

土壤环境地质污染现状及修复技术探讨

肖道恺

河南省地质局生态环境地质服务中心, 河南 郑州 450000

DOI:10.61369/EAE.2026020003

摘 要 : 本文深入分析了我国土壤环境地质污染的现状, 指出目前污染呈局部加重、区域扩散及复合污染凸显的态势, 工矿区、农耕区及城市周边等不同功能区污染特征差异显著, 且污染已对生态安全、人体健康及经济发展造成多维度危害。在此基础上, 文章系统探讨了物理修复、化学修复、生物修复及联合修复四类关键技术的基本原理与适用场景, 并对各类技术的优缺点进行了对比评价。研究提出, 土壤修复技术的选择需综合考虑土壤地质类型、污染物性质及场地功能, 依据一域一策原则实现精准适配。本文旨在为土壤污染治理提供科学依据, 推动修复技术的优化与应用, 以实现土壤地质环境的质量提升与可持续利用。

关 键 词 : 土壤环境; 地质污染; 污染现状; 修复技术

Discussion on the Current Situation of Soil Environmental Geological Pollution and Remediation Technologies

Xiao Daokai

Ecological Environment Geological Service Center, Henan Provincial Geological Bureau, Zhengzhou, Henan 450000

Abstract : This paper provides an in-depth analysis of the current status of soil environmental geological pollution in China, highlighting a trend of localized intensification, regional dispersion, and prominent compound pollution. Significant differences in pollution characteristics are observed across various functional areas, including industrial and mining zones, agricultural regions, and areas surrounding cities. The pollution has caused multidimensional harm to ecological security, human health, and economic development. Building on this foundation, the article systematically explores the fundamental principles and applicable scenarios of four key remediation technologies: physical remediation, chemical remediation, biological remediation, and combined remediation. It also offers a comparative evaluation of the advantages and disadvantages of each technology. The study proposes that the selection of soil remediation technologies should take into comprehensive consideration soil geological types, pollutant properties, and site functions, achieving precise adaptation based on the principle of "one strategy per region." This paper aims to provide a scientific basis for soil pollution control and promote the optimization and application of remediation technologies to enhance the quality and sustainable utilization of the soil geological environment.

Keywords : soil environment; geological pollution; pollution status; remediation technologies

引言

当前, 我国土壤环境地质污染形势严峻, 部分区域污染浓度高、风险大, 且污染类型已从单一的无机或有机污染逐渐向重金属-有机复合污染转变。南方酸性红壤区、西南岩溶区等特殊地质背景区, 由于地质环境脆弱, 污染物更容易迁移扩散, 治理难度显著增加。因此, 深入分析我国土壤环境地质污染的现状与特征, 系统探讨各类修复技术的原理、优缺点及适用条件, 对于构建科学合理的土壤污染治理体系、提升地质环境修复效能具有重要意义。本文旨在通过梳理我国土壤污染现状, 对比分析主流修复技术, 以期为我国土壤地质环境保护与修复工作提供理论参考和技术支撑。

一、我国土壤环境地质污染现状分析

(一) 总体污染形势

随着城市化进程的加速和工业化的深入推进, 土壤污染问题

日益凸显, 尤其是非正规垃圾填埋场所导致的土壤及地下水污染问题, 已成为环境保护与治理的重点和难点^[1]。我国土壤环境地质污染呈局部加重、区域扩散、复合污染凸显态势, 污染来源多元^[2]。全国土壤详查显示, 土壤存在一定点位超标, 无机与有机

污染物为主要因子，镉、汞、砷、铅等重金属超标突出，工业集中区有机污染高发。土壤污染空间异质性显著，南方酸性红壤区重金属迁移扩散风险更高，农耕区面源污染广而隐蔽，工矿区点源污染重且难治理，部分区域人为污染与高地质背景值叠加，加剧风险管控难度。同时，土壤与地下水污染耦合形成水土复合污染，对地质环境修复的系统性要求显著提升。

（二）典型区域污染特征

不同功能区与地质地貌单元的土壤污染特征差异明显，污染格局分化突出^[3]。工矿区以重金属、石油类有机污染为主，污染深度大且与地质结构密切相关；农耕区以农业面源污染为主，易在肥沃冲积平原形成连片污染，威胁耕地与农产品安全；城市及工业园区周边多为重金属与有机污染物共存的复合污染，受工程活动影响迁移复杂。西南喀斯特、西北盐渍土等特殊地貌区，受地质背景与人为活动叠加影响，污染治理需适配特殊地质环境。

（三）土壤污染造成的危害

土壤地质污染具备多维度、长期性与不可逆性，危害覆盖生态、健康及经济社会全链条^[4]。生态上，污染物破坏土壤微生物群落与自净能力，造成土壤退化、植被受损、水土流失加剧，并通过淋溶、径流引发水土联动污染，破坏水文地质系统平衡；健康层面，污染物经接触、呼吸及食物链富集侵入人体，诱发癌症、神经损伤等重疾，农产品重金属超标为主要暴露途径；经济社会层面，污染导致土地利用受限、资源闲置低效，修复投入高昂，还易引发农产品安全事件与环境纠纷，制约区域可持续发展与地质资源合理利用。

二、土壤环境修复技术探讨

（一）物理修复技术

物理修复技术是依托物理分离、迁移、固定等原理实现土壤污染物去除或钝化的技术类型，适用于高浓度、重污染场地的应急治理与快速处置，核心技术包括土壤客土换土、热脱附、土壤气相抽提、电动修复、固化/稳定化等^[5]。土壤客土换土技术通过置换污染土壤实现快速降污，操作简便但工程量大、成本高，易造成二次土壤扰动与生态破坏，适用于小面积重度污染区域。热脱附技术通过加热破坏有机污染物化学键，使其挥发分离后集中处理，对石油烃、多环芳烃等挥发性/半挥发性有机物去除效果显著，修复效率高，但能耗高、易破坏土壤有机质，且需配套废气处理系统^[6]。土壤气相抽提技术利用真空抽提系统去除土壤气相中的挥发性有机物，适配渗透性较好的砂质土壤地质条件，对低渗透性黏土地质区适用性较差^[7]。电动修复技术借助电场作用驱动重金属离子定向迁移富集，适用于低渗透性黏性土壤的重金属污染治理，不受地质介质孔隙度限制，但对复合污染处理效果有限^[8]。固化/稳定化技术通过掺入固化剂将污染物包裹固定于土壤基体，阻断迁移路径，操作便捷、成本适中，是重金属污染场地常用的应急处置技术，但仅实现污染物固定，未彻底去除，存在长期淋滤释放风险。

（二）化学修复技术

化学修复技术基于化学反应实现污染物氧化还原、络合萃

取、沉淀钝化，是当前土壤污染治理的主流技术之一，主要包括化学淋洗、化学氧化还原、土壤钝化、化学萃取等。化学淋洗技术利用淋洗剂洗脱土壤中的重金属与有机污染物，修复效率高、适用范围广，淋洗剂可分为无机淋洗剂、有机螯合剂与生物表面活性剂，适配不同地质土壤介质，但淋洗剂残留易造成二次污染，淋洗液处理难度大，且易导致土壤养分流失。化学氧化还原技术通过投加氧化剂或还原剂，将有毒污染物转化为低毒、无毒物质，常用药剂包括芬顿试剂、过硫酸盐、零价铁等，对有机污染物与变价重金属治理效果突出，反应速度快，但药剂投加量难以精准控制，易破坏土壤理化性质与微生物群落。土壤钝化技术通过施加钝化剂改变重金属赋存形态，降低其生物有效性及迁移性，钝化剂包括石灰、磷酸盐、生物炭等环境友好型材料，适用于农耕区重金属污染原位修复，不破坏土壤耕作层，但无法彻底去除重金属，需长期监测钝化稳定性。化学萃取技术利用有机溶剂萃取土壤中的有机污染物，修复彻底，但萃取剂成本高、易挥发，对土壤地质结构破坏较大，应用场景受限。

（三）生物修复技术

生物修复技术依托微生物、植物及生物制剂的代谢作用降解或富集污染物，具有绿色环保、成本低廉、生态友好的优势，契合土壤地质生态可持续修复需求，主要分为微生物修复、植物修复、动物修复与生物联合修复^[9]。微生物修复利用细菌、真菌等微生物降解有机污染物、转化重金属形态，分为原位微生物修复与异位微生物修复，可通过投加营养盐、驯化功能微生物强化修复效果，对石油烃、农药等有机污染治理潜力巨大，但修复周期长，受土壤温度、湿度、pH值及地质养分条件影响显著^[10]。植物修复通过超富集植物吸收富集重金属、降解有机污染物，包括植物提取、植物稳定、植物挥发等技术，适用于大面积中低浓度污染耕地，兼具生态景观效益，但超富集植物生物量小、修复周期长，对高浓度污染场地适配性差。动物修复借助蚯蚓、土壤线虫等土壤动物的富集、转运作用降解污染物，常作为辅助修复手段，与微生物、植物修复协同应用。生物修复技术最大优势在于保护土壤地质生态系统完整性，是农田、生态保护区等区域的首选修复技术，但对极端污染、复杂地质环境的适配性仍需优化。

（四）联合修复技术

针对土壤复合污染、复杂地质环境的治理需求，单一修复技术难以满足高效、彻底的修复目标，联合修复技术通过整合不同技术优势，实现协同增效，成为当前土壤修复技术的研发与应用热点。常见联合模式包括物理-化学联合、生物-物理联合、生物-化学联合、多技术耦合等。物理-化学联合修复结合热脱附与化学氧化，先通过热脱附去除挥发性有机物，再利用化学氧化降解残留难降解有机物，适配高浓度复合有机污染场地；电动修复与化学钝化联合，通过电场驱动重金属迁移，同步施加钝化剂实现固定，提升低渗透土壤重金属修复效率。生物-物理联合修复将植物修复与土壤曝气、翻耕等物理措施结合，改善土壤通气性与微生物活性，加快有机污染物降解；微生物修复与土壤气相抽提联合，强化挥发性有机物的微生物降解与抽提效率。生物-化学联合修复采用化学淋洗与生物降解耦合，先通过低浓度淋洗

剂洗脱污染物，再利用微生物降解淋洗液中的有机物，降低二次污染风险；生物炭钝化与植物提取联合，提升重金属生物有效性，增强植物富集效率。联合修复技术可根据污染类型、地质条件灵活组合，兼顾修复效率与生态效益，是未来土壤地质污染治理的重要发展方向。

三、典型修复技术的对比与适用性评价

（一）各类修复技术的优缺点分析

物理修复技术整体修复速度快、污染物去除彻底，对高浓度、重污染场地适配性强，可实现应急风险管控，但普遍存在能耗高、工程量大、土壤地质结构破坏严重、易产生二次污染等问题，且治理成本偏高，适用于工业污染场地异位修复与应急处置。化学修复技术操作灵活、修复效率高，可针对性处理重金属与有机复合污染，药剂选择范围广，但存在药剂残留、土壤理化性质劣化、二次污染防治难度大等缺陷，部分化学药剂成本较高，长期使用可能影响土壤地质生态系统的自我修复能力。生物修复技术生态友好、成本低廉、无二次污染，能最大程度保留土壤生态功能，适配大面积原位修复场景，但修复周期漫长、对污染浓度与地质环境条件要求严苛，极端环境下微生物与植物活性受限，修复效果难以保障。联合修复技术整合了单一技术的优势，可适配复合污染与复杂地质条件，修复效果与经济性更优，但技术耦合工艺复杂、系统调控难度大，不同技术间可能存在拮抗作用，对工程设计与运维水平要求较高，研发与应用成熟度仍有待提升。

（二）不同地质环境下的技术选择

土壤修复技术的遴选需紧密结合土壤地质类型、污染物类型、污染程度、场地功能等核心要素，实现一域一策、精准适

配。在砂质土、砾石土等高渗透性地质区域，土壤孔隙度大、污染物迁移速度快，易引发地下水次生污染，优先选用土壤气相抽取、化学淋洗、原位化学氧化等技术，可快速阻断污染物垂向迁移，提升修复效率；针对该区域重金属污染，可采用固化/稳定化技术，降低污染物淋滤风险。在黏土、粉质黏土等低渗透性地质区域，污染物迁移受阻、修复药剂扩散困难，电动修复、微生物原位修复、植物修复更具优势，电动修复不受土壤渗透性限制，微生物与植物修复可逐步改善土壤地质结构，实现生态修复。在农耕地等生态敏感型地质区域，以保障土壤肥力与生态功能为核心，优先选用生物修复、化学钝化等原位修复技术，避免破坏耕作层地质结构，其中生物炭钝化、超富集植物修复适配中低浓度重金属污染耕地。在工矿区等重污染地质区域，污染物浓度高、复合污染突出，需采用异位热脱附、化学淋洗、固化/稳定化等快速修复技术，或物理-化学联合修复技术，实现污染物高效去除与风险管控。在喀斯特、盐渍土等特殊地质区域，需结合地质背景特征，选用耐逆境生物修复技术与改性钝化材料，规避地质背景因素对修复效果的干扰，同时兼顾水土污染协同治理。

四、结束语

土壤环境地质污染治理是一项长期而艰巨的系统工程，关乎国家生态安全、人民群众健康以及经济社会的可持续发展。本文通过对我国土壤污染现状的分析表明，当前土壤污染形势依然严峻，呈现出来源复杂、区域差异大、水土复合污染显著等特点，对生态与安全构成了严重威胁。面对这一挑战，依托科技力量，科学合理地选择和应用修复技术是破解难题的关键。随着“绿水青山就是金山银山”理念的深入实践，土壤修复技术将向着绿色低碳、低成本、高效率及原位生态修复的方向演进。

参考文献

- [1] 赖兴兰, 冯利强, 吴晶晶, 等. 地质学视角下的土壤污染分析与防控建议 [J]. 环境生态学, 2025, 7(12): 147-153. DOI: 10.3969/j.issn.2096-6830.2025.12.22.
- [2] 王红红, 谷丰, 路永歌, 等. 矿山地质环境污染防治特点综述 [J]. 黑龙江科学, 2025, 16(8): 66-67. DOI: 10.3969/j.issn.1674-8646.2025.08.017.
- [3] 潘宏毅. 基于环境地质污染防治的分析与讨论 [J]. 砖瓦世界, 2023(12): 199-201. DOI: 10.3969/j.issn.1002-9885.2023.12.067.
- [4] 张胜, 张翠云, 何泽, 等. 地质微生态技术在石油污染土壤修复的应用研究 [C]// 中国地质学会水文地质专业委员会2017年年会暨地下水环境研讨会论文集. 2017: 1-7.
- [5] 高红梅. 某煤矿塌陷区重金属污染土壤治理及环境修复研究 [J]. 现代矿业, 2025, 41(3): 210-213, 218. DOI: 10.3969/j.issn.1674-6082.2025.03.043.
- [6] 谢文浩. 浅谈土壤修复工程中的环境污染防治与管理 [J]. 皮革制作与环保科技, 2024, 5(9): 102-104. DOI: 10.20025/j.cnki.CN10-1679.2024-09-35.
- [7] 余蕊蕊. 重金属污染土壤与地下水修复工程环境监测 [J]. 世界有色金属, 2024(15): 121-123. DOI: 10.3969/j.issn.1002-5065.2024.15.041.
- [8] 郭丽. 简述土壤环境监测及污染治理对策 [J]. 皮革制作与环保科技, 2023, 4(21): 118-120. DOI: 10.20025/j.cnki.CN10-1679.2023-21-41.
- [9] 冯虎贵. 基于超积累植物修复技术的土壤环境污染治理研究 [J]. 环境科学与管理, 2022, 47(1): 100-104. DOI: 10.3969/j.issn.1673-1212.2022.01.026.
- [10] 常兵磊, 陈洪卓, 熊攀攀. 土壤修复工程中的环境污染防治与管理 [J]. 中国高科技, 2023(21): 128-130. DOI: 10.13535/j.cnki.10-1507/n.2023.21.43.