

Research on Application Strategies of Microbial Technology in Remediation of Soil Heavy Metal Pollution

Qinqin Zhang¹ Guangming Wang²

1. Academy of Environmental Planning and Design, Co.,Ltd. Nanjing University(Jiangsu Branch), Nanjing, Jiangsu, 210003, China

2. NJU Environmental Technologies of Nanjing University Jiangsu Co., Ltd., Nanjing, Jiangsu, 210003, China

Abstract

Soil heavy metal pollution has become a global environmental issue, severely threatening ecological security and human health. Microbial remediation technology demonstrates unique application value in contaminated soil management due to its environmentally friendly and cost-effective advantages. However, the practical effectiveness of this technology is constrained by multiple factors, primarily involving multidimensional variables such as soil physicochemical properties, microbial species and characteristics, and environmental conditions. This paper begins with the principles of microbial technology in remediating soil heavy metal pollution, clarifies the factors influencing microbial remediation effectiveness, and further explores application strategies of microbial technology in soil heavy metal pollution remediation.

Keywords

Microbial technology; Soil heavy metal pollution; Pollution remediation; Application strategies

微生物技术在土壤重金属污染修复中的应用策略研究

张芹芹¹ 王光明²

1. 南大环境规划设计研究院(江苏)有限公司, 中国·江苏 南京 210003

2. 南大恩洁优环境技术(江苏)股份公司, 中国·江苏 南京 210003

摘要

土壤重金属污染已成为全球性环境问题, 严重威胁生态安全和人类健康。微生物修复技术凭借其环境友好、经济高效等优势, 在污染土壤治理领域展现出独特应用价值。然而, 该技术的实际应用效果受多重因素制约, 主要涉及土壤理化特性、微生物种类及特性, 以及环境条件等多维变量。本文主要从微生物技术修复土壤重金属污染的原理入手, 明晰影响微生物修复效果的因素, 进而探讨微生物技术在土壤重金属污染修复中的应用策略。

关键词

微生物技术; 土壤重金属污染; 污染修复; 应用策略

1 引言

土壤是地球生态系统的重要组成部分, 其质量直接关系到农业生产和生态环境的可持续发展。然而, 近年来, 由于工业废水、废气、废渣的排放, 以及农业化肥、农药的不合理使用等, 导致土壤重金属污染问题日益突出。重金属在土壤中具有难以降解、易于积累的特性, 不仅会降低土壤肥力, 影响农作物的生长和产量, 还会通过食物链的传递作用, 最终危害人体健康。因此, 寻找有效的土壤重金属污染修复技术与策略具有重要意义。

2 微生物技术修复土壤重金属污染的原理

【作者简介】张芹芹(1990-), 中国江苏泰州人, 硕士, 工程师, 从事土壤污染治理、固废治理、规划政策研究。

微生物技术在土壤重金属污染修复中展现出独特的优势, 其核心原理主要基于生物吸附、生物转化和生物沉淀三种机制^[1]。如表一所示, 不同技术原理的作用时效、重金属稳定性、以及适用 pH 范围都有所区别。

表一 微生物技术核心原理对比分析

机制类型	作用时效	重金属稳定性	适用 pH 范围
生物吸附	数小时	中等(可逆)	4.5-8.5
生物转化	数周	低(形态可变)	3.0-9.0
生物沉淀	数天	高(不可逆)	6.0-8.5

2.1 生物吸附

生物吸附是微生物通过表面官能团与重金属离子发生物理化学结合的过程。微生物细胞壁的多糖、蛋白质及脂质等成分含有大量羧基、磷酸基、氨基等活性基团, 可通过静电吸附、离子交换和络合作用固定重金属。例如, 某些细菌

的细胞壁表面富含羧基和磷酸基团,能够与铅(Pb^{2+})和镉(Cd^{2+})等重金属离子形成稳定的络合物,显著降低这些重金属在土壤中的迁移性和生物可利用性。生物吸附过程不仅依赖于微生物细胞表面的化学性质,还受到土壤环境因素(如pH值、离子强度等)的影响。在酸性条件下,细胞表面的负电荷增加,从而增强对重金属阳离子的吸附能力。生物吸附是一种快速且高效的过程,能够在短时间内显著降低土壤中重金属的浓度,尤其适用于处理高浓度重金属污染的土壤。

2.2 生物转化

生物转化是指微生物通过其代谢酶系改变重金属的化学形态和生物有效性。这一过程主要包括氧化还原反应和甲基化反应。在氧化还原反应中,微生物利用其细胞内的酶系将重金属从一种价态转化为另一种价态,从而改变其化学性质和毒性。例如,硫杆菌能够通过氧化酶将高毒性的三价砷(As^{3+})氧化为低毒的五价砷(As^{5+}),显著降低其毒性。亚铁还原菌(*Shewanella*)则利用细胞色素c将六价铬(Cr^{6+})还原为三价铬(Cr^{3+}),使铬的毒性降低约100倍。生物转化过程不仅能够降低重金属的毒性,还能够改变其在土壤中的迁移性和生物可利用性,是一种具有广泛应用前景的微生物修复机制。

2.3 生物沉淀

生物沉淀是指微生物通过其代谢产物与重金属离子反应,生成难溶性矿物沉淀的过程。这一过程主要包括硫化物沉淀和磷酸盐/碳酸盐沉淀两种形式。在硫化物沉淀过程中,某些微生物(如硫酸盐还原菌)能够将硫酸盐还原为硫化氢(H_2S),硫化氢与重金属离子反应生成难溶的硫化物沉淀,如硫化铅(PbS)和硫化镉(CdS)。磷酸盐沉淀则依赖于微生物代谢产生的磷酸盐,这些磷酸盐与重金属离子结合形成难溶的磷酸盐矿物,如磷酸铅($\text{Pb}_3(\text{PO}_4)_2$)和磷酸镉($\text{Cd}_3(\text{PO}_4)_2$)。碳酸盐沉淀则通过微生物代谢产生的碳酸根离子(CO_3^{2-})与重金属离子反应生成碳酸盐矿物,如碳酸铅(PbCO_3)和碳酸镉(CdCO_3)。生物沉淀过程不仅能够有效去除土壤中的重金属,还能够形成稳定的矿物沉淀,防止重金属的再次释放,是一种长期有效的土壤修复机制。

3 影响微生物修复效果的因素

3.1 土壤理化性质

土壤的理化性质对微生物修复效果起着关键作用。土壤的酸碱度直接影响微生物的生长和活性。一般来说,中性或接近中性的土壤环境更有利于大多数微生物的生长和代谢活动,从而提高修复效率。土壤的质地也会影响微生物修复的效果。质地较细的土壤(如黏土)具有更高的比表面积,能够为微生物提供更多的吸附位点,增强微生物对重金属的吸附能力。^[2]然而,黏土的通气性较差,可能会限制微生物的有氧呼吸,从而影响其代谢活性。此外,土壤中的有机质

含量对微生物修复也至关重要。有机质不仅为微生物提供碳源和能源,还能改善土壤的物理结构,增强土壤的保水性和透气性,从而为微生物创造更适宜的生存环境。研究表明,土壤有机质含量的增加可以显著提高微生物的活性和修复效果。

3.2 微生物种类及特性

微生物的种类和特性是决定修复效果的重要因素。不同种类的微生物对重金属的吸附和转化能力存在显著差异。例如,某些细菌(如硫杆菌)能够通过氧化还原反应将重金属从一种价态转化为另一种价态,从而降低其毒性。而一些真菌则可以通过分泌胞外酶或代谢产物,与重金属形成稳定的络合物,增强其在土壤中的固定化。微生物的生长速度、代谢产物的种类和数量也会影响修复效果。生长速度快、代谢产物丰富的微生物能够在较短时间内积累大量的生物量,从而提高对重金属的吸附和转化能力。此外,微生物的耐受性也至关重要。在重金属污染严重的土壤中,微生物需要具备一定的耐受性,才能在高浓度重金属的环境中生存并发挥修复作用^[3]。

3.3 环境条件

环境条件对微生物修复效果的影响不容忽视。温度、氧气浓度、水分含量等环境因素直接关系到微生物的生长和代谢活动。适宜的温度能够促进微生物的生长和代谢,提高修复效率^[4]。一般来说,大多数微生物在25℃-30℃的温度范围内生长最为活跃。氧气浓度也是影响微生物修复效果的重要因素。好氧微生物需要充足的氧气才能进行有氧呼吸,而厌氧微生物则需要无氧环境下才能正常生长和代谢。因此,在修复过程中,需要根据微生物的类型合理控制氧气浓度。此外,土壤的水分含量也会影响微生物的活性。适量的水分能够保持土壤的湿润度,为微生物提供适宜的生存环境,但过多的水分会导致土壤缺氧,影响微生物的有氧代谢。

4 关于微生物技术在土壤重金属污染修复中的应用策略探讨

4.1 功能菌种选育与改良

微生物修复技术的核心在于功能菌株的性能优化。针对重金属污染环境,需从污染区域筛选具有高耐受性和特异性的土著微生物,例如耐酸、耐盐或耐高浓度重金属的菌株^[5]。通过基因编辑技术对菌株进行定向改良,强化其重金属转化或吸附的关键基因表达,例如增强砷还原酶基因以提高砷的转化效率。同时,开发菌剂固定化技术,利用复合载体,如海藻酸钠、生物炭等包埋菌体,提升其在复杂环境中的存活率与稳定性。此类改良菌株需结合自杀基因等生物安全设计,确保其在非目标环境中自发失活,避免生态风险。

4.2 构建多技术协同修复体系

单一技术难以应对复合污染与复杂土壤条件,需整合微生物技术与其他修复手段。例如,微生物与植物联合修复

中,植物根系分泌物可激活根际微生物活性,促进重金属的吸附与转化;微生物与生物炭联用时,生物炭的高比表面积提供吸附位点,同时作为载体增强菌体定殖能力;微生物与纳米材料联合修复时,可利用纳米材料的高比表面积、结晶性和增强的反应性,有效与植物根系和土壤微生物相互作用,促进养分吸收和植物代谢^[6]。此外,物理化学手段(如电场、氧化还原电位调控)可优化微生物的迁移与代谢效率。通过多技术协同,形成“吸附-转化-稳定化”的集成修复链条,兼顾修复效率与环境友好性。

4.3 污染分区动态调控

土壤重金属污染的修复需要根据污染程度、土壤理化性质以及环境特征制定差异化的修复方案。这种分区动态调控策略能够有效提高修复效率并降低修复成本。在轻度污染区域,优先激活土著微生物是一种经济且有效的方法。通过添加腐植酸或碳源,可以显著提升土著微生物的代谢活性,促进其对重金属的吸附与转化^[7]。对于重度污染区域,单一依靠土著微生物往往难以达到理想的修复效果,此时需要引入经过基因编辑的工程菌株。这些工程菌株可以通过基因编辑技术(如CRISPR-Cas9)进行定向改良,强化其重金属转化或吸附的关键基因表达。例如,通过增强砷还原酶基因的表达,可以显著提高菌株对砷的转化效率。通过实时监测土壤关键参数,可以根据土壤的实际状况调整菌剂投加量或电子供体浓度,确保微生物始终保持在最优的活性状态。

4.4 全生命周期风险管控

微生物修复技术的全生命周期风险管控是确保修复过程安全、有效的重要环节。这一过程需要贯穿“技术实施-过程监控-长期维护”的全过程。在技术实施阶段,通过基因设计限制工程菌的环境扩散风险是一种有效的策略。在修复过程中,设置物理屏障(如活性炭吸附层)可以有效拦截挥发性污染物,防止二次污染的发生。此外,物理屏障还可以作为一种应急措施,当修复过程中出现意外情况时,能够及时阻止污染物的扩散。修复完成后,开展长期生态监测是评估修复效果和潜在风险的重要手段。通过长期监测微生物群落结构的恢复情况以及重金属的再活化风险,可以及时发

现并解决可能出现的问题。此外,建立风险预警机制是全生命周期风险管控的重要组成部分,通过对土壤关键参数的动态监测,结合预先设定的风险阈值,可以对潜在的污染反弹或生态失衡问题进行及时预警。

4.5 区域适配工程模式

不同地理区域的重金属污染特征与土壤环境差异显著,需制定针对性修复模式。例如,酸性矿区土壤需优先选用耐酸菌株,结合硫氧化技术降低重金属活性;农田系统宜采用微生物-植物协同修复,兼顾土壤肥力恢复与作物安全;工业污染场地可结合电动修复强化微生物迁移效率。区域化方案需综合考虑气候条件、土地利用类型及社会经济因素,形成可推广的标准化技术流程,降低工程实施成本。

5 结语

微生物技术作为一种环境友好型的修复手段,具有独特的优势。为进一步发挥微生物技术在土壤重金属污染修复中的积极作用,基于土壤理化性质、微生物种类及特性、环境条件等影响因素,需进一步在功能菌种选育与改良、多技术协同修复体系构建、污染分区动态调控、全生命周期风险管控等方面久久为功。

参考文献

- [1] 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(02):145-153+197.
- [2] 党电邦,吕莹,湛金,等.微生物在露天矿高陡坡面生态修复中的应用与展望[J].黄金,2024,45(12):13-19+138.
- [3] 周千,王学涛,王靖逸,等.土壤重金属污染微生物修复技术研究进展[J].现代农业科技,2024,(13):95-98+122.
- [4] 杜运付,伍金花,高海健,等.菌根真菌修复重金属污染土壤研究进展[J].农业生物技术学报,2024,32(07):1681-1692.
- [5] 杜志敏,赵晶玉,丁娅,等.生物炭基微生物菌剂修复重金属污染土壤研究[J].应用化工,2024,53(05):1160-1165.
- [6] 王梁燕,戴商,金妙仁,等.重金属污染水环境的微生物修复技术[J].生物工程学报,2024,40(10):3427-3440.
- [7] 牛磊,郑春丽.生物炭协同微生物矿化技术修复复合重金属污染农田土壤[J].有色金属工程,2023,13(11):141-155.