色金属土壤污染检测、调查、修复等环节的应用。加强有色金属污染治理相关人才的培养,加大科研投入,鼓励高校科研院所联合生产企业,适时引进国外先进技术。

3) 探索解决资金不足难题的新方案

通过模式创新,突破资金困境。近期自然资源部的一些文件显示有破冰现象,例如土壤修复捆绑土地开发、山水林田湖草系统治理等。未来,在土壤污染防治方面还应积极探索实施 EOD、PPP 等商业模式,采取产业链延伸、联合经营、组合开发等方式,破解资金瓶颈。将修复工程实施与区域土地规划发展密切结合,形成新的投资模式和盈利模式,大力吸引社会资本的投入。对于农用地,可探索与生态农业组合开发以及生态旅游组合开发的农用地组合开发模式。对于建设用地可探索商业地产以及工业用地组合开发的建设用地组合开发模式,通过土地增值收回修复成本。

3 结论

“绿水青山就是金山银山”,近年来,中国有色金属工业迅速发展,与此同时所造成的重金属污染也日趋严重。在发展有色金属工业的同时,加强有色金属工业土壤重金属污染防治,是实现可持续发展的题中之义。经过多年的探索,我国有色金属工业土壤重金属污染防治工作取得了一定的成效。但是应当看到,防治形势仍然十分严峻。2021年是“十四五”规划的开局之年。如何在“十三五”期间经验的基础之上,严格落实《土壤污染防治法》等政策法规,不断完善有色金属土壤污染防治体制机制,促进相关技术创新,解决资金不足难题、促进产业发展,打好攻坚战,将是土壤重金属污染防治工作的重点。

参考文献

[1] 国家统计局. 中国统计年鉴—2020[M]. 北京: 中国统

- 计出版社,2020.
- National Bureau of Statistics. China Statistical Yearbook:2020[M]. Beijing:China Statistics Press,2020.
- [2] 王海北.我国二次资源循环利用技术现状与发展趋势[J].有色金属(冶炼部分),2019(9):1-11.
- WANG H B. Status and prospect on recycling technologies of secondary resources in China[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2019(9):1-11.
- [3] 环境保护部,国土资源部.全国土壤污染状况调查公报[EB/OL]. [2021-01-03]. http://www.mee.gov.cn/gkml/sthjbgw/qt/201404/t20140417_270670.htm.
- Ministry of Environmental Protection, Ministry of Land and Resources. Bulletin of national soil pollution survey[EB/OL]. [2021-01-03]. http://www.mee.gov.cn/gkml/sthjbgw/qt/201404/t20140417_270670.htm.
- [4] 张小红.坚决打好有色金属行业生态污染防治攻坚战[J].中国有色金属,2019(19):50-51.
- ZHANG X H. Firmly fight the key battle of ecological pollution prevention and control in nonferrous metal industry[J]. China Nonferrous Metals, 2019(19):50-51.
- [5] 陈桂荣,曾向东,黎巍,等.金属矿山土壤重金属污染现状及修复技术展望[J].矿产保护与利用,2010(2):41-44.
- CHEN G R, ZENG X D, LI W, et al. Overview on current situation of heavy metal pollution in soils and remediation technology of contaminated soils in metal mines[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2010(2):41-44.
- [6] 任锋,徐国栋,何新春.有色金属矿采选业土壤污染影响范围研究[J].中国矿山工程,2018,47(3):26-30.
- REN F, XU G D, HE X C, et al. Research on the impact scope of nonferrous metal mining and dressing industry on soil pollution[J]. China Mine Engineering, 2018,47(3):26-30.
- [7] 施烈焰,易军,王珂珂.河南省有色金属矿采选行业土壤污染防治对策研究[J].河南科技,2019(19):147-149.
- SHI L Y, YI J, WANG K K. Study on countermeasures for prevention and control of soil pollution in mining and separating industry of nonferrous metals in Henan province[J]. Journal of Henan Science and Technology, 2019(19):147-149.
- [8] 赵盈丽,黄祖浩.金属矿区污染修复技术选择简析[J].内蒙古煤炭经济,2019(20):200-201.
- ZHAO Y L, HUANG Z H. Selection of pollution remediation technology in metal mining area[J]. Inner Mongolia Coal Economy, 2019(20):200-201.
- [9] 张溪,周爱国,甘义群,等.金属矿山土壤重金属污染生物修复研究进展[J].环境科学与技术,2010(3):106-112.
- ZHANG X, ZHOU A G, GAN Y Q, et al. Research progress on bioremediation of heavy metal contaminated soil in metal mines[J]. Environmental Science and Technology, 2010(3):106-112.
- [10] 张力,王树.浅谈金属矿山土壤重金属污染及其修复[J].有色金属(矿山部分),2007,59(4):38-40.
- ZHANG L, WANG S. Brief review on heavy metal pollution soils and remedy of contaminated soils in metallic mines[J]. Nonferrous Metals (Mining Section), 2007,59(4):38-40.
- [11] 张江生.有色金属矿区污染土壤中重金属化学固定研究[D].长沙:中南大学,2014.
- ZHANG J S. Study on chemical fixation of heavy metals in contaminated soil of nonferrous metal mining area[D]. Changsha:Central South University, 2014.
- [12] 北极星环境修复网.2019美国修复市场权威发布《美国环境修复产业报告:修复与产业服务》[EB/OL]. [2021-01-03]. <http://huanbao.bjx.com.cn/news/20200218/1044309.shtml>.
- Hjxf.bjx.com.cn. US environmental remediation industry report: Remediation and industrial services, released by US remediation market authority in 2019 [EB/OL]. [2021-01-03]. <http://huanbao.bjx.com.cn/news/20200218/1044309.shtml>.
- [13] 贾杰林,卢然,王兆苏,等.“十三五”时期我国重金属污染防治思路与任务[J].环境保护科学,2018,44(2):1-5.
- JIA L J, LU R, WANG Z S, et al. Study of the ideas and tasks of prevention and control of heavy metal pollution during the 13th Five-year Plan period[J]. Environmental Protection Science, 2018,44(2):1-5.
- [14] 刘阳生,李书鹏,邢轶兰,等.2019年土壤修复行业发展评述及展望[J].中国环保产业,2020(3):26-30.
- LIU Y S, LI S P, XING Y L, et al. Review and prospect of the development of soil remediation industry in 2019[J]. China Environmental Protection Industry, 2020(3):26-30.
- [15] 王龙运,黄建明,尤振平.“十四五”有色金属工业需要转型发展[J].中国投资,2020(17):28-29.
- WANG L Y, HUANG J M, YOU Z P. Transformation and development of nonferrous metals industry in the 14th Five-year Plan[J]. China Investment, 2020(17):28-29.
- [16] 中国科学院创新发展研究中心中国生态环境技术预见研究组.中国生态环境2035技术预见[M].北京:科学出版社,2020.

- 出版社,2020:58-67.
China Ecological Environment Technology Foresight Research Group, Innovation and Development Research Center, Chinese Academy of Sciences. Technology Foresight of Ecological Environment 2035 in China[M]. Beijing: Science Press, 2020: 58-67.
- [17] 赵永红,周丹,余水静,等. 有色金属矿山重金属污染控制与生态修复[M]. 北京:冶金工业出版社,2014: 129-144.
ZHAO Y H, ZHOU D, YU J S, et al. Heavy Metal Pollution Control and Ecological Restoration in Nonferrous Metal Mines [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2014: 129-144.
- [18] 员荣立. Cu、Zn 污染对土壤和植物生境的影响及金属形态的研究[D]. 河南新乡:河南师范大学,2016.
YUAN R L. Effects of Cu and Zn pollution on soil and plant habitats and metal speciation [D]. Xinxiang: Henan Normal University, 2016.
- [19] 伍振镛. 5 种树木吸收重金属能力比较与土壤污染历史重建[D]. 南京:南京林业大学,2017.
WU Z K. Comparison of heavy metal absorption capacity of five species of trees and reconstruction of soil pollution history [D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2017.
- [20] 刘江红,薛健,魏晓航. 表面活性剂淋洗修复土壤中重金属污染研究进展[J]. 土壤通报,2019,50(1):240-245.
LIU J H, XUE J, WEI X H. Research progress of surfactant washing for remediation of heavy metal pollution in soil[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2019, 50(1): 240-245.
- [21] 王恒,牛双,叶红升,等. 典型重金属污染土壤植物修复应用研究[J]. 科技创新导报,2019(29):109-110.
WANG H, NIU S, YE H S, et al. Phytoremediation of typical heavy metal contaminated soil[J]. Science and Technology Innovation Herald, 2019(29): 109-110.
- [22] 章梅,张谷春,黄欣怡,等. 电力修复重金属复合污染土壤关键因素研究进展[J]. 能源环境保护,2019,33(5): 1-5,22.
ZHANG M, ZHANG G C, HUANG X Y, et al. A review of key factors on electrokinetic remediation of heavy metals contaminated soil[J]. Energy Environmental Protection, 2019, 33(5): 1-5, 22.
- [23] 徐一芄,黄益宗,张利田,等. 镉砷污染土壤修复技术的文献计量分析[J]. 环境工程学报,2020,14(10): 2882-2894.
XU Y P, HUANG Y Z, ZHANG L T, et al. Bibliometric analysis on remediation technology of cadmium and arsenic contaminated soil [J]. Chinese Journal of Environment Engineering, 2020, 14(10): 2882-2894.
- [24] 闫雪莲. 工业污染场地土壤修复技术研究[J]. 化工设计通讯,2020(11):184-185.
YAN X L. Study on soil remediation technology of industrial contaminated sites[J]. Chemical Engineering Design Communications, 2020(11): 184-185.
- [25] 黄远东,刘泽宇,许璇. 中国有色金属行业的环境污染及其处理技术[J]. 中国钨业,2015,30(3):67-72.
HUANG Y D, LIU Z Y, XU X. Environmental pollution and its processing technology in non-ferrous metals industry in China[J]. China Tungsten Industry, 2015, 30(3): 67-72.
- [26] 郭子萍,王海荣. 有色金属矿区土壤重金属污染及其修复[J]. 经济研究导刊,2013(18):286-287.
GUO Z P, WANG H R. Heavy metal pollution and remediation of soil in nonferrous metal mining area[J]. Economic Research Guide, 2013(18): 286-287.
- [27] 甘凤伟,王菁菁. 有色金属矿区土壤重金属污染调查与修复研究进展[J]. 矿产勘查,2018,9(5):1023-1030.
GAN F W, WANG Q Q. Review of study on survey and remediation of soil contamination by heavy metal in nonferrous metal mining area[J]. Mineral Exploration, 2018, 9(5): 1023-1030.
- [28] 武瑞平,王莹,张婷瑜,等. 有色金属矿区重金属污染超标及治理技术的研究[J]. 世界有色金属,2017(20): 36-37.
WU R P, WANG Y, ZHANG T Y, et al. Study on heavy metal pollution exceeding standard in nonferrous metal mining area and its treatment technology [J]. World Nonferrous Metals, 2017(20): 36-37.
- [29] 刘焕,张昆. 矿山重金属污染研究现状及修复技术展望[J]. 云南地质,2018,37(1):117-121.
LIU H, ZHANG K. The present study situation and recovery prospect of heavy metal pollution of mine[J]. Yunnan Geology, 2018, 37(1): 117-121.
- [30] 张晨. 矿区重金属污染土壤的修复技术[J]. 世界有色金属,2020(13):217-218.
ZHANG C. Remediation technology of heavy metal contaminated soil in mining area[J]. World Nonferrous Metals, 2020(13): 217-218.
- [31] 何俐蓉. 矿区重金属污染土壤化学修复技术研究[J]. 河南科技,2019(11):134-136.
HE L R. Research on chemical remediation technology of heavy metal contaminated soil in mining area [J]. Journal of Henan Science and Technology, 2019(11): 134-136.
- [32] 高燕,於孝牛. 浅论生物修复金属矿区土壤重金属污染

- 研究进展[J]. 教育现代化, 2018, 32(5): 339-340, 345.
- GAO Y, YU X N. Advances in research on bioremediation heavy metal pollution in diggings soil[J]. Course Education Research, 2018, 32(5): 339-340, 345.
- [33] 中国环境保护产业协会. 中国环境保护产业发展报告[M]. 北京: 气象出版社, 2019: 198-214.
- China Environmental Protection Industry Association. China Environmental Protection Industry Development Report [M]. Beijing: Meteorological Press, 2019: 198-214.
- [34] 张红振, 董璟琦, 高胜达, 等. 中国土壤修复产业健康发展建议[J]. 环境保护, 2017, 45(11): 58-61.
- ZHANG H Z, DONG J Q, GAO S D, et al. Healthy development suggestions for soil remediation industry in China[J]. Environmental Protection, 2017, 45(11): 58-61.
- [35] 张红振, 董璟琦, 司绍诚, 等. 中国环境修复产业发展现状与预测分析[J]. 环境保护, 2016, 44(17): 50-53.
- ZHANG H Z, DONG J Q, SI S C, et al. State-of-the-art and forecast analysis of environmental restoration industry in China[J]. Environmental Protection, 2016, 44(17): 50-53.
- [36] 张娟, 刘阳生, 李书鹏, 等. 2018年土壤修复行业发展概述及发展展望[J]. 中国环保产业, 2019(4): 15-17.
- ZHANG J, LIU Y S, LI S P, et al. Overview and prospect of soil remediation industry in 2018[J]. China Environmental Protection Industry, 2019(4): 15-17.
- [37] 张智楠, 陈小桂, 张文利. 耕地修复的挑战与市场化路径选择[J]. 商业经济, 2016(11): 24-26.
- ZHANG Z N, CHEN X J, ZHANG W L. The challenge of farmland restoration and the choice of marketization path[J]. Business Economy, 2016(11): 24-26.
- [38] 易斌, 黄滨辉, 李宝娟, 等. 2020中国环保产业分析报告[R]. 北京: 中国环境保护产业协会, 2020.
- YI B, HUANG B H, LI B J. China environmental protection industry analysis report 2020[R]. Beijing: China Environmental Protection Industry Association, 2020.