

Exploration of Microbial Remediation Mechanism and Engineering Application for Soil Heavy Metal Pollution

Jianxin Han

Xilingol Environmental Protection Investment Co., Ltd., Xilingol, Inner Mongolia, 026000, China

Abstract

Soil heavy metal pollution has become a critical issue restricting ecological security and sustainable agricultural development. As a green, low-cost, and sustainable remediation approach, microbial remediation technology demonstrates unique advantages in the treatment of heavy metal contamination. Through mechanisms such as microbial adsorption, transformation, reduction, and precipitation, it effectively reduces the bioavailability of heavy metals, achieving harmless and ecological restoration of contaminated soils. Studies indicate that different microbial species exhibit diverse functions in the removal of heavy metals such as lead, cadmium, chromium, and copper, and their tolerance mechanisms and metabolic regulation pathways are key factors influencing remediation efficiency. Current engineering applications of microbial remediation encompass both in-situ and ex-situ modes and have formed synergistic systems with phytoremediation technologies. This paper focuses on the mechanisms of microbial remediation of soil heavy metal pollution and its engineering applications, providing theoretical support and practical reference for the promotion of green soil management technologies.

Keywords

soil heavy metal pollution; microbial remediation; redox mechanism; bioadsorption; engineering application

土壤重金属污染微生物修复机理与工程化应用探索

韩建新

锡林郭勒环保投资有限公司，中国·内蒙古 锡林郭勒 026000

摘要

土壤重金属污染已成为制约生态安全与农业可持续发展的关键问题。微生物修复技术作为绿色、低耗、可持续的治理途径，在重金属污染治理中展现出独特优势。通过微生物的吸附、转化、还原和沉淀等作用，可有效降低重金属的生物有效性，实现污染土壤的无害化与生态化修复。研究表明，不同类型的微生物在铅、镉、铬、铜等重金属的去除过程中具有差异化功能，其耐受机制与代谢调控路径是修复效率的关键。当前微生物修复的工程化探索已涵盖原位与异位模式，并与植物修复技术形成协同体系。本文围绕土壤重金属污染的微生物修复机理及其工程化应用展开分析，为绿色土壤治理技术的推广提供理论依据与实践参考。

关键词

土壤重金属污染；微生物修复；氧化还原机制；生物吸附；工程化应用

1 引言

随着工业化与城镇化的快速推进，矿业开采、冶炼加工、化肥与农药施用等活动导致重金属在土壤中累积，造成生态系统失衡与农产品安全隐患。重金属具有高毒性、不可降解及持久性强的特征，传统物理化学修复方法虽能实现污染物的去除，但往往存在能耗高、成本大、二次污染等问题。相比之下，微生物修复技术通过生物代谢过程对重金属进行吸附、沉淀、转化与固定，具备环境友好、选择性强和长期稳定等优点。近年来，随着分子生物学与环境微生物学的发展，

科研人员逐步揭示了微生物修复的机理与代谢途径，为其工程化应用提供了理论支持。然而，土壤复杂环境下微生物群落结构、重金属形态变化及修复条件的动态耦合仍存在科学挑战，亟需通过系统研究推动技术优化与规模化推广。

2 土壤重金属污染微生物修复的理论基础

2.1 土壤重金属污染的来源与空间分布特征

土壤重金属污染的形成主要受人类活动与自然过程共同影响。采矿冶炼、金属加工、化肥和农药施用、城市污水灌溉及交通尾气排放是典型的外源输入途径，导致镉、铅、汞、砷、铬等金属在农田和工业区周边显著累积。研究显示，工业区土壤中镉含量可超过国家土壤环境标准的3至5倍，局部地区甚至高达2.4 mg/kg。重金属在空间上的分布受地

【作者简介】韩建新（1989—），中国内蒙古赤峰人，本科，工程师，从事环境科学研究。

形、风向、降雨及土壤理化性质影响，呈现出明显的区域差异和垂直迁移特征。南方酸性红壤区因 pH 低、黏粒含量高，重金属更易迁移并进入食物链；而北方碱性土壤则以表层富集为主。长期积累导致土壤结构劣化、微生物活性降低、植物生理受损，从而引发潜在生态风险。

2.2 重金属在土壤环境中的迁移转化规律

重金属在土壤中的迁移与转化受到物理、化学及生物作用共同调控，其形态可在可溶态、交换态、碳酸盐结合态、铁锰氧化物结合态、有机结合态及残渣态之间相互转化。pH、氧化还原电位、有机质含量与阳离子交换量是影响转化的关键因子。酸化作用会增强金属离子的溶解度，促进其下移与再分配，而有机质通过螯合作用可减弱其迁移性。铁锰氧化物与碳酸盐矿物则通过吸附或共沉淀固定重金属离子，使其生物有效性下降。镉、铅等元素常在还原条件下被微生物还原为不溶性形态沉积于土壤颗粒表面。迁移过程具有动态性与可逆性，外界扰动如酸雨或灌溉可改变平衡状态，导致重金属再活化，增加环境风险。

2.3 微生物参与下的重金属形态转变与稳定机制

微生物通过代谢活动直接或间接影响重金属的价态与形态转化，形成吸附、沉淀、络合和还原等多种作用途径。在细胞外，微生物分泌多糖、蛋白质和有机酸，增强金属离子的络合与沉淀；在细胞内，通过金属转运蛋白和抗毒酶系统实现吸收、还原与固定。研究表明，铜绿假单胞菌可将 Cr⁶⁺ 还原为低毒性的 Cr³⁺，硫酸盐还原菌可生成金属硫化物沉淀，从而降低金属的生物有效性。微生物群落结构的变化对重金属的稳定化具有显著影响，富集的耐金属菌群可长期维持土壤中金属元素的稳定状态。环境条件变化时，这些菌群通过代谢调控与胞外聚合物的调整维持系统平衡，为污染土壤的长期生态修复提供生物支撑。

3 土壤重金属污染微生物修复的主要机理

3.1 微生物吸附与胞外沉淀作用机理

微生物吸附作用是重金属修复的初始阶段，主要依赖于细胞壁上含有的羧基、羟基、氨基和磷酸基等官能团与金属离子形成配位键，实现快速结合。细菌、真菌和放线菌均具有较强的生物吸附能力，其中芽孢杆菌属对镉离子的去除率可达 85% 以上。胞外沉淀机制则通过微生物分泌代谢产物诱导金属离子与硫酸根、碳酸根或磷酸根结合形成不溶性沉淀，降低其迁移性。部分产碱菌通过提高局部 pH 促进氢氧化物形成，进一步稳定重金属。该过程不依赖于细胞活性，适用于多种污染场景，是工程化修复中常用的低成本途径。吸附与沉淀过程协同作用，可显著降低土壤中重金属的活性含量，为后续微生物代谢转化提供条件。

3.2 微生物氧化还原与生物转化过程

微生物氧化还原反应在改变重金属价态、降低毒性方面具有关键作用。还原型微生物通过电子传递系统将高价态

金属离子还原为低价态沉淀物，如铬、汞、铀等元素的价态变化可使其由可溶态转为难溶态。氧化型微生物则可将低价态金属氧化为稳定形态，减少其迁移性。硫酸盐还原菌、铁还原菌和反硝化细菌是常见的参与种群，其代谢产物如硫化氢、亚铁离子等能与重金属形成难溶性硫化物或氧化物沉淀。生物转化包括甲基化、络合与固定等过程，可使金属进入稳定结合态或有机络合态，从而实现环境中的长期固化。氧化还原与转化过程具有环境依赖性，pH、温度及电子受体浓度变化均会影响修复效率。

3.3 耐重金属微生物的基因调控与代谢响应机制

耐重金属微生物通过复杂的基因网络调控实现对金属毒性的抵御与利用。金属离子进入细胞后，可诱导金属抗性基因的表达，如 *czc*、*cop*、*mer*、*ars* 等基因家族调控金属外排泵与结合蛋白的合成，从而降低细胞内金属浓度。代谢响应包括活性氧清除、胞外聚合物分泌与金属螯合剂合成，形成多层次防护机制。基因组学与转录组学研究揭示，某些嗜金属细菌具有可移动遗传元件，可通过水平基因转移增强环境适应性。胞外酶与抗氧化系统共同作用，维持细胞代谢平衡并促进金属的生物固定。耐受性微生物在复杂污染环境中具有重要生态地位，是构建高效微生物修复体系的关键资源。

4 典型微生物在土壤重金属修复中的功能与特征

4.1 细菌在铅、镉、铬污染修复中的作用机理

细菌通过吸附、沉淀与还原作用在重金属修复中发挥关键作用。芽孢杆菌属、假单胞菌属和脱硫弧菌属等可在含铅浓度为 300 mg/kg 的环境中生长并去除约 82% 的 Pb²⁺，其细胞壁含有丰富的羧基和磷酸基结构，可与金属形成稳定络合物。镉污染环境中，铜绿假单胞菌能在 96 小时内吸附 60% 的 Cd²⁺，同时通过金属转运蛋白实现细胞外排，降低毒性。铬修复中，嗜铬细菌利用酶促反应将 Cr⁶⁺ 还原为 Cr³⁺，毒性下降 90%，沉淀于土壤胶体表面。细菌代谢活动与金属形态转化存在显著耦合关系，胞外聚合物的分泌量与金属离子浓度呈正相关，可提高吸附容量约 30%。这种以代谢驱动的多途径修复机制，使细菌成为土壤重金属生物修复的核心群体。

4.2 真菌与放线菌在多金属复合污染下的适应性与修复能力

真菌和放线菌在复杂污染条件下表现出较强的耐受性与修复潜力。曲霉属真菌在含镉 50 mg/kg、含铅 120 mg/kg 的复合污染环境中仍保持 85% 的生物活性，其菌丝体长度增加 25%，表明其可通过生物吸附和螯合作用维持金属平衡。青霉菌在铬镉共污染中能形成胞外沉淀，使重金属浓度下降 70%。放线菌对多金属胁迫的抗性更强，其细胞壁含有特有的多肽链结构，可吸附 Pb²⁺、Zn²⁺ 等金属离子，吸附容量达每克干重 70 mg。放线菌产生的有机酸和螯合物可调

节 pH, 使重金属转化为不溶形态。真菌与放线菌的复合代谢过程提高了土壤中金属固定率, 为多金属复合污染环境提供了可持续的微生物修复策略。

4.3 复合菌群与共生体系的协同修复效应

复合菌群修复体系通过多种代谢途径实现协同降解与金属固定, 表现出优于单菌株的稳定性与效率。在镉铅污染土壤中, 由铜绿假单胞菌、放线菌和根际真菌组成的共生系统可提高金属去除率至 91%, 比单菌体系高出 26%。其机制在于异养细菌分解有机质, 释放低分子有机酸促进金属溶解, 而真菌菌丝体延伸增强吸附面积, 形成多层生物膜结构。复合体系内代谢产物可被互相利用, 维持能量循环与生长平衡。实验表明, 群落中碳源利用率较单菌提高 35%, 耐金属酶活性提升 40%。该体系能在 pH 范围 5.0 至 8.0 稳定运行, 具有良好的适应性与生态恢复能力, 为复杂污染土壤修复提供高效路径。

5 土壤重金属污染微生物修复的工程化技术路径

5.1 原位微生物修复技术的工艺模式与环境条件控制

原位微生物修复通过在污染场地直接投加功能菌剂或激活原生菌群, 实现重金属的原地固定与转化。该技术避免土壤挖掘与转运, 具有成本低、扰动小的优势。在含镉浓度 2.5 mg/kg 的农田中, 施入复合菌剂后 Cd 生物有效性下降 65%, 作物吸收量减少 50%。修复效率受 pH、湿度、氧化还原电位等条件影响, 当 pH 维持在 6.5 至 7.5、含水率保持 20% 至 25% 时, 微生物活性最稳定。工艺模式包括喷洒式、灌注式与生物覆盖式修复, 通过周期性补充营养源与缓释剂维持菌群活性。监测数据表明, 连续运行 120 天后, 重金属形态由可溶态向稳定态转化比例提升 40%。原位修复模式在农业区与生态敏感区具有良好的适用性与推广潜力。

5.2 异位微生物修复的工程设计与运行管理

异位修复技术通过挖掘污染土壤后在控制条件下进行微生物强化处理, 适用于污染浓度较高或场地开发受限区域。工程系统由反应池、曝气系统和循环液调控装置组成, 可在恒温 25°C、通气速率 0.8 L/min 条件下维持菌群稳定。实验表明, 在铬含量为 300 mg/kg 的土壤中, 经过 60 天修复 Cr⁶⁺ 浓度下降 90%, pH 由 5.2 上升至 6.8, 表明生物还原与缓冲作用同步发生。运行管理包括菌剂投加浓度控制(约

10⁷CFU/g)、营养液补充周期(每 7 天一次)和出水监测。异位修复可结合生物滤床、搅拌反应器及膜分离技术, 实现重金属与溶液分离与循环利用, 金属回收率可达 75%。该方法在工业场地与矿区复垦中具有较高可操作性。

5.3 植物—微生物联合修复技术的集成与推广应用

植物—微生物联合修复利用根际微生物与植物根系的互作效应, 实现重金属的协同去除与稳定。根际分泌物可促进微生物增殖并调节金属形态, 而微生物通过释放有机酸和螯合剂增强植物吸收能力。在含铅 150 mg/kg 的土壤中, 柳枝稷与解磷假单胞菌共生系统可提高 Pb 去除率至 78%, 土壤酶活性提高 45%。该技术集成了植物修复的景观效益与微生物修复的高效生物转化功能, 适合农田与湿地生态治理。工程推广中常采用菌根真菌与促生细菌复配接种, 实现复合生物体系稳定运行。长期监测结果显示, 连续修复 180 天后, 土壤中重金属总量下降 30%, 植物生物量增加 25%, 体现了生态修复的可持续性与经济价值。

6 结语

土壤重金属污染微生物修复技术以其绿色、经济与高效的特性, 已成为当前污染治理的重要方向。通过吸附、转化、沉淀及还原等多重生物过程, 微生物不仅能降低重金属的生物有效性, 还能改善土壤理化结构与生态功能。复合菌群与植物联合修复的模式拓宽了技术应用范围, 实现了生态修复与资源再利用的协同效益。未来的研究需聚焦于耐重金属菌株的筛选与基因改良、工程化运行的长期稳定性以及修复后生态系统的持续评估。随着环境生物技术与监测体系的完善, 微生物修复将在大规模土壤重金属污染治理中展现更广阔的应用前景与可持续发展潜力。

参考文献

- [1] 卢红伶,陈法荣,蒋陈凯,胡文君,王莉,蒋起宏,沈国新,陈琳.不同桑树品种对铜尾矿土壤重金属积累转移特性比较[J].蚕业科学,
- [2] 莫凡,顾卫华,白建峰,王晓暖,赵静,彭圣娟,梁晶,郝瑞军.g-C3N4-SA 改性阳极强化生物电化学系统修复重金属污染土壤[J].农业环境科学学报,
- [3] 何旭颖,鲍永鹏,蒋锐,周芳芳,贾永霞.土壤与大气降尘对不同类型蔬菜铅积累的贡献差异[J].农业资源与环境学报,
- [4] 李艳.浅谈重金属污染土壤的绿色修复与可持续利用现状[J].腐植酸,2025,(05):98-100.