

污染场地土壤及地下水绿色低碳修复现状问题及对策分析

徐年¹ 钱月梅²通讯作者

1.江苏泰州环保产业发展有限公司 江苏 泰州 225300

2.江苏苏新环保产业发展有限公司 江苏 泰州 225300

摘要: 本文针对污染场地土壤及地下水绿色低碳修复开展研究,对该修复模式核心的内涵进行概述,分析了我国绿色低碳修复面临的挑战,再进一步探讨实践过程中的难点,如碳减排与修复效果存在矛盾、技术设备不完善、适用性评估困难以及方案灵活性不足等问题,最后阐述我国绿色低碳修复技术的发展方向,涉及纳米材料与智能技术融合、微生物生态调控、高时空分辨率观测、化学/生物协同修复以及地下原位装备工艺优化等领域,给行业发展提供技术路径方面的参考。

关键词: 绿色低碳修复; 污染场地; 土壤地下水修复; 技术发展

工业化留下的遗留问题加上城市化进程的加速,让我国污染场地的土壤以及地下水污染问题,成了生态文明建设面临的关键挑战。据原环境保护部和原国土资源部发布的《全国土壤污染状况调查公报》,全国土壤的总超标率达到了16.1%,无机污染物超标点位数所占比例为82.8%,复合污染情况十分突出,多数场地还同时污染了地下水。在“净土保卫战”的推动下,土壤修复市场开始快速地扩容,前瞻产业研究院数据显示,2024年市场规模已经突破了120亿元,预计到2025年能够达到140亿元。

一、绿色低碳修复概述

绿色低碳修复是在传统污染场地土壤和地下水修复基础之上,融合了生态友好理念与低碳发展目标的新型修复模式,它的核心内容是在达成污染治理效果时,尽力减少修复过程中的资源消耗与环境影响,这种模式着重强调修复技术要具备环境兼容性,看重使用自然过程或者低能耗技术去取代高能耗与高污染的传统手段,通过优化修复工艺、提升能源利用效率以及降低碳排放等举措,推动修复活动和生态系统的协同发展,绿色低碳修复不但关注污染去除所产生的终端效果,而且更加重视修复全过程的生态足迹情况,从修复方案设计、材料选择直到施工运营的整个过程,都以减少环境负担作为导向方向,最终实现污染治理和生态保护、低碳发展的有机统一,为实现可持续的土地资源利用工作提供有力支撑(见表1)。

表1 绿色低碳修复与传统修复技术对比表

对比维度	绿色低碳修复技术	传统修复技术
核心目标	污染治理+低碳减排+生态保护	单一污染去除
能源消耗	依赖低能耗技术/自然过程,碳排放低	高能耗设备为主,碳排放高
环境扰动	原位修复为主,减少场地破坏与二次污染	异位修复占比高,场地扰动大
修复周期	部分技术周期较长,但生态兼容性好	周期短,但易忽视长期生态影响
资源利用	注重材料循环与自然过程利用	依赖化学药剂与外部资源输入
长期效益	促进场地生态恢复,支撑可持续利用	仅关注短期污染去除,生态效益弱

二、我国绿色低碳修复面临的挑战

(一) 绿色低碳修复技术研发不足

绿色低碳修复技术研发不足表现为技术体系系统性和成熟度需提升,现有技术大多处于实验室或小规模应用阶段,缺乏大规模工程验证支撑,技术研发方向常聚焦单一污染物或单一介质处理,针对复合污染场地的技术较少,难以适应复杂污染情境需求,技术研发过程对低碳性与修复效率平衡考虑不足,部分技术虽能实现低碳目标,但修复周期长或治理效果不稳定,无法满足实际工程时效性要求,研发资源分配不均衡,基础研究与应用研究衔接不够紧密,致使技术成果向工程实践转化通道不畅,许多有潜力技术难以快速落地。

(二) 绿色低碳技术标准体系建设滞后

绿色低碳技术标准体系建设滞后影响技术规范化和行业健康发展，标准缺失使技术应用缺乏统一评价依据和操作规范，现有标准大多沿用传统修复评价框架，对绿色低碳相关指标要求不足，难以有效衡量技术低碳性与生态友好性，标准覆盖范围不够全面，不同修复技术和不同污染类型专项标准有空白，导致部分新兴技术应用无据可依，标准更新速度跟不上技术发展步伐，一些已有标准内容陈旧，无法反映当前绿色低碳修复技术进展与实践需求，标准体系各层级标准衔接不够顺畅，不同领域标准存在交叉或冲突，增加工程实践执行难度。

（三）绿色低碳修复行业产业链不完善

绿色低碳修复行业产业链不完善表现在各环节协同性明显不足，从技术研发、装备制造直至工程服务、运营管理等环节存在脱节情况，上游技术研发与装备生产环节缺乏对下游工程需求精准对接，使得部分技术装备难以适应实际工程复杂场景，中游工程服务环节缺乏专业技术集成能力，难以将分散绿色低碳技术整合为系统化修复方案，影响修复效果稳定性，下游运营管理环节对修复后场地长期监测与维护重视不够，缺乏持续技术支持与管理机制，可能导致修复效果出现反弹现象，产业链中市场主体较为分散，缺乏具有引领性的龙头企业，行业集中度较低难以形成规模效应与技术创新合力^[1]。

三、开展绿色低碳修复的难点

（一）碳减排与修复之间存在矛盾

碳减排和修复之间矛盾的核心点是修复目标与低碳目标优先级难以平衡，修复活动本身需要消耗一定的能源与资源，可碳减排却要求严格控制这些消耗，所以两者在实践中容易形成冲突状况，修复过程中为确保污染去除达到彻底的程度，往往需要采用高能耗的相关技术手段，而这些手段会直接增加碳排放数量，这与绿色低碳的要求是相互违背的，要是过度强调碳减排相关的要求，可能会限制修复技术的具体选择范围，从而导致部分高效但高能耗的技术无法得到应用，进而影响修复效果最终达成^[2]。

（二）修复技术与设备尚需完善

部分绿色低碳修复技术反应机制还未完全明确，在复杂场地环境中易出现效果波动，无法保证污染去除效率的持续稳定，技术自动化程度较低且依赖人工操作环节较多，不仅增加人力成本还易因人为操作误差影响修复效果，设备研发与制造未能充分匹配绿色低碳技术需求，现有设备

能耗控制水平不高，运行中会产生额外碳排放削弱技术低碳优势，设备耐用性与维护性有待提升，长期运行过程中容易出现故障，增加设备更换与维修成本并影响修复工程连续性。

（三）修复技术的适用性与可操作性难以评估

修复技术的适用性和可操作性难以评估，使得技术选择缺少科学方面的依据，进而增加了工程所面临的风险，技术适用性的评估没有统一的方法与指标，无法准确判断技术对特定场地污染类型和程度的适配性，容易出现技术选择不恰当的情况，评估过程对场地环境条件考虑得不够充分。

（四）修复方案的灵活性和适应性不足

修复方案的设计通常以前期场地调查数据为依据，若是调查数据有偏差或者场地污染状况在修复时发生改变，方案无法及时进行调整，就可能造成修复目标无法实现，方案的设计显得过于僵化，对于不同修复阶段之间的衔接考虑不够充分，并且缺乏应对突发情况的相关预案，一旦出现设备故障、污染扩散等问题，无法迅速响应并采取有效的应对措施，方案的适应性不足表现在对不同场地条件的兼容程度较差，同一方案在不同场地的应用效果存在较大差异，需要做大量调整才能适配，增加了方案设计的成本和时间^[3]。

四、我国绿色低碳修复技术的发展

（一）纳米材料与智能技术

纳米材料和智能技术相融合给绿色低碳修复带来新的技术路径，其核心在于利用纳米材料高反应活性与智能技术精准调控能力来提升修复效率并降低能耗，纳米材料凭借独特表面效应和小尺寸效应能增强对污染物吸附降解能力，在低剂量投入情况下实现高效污染去除并减少修复中材料消耗与二次污染风险，智能技术借助传感器实时监测修复场地污染浓度和环境参数等数据，为修复过程提供动态反馈以避免过度修复或修复不足情况并优化能源材料使用，纳米材料制备过程正逐渐朝着绿色化方向发展，采用低能耗低污染合成方法来降低材料生产环节碳足迹，智能技术的算法模型持续优化，能更准确预测污染迁移规律与修复效果，为修复方案动态调整提供支持^[4]。

（二）微生物生态调控技术

微生物生态调控技术能调节场地内微生物群落结构和功能，依靠微生物代谢作用来实现污染降解，属于典型绿色低碳修复技术，此技术依赖微生物对污染物自然降解

能力,不用引入大量化学药剂或高能耗设备,修复过程碳排放量比较低,微生物生态调控核心是优化微生物生存环境,通过调整土壤湿度和营养条件等因素,促进有降解功能微生物生长繁殖并增强其代谢活性,该技术关键在于维持微生物群落的稳定性,防止外界环境变化破坏群落结构,保证降解功能持续发挥,微生物生态调控技术不仅可去除污染物,还能改善土壤生物活性与生态功能,推动修复场地生态恢复并同步推进污染治理与生态修复。

(三) 高时空分辨率原位观测及实验技术

高时空分辨率原位观测及实验技术不断发展,为绿色低碳修复工作提供精准技术支撑,其核心目标是实现对修复过程实时精细监测,该技术借助高灵敏度传感器与先进观测设备,可在原位条件下获取污染物浓度分布及迁移动态数据,时间和空间分辨率提升让监测结果更接近真实情况,原位观测技术避免传统采样分析带来的扰动与误差,还减少样品运输与实验室分析过程中的能耗,完全符合绿色低碳相关要求,实验技术发展着重模拟真实场地的各类环境条件,通过构建原位实验系统研究修复技术在实际环境反应过程与效果,为技术优化提供重要依据,高时空分辨率技术应用能及时发现问题,为修复方案调整提供有力数据支持,避免无效能源与资源投入情况发生。

(四) 化学/生物强化与协同修复技术

化学/生物强化与协同修复技术把化学手段和生物手段结合,以此提升修复效率同时降低环境影响,化学强化主要是通过添加少量化学药剂来激活生物降解过程,或者增强污染物的生物可利用性,从而减少化学药剂使用量并降低修复过程环境负担,生物强化是通过引入高效降解微生物

或者酶,增强生物降解能力进而缩短修复周期,同时减少能源消耗,协同修复的核心在于利用化学与生物过程的互补性,化学过程能够快速改变污染物的形态为生物降解创造条件,生物过程则可以彻底矿化污染物避免产生二次污染,该技术的发展重点是优化化学药剂与生物制剂的配比,以及确定两者作用的时序,实现修复效率与低碳性之间的平衡。

(五) 地下原位污染修复技术的装备与工艺

地下原位污染修复技术的装备与工艺的核心要点是提升装备性能以及工艺的合理性,装备的发展方向朝着小型化、模块化与智能化迈进,方便在地下复杂环境中进行部署与操作,可减少施工过程对场地造成的扰动,装备的能耗控制技术持续进步,借助优化动力系统、采用节能材料等手段,降低装备运行过程中的能源消耗,工艺的发展着重于简化操作流程、减少施工步骤,降低修复过程的时间成本与资源消耗,原位修复工艺避免了土壤或者地下水的异位搬运,减少运输过程中的碳排放与二次污染风险,符合绿色低碳的相关要求,装备与工艺的协同发展能够实现修复过程的高效化与低碳化,提升地下原位修复技术的工程适用性。

六、结论

污染场地土壤及地下水绿色低碳修复模式是传统修复朝着可持续治理转型的核心方向。当前行业面临多维度挑战,并且在实践过程中存在碳减排和修复效果难以平衡、技术适配性不足等问题,制约了绿色低碳修复的规模化应用。下一步需聚焦技术研发和工程转化之间的衔接,推动标准体系的完善与进一步细化,强化产业链各个环节之间的协同。

参考文献:

[1]黄卫东.浅析场地污染状况调查中土壤及地下水重金属[J].实验室检测,2025,3(13):236-238.
[2]赵照君,肖华.“双碳”背景下污染场地修复技术的发展趋势研究[J].产业创新研究,2025,(06):129-131.

[3]钱涌,宋亚丹,汪家睿.污染场地土壤环境调查与修复技术[J].农村科学实验,2025,(06):54-56.
[4]侯德义.如何从源头协同防治土壤地下水污染[J].中国环境监察,2025,(01):25-27.

作者简介:徐年(1995-)女,汉,江苏兴化,硕士,中级工程师,污染场地修复工作;

通讯作者:钱月梅(1987-)女,民族:汉,籍贯:江苏泰州,学历:本科,职称:中级工程师。