

# 江苏省土壤修复产业发展现状及对策分析

夏威夷<sup>1,2</sup>, 王栋<sup>1</sup>, 朱迟<sup>1</sup>, 郭乾<sup>2</sup>, 丁亮<sup>1\*</sup>

(1. 江苏省环境工程技术有限公司, 江苏 南京 210019; 2. 南京工程学院, 江苏 南京 211167)

**摘要:** 简述了江苏省土壤修复市场发展情况及土壤修复技术发展现状。从营商环境、市场竞争力、标准法规建设等方面分析存在的市场问题, 提出应规范市场环境、培育企业竞争力, 加强标准制定、模式创新和人才培养的建议。针对场地环境调查与风险评估技术有待提升、地下水修复技术研发工作投入不足、修复后土壤监测和安全再利用问题突出等技术问题, 提出, 应完善环境调查与风险评估技术研究, 加强土水修复材料、装备与工艺研发, 提升长期监测及修复再利用研究的建议。以期为土壤修复行业的良性发展提供有益参考。

**关键词:** 江苏省; 污染土壤; 修复产业; 对策建议

中图分类号: X53

文献标志码: C

文章编号: 1674-6732(2021)02-0060-06

## Analysis on the Development Status and Countermeasures of Soil Remediation Industry in Jiangsu Province

XIA Wei-yi<sup>1,2</sup>, WANG Dong<sup>1</sup>, ZHU Chi<sup>1</sup>, GUO Qian<sup>2</sup>, DING Liang<sup>1\*</sup>

(1. Jiangsu Environmental Engineering Technology Co., Ltd., Nanjing, Jiangsu 210019, China; 2. Nanjing Institute of Technology, Nanjing, Jiangsu 211167, China)

**Abstract:** In this paper, the development of the soil remediation market and the status of soil remediation technology in Jiangsu Province is expounded. The existing market problems from the aspects of business environment, market competitiveness, standards and regulations are also analyzed, and put forward suggestions that the market environment needs to be ameliorated, market competitiveness needs to be strengthened, standards be formulated, model be innovated and talented people be cultivated. In response to some technical problems such as the site environmental survey and risk assessment technology remain to be improved, there is lack of R&D investment in the remediation of groundwater, and research on soil monitoring and safely reuse after remediation lags behind. So, in order to make a good reference for healthy development of soil remediation industry, we suggest that site environmental survey and risk assessment technology be improved, research and develop material, equipment and technology for water and soil remediation be strengthened, long term monitoring and reuse research be enhanced.

**Key words:** Jiangsu province; Contaminated soil; Remediation industry; Countermeasures and suggestions

### 0 前言

土壤是社会经济可持续发展的物质基础, 随着江苏省内城市化进程和环境整治工作的不断推进, 土壤污染治理修复产业面临重大发展机遇<sup>[1]</sup>。党中央、国务院对土壤环境保护和污染治理高度重视, 将扎实推进净土保卫战、落实污染防治攻坚战

阶段性目标, 作为全面加强生态环境保护、建设生态文明重要抓手<sup>[2]</sup>。近年来, 以《土壤污染防治行动计划》《土壤污染防治法》为代表, 国家层面政策措施密集发布, 有效激发了土壤环境调查、监测和修复市场<sup>[3-4]</sup>。中央财政设立专项资金, 持续强化土壤污染防治资金保障, 不断推动场地土壤污染防

收稿日期: 2020-12-14; 修订日期: 2021-02-04

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(41902276, 41807141); 江苏省自然科学基金资助项目(BK20181094); 国家重点研发计划资助项目(2019YFC1804000); 江苏省生态环境科研基金资助项目(2020001); 江苏省资助招收博士后研究人员项目(2019Z037); 国家自然科学基金资助项目(41902286)

**作者简介:** 夏威夷(1989—), 男, 工程师, 博士, 主要从事污染场地土壤和地下水防治技术研究工作。

\* 通讯作者: 丁亮 E-mail: dingliang@jsep.com

治技术、材料和装备研发<sup>[5-6]</sup>。

江苏省作为唯一的部省共建生态环境治理体系和治理能力现代化试点省,其土壤污染防治工作走在全国前列。通过有序启动土壤污染防治条例立法,强力推进重点行业企业用地土壤污染状况调查,建立建设用地土壤污染风险管控和修复名录和省级农产品产地环境监测网,有效地拉动了土壤污染治理需求,初步释放了广阔的土壤环境调查、监测和修复市场空间。通过大量文献查阅和调研分析工作,从市场发展、技术水平两个角度出发,围绕产业发展资本、制度、技术和人员等产业要素的现有情况和存在不足进行仔细梳理,提出了针对性的政策建议和研究展望,以期对江苏及其他省份土壤修复产业的优化发展提供参考和依据。

## 1 土壤修复市场情况

土壤污染防治产业起步良好,具备一定的发展基础和竞争力,已成为继水、大气和固废处理后的重要细分板块,众多环保领域公司纷至沓来、抢占市场。由于我国土地的公有制属性、法律规范差异和土壤污染的复杂性,国内企业占据了我国土壤市场绝大部分份额,2018年我国土壤治理修复企业共计3 830家,其中拥有工程设计、总承包能力的企业多来自江苏、广东、湖南、北京、上海等省、市<sup>[7]</sup>。2019年江苏省土壤修复市场发包项目数量中,本地企业中标比例为44%,远低于上海(100%)、北京(80%)和湖南(78%)等省、市<sup>[8]</sup>,显示出其土壤污染防治市场竞争激烈,而本地供给能力较弱。为全面加强省内生态环境保护,坚决打好污染防治攻坚战,江苏省委、省政府于2020年5月成立了江苏省环保集团有限公司,将土壤修复纳入5大业务板块,通过资源整合充分发挥省级国有资本作用,形成全省环境治理技术研发和数据集成平台,加快构建土壤领域现代环境治理体系;同年11月,环保集团响应习近平总书记提出的长三角一体化发展战略,牵头成立了长三角生态环保产业链联盟,以市场化方式打破地理约束和行业壁垒,优化产业链生态系统,为实现江苏省乃至长三角地区土壤等领域生态环境的高水平保护提供支撑保障。

江苏省土壤污染防治领域产业规模巨大。根据公开数据统计,截至目前,全省经营范围涵盖土壤修复的企业数量高达703家,从业人员数量19 058人,总注册资本192亿元。江苏省土壤修复

企业整体呈现年轻化态势,71%的企业在2014年以后成立。企业和修复市场的地域分布特征明显,均集中于苏南地区,其中南京(198个)、苏州(175个)、无锡(117个)、常州(70个)的企业总数占全省80%。这与苏南地区工业搬迁遗留场地数量多,同时土地开发强度高密切相关。2019年江苏省获批土壤污染防治专项资金15 736万元,低于以土壤修复先行区为代表的湖南、湖北、浙江、广西、广东、贵州等省(自治区)。从前期资金拨付情况来看,重点集中于土壤污染数据详查及历史遗留矿渣、冶炼厂和农药厂等项目的修复,同时江苏中央财政资金与当年修复项目金额的比例低于0.5,显示其主要依靠社会投入资金推动土壤环境修复项目。据统计,2018年江苏省土壤治理修复工程中,以工业场地修复为主,农田和矿山土壤项目较少,其项目数分别占到92%,6%和2%<sup>[9]</sup>,这与其工业发达,耕地面积有限,同时矿产开采量远低于全国水平的产业现状相一致。

## 2 土壤修复技术发展水平

江苏省土壤污染防治技术整体研发能力在全国具有较强优势,部分产品、技术具有一定竞争力。截至2020年3月,土壤修复相关专利数量位居全国第1名(1 197件),高于第2名的北京(762件)<sup>[10]</sup>。在已市场化应用的相关技术方面,省内企业依托自主研发的高效环境修复药剂、高化学相容性阻隔材料和高适应性靶向微生物菌剂,形成了立体化的绿色原位阻控修复技术体系,相关成果已在南京、镇江等多个污染场地治理项目成功应用,共实现药剂、材料等商品化生产应用近万吨,修复土壤和地下水总量超过100 000 m<sup>3</sup><sup>[11]</sup>。由省内企业通过引进吸收,成功实现原位燃气热脱附技术的国产化,实施了全球最大、国内首个有机污染场地燃气热脱附(GTR, Gas Thermal Remediation)修复工程<sup>[12-13]</sup>。江苏省独立自主研发的异位热脱附系统的技术性能在国际领先,已为宁波、无锡、盐城等地区成功修复土壤30 000 m<sup>2</sup>,年业务销售收入3 000余万元<sup>[14-16]</sup>。自主品牌的V型粉粒混合机,产品具有较好的性能和价格优势,已成功应用于某农药生产场地等多项土壤修复项目<sup>[16-18]</sup>。由省内科研院所和企业联合研发的国内首台污染场地精准调查与决策处置工作站(土壤检测车),还获评绿色技术银行“十佳绿色技术应用案例”<sup>[19]</sup>,

并和多相抽提修复技术等技术成果一起入选国家首批《土壤污染防治先进技术装备目录》。目前尚有众多高校和中小企业积极从事土壤修复相关材料、设备和技术的研发工作,但成果应用多局限于小试、中试阶段,而市场化、工程化、规模化应用少见报道。

针对省内已成功开展的 21 个典型土壤污染治理项目进行了统计分析,发现采用的修复技术以化学修复为主(56%),其次是物理修复(31%)和生物修复(13%)。具体技术类型差异较大,其中热脱附技术 7 个,水泥窑协同处置技术 6 个,固化稳定化技术 6 个,化学氧化技术 5 个,安全填埋、常温热解吸、淋洗技术、微生物钝化、电动修复、多相抽提、水分管理、化学升温、农艺措施调控和酸碱中和等应用较少。由此可见,市场对高成本、高风险隐患治理技术接受度有限。

在中央财政的支持下,省内科研院所、高校和企业近 3 年牵头承担/参与了 15 项国家重点研发计划“场地土壤污染成因与治理技术”重点专项项目,中央财政经费总额超过 2 亿元<sup>[20-21]</sup>。其中涉及集成示范类项目 5 项、装备研发类项目 4 项、测试评估方法类项目 3 项、新材料开发类项目 2 项以及修复机理类项目 1 项。在场地环境调查评估方面,将在场地土壤环境风险评估方法和基准、土壤污染物形态原位表征和生物有效性的标准化测试方法、土壤及地下水原位采样新技术与新设备领域实现突破。而在重金属污染修复领域,废旧电器拆解场地、金属采选场地及周边土壤污染防控与治理技术有望实现国内领先。在土壤有机污染治理领域,针对重点区域场地有机污染空间分布与驱动机制、农药污染场地修复及安全利用、复合有机污染场地原位热处理耦合修复等方面,预计将产出一批重大共性技术与装备。在土壤复合污染治理领域,化工园区、焦化场地污染治理与再开发利用技术将能够填补国内空白,并实现转化应用。在地下水污染治理领域,有望重点攻克地下水原位修复功能材料精准注入与强化传输、煤矿区场地地下水污染防控相关技术、材料与装备,力图取代进口产品,大幅度提升地下水处理的经济性和效率。

### 3 土壤修复产业发展存在的问题

#### 3.1 市场方面

(1) 营商环境亟待改善。近年来,江苏省土壤

污染防治产业整体发展势头强劲,但由于行业尚属成长初期,难以营造有序竞争的市场环境。多数企业技术雷同、产品单一、同质化竞争普遍,激烈竞争中脱离优质服务和产品质量,导致行业利润偏低,部分程度上损害土壤修复产业整体利益,同时影响土壤环境质量的改善。加之行业准入标准不够完善,以及无序抢占市场的行为,导致了土壤污染治理市场的规范程度仍不足。

(2) 市场竞争能力亟需加强。多数土壤修复企业自主知识产权研发投入不足,核心专利、技术标准和特色产品等重大创新成果较少,不能充分满足省内市场需求;土壤修复产品种类有限,生产配套能力较弱。同时行业未形成有效产业链条,集约程度不足。骨干企业体量偏小,缺乏具有总承包资质、能够面向大体量复杂污染场地提供整体解决方案的大型企业集团。产研用结合薄弱,保有的科技成果应用转化比例较低,市场认可度不高,大规模推广和应用受到制约。

(3) 标准体系和法律法规亟需健全。除技术局限和资金短缺外,政策和责任的不明晰也是制约土壤污染防治行业高速发展的一大瓶颈。如《污染场地岩土工程勘察标准》(DB 32/T 3749—2020)、《复合污染工业场地调查技术指南(立项)》等,均针对的是土壤治理环节的技术问题,缺乏考虑具体污染物类型、污染赋存介质等条件的可操作性技术规范,对具体工作指导性偏弱,政策标准的可操作性需要提高。环境调查、风险评估、修复及监测从业单位资质要求、管理流程也有待进一步标准化。

(4) 投资力度、融资渠道有待改善。现阶段土壤修复市场资金投入主要来源于城市建设用地的修复增值项目和中央财政专项转移支付,资金总量有限、来源单一,无法满足土壤修复对资金的大量需求。由于土壤污染修复责任主体不清,盈利模式、商业模式不明确,加上修复资金投入周期长、技术风险高,社会资本对土壤污染防治领域的参与、投入力度有限,成为制约土壤修复市场释放和项目开展的关键因素。

#### 3.2 技术方面

(1) 场地环境调查与风险评估技术有待提升。江苏省当前缺乏适用于我国场地土壤的弱扰动原位采样的国产化声波、直推式钻井设备<sup>[22]</sup>。同时地下水调查也尚未形成系列化、规模化的采样器

具,国产化率较低。原位测试手段有限,与最新检测、传感器和物探技术结合度不高,重要装备依赖国外引进<sup>[23]</sup>,还未建立可大规模推广应用的精准调查及三维识别技术体系。同时缺乏一整套基于健康风险和生态风险的环境基准与标准体系,现用的环境质量标准部分以引用国外已有基准或标准为主,缺乏以生态和健康风险评估主导的本土化暴露和剂量效应研究。

(2)土壤修复治理技术仍存在多种问题。江苏省场地污染物种类多、水文地质条件差异大,加之复合污染现象普遍、区域经济发展不同,传统单项修复技术往往很难达到修复目标,因此迫切需要发展协同联合的土壤综合修复技术模式。当前省内多数从业企业保有的核心技术和设备单一,无法胜任上述复杂多变的污染土壤治理需求。同时,污染场地对工期及修复效率要求严格,现阶段多采用快速、操作性高的异位修复技术,但异位修复存在环境破坏大、作业风险高的问题<sup>[24-26]</sup>,因此更为经济、环境友好的原位修复技术未来将具备巨大发展空间<sup>[27]</sup>。

(3)地下水修复技术研发工作投入不足。江苏省内地下水埋藏较浅(多在0~4 m),土壤和地下水交互频繁,土水复合污染情况普遍,因此开展土壤和地下水联合治理尤为重要<sup>[28]</sup>。针对省内已有21个典型土壤治理项目统计发现,95%的项目开展了土壤修复,而仅有38%的项目进行了地下水修复。虽然不能完全代表整体市场状况,但也一定程度上反映出当前实践中还存在“重土轻水”现象。地下水流动会导致污染物扩散风险,忽视地下水不仅会使得修复效果达不到预期,同时还会导致二次污染。因此地下水修复市场空间巨大,对企业开展相关技术研发提出迫切需求。

(4)修复后土壤监测和安全再利用问题突出。污染场地修复周期一般较长,如美国超级基金场地,修复施工结束后通常需要数年的持续运营,再经验收合格方算修复完成<sup>[29]</sup>,因此对场地污染物监测和预警的实时性、完整性和严格性提出较高要求,以在漫长的修复过程中实现全链条、全要素闭环管理。此外,现阶段国内地方企业对突发土壤环境污染事件的应急处置能力有限,急需开发能够实现应急处理污染物、快速调查土壤环境、及时安全化处置受污染土壤的相关材料和装备。同时,在发达国家的资源化利用是污染场地土壤消纳的重要

途径之一,但江苏省污染土壤的资源化再利用的认识与研究相对滞后,同发达国家相比存在巨大差距<sup>[30-31]</sup>。

## 4 对策建议

### 4.1 完善环境调查与风险评估技术研究

针对区域性污染场地水文地质条件和污染物赋存特征,利用传统土工勘察、地球物理探测和环境分析仪器的集成优化,研制国产化成套装备,构建综合原位精准测试和无扰动/弱扰动采样技术。针对典型污染类别、再利用情景,形成能反映污染场地生态毒性效应的准确全面的综合生态风险评估技术体系<sup>[32]</sup>。综合考虑典型高迁移性、高毒性污染物,建立多场耦合作用条件下的场地污染诊断及风险评估技术<sup>[33]</sup>。基于污染场地最终开发利用去向的暴露对象、方式、途径和暴露点分析,建立满足污染场地治理规划的场地环境风险评估技术。

### 4.2 加强土水修复材料、装备与工艺研发

考虑建设用地土壤理化特性、污染特征差异性和再利用功能需求,开发新型高效、低成本、低环境影响稳定剂、固化稳定剂、微生物菌剂等修复材料<sup>[34-35]</sup>。针对农田污染土壤性质和种植需求,开发绿色钝化剂和污染物降解材料。针对地下水风险管控和修复需求,开展长效竖向阻隔、高效降水抽提/截获、可渗透性反应墙技术,最终构建“外部阻隔、内部削减、异位净化”的立体式地下水污染修复技术体系<sup>[36]</sup>。同时开展破碎拌合、机械搅拌、高压注射等修复施工方法和装备研制,通过多技术集成构建土水综合治理技术体系,为解决土壤污染控制提供系统化的成套解决方案。

### 4.3 提升长期监测及修复再利用研究

形成较为全面的污染场地修复后“土-水-气”环境风险监测技术,构建数字化、可视化的环境风险预警控制技术体系。研发快速固化封闭材料、挥发性污染物快速吸附材料,研制高机动性、高适应性一体化场地环境应急调查与处置车,形成突发场地土壤污染事故应急管控、修复技术体系。针对污染土壤修复后的安全再利用问题,开展功能指标改良和污染扩散防控技术体系研究,实现修复土壤的高价值资源化利用。基于修复体功能性指标劣化和污染物迁移扩散规律,建立修复后土壤的长期稳定性超前评价技术体系<sup>[38-39]</sup>。

#### 4.4 规范市场环境、培育企业竞争力

尽快制订行业相关管理规定、办法,强化市场环境规范化营造,实现行业企业从业人员管理、市场行为有法可依、有章可循。针对土壤修复治理各环节,建立健全市场准入制度,推动从业单位资质和人员资格的规范管理,逐步完善承担单位终身负责制,提高市场专业化、正规化水平。促进企业优胜劣汰,扶优扶强,引导企业做大做强,通过树立行业标杆实现市场集约化。制订全国统一或地区性的行业指导参考价格,促进行业健康发展。推进重大土壤治理项目建设,同时鼓励企业加大科技资源投入,支持企业建设高水平技术研发平台,通过构建公平、便捷的产学研用合作机制,引导科技成果多层次转化,全面提升企业科技成果转化动力和市场竞争能力。

#### 4.5 加强标准制定、模式创新和人才培养

面对土壤环境治理实际需求和现实条件,通过制订国家、行业和地方管理法规、技术标准规范,加强标准化工作,支撑省内材料、技术和设备研究成果的推广和应用。积极探索融资渠道和投资回报机制创新,利用中央财政安排的生态环境资金和江苏省土壤污染防治基金开展重要、大型土壤修复项目。创新土壤修复商业模式,积极探索棕地开发、政府和社会资本合作(PPP, Public-Private Partnership)、环境综合管理服务等多元化项目运作模式<sup>[40]</sup>,通过“修复+开发”等方式吸引更多社会资本投资,建立多元化、可持续的资金投入渠道。同时通过增大研发投入、改善研发条件,吸引多领域专业人员投入污染场地修复市场,加强从业单位在技术创新度、适应性及产业化上的核心竞争力沉淀,提升土壤修复产业技术和管理水平。

#### [参考文献]

- [1] 王水,蔡安娟,曲常胜. 加强土壤污染防治保障土壤环境安全——《江苏省土壤污染防治工作方案》解读[J]. 环境监控与预警, 2017, 9(2): 1-5.
- [2] 罗敏. 打赢蓝天碧水净土保卫战,实施升级版“十四五”污染防治攻坚战——访第十三届全国人民代表大会代表,生态环境部环境规划院院长,中国工程院院士王金南[J]. 环境保护, 2020, 682(11): 14-18.
- [3] 陈宇. 以生态环境保护督察推动土壤污染防治责任有效落实[J]. 环境科学与管理, 2020, 45(5): 35-38.
- [4] 崔轩,刘瑞平,王夏晖. 中国省级土壤污染防治立法实践及建议[J]. 环境污染与防治, 2020, 42(7): 879-833.
- [5] 孙宁,朱文会,孙添伟,等. 加强土壤污染防治资金和工程项目管理的建议[J]. 环境保护科学, 2017, 43(5): 17-22.
- [6] 史丹,吴仲斌. 土壤污染防治中央财政支出:现状与建议[J]. 生态经济, 2015, 31(4): 121-124.
- [7] 张娟,刘阳生,李书鹏,等. 2018年土壤修复行业发展评述和2019年展望[EB/OL]. (2019-01-29) [2020-12-10]. [https://www.sohu.com/a/292109446\\_756848](https://www.sohu.com/a/292109446_756848).
- [8] 于琪,马骏,曲丹. [行业视角]分析了873个项目,土壤修复市场原来是这样的[EB/OL]. (2020-02-29) [2020-12-10]. [https://www.sohu.com/a/376680782\\_657688](https://www.sohu.com/a/376680782_657688).
- [9] 李书鹏. 土壤与地下水修复行业发展报告(2018)[EB/OL]. (2019-6-15) [2020-12-10]. <http://huanbao.bjx.com.cn/news/20190615/986390.shtml>.
- [10] 彭琨懿. 2019年土壤修复行业发展现状与趋势分析:江苏专利数量全国第一 技术将向绿色化发展[EB/OL]. (2020-03-16) [2020-12-14]. <https://www.qianzhan.com/analyst/detail/220/200313-a077dace.html>.
- [11] 夏威夷,王栋,朱迟,等. 新型固化剂修复复合污染土壤室内试验研究[J]. 环境科技, 2021, 34(1): 1-7.
- [12] 梅志华,刘志阳,王从利,等. 燃气热脱附技术在某有机污染场地的中试应用[J]. 资源节约与环保, 2015(1): 34-35.
- [13] 何允玉,王铎,郭都. 地下水中挥发性有机污染物去除新技术——循环井工艺[J]. 资源节约与环保, 2013, 3(3): 37-37.
- [14] 胡孙,陈纪赛,周永贤,等. 异位热脱附技术在某污染场地中试试验[J]. 环境科技, 2017, 30(4): 33-38.
- [15] 褚维平,王小峰,周永贤. 多环芳烃类污染土壤热脱附修复技术应用研究[J]. 精品, 2019(9): 253-253.
- [16] 郑金胜. 处置焦化场地污染土壤中应用热脱附技术的实践研究[J]. 精品, 2020(2): 241-241.
- [17] 朱巧红,李明,安忠义. 生物质炭在红壤改良与重金属污染治理中的应用[J]. 环境保护前沿, 2019, 9(1): 38-43.
- [18] 李明,程寒飞,安忠义,等. 化学淋洗与生物质炭稳定化联合修复镉污染土壤[J]. 环境工程学报, 2018, 12(3): 904-913.
- [19] 徐工环境. 又一全新产品重磅问世 国内首台土壤检测车下线[N]. 搜狐新闻, 2019-11-17.
- [20] 江苏生态环境. 国家重点研发计划“长江经济带化工园区场地污染防治技术集成与工程示范”项目顺利启动[N]. 搜狐新闻, 2020-07-08.
- [21] E20环境产业俱乐部. 大地益源:国家重点研发计划“场地土壤污染成因与治理技术”正式立项[N]. 搜狐新闻, 2018-12-19.
- [22] 秦沛,李海明,刘春生. Geoprobe直推钻机在城市水士环境地质调查中的应用[J]. 探矿工程-岩土钻掘工程, 2020, 47(3): 1-8.
- [23] 武猛,蔡国军,刘松玉,等. 挥发性有机污染场地原位评价的膜界面探测器MIP研究综述[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(S1): 29-32.
- [24] Contaminated Sites Management Working Group. Site remediation technologies: a reference manual [R]. Canmla: Water

- Technology International Corp, 1997.
- [25] 周启星, 宋玉芳. 污染土壤修复原理与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [26] 谷庆宝, 郭观林, 周友亚, 等. 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.
- [27] 夏威夷. 新型羟基磷灰石基固化剂修复铅锌镉复合污染土的机理与应用研究[D]. 南京: 东南大学, 2018.
- [28] 周建利. 铅锌矿废水污染土壤联合修复技术及对地下水的的影响[D]. 广州: 华南农业大学, 2009.
- [29] 谷庆宝, 颜增光, 周友亚, 等. 美国超级基金制度及其污染场地环境管理[J]. 环境科学研究, 2007, 20(5): 84-88.
- [30] 温丹丹, 解洲胜, 鹿腾. 国外工业污染场地土壤修复治理与再利用——以德国鲁尔区为例[J]. 中国国土资源经济, 2018(5): 52-58.
- [31] 刘春霞. 土壤重金属污染的国际治理经验及对我国的启示[J]. 许昌学院学报, 2018, 37(3): 86-89.
- [32] 徐建, 林玉锁, 金鑫, 等. 应用斑马鱼和凡纳对虾诊断污染场地污水的生物毒性[J]. 环境监测管理与技术, 2008, 20(5): 52-55.
- [33] 吴以中, 朱沁园, 刘宁, 等. 污染场地地下水渗流场模拟与评价——以柘城县为例[J]. 生态学报, 2012(4): 1283-1292.
- [34] 冯亚松, 夏威夷, 杜延军, 等. SPB 和 SPC 固化稳定化镍锌污染土的强度及环境特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(12): 3062-3074.
- [35] 王加华, 张峰, 马烈. 重金属污染土壤稳定化修复药剂研究进展[J]. 中国资源综合利用, 2016, 34(2): 49-52.
- [36] 鄂佳楠, 周睿, 郑龙日, 等. 基于蒙特卡罗法和层次分析法的污染场地地下水修复技术筛选方法研究[J]. 环境污染与防治, 2017, 39(5): 499-503, 509.
- [37] 张伯强, 安达, 王月, 等. 基于 MCDA 的沙漠地区污染场地地下水修复技术优化方法[J]. 环境工程学报, 2016, 10(10): 5521-5527.
- [38] 魏明刚, 伍浩良, 杜延军, 等. 冻融循环下含磷材料固化铅镉污染土的强度及溶出特性研究[J]. 岩土力学, 2015(S1): 215-219.
- [39] 曹智国, 章定文, 刘松玉. 固化铅污染土的干湿循环耐久性试验研究[J]. 岩土力学, 2013(12): 3485-3490.
- [40] 刘国强, 高辉, 徐虎林, 等. 污染土壤修复与房地产开发结合施工探索: 以南京市某搬迁化工企业原址用地为例[J]. 环境工程, 2017, 35(S1): 469-472.

(上接第59页)

- [8] WANG M Y, CAO C X, LI G S, et al. Analysis of a severe prolonged regional haze episode in the Yangtze River Delta, China [J]. Atmospheric Environment, 2015, 102: 112-121.
- [9] The Clean Air Scientific Advisory Committee. Review of EPA's Photochemical Assessment Monitoring Stations (PAMS) Network Re-engineering Project [M]. NC: USEPA, 2011.
- [10] CARTER W P L. Development of ozone reactivity scales for volatile organic compounds [J]. Air and Waste, 1994, 44(7): 881-899.
- [11] DUAN J C, TAN J H, YANG L, et al. Concentration sources and ozone formation potential of volatile organic compounds (VOCs) during ozone episode in Beijing [J]. Atmospheric Research, 2008, 88(1): 25-35.
- [12] ATKINSON R, AREY J. Atmospheric degradation of volatile organic compounds [J]. Chemical Review, 2003, 103(12): 4605-4638.
- [13] GROSJEAN D, SEINFELD J H. Parameterization of the formation potential of secondary organic aerosols [J]. Atmospheric Environment, 1989, 23(8): 1733-1747.
- [14] GROSJEAN D. In situ organic aerosol formation during a smog episode estimated production and chemical functionality [J]. Atmospheric Environment, 1992, 26A: 953-963.
- [15] 唐孝炎, 张远航, 邵敏, 等. 大气环境化学[M]. 2版. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [16] 虞小芳, 程鹏, 古颖纲, 等. 广州市夏季 VOCs 对臭氧及 SOA 生成潜能的研究[J]. 中国环境科学, 2018, 38(3): 830-837.
- [17] 徐晨曦, 陈军辉, 韩丽, 等. 成都市 2017 年夏季大气 VOCs 污染特征、臭氧生成潜势及来源分析[J]. 环境科学研究, 2019, 32(4): 619-626.
- [18] 罗达通, 高健, 王淑兰, 等. 上海秋季大气挥发性有机物特征及污染物来源分析[J]. 中国环境科学, 2015, 35(4): 987-994.
- [19] NELSON P E, QUIGLEY S M. The hydrocarbons compositions of exhaust emitted from Gasoline fueled vehicles [J]. Atmospheric Environment, 1984, 18(1): 79-87.
- [20] 吴方堃, 孙杰, 余晔, 等. 长白山背景站大气 VOCs 浓度变化特征及来源分析[J]. 环境科学, 2016, 37(9): 3308-3314.
- [21] KIM E, HOPKE P K, EDGERTON E S. Source identification of Atlanta aerosol by positive matrix factorization [J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2003, 53(6): 731-739.
- [22] HATFIELD M L, HARTZ K E H. Secondary organic aerosol from biogenic volatile organic compound mixtures [J]. Atmospheric Environment, 2011, 45(13): 2211-2219.
- [23] LI J, XIE S D, ZENG L M, et al. Characterization of ambient volatile organic compounds and their sources in Beijing, before, during, and after Asia-Pacific Economic Cooperation China 2014 [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2015, 15(14): 7945-7959.
- [24] JACOBSON M C, HANSSON H C, NOONE K J, et al. Organic atmospheric aerosols: Review and state of the science [J]. Reviews of Geophysics, 2000, 38(2): 267-294.
- [25] JANG M, CZOSCHKE N M, LEE S, et al. Heterogeneous atmospheric aerosol production by acid-catalyzed particle-phase reactions [J]. Science, 2002, 298: 814-817.

栏目编辑 王 湜 李文峻 周立平 谭 艳