

受污染土壤的微生物环保修复技术探讨

邹晨晖^{*} 张文星 尹强 姜平平 魏泰峰

内蒙古生态环境科学研究院有限公司, 中国·内蒙古 呼和浩特 010000

摘要: 随着工业化和城市化的快速发展, 土壤污染问题日益严重, 对生态系统和人类健康构成严重威胁。微生物环保修复技术凭借其成本低廉、无二次污染及修复效果持久等优势, 已成为污染土壤治理领域的研究热点与核心技术。本文系统阐述了微生物修复技术的核心原理与分类体系, 随后结合应用案例探讨了该技术在不同类型污染土壤中的修复效果, 最后展望了该技术未来智能化、规模化、绿色化的发展趋势, 旨在为受污染土壤的生态修复与可持续治理提供理论参考与技术支持。

关键词: 土壤污染; 微生物环保修复; 修复技术

Discussion on environmentally-friendly microbial remediation techniques for contaminated soil

Zou Chenhui^{*}, Zhang Wenxing, Yin Qiang, Jiang Pingping, Wei Taifeng

Inner Mongolia Academy of Ecological Environment Sciences Co., Ltd., China Inner Mongolia Hohhot 010000

Abstract: With the rapid development of industrialisation and urbanisation, soil pollution has become increasingly serious, posing a severe threat to ecosystems and human health. Microbial environmental remediation technology, with its advantages of low cost, no secondary pollution, and long-lasting remediation effects, has become a research hotspot and core technology in the field of contaminated soil treatment. This paper systematically elaborates on the core principles and classification system of microbial remediation technology, then discusses its remediation effects in different types of contaminated soils through application cases, and finally envisages future trends towards intelligent, large-scale, and green development of this technology, aiming to provide theoretical reference and technical support for the ecological restoration and sustainable management of polluted soils.

Keywords: Soil pollution; Microbial environmental remediation; Remediation technology

0 引言

土壤是生态系统的核心组成部分, 承载着物质循环与生物栖息的关键功能, 然而工业活动、农业生产及人类生活等多方面因素已导致土壤污染问题日益严峻, 重金属、持久性有机污染物、石油烃等污染物不仅破坏土壤理化性质与微生物群落结构, 更通过食物链累积威胁生态安全与人类健康。因此, 污染土壤的修复与治理迫在眉睫。传统的物理修复与化学修复虽然能在短期内取得一定修复效果, 但存在成本高昂、操作复杂等显著局限。相比之下, 微生物修复技术以其环境友好、成本不高、操作简单等优势, 逐步成为土壤污染治理领域的弄潮儿。探讨受污染土壤的微生物环保修复技术, 具有重要的理论意义和实践价值。

1 微生物环保修复技术的原理

微生物修复技术的核心机制是利用微生物的代谢功能实现对污染物的转化与去除, 其本质是微生物与污染物、土壤环境之间相互作用的复杂过程。就作用机制而言, 主

要包括生物降解作用、生物转化与钝化作用、生物吸附作用。生物降解作用是针对有机污染物的主要修复途径。微生物能够产生特异性酶(如氧化还原酶、水解酶、脱氢酶等), 将复杂有机污染物分解为结构简单的小分子物质, 最终矿化为 CO_2 和 H_2O 。比如, 石油烃降解菌可利用氧化作用将烷烃、芳香烃等石油组分分解为脂肪酸, 再经 β -氧化进入三羧酸循环完成彻底降解; 多环芳烃(PAHs)则在加氧酶的作用下打开芳香环, 逐步转化为无害物质。

生物转化与钝化作用主要适用于重金属污染土壤的修复。借助氧化还原、甲基化/去甲基化、络合螯合等反应, 微生物可以改变重金属的化学形态与价态^[1], 降低其生物有效性与迁移性。例如, 硫酸盐还原菌可将六价铬(Cr^{6+})还原为毒性极低的三价铬(Cr^{3+}), 并以细胞壁吸附或胞内积累的方式实现固定; 某些真菌可分泌有机酸与重金属离子形成稳定络合物, 减少其在土壤中的淋溶与植物吸收。生物吸附作用方面, 微生物通过细胞壁表面的多糖、蛋白

质、核酸等官能团（如羟基、羧基、氨基）与污染物发生物理吸附或化学吸附，将污染物富集于微生物体内或体表。这种作用快速且高效，尤其适用于高浓度污染物的应急处理，常见的吸附微生物包括蓝细菌、酵母菌、放线菌等。

2 微生物环保技术分类

2.1 生物强化技术

向污染土壤中接种具有特定降解或转化能力的功能微生物（土著微生物筛选驯化菌株或外源高效菌株），提高土壤中目标微生物的浓度与活性，从而加速污染物去除，此为生物强化技术。该技术的关键在于筛选具有高降解效率、强环境适应性的功能菌株，譬如，从石油污染场地分离的假单胞菌属、芽孢杆菌属菌株，对石油烃的降解率可达 80% 以上；从重金属污染土壤中筛选的硫杆菌属菌株，能有效降低土壤中铅、镉的生物有效性。生物强化技术具有修复针对性强、效率高的优势，但外源菌株的存活与定殖能力直接影响修复效果，需以添加载体材料（如活性炭、秸秆生物质）或营养物质的方式改善其生存环境。

2.2 生物刺激技术

生物刺激技术无需接种外源微生物，而是在改善土壤环境条件的过程中激活土壤中土著微生物的代谢活性，利用土著微生物的自然降解能力实现污染物去除。常见的刺激方式包括添加营养物质（如氮、磷、钾及微量元素）、电子受体（如氧气、硝酸盐）、共代谢底物（如葡萄糖、乙酸）等，以满足微生物生长代谢的需求。举个例子，在石油污染土壤修复中，添加适量的氮磷营养盐可调节土壤碳氮比至适宜范围（通常为 10:1~20:1），显著提高土著降解菌的活性；在厌氧环境下，添加硝酸盐可促进反硝化细菌的生长，增强对多氯联苯（PCBs）的降解效果。生物刺激技术具有成本低、环境兼容性好、无外源菌株入侵风险等优势^[2]，适用于污染程度较轻、土著微生物资源丰富的土壤。

2.3 微生物制剂修复技术

微生物制剂修复技术是将功能微生物与载体材料、营养物质等复合制成菌剂、菌肥等标准化的微生物制剂，采取撒施、喷施或灌施等方式应用于污染土壤。微生物制剂具有运输方便、使用灵活、活性稳定等特点，可根据污染类型与土壤条件选择针对性制剂。例如，针对农药污染土壤，可使用含有降解菌（如诺卡氏菌属、节杆菌属）的微生物制剂，其降解酶系能快速分解有机磷、拟除虫菊酯等农药残留；针对重金属污染土壤，可应用含有钝化菌（如酵母菌、霉菌）的制剂，借助微生物代谢产物与重金属的

络合作用降低其毒性。

2.4 联合修复技术

联合修复技术是将微生物修复与物理、化学修复技术相结合，利用不同技术的优势互补，提高复杂污染土壤的修复效果。常见的联合方式包括微生物-物理联合（如微生物修复与土壤通气、电动修复结合）、微生物-化学联合（如微生物修复与化学淋洗、氧化剂添加结合）、微生物-植物联合（即植物-微生物联合修复技术）。譬如，在重金属复合污染土壤修复中，采用化学淋洗（如柠檬酸淋洗）与微生物钝化相结合的方式，先通过淋洗去除部分易迁移态重金属，再利用微生物制剂固定残留重金属，修复效率较单一技术提高 30% 以上；植物-微生物联合修复则依靠植物根系分泌的有机物质为微生物提供营养，微生物促进植物对污染物的吸收与转化，在石油污染、重金属污染土壤修复中已得到广泛应用，如紫花苜蓿与根瘤菌联合修复石油污染土壤，不仅提高了石油烃降解率，还改善了土壤结构。

3 微生物修复技术在不同类型污染土壤中的应用实践

3.1 重金属污染土壤的微生物修复应用

重金属污染土壤的微生物修复以钝化、转化为核心，以降低重金属生物有效性的方式实现生态风险管控。在镉污染土壤修复中，研究者从矿山污染土壤中筛选出一株枯草芽孢杆菌菌株，该菌株利用细胞壁吸附与胞内积累作用实现了对镉的有效吸附（吸附率可达 92.3%）。将该菌株制成微生物制剂应用于镉污染耕地，连续施用 3 个月后，土壤中可交换态镉含量降低 45.6%，水稻籽粒镉含量从 0.38mg/kg 降至 0.12mg/kg，达到国家食品安全标准（GB 2762-2022）。此外，硫酸盐还原菌（SRB）在厌氧条件下可将 Cr^{6+} 还原为 Cr^{3+} ，并生成硫化铬沉淀，应用于铬污染场地修复时， Cr^{6+} 去除率可达 95% 以上，且修复后土壤中铬的迁移性显著降低。

在铅锌污染土壤修复中，利用酵母菌的钝化作用，可分泌有机酸与铅、锌离子形成稳定络合物，降低其生物有效性。某铅锌矿山周边污染土壤修复工程中，施用酵母菌制剂后，土壤中可交换态铅、锌含量分别降低 58.2% 和 49.7%，植物体内铅、锌累积量较对照降低 60% 以上，土壤微生物群落多样性显著恢复。

3.2 有机污染物污染土壤的微生物修复应用

生物降解是有机污染物污染土壤的微生物修复核心，已在石油烃、农药残留、多环芳烃等污染土壤修复中得

到广泛应用^[3]。在石油污染土壤修复中,生物强化与生物刺激技术的联合应用最为常见。某油田开采区石油污染土壤(石油烃含量为 8500mg/kg)修复工程中,接种石油烃降解菌(假单胞菌与红球菌复合菌株)并添加氮磷营养盐,修复 6 个月后,土壤石油烃含量降至 1200mg/kg,降解率达 85.9%,土壤中细菌数量从 1.2×10^6 CFU/g 增至 3.5×10^8 CFU/g,微生物群落结构明显优化。以及,植物-微生物联合修复技术在石油污染土壤修复中也表现出良好效果。比如,种植紫花苜蓿并接种根瘤菌与石油降解菌,修复 12 个月后,石油烃降解率达 89.3%,同时土壤有机质含量提高 23.5%,土壤肥力得到改善。

在农药污染土壤修复中,针对有机磷农药(如毒死蜱、乐果)污染,可筛选出具有高效降解能力的节杆菌菌株,其产生的有机磷水解酶可快速分解农药分子中的磷酸酯键,将其转化为无害的醇类与磷酸。某农田毒死蜱污染土壤(残留量为 12.5mg/kg)修复中,施用该菌株制剂后,7 天内毒死蜱降解率达 90.2%,修复后土壤种植的蔬菜中农药残留量低于国家限量标准。对于氯氟菊酯等难降解的拟除虫菊酯类农药,可采用共代谢修复技术,添加葡萄糖作为共代谢底物,如此便可显著提高微生物对农药的降解效率,降解率较无共代谢底物条件下提高 35% 以上。

在多环芳烃(PAHs)污染土壤修复中,由于 PAHs 具有强疏水性与难降解性,单一修复技术效果有限,常采用微生物-化学联合修复技术。某焦化厂 PAHs 污染土壤(总 PAHs 含量为 3200mg/kg)修复工程中,先采用过氧化氢(氧化剂)预处理,破坏 PAHs 的芳香环结构,再接种 PAHs 降解菌(黄杆菌属、分枝杆菌属复合菌株),修复 8 个月后,总 PAHs 降解率达 82.6%,其中高环 PAHs(苯并[a]芘)降解率达 75.3%,显著优于单一微生物修复(降解率为 58.1%)。

3.3 复合污染土壤的微生物修复应用

复合污染土壤(如重金属-有机污染物复合污染)的修复难度较大,采用单一微生物修复效果有限,故应采用多功能微生物或联合修复技术。某化工园区污染土壤同时受到镉与石油烃复合污染(镉含量为 85mg/kg,石油烃含量为 9200mg/kg),采用复合功能微生物制剂(含石油烃降解菌与重金属钝化菌)进行修复,修复 12 个月后,石油烃降解率达 83.5%,可交换态镉含量降低 52.8%,土壤酶活性(脲酶、蔗糖酶)较修复前提高 40%~60%,实现了对复合污染物的同步去除与土壤生态功能的恢复。

另外,微生物-物理联合修复技术在复合污染土壤中

也有应用。某矿山周边土壤受到铅、锌与多环芳烃复合污染,采用电动修复与微生物修复联合技术,借助电动作用促进污染物向土壤表层迁移^[4],同时接种复合功能微生物,修复 6 个月后,铅、锌去除率分别达 65.2% 和 58.7%,多环芳烃降解率达 79.4%,较单一电动修复或微生物修复效率提高 25%~30%。

4 未来发展趋势与展望

随着生态环境保护意识的提高与修复技术的不断创新,微生物环保修复技术将向智能化、规模化、绿色化方向发展。很多专家都认为,未来研究与应用重点将离不开以下几个方面。

一是功能微生物资源的深度挖掘。已有不少研究人员致力于利用宏基因组学、代谢组学等现代生物技术,从矿山、深海、极地等极端环境或污染场地中挖掘新型功能微生物与功能基因,解析其修复机制,为高效微生物制剂的研发提供资源支撑。以及,合成微生物组技术将成为研究热点,该技术依靠人工设计与构建微生物群落来实现种间协同作用的最大化,提高对复杂污染物的修复效率。二是智能化修复技术的研发与应用,即结合大数据、人工智能、物联网等技术,构建污染土壤微生物修复的智能决策与调控系统。此系统可分析土壤类型、污染物特性、环境条件等数据,自动优化修复方案;也可利用无人机、机器人等设备实现微生物制剂的精准施用与修复过程的实时监测,提高修复的智能化水平与工程效率。

三是绿色可持续修复技术的发展,注重修复过程的环境友好性与资源循环利用,开发基于秸秆、畜禽粪便等农业废弃物的微生物载体材料与营养物质,降低修复成本;或推动微生物修复与土壤改良、生态重建相结合,在修复污染的同时恢复土壤肥力与生态功能,实现“修复-改良-重建”一体化^[5]。四是规模化工程应用的推广。很多科研单位都已加强微生物修复技术的工程化研究,优化修复工艺参数,开发低成本、易操作的修复设备与技术方案;还有一些单位建立了微生物修复技术的标准体系与效果评估方法,规范修复工程的设计、施工与验收,提高技术的可信度与推广力度。同时,跨学科合作将更加紧密,微生物学、环境科学、工程学、计算机科学等多学科的融合将为技术创新提供新的思路与方法。

5 结语

综上所述,受污染土壤的微生物环保修复技术是一种环境友好、成本可控的修复方式,在生态环境治理中具有不可替代的优势。不过,与物理修复、化学修复一样,微

生物修复技术也有缺陷，其大规模应用仍面临功能菌株环境适应性、污染物生物可利用性等挑战，需要在长期的探索和实践不断优化和完善。未来，广大科研单位和研究人员可采取深度挖掘功能微生物资源、优化联合修复技术、精准调控修复条件、推进智能化与规模化应用等举措，进一步提升微生物修复技术的性能与实用性。随着多学科交叉融合的深入与技术瓶颈的突破，微生物修复技术必将在土壤环境保护中发挥越来越重要的作用。

参考文献：

[1] 于军华. 受污染土壤的微生物环保修复技术探讨[J]. 当代化工研究, 2024(21):104-106.

[2] 张钊. 石油污染土壤微生物修复技术及机理研究进展[J]. 应用化工, 2024,53(2):414-418.

[3] 杨海龙, 周丹丹, 白保勋等. 微生物修复农田土壤重金属污染技术研究进展[J]. 北方园艺, 2023(5):123-131.

[4] 葛志涛. 影响污染土壤微生物修复技术的因素分析[J]. 中文科技期刊数据库(全文版)自然科学, 2023(4):3.

[5] 宋亚儒, 杨金强, 李媛媛等. 重金属污染土壤微生物修复技术新进展[J]. 市政技术, 2025,43(2):145-153.

作者简介：邹晨晖（1991.05-），男，汉族，内蒙古呼和浩特市人，中级工程师，本科，研究方向：生态环境规划。