

基于生态修复技术的污染场地治理策略研究

丛 娜

辽宁瑞尔工程咨询有限公司 辽宁省鞍山市 114000

摘 要: 本论文围绕基于生态修复技术的污染场地治理策略展开研究。系统梳理物理、化学、生物等生态修复技术,剖析其原理与应用特性,从污染物类型、场地条件适配及多技术联用等维度,探讨污染场地治理策略。旨在为污染场地治理提供理论支撑,推动生态修复技术科学应用,助力生态环境可持续发展。

关键词: 生态修复技术; 污染场地; 治理策略; 物理修复; 化学修复

在我国工业化与城市化高速推进的进程中,工业生产、矿产开发等活动产生的大量污染物,致使众多场地遭受污染。污染场地不仅破坏生态系统平衡,干扰生物生存繁衍,还可能通过食物链传递等途径,严重威胁人体健康。生态修复技术作为解决污染场地问题的核心手段,其研究与应用日益受到重视。然而,不同污染场地在污染物构成、污染程度以及地质水文条件等方面存在显著差异,单一修复技术难以满足复杂的治理需求。因此,深入研究基于生态修复技术的污染场地治理策略,科学合理地选择和组合修复技术,对提升污染场地治理效能、降低治理成本、实现生态环境有效修复具有重要意义。

1. 生态修复技术的分类与原理

1.1 物理修复技术

物理修复技术依托物理原理与工程措施,通过改变污染物的物理状态实现污染治理,具有操作直观、见效较快的特点。隔离技术是其中的典型应用,它通过构建防渗墙、铺设土工膜等隔离屏障,在污染场地与周边环境间形成阻隔,防止污染物扩散迁移,从而控制污染范围。垂直防渗墙通常采用水泥-膨润土、塑性混凝土等材料,通过机械成槽后浇筑形成连续墙体,其渗透系数可低至 $10^{-7} - 10^{-8} \text{ cm/s}$,能够有效切断污染物在地下水中的水平扩散路径,保障周边地下水环境安全^[1]。尤其适用于污染范围明确、地下水水力梯度较大的场地,可快速将污染控制在有限区域内。热脱附技术同样是重要的物理修复手段。该技术依据污染物挥发性随温度变化的特性,对污染土壤或沉积物进行加热处理。根据加热温度不同,可分为低温热脱附($< 400^\circ\text{C}$)和高温热脱附($> 400^\circ\text{C}$)。当温度达到一定阈值,污染物从土壤颗粒

表面挥发,再经冷凝、吸附等方式收集处理。对于氯代烃、苯系物等挥发性有机污染物,热脱附技术不仅能实现90%以上的去除率,还能较好地保护土壤结构,避免化学药剂对土壤的二次污染。近年来,移动式热脱附设备的研发应用,进一步提升了技术的灵活性和适用性,可根据场地污染情况灵活调配作业。

1.2 化学修复技术

化学修复技术借助化学反应,改变污染物的化学性质,使其转化为无害或低毒物质,在处理复杂污染物时具有独特优势。化学氧化技术利用高锰酸钾、过氧化氢、芬顿试剂等强氧化剂,与污染物发生氧化还原反应,将有机污染物分解为二氧化碳和水等无害成分。以石油烃污染场地治理为例,通过注入过硫酸盐溶液,在土壤中产生硫酸根自由基($\text{SO}_4 \cdot^-$),其氧化还原电位高达 $2.5 - 3.1 \text{ V}$,能够快速降解长链烷烃、芳香烃等污染物。该技术反应速率快,可在短时间内降低污染物浓度,适用于应急修复场景。化学固定/稳定化技术则是通过向污染土壤添加化学药剂,促使污染物与药剂发生化学反应,形成难溶性化合物或稳定络合物,降低污染物的迁移性和生物有效性。常用的药剂包括石灰、磷酸盐、黏土矿物等。例如,向镉污染土壤中添加羟基磷灰石,可通过离子交换和表面络合作用,将水溶性镉转化为磷酸镉沉淀,使镉的生物可利用性降低70%以上。这种技术常用于重金属污染场地治理,能够显著降低重金属在土壤中的活性,减少其通过食物链传递对生态环境和人体健康的潜在威胁,且修复成本相对较低,便于大规模应用。

1.3 生物修复技术

生物修复技术利用微生物、植物、动物等生物的代谢

活动,实现对污染物的降解、转化或固定,具有环境友好、可持续性强的特点。微生物修复技术是生物修复的关键组成部分,微生物以污染物为碳源和能源,通过自身代谢将污染物分解为简单无机物。例如,在处理含酚类污染场地时,假单胞菌属微生物能够分泌酚羟化酶,将酚类物质逐步降解为邻苯二酚,再进一步分解为二氧化碳和水。通过优化营养物质(氮、磷等)配比、调节溶解氧浓度等条件,可显著提高微生物的降解效率。植物修复技术依靠植物的吸收、富集、转化等功能治理污染场地。超富集植物如蜈蚣草(砷富集)、东南景天(锌富集)等,能够大量吸收土壤中的重金属,并将其积累于地上部分,富集系数可达普通植物的10-100倍。通过定期收割植物地上部分即可实现土壤重金属去除。同时,植物根系分泌物含有糖类、氨基酸等物质,可促进土壤微生物生长代谢,形成根际微生物-植物协同修复体系。例如,在多环芳烃污染场地中,紫花苜蓿根系分泌物可刺激根际微生物分泌漆酶、过氧化物酶,协同增强对有机污染物的降解效果,这种技术尤其适用于大面积、低浓度污染场地的长期修复^[2]。

2. 污染场地治理中生态修复技术的应用策略

2.1 根据污染物类型选择修复技术

不同类型污染物需匹配相应的生态修复技术,这是实现高效治理的关键前提。对于挥发性有机污染物,其具有沸点低、易挥发的特性,物理修复的热脱附技术与化学修复的化学氧化技术均能发挥良好处理效果。热脱附技术通过对污染土壤或介质进行加热,使污染物在高温条件下从固相或液相中挥发分离,再经冷凝、吸附等后续处理实现污染物去除,这种技术能直接将污染物从污染介质中剥离,处理效率高且对土壤结构破坏相对较小。化学氧化技术则是利用强氧化剂的氧化性,与挥发性有机污染物发生氧化还原反应,将其分子结构破坏,分解为二氧化碳、水等无害小分子物质,从根本上消除污染物危害。而针对重金属污染物,因其具有不可降解性且易在生物体内富集的特点,化学固定/稳定化技术和植物修复技术更为适用。化学固定/稳定化技术通过向污染土壤中添加化学药剂,与重金属离子发生化学反应,形成难溶性化合物或稳定络合物,从而降低重金属在土壤中的活性和迁移性,快速阻断其对周边环境的污染扩散途径;植物修复技术则是借助超富集植物对特定重金属的高吸收和富集能力,通过长期的植物种植与生长,逐步将土壤中的重金

属转移至植物地上部分,再通过收割植物实现重金属从土壤中的去除,这种方式具有成本低、环境友好等优势^[3]。

2.2 结合场地条件优化修复方案

场地的地质、水文等条件对生态修复技术的选择和应用效果影响重大,必须因地制宜制定修复方案。在地下水位高的污染场地,地下水的流动性和浮力作用增加了污染物迁移扩散的风险,采用隔离技术时需精准设计防渗墙深度与稳定性,确保其能够穿透含水层并嵌入不透水层,形成有效的垂直阻隔屏障,从而阻断污染物随地下水的迁移路径,保障周边地下水环境安全。对于渗透性差的土壤,其致密的结构导致水分和氧气难以渗透,而微生物修复过程中微生物的代谢活动需要充足的水分和氧气供应,受限的环境条件会严重影响微生物的活性和修复效果。此时,可结合物理松土方法,如采用深耕、翻土等措施打破土壤板结结构,增加土壤孔隙度,改善其渗透性;也可通过化学改良手段,添加土壤改良剂调节土壤酸碱度、离子交换性能等,优化土壤理化性质,为微生物创造适宜的生存环境,进而提升微生物修复效能,确保修复工作顺利开展。

2.3 采用多种技术联合修复

由于污染场地污染物的复杂性和多样性,单一修复技术往往难以达到理想效果,多种技术联合修复成为必然选择。实际污染场地中,污染物通常呈现复合型污染特征,例如化工企业遗留场地可能同时含有有机污染物和重金属污染物。在处理这类复杂污染场地时,可先运用化学固定/稳定化技术,针对重金属污染物添加相应的化学药剂,通过沉淀、螯合等化学反应降低重金属活性,将其稳定在土壤中,减少重金属在修复过程中的二次污染风险;在此基础上,再利用微生物修复技术,筛选和培育能够降解有机污染物的微生物菌群,通过微生物的代谢活动将有机污染物逐步分解为无害物质。此外,物理修复与生物修复联合应用也具有显著优势,物理修复技术可快速去除部分污染物,降低污染物浓度,为生物修复创造更有利的环境条件;生物修复则能够进一步降解残留污染物,并通过生物代谢活动改善土壤生态环境,两者优势互补,可有效提高污染场地治理效率,缩短修复周期,实现对复杂污染场地的全面、高效治理^[4]。

3. 生态修复技术在污染场地治理中的发展趋势

3.1 技术创新与集成化

随着科技发展,生态修复技术正经历着前所未有的创

新变革,新型修复材料和药剂不断涌现,为污染场地治理注入新的活力。纳米材料凭借其独特的表面效应、小尺寸效应和量子尺寸效应,展现出卓越的污染物吸附性能。例如,纳米零价铁具有巨大的比表面积和强还原性,能够高效吸附并降解卤代烃、重金属离子等污染物,其反应活性是普通铁的数十倍。在微生物菌剂研发方面,通过基因工程技术构建的工程菌,能够定向降解特定污染物,如经过改造的恶臭假单胞菌可显著提高对多氯联苯的降解效率。同时,单一修复技术的局限性促使不同生态修复技术的集成化应用成为必然趋势。物理修复技术能够快速降低污染物浓度,化学修复技术可针对性地改变污染物性质,生物修复技术则具有环境友好的优势,将三者有机结合,可构建更完善的综合修复体系。例如,在处理复合型污染场地时,可先用热脱附技术去除挥发性有机污染物,再利用化学氧化技术分解残留的顽固有机污染物,最后借助微生物修复技术净化土壤微环境,实现对复杂污染场地的高效治理。

3.2 智能化与精准化

物联网、大数据、人工智能等先进技术的深度融合,正推动生态修复技术向智能化、精准化方向加速迈进。在污染场地治理现场,各类传感器如土壤湿度传感器、重金属离子传感器、有机污染物浓度传感器等,能够实时、动态地监测土壤和地下水的污染状况,以及修复过程中的温度、pH值、溶解氧等关键参数。这些海量数据通过物联网技术实时传输至智能管理系统,系统运用大数据分析技术对数据进行深度挖掘,识别污染分布特征和修复过程中的异常情况。人工智能算法则能够基于数据分析结果,结合历史修复案例和经验模型,自动优化修复方案,精准调整修复技术参数。例如,当系统检测到某区域土壤中重金属浓度未达到预期下降目标时,会自动调整化学固定剂的投放量和投放频率;若微生物修复过程中溶解氧不足,系统会控制增氧设备及时补充氧气^[5]。

3.3 绿色可持续发展

在全球对生态环境保护日益重视的背景下,未来生态修复技术在污染场地治理中将更加坚定地贯彻绿色可持续发展理念。一方面,在技术选择上,优先采用环境友好、能耗低、资源利用率高的修复技术。例如,植物修复技术利用绿色植物对污染物的吸收、富集作用,无需大量消耗能源和

化学药剂,在修复污染土壤的同时还能改善土壤结构和生态环境;微生物燃料电池技术则将污染物降解与能源回收相结合,实现“变废为宝”。另一方面,修复后场地的生态恢复与功能重建成为重要目标。在完成污染物治理后,通过生态重建技术,如植被恢复、土壤改良、生物多样性重建等,使场地生态系统逐步恢复平衡,并根据场地的区位条件和社会需求,合理规划其后续功能,如建设生态公园、城市绿地等。

4. 结论

生态修复技术在污染场地治理中占据重要地位。通过对物理、化学、生物修复技术的分类研究及其原理剖析,明确了各技术适用范围与特点。在污染场地治理实践中,依据污染物类型和场地条件合理选择修复技术,并采用多技术联合修复策略,可有效提升治理效果。未来,生态修复技术将朝着技术创新与集成化、智能化与精准化、绿色可持续发展方向持续发展。本研究为污染场地治理提供了系统的生态修复技术策略参考,有助于推动我国污染场地治理工作科学开展,促进生态环境保护与修复。

参考文献:

- [1] 赵华阳. 废弃露天矿山生态环境污染修复技术研究[J/OL]. 清洗世界,1-6[2025-05-30].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.4834.TQ.20250513.1712.018.html>.
- [2] 彭香玉,赵剑,周林,等. 农田土壤重金属污染生态治理技术的研究进展与可持续修复展望[J]. 中南农业科技,2025,46(04):227-231.
- [3] 黄玉生. 煤矿矿山废弃地污染成因及生态环境修复技术研究[J]. 环境科学与管理,2025,50(04):162-167.
- [4] 徐忠良. “三水统筹”下流域污染控制与生态修复理论与技术体系研究[J/OL]. 水利水电快报,1-10[2025-05-30].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1142.tv.20250407.1547.002.html>.
- [5] 林萍,郭星星,李胜华,等. 河湖缓冲带生态修复技术在农业面源污染治理中的应用分析[J]. 环境保护与循环经济,2025,45(03):67-70.

作者简介:丛娜(1987年3月-),女,汉,辽宁省营口市,硕士,副高级工程师,研究方向:环境工程