

# 我国工业场地土壤污染防治十大科技问题与对策

晏井春<sup>1</sup>, 宋静<sup>1,2\*</sup>, 孙钰沅<sup>1,3</sup>, 唐伟<sup>1</sup>, 刘睿<sup>1</sup>, 严梓辰<sup>1</sup>, 刘雨鑫<sup>1,4</sup>, 尧一骏<sup>1</sup>, 骆永明<sup>1</sup>

- 中国科学院南京土壤研究所, 江苏 南京 211135
- 中国科学院大学南京学院, 江苏 南京 211135
- 常州大学环境科学与工程学院, 江苏 常州 213164
- 安徽师范大学生态与环境学院, 安徽 芜湖 241003

**摘要:** 自“十五”起步以来, 历经近 20 年的发展, 我国工业场地土壤污染防治管理和技术体系已基本建立。当前, 我国经济社会发展已进入加快绿色化、低碳化的高质量发展阶段, 场地土壤污染防治科技面临前所未有的挑战和发展机遇。该文在梳理我国工业场地土壤污染防治科技发展历程、分析新阶段土壤污染防治科技发展需求的基础上, 从土壤环境基准理论与方法、污染成因机理、监测监管技术、管控修复技术及决策支撑体系等多个层面, 提出了土壤环境基准研究对土壤污染风险管控标准制定支撑不强、部分污染物污染机制不明确、土壤采样方法与检测监测技术体系不完善、绿色低碳管控与修复技术储备不足以及决策支撑体系不健全等五大类工业场地土壤污染防治十大科技问题。在结合我国国情和国内外发展趋势的基础上, 建议强化土壤环境基准研究, 深化污染成因机理探索, 完善土壤污染物检测监测体系, 发展绿色低碳修复材料、技术、装备与管理体系, 健全基于信息化和智慧化的场地污染风险管理决策支持系统, 以期为科技创新引领工业场地土壤污染防治学科、技术和行业协同发展提供参考。

**关键词:** 工业场地; 土壤污染; 风险管控; 修复; 环境管理

中图分类号: X53

文章编号: 1001-6929(2024)12-2733-12

文献标志码: A

DOI: 10.13198/j.issn.1001-6929.2024.09.24

## Ten Scientific & Technological Challenges and Strategies for Soil Pollution Prevention and Remediation of Contaminated Industrial Sites in China

YAN Jingchun<sup>1</sup>, SONG Jing<sup>1,2\*</sup>, SUN Yuyuan<sup>1,3</sup>, TANG Wei<sup>1</sup>, LIU Rui<sup>1</sup>, YAN Zichen<sup>1</sup>, LIU Yuxin<sup>1,4</sup>, YAO Yijun<sup>1</sup>, LUO Yongming<sup>1</sup>

- Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 211135, China
- University of Chinese Academy of Sciences, Nanjing 211135, China
- School of Environmental Science and Engineering, Changzhou University, Changzhou 213164, China
- School of Ecology and Environment, Anhui Normal University, Wuhu 241003, China

**Abstract:** Since the launch of the '10th Five-Year Plan', China has spent nearly 20 years developing a comprehensive system for managing and cleaning up contaminated industrial sites. As the country enters a phase of high-quality development, with a focus on green and low-carbon initiatives, the prevention and control of soil contamination at these sites faces both challenges and new opportunities. This paper reviews progress in technologies for the prevention and remediation of contaminated industrial sites in China, evaluates current needs, and identifies ten major scientific and technical challenges across five key areas: soil environmental standards, pollution

收稿日期: 2024-08-31

修订日期: 2024-09-28

**作者简介:** 晏井春 (1983-), 男, 江苏沭阳人, 副研究员, 博士, 主要从事污染场地土壤与地下水修复技术机理和环境生态效应评价研究, [jcyan@issas.ac.cn](mailto:jcyan@issas.ac.cn)

\* 责任作者: 宋静 (1974-), 男, 浙江绍兴人, 研究员, 博士, 主要从事土壤环境基准、污染土壤物化修复技术和土壤环境采样方法研究, [jingsong@issas.ac.cn](mailto:jingsong@issas.ac.cn)

**基金项目:** 国家重点研发计划项目 (No.2021YFC1809201); 国家自然科学基金项目 (No.42077181); 中国科学院南京土壤研究所“十四五”自主部署项目 (No.ISSASIP2213)

**Supported by** National Key Research and Development Program of China (No.2021YFC1809201); National Natural Science Foundation of China (No.42077181); Self-Deployed Project during '14th Five-Year Plan' Period at Nanjing Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences (No. ISSASIP2213)

mechanisms, monitoring and regulatory technologies, remediation techniques, and decision-support systems. It highlights specific gaps, including limited scientific support for soil standards, unclear pollution mechanisms for certain contaminants, incomplete sampling and monitoring systems, insufficient green remediation technologies, and a lack of comprehensive decision-making tools. Based on China's national conditions and global trends, the paper proposes several strategies: strengthening research on soil standards, deepening the study of pollution mechanisms, improving monitoring systems, advancing green remediation technologies, and building an information and intelligence-based decision-support system. These efforts aim to drive scientific and technological innovation, promoting coordinated development across disciplines, technologies as well as the soil remediation industry.

**Keywords:** industrial sites; soil pollution; risk control; remediation; environmental management.

我国工业污染场地数量庞大,据不完全统计,现存面积大于 10 000 m<sup>2</sup> 的污染场地超过 50 万块<sup>[1-2]</sup>。总体上,我国的工业污染场地具有水文地质条件复杂、污染特征多样、周边敏感点多等特点。我国工业污染场地类型具有明显的空间分布特征:以京津冀、西北地区为代表的北方地区,多见以能源开采/加工行业为核心的污染场地,如石油、焦化污染场地等;以长三角地区以及长江部分流域为代表的东部地区,多见以化工行业为污染源头的污染场地,如农药、化工污染场地等;而以湖南省、云南省为代表的中南、西南地区则以有色金属采选、冶炼相关有色金属行业为核心的污染场地为主<sup>[3]</sup>。

在国家“863”计划、科技支撑以及环保行业专项等项目的支持下,我国土壤污染防治科技于“十五”起步、“十一五”进步、“十二五”发展、“十三五”跨越<sup>[4]</sup>。我国工业场地土壤污染防治科技发展历程如图 1 所示。“十五”期间,经济发达地区开始借鉴国外经验开展工业搬迁场地的环境调查和风险评估,污染治理主要采用挖掘填埋或高温焚烧。“十一五”期间,以异位修复技术为主,如固化/稳定化、化学

氧化还原、土壤洗脱、生物堆等,缺少专门的修复装备。“十二五”期间,异位热脱附装备以及原位修复技术与装备(化学氧化还原、化学淋洗,固化/稳定化、气相/多相抽提、生物通风等)得到快速发展。进入“十三五”,随着《土壤污染防治法》等法律法规、标准、规范的出台,以及国家重点研发等项目启动,我国工业场地土壤污染防治科技不但在污染成因、源解析、迁移转化机制、风险评估等基础研究领域取得突破性进展,而且在功能材料、原位修复技术(如热脱附、强化生物修复、监测自然衰减等)、钻探/检测监测/修复专用装备国产化、多技术组合、监测预警技术和监管平台等诸多方面实现跨越式、全方位发展。“十四五”以来,土壤污染风险管控和修复技术体系已经初步建成并逐步完善,土壤污染防治从注重末端治理发展到注重源头防控、过程控制和末端治理全过程的控制理念,新污染物的治理也已经提上议事日程。当前,我国经济社会发展已经进入加快绿色化、低碳化的高质量发展阶段,我国工业场地土壤污染防治科技面临前所未有的挑战和发展机遇。

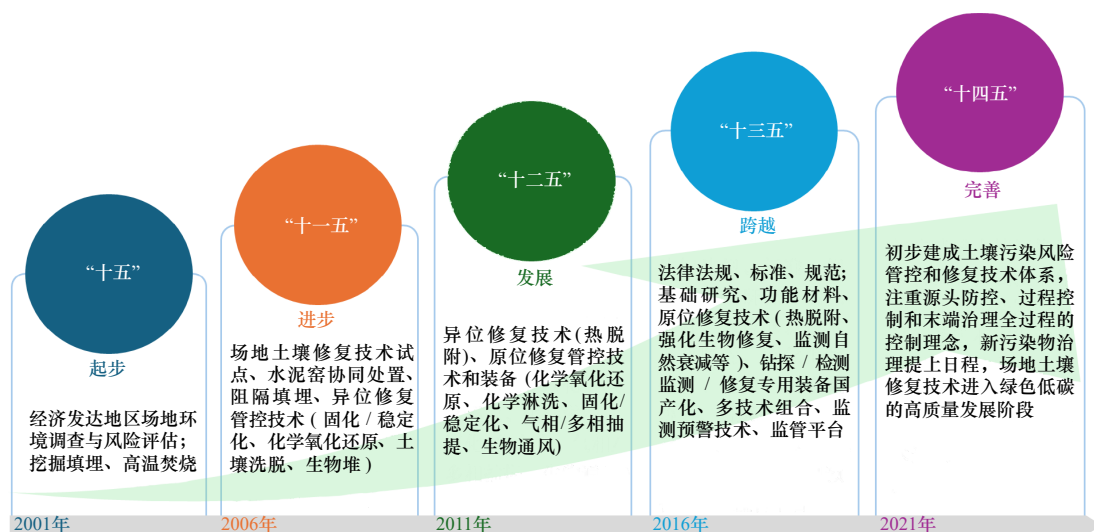


图 1 我国工业场地土壤污染防治科技发展历程

Fig.1 Development of soil pollution prevention and remediation technology for industrial sites in China

## 1 新时期场地土壤污染防治科技面临前所未有的挑战和发展机遇

进入“十四五”以来,土壤修复技术研发的发展驱动力由土地开发需求驱动逐步转变为由法律法规和环境要求,修复对象由工业企业搬迁遗留原场地向在产工业企业场地转变,污染土壤的修复实施方法也由粗放式的修复模式向精准修复与风险管控的方向发展。此外,在国家减污降碳、绿色低碳的战略背景下,土壤修复行业响应新的政策导向以及市场需求(如在产企业边生产边管控修复),更多基于风险管控的理念,采用原位、绿色、可持续的修复技术,实现精准治污、科学治污和依法治污。

当前,我国场地土壤污染防治仍面临一些问题,如土壤环境基准研究对土壤污染风险管控标准制定的支撑不足、部分污染物污染机制不明确、土壤采样方法及检测监测技术体系不完善、绿色低碳管控与修复技术储备不足以及决策支撑体系不健全等。为此,该文从我国工业场地土壤污染防治科技发展及场地修复实际应用需求出发,结合国内外前沿技术、管理方法与国内管理现状,面向国家需求和科学需求,提出我国工业场地土壤污染防治十大科技问题及对策,以期土壤污染防治科技创新引领学科、技术和产业协同发展提供参考。

## 2 土壤污染防治存在的科技问题与对策

### 2.1 土壤环境基准

欧美发达国家从 20 世纪 80 年代起就基于本国情陆续建立了基于风险评估的土壤环境基准理论方法体系,为制定土壤环境标准提供科学依据。我国土壤环境基准和标准的研究起步较晚,国家层面缺乏统筹,基准制定方法体系尚不完善,本土化的相关数据库尚未建立<sup>[5-6]</sup>。

我国 2015 年发布的《中华人民共和国环境保护法》和 2018 年发布的《中华人民共和国土壤污染防治法》均明确提出,国家鼓励、支持开展(土壤)环境基准研究。与水质基准相比,土壤环境基准的制定和发布相对滞后。2015 年骆永明等<sup>[7]</sup>系统阐述了土壤环境基准的定义及其制定的理论和方法。2018 年原环境保护部就《保护生态安全的土壤环境基准制定技术指南》《保护人体健康的土壤环境基准制定技术指南》和《保护农产品安全的土壤环境基准制定技术指南》3 份技术文件公开征求意见,但最终 3 份指南未正式发布。其中一个重要原因是,当时学术界及管理者对于“土壤环境基准”的定义及其与土壤污染风险筛选值的关系等问题尚未达成共识。

科技部国家重点研发计划项目“场地土壤环境风险评估方法和基准”(2018—2022 年)和“场地土壤污染物环境基准制定方法体系及关键技术”(2020—2023 年)进一步阐述了土壤环境基准的定义,完善了土壤环境基准制定的理论和方法。龙涛等<sup>[8]</sup>在回顾我国土壤环境基准研究历史的基础上,将土壤环境基准定义为“土壤污染物对特定受体(包括人体健康、生态受体及地下水等其他环境介质)不产生不良效应的含量,包含特定暴露条件下土壤污染物含量(剂量)与受体不良效应之间的完整关系”;此外,明确了土壤环境基准研究的主要工作内容,即基于统一的试验和数据分析方法,通过实验研究或实地调查(包括田野调查、流行病学调查等),建立特定暴露条件下土壤污染物含量与受体不良效应之间的完整关系,并推导土壤污染物对特定受体不产生不良效应的含量。

在土壤环境基准相关基础研究方面,我国学者在优先污染物的筛选及清单<sup>[9]</sup>,包气带呼吸模型(vadose zone breathing)<sup>[10]</sup>,Cr<sup>6+</sup>的固-液分配系数<sup>[11]</sup>,儿童土壤摄入率等污染物理化性质参数和暴露参数<sup>[12]</sup>,以及基于定量离子特征-活性关系(QICAR)模型的重金属固-液分配和生态毒性的预测方法<sup>[13]</sup>等领域取得进展,填补了国内相关模型和本土化参数的空白。此外,大数据和机器学习等新方法也已经用于土壤环境基准相关研究中,如土壤-土壤气界面 VOCs 的非线性分配机制的探索<sup>[14]</sup>,蒸气入侵衰减因子预测<sup>[10]</sup>,基于人体健康的公园土壤环境基准推导<sup>[15]</sup>,以及不同植物组织对全氟和多氟烷基物质(PFAS)的生物富集<sup>[16]</sup>等。

在土壤环境基准制定相关技术指南方面,2023 年,数项保护不同受体的土壤环境基准制定相关团体标准正式发布,包括保护人体健康的《建设用地土壤环境基准制定基本数据集 保护人体健康》(T/ACEF 090—2023)和《建设用地土壤人体健康环境基准制定技术指南》(T/ACEF 088—2023),以及保护生态受体的《建设用地土壤环境基准制定基本数据集 保护生态安全》(T/ACEF 089—2023)和《建设用地土壤生态安全环境基准制定技术指南》(T/ACEF 087—2023)。

虽然我国土壤环境基准工作已取得长足进步,但为有效支撑国家土壤环境管控标准的制定,土壤环境基准研究还需要持续推进,建议的未来研究方向包括五方面:①暴露场景和暴露参数的本土化;②非水相液体(NAPL)相迁移、转化及界面通量的预测模型及实地验证;③污染物毒性的预测模型;④大数据和机器学习在土壤环境基准制定中的应用;⑤PFAS 等新污染物的土壤环境基准等。

在组织方面,为有效组织相对分散的团队攻关,需要在制定基准工作方案的基础上,从国家层面进行项目的顶层设计,减少重复性和低水平的研究,加强数据库、软著等研究成果的共享和验证,保持梯队合理、稳定的研究队伍。

## 2.2 土壤污染高分辨调查与精准刻画

受污染物本身理化性质、赋存形态、进入土壤的方式、土壤理化性质、水文地质条件以及人为干扰(如修复措施)等众多因素的影响,污染物尤其是水溶性低的污染物在土壤中的分布具有较大的各向异性,给场地土壤污染的调查和刻画带来挑战。

传统的场地土壤污染状况调查技术规范主要基于离散采样(discrete sampling),采样点的间距一般为数十米,远超过场地污染异质性的尺度(通常 $<1\text{ m}$ )。例如, Brewer 等<sup>[17-18]</sup>离散采样可靠性的研究表明,受到污染物(As、Pb 和 PCBs)本身理化性质和赋存形态(废水、飞灰、绝缘油)的影响,土壤样本内的变异(intra-sample variability)以及 1 m 范围内土壤样本间的变异(inter-sample variability)都可能出现数量级的变化。因此,传统的离散采样方法很难准确刻画污染空间分布特征,预测的污染或修复边界和方量与实际情况可能存在较大的差异,常导致工程逾期或超预算,甚至引起经济诉讼。

近年来,“精准治污”“科学治污”已经成为共识。场地精细化风险评估和精准修复客观上要求提高场地污染调查和空间表征的精度,欧美发达国家已经建立了高分辨率场地表征(HRSC)的技术体系和工具<sup>[19]</sup>。HRSC 是指选用适宜的表征工具和方法,对选定的地下单元进行高密度测量,以避免待测物的过度平均化,从而保留场地污染特征的细节。美国国家环境保护局推荐的高分辨场地表征技术包括:①用于探测地层结构、地下构筑物及疑似污染分布的地球物理方法(如静力触探 CPT、探地雷达 GPR、电阻层析成像 ERT、电磁探测、钻孔核磁共振、地震反射波等)。②基于 Geoprobe 等直压式平台的现场探测工具,如用于探测地层渗透性的透水性分析仪 HPT,定性半定量原位测定 VOCs 的薄膜界面探测器 MIP,它可配备光离子化检测器 PID、火焰离子化检测器 FID 和卤素选择性检测器 XSD 等不同检测器;用于定性半定量探测燃油、石油、杂酚油、煤焦油等 NAPL 相的光学图像层析工具 OIP-UV 和 OIP-G,激光诱导荧光 LIF 等。③现场快速检测技术,如 X 射线荧光 XRF,光离子化检测器 PID 等。④物质通量(mass flux)和物质排放(mass discharge)的测量。⑤被动式土壤气采样。⑥三

维可视化分析等。由于 HRSC 获取的数据类型多,数据量大,因此需要采取动态的工作策略。美国州际技术与管理委员会(ITRC)发布了高级场地表征筛选工具(ASCT),用于指导不同场地表征工具的筛选。

在国家重点研发项目的资助下,目前我国已成功研发针对 VOCs 污染场地的剖面钻进探测一体化装备,手持式 X 射线荧光等现场快速检测设备也实现国产化。因此,我国开展高分辨率场地调查尚需更多实用工具的开发,实地验证和相关技术规范的制定。

## 2.3 土壤环境检测与监测

目前,我国已经基本建立了场地土壤污染检测与监测技术体系,但仍存在一些短板,例如,部分污染因子缺乏检测指标及依据,采样、制样及分析质量控制方法尚不完善,第三方检测公司检测能力有限,相关从业人员专业技能有待提高以及个别技术规范有待修订。

按照“防新增、去存量、控风险”的总体思路,未来土壤环境管理的工作重点之一是土壤污染源头防控<sup>[20]</sup>。除了土壤重点监管企业自身开展的隐患排查和自行监测之外,环境主管部门还在土壤重点监管企业周边开展土壤环境质量监测。目前,中国环境监测总站以及天津、江苏、福建、陕西等省份都制定了土壤重点监管企业/单位周边土壤(及地下水)监测技术规范。

在大尺度上我国已初步建成土壤环境监测网络。生态环境部印发的《“十四五”生态环境监测规划》指出,各地以土壤污染风险防控为重点,完善土壤环境监测点位,筛选国家重点关注的土壤环境风险监控点,每 1~3 年完成一轮监测,及时跟踪土壤环境污染问题。目前我国土壤环境监测网络布局仍有较大优化空间,省级监测网络和国家监测网络的合力尚未形成,同时监测指标体系相较于管理需求尚显不足,部分监测指标检测方法仍待完善,比如,农药、精细化工等行业场地常存在嗅阈值低、异味活度高的异味物质(含硫化物、含氮化合物等)目前仍未有完善的方法去检测量化<sup>[21-22]</sup>。未来,需要结合我国土壤生态环境保护管理要求和主要问题,构建适合的监测指标体系,完善遥感、大数据和光谱学监测方法体系和评价体系;形成国家尺度长时间序列监测数据库;统筹国家网和地方网的监测工作,建立土壤监测数据平台,提升数据分析能力,为土壤环境管理和公众提供可靠的数据产品<sup>[23]</sup>。

## 2.4 场地精细化风险评估

欧美发达国家在 20 世纪 80 年代陆续建立人体

健康风险评估技术框架,用于支持基于风险的场地管理和决策<sup>[24]</sup>。风险评估技术引入我国已有十余年,从开始直接采用国外的商业软件(如 RBCA)、模型和参数,逐渐开展各类参数的本土化[如《中国人群暴露参数手册(成人卷)》《中国人群暴露参数手册(儿童卷:0~5岁)》和《中国人群暴露参数手册(儿童卷:6~17岁)》的出版]、技术导则编制和风险评估工具软件开发(如 HERA<sup>+</sup>、污染场地风险评估电子表格、CRISK 等)。

虽然我国人体健康风险评估技术已经基本建立,但与欧美发达国家相比,目前我国场地土壤污染健康风险评估仍存在以下不足:

a) 现行导则中采用的模型多为用于筛选值制定的简易模型或算法,或采用了保守的假设。这将导致具体场地风险评估推导的无机物、重金属和 SVOCs 的风险控制值几乎等同于国家发布的土壤筛选值,进而可能引起过度修复。当场地的水文地质条件、污染物迁移转化过程等与保守的假设显著不同时,根据需要,可考虑采用更为复杂的机理模型。例如,针对石油烃和苯系物等 VOCs 蒸气入侵途径估算时考虑建筑物地板下的氧气浓度<sup>[25]</sup>、采用二元平衡解吸 DED 模型<sup>[26]</sup>、污染源衰减模型<sup>[27]</sup>、优先通道<sup>[28]</sup>或基于现场采集测定的土壤气浓度<sup>[29]</sup>,吸入土壤颗粒物途径宜采用起尘因子(particulate emission factor, PEF)而不是大气 PM<sub>10</sub> 浓度等。

b) 土-水迁移风险评估及相关参数本土化有待进一步加强。欧美发达国家已经建立了保护地下水的土壤环境基准推导方法体系<sup>[30]</sup>、实际污染土壤污染物淋溶环境评估框架(如 US EPA 的 LEAF 框架)以及保护地下水的土壤筛选值(如美国区域筛选值 RSL)。我国现行《建设用地土壤污染风险评估技术导则》(HJ 25.3—2019)中仅要求对于地下水作为饮用水的地块,基于土壤固相-水分配系数( $K_d$ )和土-水淋溶因子(LF<sub>sgw</sub>)推导保护地下水的土壤风险控制值。其中,关键参数  $K_d$  缺乏基于我国典型土壤的数据库。以六价铬为例,我国现行导则及软件中仍沿用美国 RSL 中的六价铬土-水分配系数  $K_d(19 \text{ L/kg})$ ,而未考虑我国不同类型土壤吸附和解吸过程土-水分配系数的巨大差异<sup>[11]</sup>。

c) 此外,目前我国虽然有保护生态的土壤环境基准制定相关的团体标准,但从国家层面尚未考虑保护建设用地的土壤生态受体和生态过程。欧美发达国家在关注人体健康风险的同时还关注土栖生物的生态风险,并发展了化学-毒理学和生物学多证据的土

壤污染生态风险评估指标和方法体系[ISO 19204:2017(E)]。

## 2.5 场地污染绿色低碳和可持续风险管控与修复

污染土壤早期多采取异位修复措施以实现污染物的全面修复。随后,由于“过度修复”问题,发展出基于风险的污染管控和修复。21 世纪初,随着公众对修复过程二次影响的重视以及对绿色、可持续观念的认同,绿色可持续修复(green and sustainable remediation, GSR)概念被提出并在欧美国家飞速发展<sup>[31]</sup>。绿色可持续修复是指针对场地条件,使用特定产品、技术和流程,以减轻受体的环境风险,并同时平衡社会目标、经济影响和环境效益<sup>[32]</sup>。绿色可持续修复包含两层概念:一是绿色修复,侧重修复过程中环境效益最大化,包括减少能耗、废气排放、用水量及水环境影响、土地及生态系统影响、材料使用和废弃物产生和长期管理行为<sup>[33]</sup>;二是可持续修复,强调修复过程中社会、经济和环境的影响(包括短期和长期影响)的全面优化,以实现修复效果大于修复工程的环境影响。众多欧美国家已构建较为完整的绿色可持续修复框架,成立专业组织,发布相关国际标准和技术规范<sup>[34]</sup>。此外,欧美国家已有实际应用案例报道,例如,美国康涅狄格州在某复合污染场地修复过程中采用了低渗透性封土和覆盖系统等绿色管控措施,原位热脱附修复污染土壤过程的碳排放可降低约 36%(以 30 年运行维护计)<sup>[35]</sup>。我国绿色可持续修复尚处于早期的萌芽状态,主要集中于学术研究、框架设计和案例分析方面<sup>[36]</sup>。目前,已发布《污染地块绿色可持续修复通则》(T/CAEPI 26—2020)等指导文件;未来,我国迫切需要建立场地修复绿色可持续框架,制定技术规范及评价体系,推动绿色可持续修复的工程实践。

绿色可持续修复的主要目的包括避免过度修复和减少二次影响,确保修复的正面效益大于其负面影响<sup>[37]</sup>。在发展过程中,首先,需构建绿色可持续修复的整体框架,制定技术规范,发布技术指南,以指导绿色可持续修复工作。其次,需制定绿色可持续修复的评价体系,目前主要采取全生命周期评价的决策方法,即针对特定污染场地,对修复活动涉及的原材料、设备、能源进行全过程环境影响评价,综合计算修复所获得“净效益”,以此选取最可持续的修复方案并改进优化。最后,需加强绿色可持续修复的科技支撑,一方面,发展土壤污染精准识别与智能监管技术,精确地界定污染范围,减少资源浪费,同时避免污染扩散<sup>[38]</sup>;另一方面,攻关关键绿色修复材料、装备和技

术研发,多选择以植物修复、微生物修复为代表的低能耗修复技术,强化对生物资源的发掘、整理、检测、筛选和性状与功能评价,通过生物刺激、生物强化和基因工程技术等手段,或与其他物化修复技术等联合,以提高原位生物修复技术的效率和速度<sup>[39]</sup>;针对以热脱附为代表的高能耗修复技术实施绿色低碳化改造,采用非化石能源(例如太阳能、风能和生物天然气等)实现源头减碳,发展低碳节能的修复新技术(如多相抽提、原位风险阻隔技术等)并改进优化现有工艺和装备实现修复过程降碳,依托信息技术实现碳排放智能监测计算并配合末端固碳和资源化利用<sup>[40]</sup>。此外,绿色可持续修复还需考虑到修复的长期效益,例如,修复工程造成的潜在污染(包括化学药剂残留、有毒副产物和遗留生物质等),极端天气和水文条件改变等气候变化导致破坏修复工程并影响污染物的迁移转化和暴露风险,综合制定弹性修复方案<sup>[41]</sup>。

## 2.6 土-水协同修复技术体系

土壤与地下水在生态功能上密不可分。然而由于历史原因,我国很多实际污染场地调查与修复过程通常重点关注土壤污染而忽略地下水污染。土壤污染物通过渗滤、扩散等作用进入地下水,而地下水中污染物通过扩散、毛细吸附等作用进入土壤<sup>[42]</sup>。土壤和地下水作为相互联系紧密的两种介质,即使某种介质中的污染物修复达标,另一种介质中的污染物也可以迁移至修复达标的介质中,造成二次污染<sup>[43]</sup>。目前,大多数修复技术仅单纯针对土壤或地下水,在协同方面的研究较少。修复过程中存在的土-水分离、各自治理的现象不仅导致修复效果不理想,还增加修

复成本,这在大型复杂场地中尤其突出。在这类污染场地中,往往不同场地之间的土壤、地下水的性质存在较大差异,场地内污染物的空间分布和迁移特征难以准确描述;而场地含水层、地下水水位和地表水水位等水文地质条件的变化对污染物的行为也有着显著影响<sup>[44]</sup>。场地地质条件差异和污染物的复杂性可能导致场地内部不同区域之间存在各不相同的特性,使用单一的修复技术往往难以达到修复目的,需要多种修复技术联合使用才能达到修复目标。

针对上述情况,在未来的场地污染修复实践过程中,调查上应当特别关注土-水复合污染场地内污染物的迁移转化特征,建立和优化污染物迁移转化模型,深度解析场地内污染物的迁移转化特征<sup>[45]</sup>。在进行风险评估时需要考虑和分析土壤和地下水中污染物的迁移趋势,实现精细的污染三维空间刻画;技术上应当针对不同污染场地情况,结合现阶段国内外常用的修复方法,耦合与优化现有的污染土壤与地下水治理修复技术(见图2)。同时,开发针对性的修复技术、环境功能材料、修复装备等,解决诸如污染物在低渗透地层的修复、含 NAPLs 相含水层的修复等实际应用需求,治理策略上需要研究修复与风险管控相结合、分区分级治理技术体系等<sup>[42]</sup>。此外,加大投入开发如生物联合修复技术等绿色原位高效修复方法并积极推广运用,也是实现土-水共治和构建土-水协同修复技术体系的重要手段。

## 2.7 修复后土壤的资源化和安全利用

2023年12月生态环境部发布的《关于促进土壤污染风险管控和绿色低碳修复的指导意见》(环办土

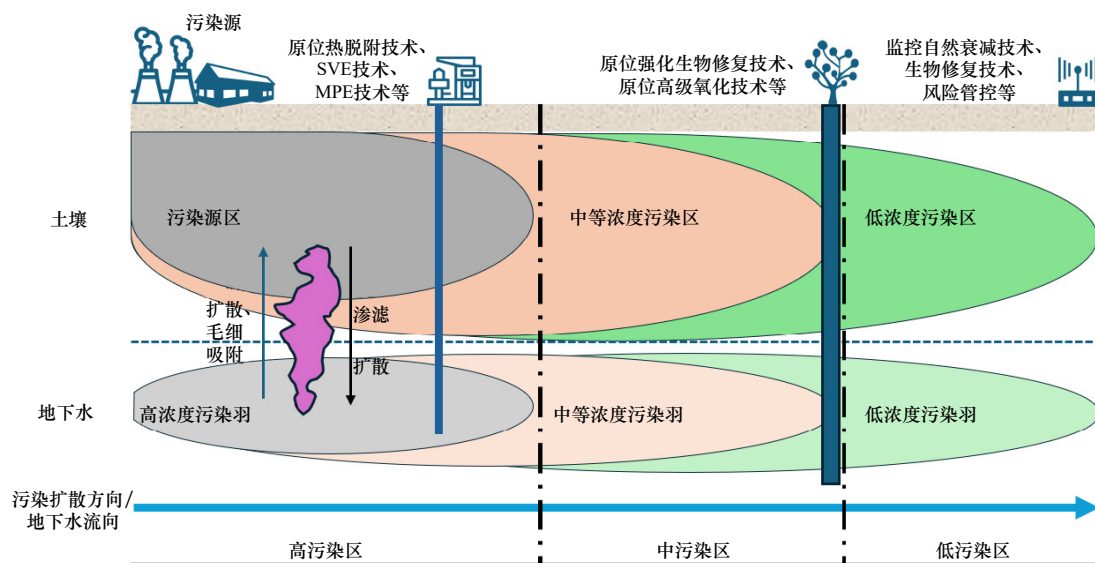


图2 土壤-地下水复合污染多技术联合分区分级修复示意

Fig.2 Diagram of regional classified multi-technology for remediation of soil-groundwater combined pollution

壤〔2023〕19号)提出“在有效防范二次污染的前提下,鼓励推动修复后土壤资源化利用”,将修复后土壤资源化利用作为探索污染土壤风险管控和绿色低碳修复最佳管理措施的一个方向。

根据修复后土壤中残留污染物种类的不同,目前国内针对修复后土壤资源化利用途径主要有用于回填用土、道路用土、绿化用土、建材化利用或景观改造等。由于不同资源化利用方式下暴露场景和敏感受体各不相同,必须评估修复后土壤在资源化利用场景下的环境与生态风险。此外,修复措施可能改变土壤理化性质和污染物的赋存形态,进而改变污染物的生物可给性,例如,冯潞等<sup>[46]</sup>研究表明,焦化场地中存在一定比例的溶剂不可提取的残留态(NERs态)多环芳烃,热脱附的前处理(添加石灰)以及高温热脱附过程导致土壤pH上升、有机质碳化、胡敏素含量大幅下降,导致残留苯并芘的生物可给性上升。因此需要建立适用于修复后土壤在不同利用情景下的环境与生态风险评估方法,完善修复后土壤再利用相关技术标准体系<sup>[47]</sup>。

## 2.8 土壤新污染物

新污染物主要包括新型持久性有机污染物(POPs)、内分泌干扰物(EDCs)、抗生素、微塑料和全氟多氟化合物等<sup>[48]</sup>,具有高持久性,易通过挥发、淋溶、径流等途径扩散至大气和水体,继而通过呼吸、饮水和食物链等途径进入人体,对健康和生态环境构成威胁<sup>[49-50]</sup>。党中央、国务院高度重视新污染物问题,国务院办公厅于2022年发布《新污染物治理行动方案》,明确要求建立健全新污染物治理体系、评估环境风险、严格源头管控、强化过程控制、深化末端治理并加强能力建设<sup>[51]</sup>。当前,我国新污染物治理面临污染底数不明、检测方法滞后、环境过程复杂、毒性机制不清以及高效修复技术匮乏等挑战。

在检测领域,基于高分辨质谱的非靶向筛查和气相色谱-质谱联用技术在近年来取得显著进展,如通过高分辨质谱(LC-GC-QTOF MS)谱库匹配和保留时间锁定建立的怀疑性筛查方法,已可以实现高通量筛查环境介质中的半挥发性有机污染物;运用离子迁移谱(IMS)和尺寸依赖性碎片化的独立性数据方法能够实现47种全氟化合物筛查<sup>[52-54]</sup>。未来,检测方法的开发与优化,尤其是高分辨质谱库算法的开发、纳米材料和生物传感器等新兴检测技术的探索将成为实现快速、灵敏检测的关键方向<sup>[55-57]</sup>。

在环境过程方面,深入研究新污染物的来源与迁移路径,对于预测其空间分布和制定治理方案至关重

要。Harraq等<sup>[58]</sup>探讨了胶体在阐释微塑料吸附、聚集以及运输过程中所发挥的关键作用,强调了胶体共迁移对微塑料在土壤中行为的重要影响。为了进一步厘清新污染物的空间分布和迁移趋势,未来研究可与同位素示踪技术<sup>[59]</sup>、分子标志物<sup>[60]</sup>等相结合。同时,大数据和人工智能的应用也将为新污染物的迁移转化提供更全面的预测<sup>[61]</sup>。

在毒性评估方面,现有化学分析往往注重测量污染物总量,而生物标志物和生物指示物能够揭示污染物的生物有效性,更准确地评估其对生态系统和人类健康的潜在威胁。因此,有必要将特异性生物标志物和生物指示物纳入效应评估,以反映新污染物的早期分子效应及其对土壤健康的长期影响<sup>[62]</sup>。

在修复技术领域,一方面研究者们加大了对传统修复技术的改进。例如,在原位热脱附修复技术中引入数值模拟手段,在氧化和生物修复过程中应用创新材料等<sup>[63-65]</sup>。另一方面,机械化学、超临界水氧化、高频电磁场加热、水热碱处理、磁性活性炭和改性生物炭等创新性去除或稳定化技术有望作为新污染物修复的技术储备<sup>[66-70]</sup>。多技术组合有助于弥补单一技术的不足。例如,将活性炭吸附与高频加热或化学氧化结合使用,能更高效地处理PFAS,磁性活性炭和改性生物炭不仅提升了吸附能力,还确保了材料的可再生性<sup>[71]</sup>。此外,绿色可持续的修复方法,如合成生物学技术,可以利用CRISPR-Cas9基因剪刀在微生物中引入或过表达特定降解酶基因,提高降解能力<sup>[72-73]</sup>。未来修复技术也将更加注重修复效果的长期稳定性和环境安全性,确保修复后的土壤具备持续的生态功能,实现对新污染物的全面可持续管理。

## 2.9 机器学习在场地环境管理与修复中的应用

在场地环境管理与修复中,大数据和机器学习技术正逐渐成为关键工具,推动了污染场地识别、风险评估、修复策略优化以及决策支持的创新发展。污染场地的识别与风险评估一直是环境管理中的核心问题,借助机器学习和大数据技术的结合,污染物识别的精度和效率得到了显著提升。Majumder等<sup>[74]</sup>构建了一种结合极限学习机与进化策略的模型,可显著提高地下水污染修复过程中识别与评估的精度。该模型通过整合多源环境数据,能够精准预测污染物的扩散路径和影响范围,尤其在复杂地质条件下表现出色。这些技术的应用不仅提升了污染物识别的准确性,还为环境管理提供了可靠的风险预测模型,有助于更精准的环境保护与治理。

在修复技术的优化与预测方面,机器学习技术通

过处理和分析大量的历史数据与实时监测数据,为优化修复策略提供了智能支持。Sprocati等<sup>[75]</sup>将基于过程的反应传输建模与机器学习结合应用于电动力修复地下水污染的技术中,显著提高了修复效率,并减少了对环境的潜在危害。此外,Li等<sup>[76]</sup>开发的基于长短期记忆网络(LSTM)的模型展示了在复杂修复情境下的优势,通过实时监测数据动态调整修复策略,确保了修复效果的最大化。这种方法特别适用于不同环境条件下的修复优化。Guo等<sup>[77]</sup>的研究则进一步强调了基于代理模型的0-1混合整数非线性规划优化模型在地下水污染源识别和修复中的应用,这种模型在处理复杂多组分污染物时表现出色,并为污染源的精准修复提供了理论基础。

智能决策支持系统的发展也极大地提升了环境管理的效率。Kaklauskas<sup>[78]</sup>详细介绍了智能决策支持系统,强调了其在实时处理和分析环境监测数据中的作用,这些系统能够生成高效且准确的决策支持,帮助管理者应对复杂的环境挑战。Wani等<sup>[79]</sup>的研究进一步展示了人工智能在环境韧性监测和管理中的创新应用,特别是在复杂污染情境下,通过智能分析和实时反馈,提升了环境治理的响应能力和预测精度。

针对新污染物如全氟和多氟烷基物质(PFAS)的识别与修复,传统的修复方法常常不足以应对其复杂的环境行为。通过大数据和机器学习技术,研究人员能够更好地理解这些污染物在不同环境中的行为模式,并制定更加有效的修复策略。例如,Fernandez等<sup>[80]</sup>展示了机器学习在应对复杂污染物时的优越性,特别是在多组分污染物的识别和处理方面,机器学习技术可以通过分析大量环境数据,深入理解这些污染物的迁移和转化行为,为制定更加科学的修复方案提供支持。

未来研究重点:①进一步开发更加精确的机器学习模型,整合多源环境数据,以提升污染场地识别和风险评估的精度;②利用大数据技术优化修复模型,特别是在处理复杂和多组分污染物时,探索更高效的预测和优化算法;③加强智能决策支持系统的开发,通过实时监测和反馈机制,提升环境治理的响应速度和精准性;④针对新污染物(如PFAS等),结合机器学习和大数据分析,进一步研究其在不同土壤和环境条件下的行为模式,制定更加科学的修复策略;⑤推动跨学科合作,加强数据共享和模型验证,从而形成更加稳固、可持续的研究和实践平台,确保环境治理措施的有效性和持续性。

## 2.10 多数据融合的土壤环境综合信息管理智慧决策平台

《土壤污染防治行动计划》提出提升土壤环境信息化管理水平,借助移动互联网、物联网等技术,拓宽数据获取渠道,实现数据动态更新。加强数据共享,编制资源共享目录,明确共享权限和方式,发挥土壤环境大数据在污染防治、城乡规划、土地利用中的作用。目前,国家和地方正在使用的土壤环境管理信息平台,如“全国建设用地土壤环境管理信息系统”、浙江省的“浙里净土”和“山东省土壤环境管理信息平台”等主要服务于监管部门的基本信息管理需求,尚不能满足未来场地土壤环境精准化、实时化和智能化管理的要求<sup>[81]</sup>。

我国已开展了多轮次全国尺度、重点区域的场地土壤环境调查,包括重点行业企业用地调查、重点监管企业土壤污染隐患排查等,掌握了大量基础数据,这些数据主要依靠土壤、地下水样品数据与质量标准的对比分析判定污染情况、可能风险,数据来源单一且以数值型结构化数据为主,关注个体数据质量,难以处理海量数据,与未来场地环境管理的需求精准化、实时化、智能化仍有较大差距。

未来土壤环境综合信息管理智慧决策平台应兼具以下功能:①多元表达功能。构建场地污染环境信息采集、识别及三维成像方法体系,实现多维度、多尺度的场地多源异构数据的整合与关联分析,实现场地污染过程的多维认知分析与可视化表达。②大数据功能。构建智能化管理平台,实现多源、多尺度、异构的环境信息传输,实现多元时空一致和统一识别框架下的场地污染环境大数据分析与管理。③联动监管功能。例如,在退役老工业聚集区治理修复、大型在产企业和工业园区监控修复中,通过构建空间信息管理系统,实现土壤环境信息叠加至国土空间规划“一张图”,实现部门间信息共享和联动监管;在实际污染土壤修复工程中,通过信息管理平台随时掌握修复工程质量、进度、二次污染、土壤外运跟踪等信息。

## 3 结论与展望

a) 经过20年的不懈努力,我国场地土壤污染防治科技水平已得到显著提升,为土壤污染风险的有效管控与修复提供了坚实支撑,显著促进了人居安全、生态环境质量的改善及美丽中国建设进程。在新的发展阶段,我国场地土壤污染防治科技领域迎来了前所未有的挑战和发展机遇。场地土壤污染防治科技人员应紧密围绕生态文明建设和绿色转型发展的核心要求,积极响应减污降碳协同、新污染物治理、绿色低碳修复等国家战略,持续深化科技创新,以科技赋能土壤污染防治事业。

b) 当前,我国土壤污染防治科技面临的主要问题集中体现在土壤环境基准理论与方法、污染成因机理、监测监管技术、管控修复技术及决策支撑体系等多个层面。针对这些问题,未来需重点加强以下几方面工作:一是强化土壤环境基准研究,特别是迁移转化模型的本土化及新污染物、不同保护受体的环境基准探索;二是深化污染成因机理的基础研究,提升复杂场地条件下污染物迁移转化行为的预测能力;三是完善土壤污染物检测监测体系,融合遥感、大数据等宏观手段与光谱学微观技术,优化监测网络与指标体系;四是推动风险管控与修复技术的多元化、智能化发展,构建土壤-地下水协同修复技术体系,并研发绿色可持续的修复装备与管理系统;五是构建基于信息化技术的土壤污染风险管控与管理决策支持系统,实现风险管理的可视化与智能化。

c) 展望未来,至 2035 年,我国将构建起较为完善的土壤污染防治科技体系,显著提升土壤污染防治的科学性、精准性和有效性,生态环境治理体系和治理能力现代化基本实现。进而,至 2050 年,通过持续不断的研发与实践,我国将全面建成系统、高效的土壤污染防治科技体系,为土壤健康、生态安全及人与自然和谐共生提供坚实保障,生态环境治理体系和治理能力现代化全面实现,建成美丽中国。这一过程中,科技创新将作为核心驱动力,不断推动土壤污染防治事业向更高质量、更高水平发展。

#### 参考文献 (References):

- [ 1 ] 宋昕,林娜,殷鹏华.中国污染场地修复现状及产业前景分析[J].土壤,2015,47(1):1-7.  
SONG X,LIN N,YIN P H.Contaminated site remediation industry in China:current state and future trends[J].Soils,2015,47(1):1-7.
- [ 2 ] 姜林,梁竞,钟茂生,等.复杂污染场地的风险管理挑战及应对[J].环境科学研究,2021,34(2):458-467.  
JIANG L,LIANG J,ZHONG M S,et al.Challenges and response to risk management of complex contaminated sites[J].Research of Environmental Sciences,2021,34(2):458-467.
- [ 3 ] 鞠铁男,雷梅,郭广慧,等.长三角土壤污染重点监管单位综合风险评估[J].中国环境科学,2023,43(12):6490-6499.  
JU T N,LEI M,GUO G H,et al.Comprehensive risk assessment of key supervision units of soil pollution in Yangtze River Delta[J].China Environmental Science,2023,43(12):6490-6499.
- [ 4 ] 骆永明,滕应.中国土壤污染与修复科技研究进展和展望[J].土壤学报,2020,57(5):1137-1142.  
LUO Y M,TENG Y.Research progresses and prospects on soil pollution and remediation in China[J].Acta Pedologica Sinica,2020,57(5):1137-1142.
- [ 5 ] 吴丰昌.中国环境基准体系中长期路线图[M].2版.北京:科学出版社,2020.
- [ 6 ] 马瑾.世界主要发达国家土壤环境基准与标准理论方法研究[M].北京:科学出版社,2021.
- [ 7 ] 骆永明,夏家淇,章海波,等.中国土壤环境质量基准与标准制定的理论和方法[M].北京:科学出版社,2015.
- [ 8 ] 龙涛,林玉锁,陈楠.我国土壤环境基准研究的历程与展望[J].生态与农村环境学报,2023,39(3):273-281.  
LONG T,LIN Y S,CHEN Q.Progress and prospect of soil environmental criteria research in China[J].Journal of Ecology and Rural Environment,2023,39(3):273-281.
- [ 9 ] 葛峰,徐珂珂,云晶晶,等.我国土壤环境基准优先污染物的筛选及清单研究[J].中国环境科学,2018,38(11):4228-4235.  
GE F,XU K K,YUN J J,et al.Studies on screening and list of priority pollutants in China's soil criteria research[J].China Environmental Science,2018,38(11):4228-4235.
- [ 10 ] MAN J,GUO Y M,ZHOU Q,et al.Database examination, multivariate analysis,and machine learning:predictions of vapor intrusion attenuation factors[J].Ecotoxicology and Environmental Safety,2022,242:113874.
- [ 11 ] 王天董,薛维纳,罗飞,等.我国典型土壤 Cr(VI) 固-液分配系数  $K_d$  值及其在推导保护地下水的土壤环境基准中的应用研究[J].环境科学研究,2024,37(6):1326-1335.  
WANG T D,XUE W N,LUO F,et al.Solid-liquid partition coefficient ( $K_d$ ) of Cr(VI) in typical soils of China and its application in the development of groundwater protection-based soil environmental criteria[J].Research of Environmental Sciences,2024,37(6):1326-1335.
- [ 12 ] WANG B B,LIN C Y,ZHANG X,et al.A soil ingestion pilot study for teenage children in China[J].Chemosphere,2018,202:40-47.
- [ 13 ] SHI W Y,WANG X D,XIA T X,et al.Deriving ecological risk thresholds for soil molybdenum in China based on interspecies correlation estimation and quantitative ion character-activity relationship models[J].Journal of Hazardous Materials,2024,472:134483.
- [ 14 ] MAN J,ZHONG M S,ZHOU Q,et al.Exploring the nonlinear partitioning mechanism of volatile organic contaminants between soil and soil vapor using machine learning[J].Chemosphere,2023,315:137689.
- [ 15 ] WU Y H,ZHAO W H,MA J,et al.Human health risk-based soil environmental criteria (SEC) for park soil in Beijing,China[J].Environmental Research,2022,212(Pt C):113384.
- [ 16 ] SONG C Z,GU Q,ZHANG D K,et al.Prediction of PFAS bioaccumulation in different plant tissues with machine learning models based on molecular fingerprints[J].Science of the Total Environment,2024,950:175091.
- [ 17 ] BREWER R,PEARD J,HESKETT M.A critical review of discrete soil sample data reliability:part 1-field study results[J].Soil & Sediment Contamination,2017,26(1):1-22.
- [ 18 ] BREWER R,PEARD J,HESKETT M.A critical review of discrete soil sample data reliability:part 1-implications[J].Soil & Sediment Contamination,2017,26(1):23-44.

- [19] 付融冰.场地精准化环境调查方法学[M].北京:中国环境出版集团,2022.
- [20] 洪亚雄.我国土壤污染源头防控的现状、问题及建议[J].环境保护,2023,51(20):12-16.  
HONG Y X.Research on current situation,problems and countermeasures of soil pollution source control in China[J].Environmental Protection,2023,51(20):12-16.
- [21] 刘钢,叶田田,徐冲,等.华南地区农药厂地块土壤异味污染物识别[J].安全与环境学报,2024,24(4):1623-1632.  
LIU G,YE T T,XU C,et al.Recognition of odor pollutants in the soil of a pesticide factory site in South China[J].Journal of Safety and Environment,2024,24(4):1623-1632.
- [22] 李佳音,李伟芳,宁晓宇,等.某有机磷农药场地异味 VOCs 污染特征与关键致臭物质识别[J].环境化学,2022,41(9):3075-3082.  
LI J Y,LI W F,NING X Y,et al.Odour VOCs pollution characteristics and identification of key odorant in an organophosphorus pesticide site[J].Environmental Chemistry,2022,41(9):3075-3082.
- [23] 封雪,李宗超,夏新,等.瑞士土壤环境监测网络构建与运行对中国的启示[J].中国环境监测,2022,38(3):18-24.  
FENG X,LI Z C,XIA X,et al.Enlightenment of the construction and operation of Swiss soil monitoring network to China[J].Environmental Monitoring in China,2022,38(3):18-24.
- [24] 孔坤,张猛,宁增平,等.国内外污染场地环境风险评估框架形成与发展[J].生态毒理学报,2023,18(1):124-137.  
KONG K,ZHANG M,NING Z P,et al.A review of formulation and development of domestic and foreign environmental risk assessment frameworks for contaminated sites[J].Asian Journal of Ecotoxicology,2023,18(1):124-137.
- [25] VERGINELLI I,YAO Y J,WANG Y,et al.Estimating the oxygenated zone beneath building foundations for petroleum vapor intrusion assessment[J].Journal of Hazardous Materials,2016,312:84-96.
- [26] ZHANG R H,JIANG L,ZHONG M S,et al.Applicability of soil concentration for VOC-contaminated site assessments explored using field data from the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration[J].Environmental Science & Technology,2019,53(2):789-797.
- [27] ZHANG R H,JIANG L,ZHONG M S,et al.A source depletion model for vapor intrusion involving the influence of building characteristics[J].Environmental Pollution,2019,246:864-872.
- [28] UNNITHAN A,BEKELE D,SAMARASINGHE C,et al. Evaluating the role of preferential pathways in exacerbating vapour intrusion risks[J].Journal of Hazardous Materials Advances,2023,10:100310.
- [29] 郝辰宇,钟茂生,姜林,等.基于土壤气的场地 VOCs 污染刻画及风险评估[J].中国环境科学,2023,43(11):5700-5708.  
HAO C Y,ZHONG M S,JIANG L,et al.Characterization and vapor intrusion risk assessment of VOCs in contaminated sites based on soil gas[J].China Environmental Science,2023,43(11):5700-5708.
- [30] 蒋世杰,翟远征,王金生,等.国内外基于保护地下水的土壤环境基准的推导与比较[J].水文地质工程地质,2016,43(4):52-59.  
JIANG S J,ZHAI Y Z,WANG J S,et al.Derivation of soil environmental criteria for groundwater protection:a comparative study between countries[J].Hydrogeology & Engineering Geology,2016,43(4):52-59.
- [31] 杜林峰,王月玲,沈彦.污染土壤绿色可持续修复理论及技术综述[J].现代农业科技,2024(3):124-127.  
DU L F,WANG Y L,SHEN Y.A review of green and sustainable remediation theory and technology for contaminated soil[J].Modern Agricultural Science and Technology,2024(3):124-127.
- [32] US EPA.Green remediation:incorporating sustainable environmental practices into remediation of contaminated sites[R].Washington DC:United States Environmental Protection Agency,2008.
- [33] ITRC.Green and sustainable remediation:a practical framework [R].Washington DC:Interstate Technology & Regulatory Council,2011.
- [34] 谷庆宝,侯德义,伍斌,等.污染场地绿色可持续修复理念、工程实践及对我国的启示[J].环境工程学报,2015,9(8):4061-4068.  
GU Q B,HOU D Y,WU B,et al.Conception and project practice of green and sustainable site remediation and its implications for China[J].Chinese Journal of Environmental Engineering,2015,9(8):4061-4068.
- [35] BUENO F B,GÜNTHER W M R,PHILIPPI A,et al.Site-specific framework of sustainable practices for a Brazilian contaminated site case study[J].Science of the Total Environment,2021,801:149581.
- [36] 韩颖,邓璟菲,高铭晓,等.污染地块绿色可持续修复的国际进展及我国的发展路径分析[J].环境保护,2023,51(增刊1):62-67.  
HAN Y,DENG J F,GAO M X,et al.International progresses and Chinese development path analysis of contaminated sites green sustainable remediation[J].Environmental Protection,2023,51(Suppl 1):62-67.
- [37] 侯德义,李广贺.污染土壤绿色可持续修复的内涵与发展方向分析[J].环境保护,2016,44(20):16-19.  
HOU D Y,LI G H.Green and sustainable remediation of contaminated soil in China:core elements and development direction[J].Environmental Protection,2016,44(20):16-19.
- [38] 马福俊.推动污染场地绿色低碳风险管控和修复[J].世界环境,2023,5:28-29.  
MA F J.Promoting green and low-carbon risk management and remediation of contaminated sites[J].World Environment,2023,5:28-29.
- [39] 房晓宇,卢滇楠,刘铮.污染土壤生物修复技术的进展与工程应用现状[J].化工进展,2023,42(12):6498-6506.  
FANG X Y,LU D N,LIU Z.Recent advancements and applications of soil bioremediation techniques[J].Chemical Industry and Engineering Progress,2023,42(12):6498-6506.
- [40] 王文兵,李春阳,董纤凌,等.双碳背景下污染场地修复策略与技术前景[J].环境工程学报,2023,17(1):188-196.  
WANG W B,LI C Y,DONG Q L,et al.Strategies and technology

- prospects for contaminated site remediation in carbon peak and carbon neutrality vision[J].*Chinese Journal of Environmental Engineering*,2023,17(1):188-196.
- [41] 肖萌,董璟琦,张红振,等.气候变化视角下的污染场地绿色可持续修复新方向[J].*中国环境管理*,2023,15(2):130-139.
- XIAO M,DONG J Q,ZHANG H Z,et al.A new direction of green and sustainable remediation of contaminated sites from the perspective of climate change[J].*Chinese Journal of Environmental Management*,2023,15(2):130-139.
- [42] 侯德义.我国工业场地地下水污染防治十大科技难题[J].*环境科学研究*,2022,35(9):2015-2025.
- HOU D Y.Ten grand challenges for groundwater pollution prevention and remediation at contaminated sites in China[J].*Research of Environmental Sciences*,2022,35(9):2015-2025.
- [43] 周慧娣,李海明,肖瀚,等.石化场地污染土壤和地下水修复技术组合研究与应用进展[J].*应用化工*,2024,53(8):1880-1885.
- ZHOU H D,LI H M,XIAO H,et al.Progress and prospect of research and application upon multi-technique collaborative remediation of contaminated soil and groundwater in petrochemical sites[J].*Applied Chemical Industry*,2024,53(8):1880-1885.
- [44] CIAMPI P,ESPOSITO C,PAPINI M P.Hydrogeochemical model supporting the remediation strategy of a highly contaminated industrial site[J].*Water*,2019,11(7):1371.
- [45] GREEN C T,LIAO L X,NOLAN B T,et al.Regional variability of nitrate fluxes in the unsaturated zone and groundwater,Wisconsin, USA[J].*Water Resources Research*,2018,54(1):301-322.
- [46] 冯璐.PAHs 污染土壤热处理后的安全性评估[D].合肥:安徽大学,2024:33-42.
- [47] 钟重,张弛,冯一帆,等.中国污染土壤再利用的环境管理思路探讨[J].*环境污染与防治*,2021,43(1):115-120.
- ZHONG Z,ZHANG C,FENG Y J,et al.Thoughts on the environmental management of contaminated soil reuse in China[J].*Environmental Pollution & Control*,2021,43(1):115-120.
- [48] 生态环境部,工业和信息化部,农业农村部,等.重点管控新污染物清单(2023年版)[EB/OL].北京:生态环境部,(2022-12-29)[2024-08-28].[https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk02/202212/t20221230\\_1009167.html](https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk02/202212/t20221230_1009167.html).
- [49] 葛锋,张转霞,扶恒,等.我国有机污染场地现状分析及展望[J].*土壤*,2021,53(6):1132-1141.
- GE F,ZHANG Z X,FU H,et al.Distribution of organic contaminated sites in China:statu quo and prospect[J].*Soils*,2021,53(6):1132-1141.
- [50] 时巧翠,傅佳宇,陈金媛,等.环境新污染物风险防范与化学品环境管理[J].*化学试剂*,2022,44(9):1342-1349.
- SHI Q C,FU J Y,CHEN J Y,et al.Risk prevention of emerging pollutants and environmental management of chemicals[J].*Chemical Reagents*,2022,44(9):1342-1349.
- [51] 国务院办公厅.国务院办公厅关于印发新污染物治理行动方案的通知[EB/OL].北京:国务院办公厅,(2022-05-04)[2024-08-28].[https://www.mee.gov.cn/zcwj/gwywj/202205/t20220524\\_983032.shtml](https://www.mee.gov.cn/zcwj/gwywj/202205/t20220524_983032.shtml).
- [52] WANG Y J,GAO W,WANG Y W,et al.Suspect screening analysis of the occurrence and removal of micropollutants by GC-QTOF MS during wastewater treatment processes[J].*Journal of Hazardous Materials*,2019,376:153-159.
- [53] KIRKWOOD-DONELSON K I,DODDS J N,SCHNETZER A, et al.Uncovering per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) with nontargeted ion mobility spectrometry-mass spectrometry analyses[J].*Science Advances*,2023,9(43):eadj7048.
- [54] PINASSEAU L,WIEST L,FILDIR A,et al.Use of passive sampling and high resolution mass spectrometry using a suspect screening approach to characterise emerging pollutants in contaminated groundwater and runoff[J].*Science of the Total Environment*,2019,672:253-263.
- [55] WANG X B,YU N Y,JIAO Z Y,et al.Machine learning-enhanced molecular network reveals global exposure to hundreds of unknown PFAS[J].*Science Advances*,2024,10(21):eadn1039.
- [56] 魏宇,陈倩羽,孟维坤,等.高分辨质谱在环境科学领域应用综述[J].*环境监控与预警*,2022,14(5):18-26.
- WEI Y,CHEN Q Y,MENG W K,et al.Application of high-resolution mass spectrometry in the field of environmental science: a critical review[J].*Environmental Monitoring and Forewarning*,2022,14(5):18-26.
- [57] MALHOTRA B D,ALI,M D A.Nanomaterials for biosensors, micro and nano technologies[M].Amsterdam,the Netherlands: William Andrew Publishing,2018:1-74.
- [58] HARRAQ A A,BHARTI B.Microplastics through the lens of colloid science[J].*ACS Environmental Au*,2022,2(1):3-10.
- [59] FISCHER A,MANEFIELD M,BOMBACH P.Application of stable isotope tools for evaluating natural and stimulated biodegradation of organic pollutants in field studies[J].*Current Opinion in Biotechnology*,2016,41:99-107.
- [60] MONTEVERDE E,GUTIERREZ L,BLANCO P,et al.Integrating molecular markers and environmental covariates to interpret genotype by environment interaction in rice (*Oryza sativa* L.) grown in subtropical areas[J].*G3*,2019,9(5):1519-1531.
- [61] de SOUZA B B,MEEGODA J.Insights into PFAS environmental fate through computational chemistry:a review[J].*Science of the Total Environment*,2024,926:171738.
- [62] HE Y J,LIAO H L,YANG G,et al.Perfluorohexanesulfonic acid (PFHxS) impairs lipid homeostasis in zebrafish larvae through activation of PPAR $\alpha$ [J].*Environmental Science & Technology*,2024,58(37):16258-16268.
- [63] LEI Y J,ZENG H Y,NAIDU R,et al.Experimental and numerical investigation on the effect of frequency combinations on PFOA defluorination by dual-frequency ultrasound coupling persulfate[J].*Environmental Technology & Innovation*,2024,34:103598.
- [64] THAPA B S,PANDIT S,MISHRA R K,et al.Emergence of per- and poly-fluoroalkyl substances (PFAS) and advances in the remediation strategies[J].*Science of the Total Environment*,2024,916:170142.

- [ 65 ] LI H R, JUNKER A L, WEN J Y, et al. A recent overview of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) removal by functional framework materials [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 452: 139202.
- [ 66 ] HUANG H, TANG J C, NIU Z R, et al. Interactions between electrokinetics and rhizoremediation on the remediation of crude oil-contaminated soil [J]. *Chemosphere*, 2019, 229: 418-425.
- [ 67 ] KANG Y G, BIRCH Q T, NADAGOUDA M N, et al. Advanced destruction technologies for PFAS in soils: progress and challenges [J]. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 2023, 33: 100459.
- [ 68 ] LI H, KOOSALETSE-MSWELA P. Occurrence, fate, and remediation of per- and polyfluoroalkyl substances in soils: a review [J]. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 2023, 34: 100487.
- [ 69 ] LIANG D Z, LI C B, CHEN H B, et al. A critical review of biochar for the remediation of PFAS-contaminated soil and water [J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 951: 174962.
- [ 70 ] SUN R Z, BABALOL S, NI R C, et al. Efficient and fast remediation of soil contaminated by per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) by high-frequency heating [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2024, 463: 132660.
- [ 71 ] LIU Y, SAMARASINGHE S C, WIJAYAWARDENA M A A, et al. PFAS soil contamination and remediation [J]. *Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences*, 2024. doi:10.1021/acs.est.4c03053.
- [ 72 ] TANG K H D, KRISTANTI R A. Bioremediation of perfluorochemicals: current state and the way forward [J]. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, 2022, 45(7): 1093-1109.
- [ 73 ] NGUYEN P Q, COURCHESNE N M D, DURAJ-THATTE A, et al. Engineered living materials: prospects and challenges for using biological systems to direct the assembly of smart materials [J]. *Advanced Materials*, 2018, 30(19): e1704847.
- [ 74 ] MAJUMDER P, LU C H. A novel two-step approach for optimal groundwater remediation by coupling extreme learning machine with evolutionary hunting strategy based metaheuristics [J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2021, 243: 103864.
- [ 75 ] SPROCATI R, ROLLE M. Integrating process-based reactive transport modeling and machine learning for electrokinetic remediation of contaminated groundwater [J]. *Water Resources Research*, 2021, 57(8): e2021wr029959.
- [ 76 ] LI J H, LU W X, LUO J N. Groundwater contamination sources identification based on the Long-Short Term Memory network [J]. *Journal of Hydrology*, 2021, 601: 126670.
- [ 77 ] GUO J Y, LU W X, YANG Q C, et al. The application of 0-1 mixed integer nonlinear programming optimization model based on a surrogate model to identify the groundwater pollution source [J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2019, 220: 18-25.
- [ 78 ] KAKLAUSKAS A. Intelligent decision support systems [M]. Cham: Springer International Publishing, 2014: 31-85.
- [ 79 ] WANI A K, RAHAYU F, BEN AMOR I, et al. Environmental resilience through artificial intelligence: innovations in monitoring and management [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2024, 31(12): 18379-18395.
- [ 80 ] FERNANDEZ N, NEJADHASHEMI A P, LOVEALL C. Large-scale assessment of PFAS compounds in drinking water sources using machine learning [J]. *Water Research*, 2023, 243: 120307.
- [ 81 ] 严佩嘉, 骆慧斌, 吴双, 等. 基于中国污染场地管理实践的环境信息数据库设计 [J]. *环境保护科学*, 2023, 49(6): 35-47.
- YAN P J, LUO H B, WU S, et al. A database design for environmental information based on the contaminated site management practices in China [J]. *Environmental Protection Science*, 2023, 49(6): 35-47.

(责任编辑:周巧富)