

Monitoring and evaluation of microbial remediation effect on heavy metal contaminated soil

Lei Zhang Zhen Li Qiang Zhou

Yunnan Yunce Quality Inspection Co., Ltd., Kunming, Yunnan, 650510, China

Abstract

With the acceleration of industrialization, heavy metal pollution has become an important problem in soil pollution, which seriously affects the ecological environment and human health. As a kind of environmentally friendly and low-cost pollution control method, microbial remediation technology has become an important way to restore heavy metal contaminated soil. Through the metabolic action of microorganisms, heavy metal pollutants can be effectively degraded or transformed to realize soil restoration. This paper reviews the characteristics and hazards of heavy metal contaminated soil, expounds the basic principles and applications of microbial remediation technology, and focuses on the monitoring and evaluation methods of microbial remediation effects. The effects and influencing factors of the remediation process were evaluated by analyzing the concentration of heavy metals in soil, microbial population activity and other indicators. In addition, this paper also discussed how to optimize the microbial remediation technology, improve the remediation efficiency, and looked forward to the application prospect of this technology in future environmental governance. Studies show that microbial remediation provides a sustainable solution for heavy metal contaminated soil, which has broad development space.

Keywords

heavy metal pollution; soil remediation; microbial remediation; effect monitoring; environmental assessment

重金属污染土壤的微生物修复效果监测与评估

张磊 李振 周强

云南云测质量检验有限公司, 中国·云南 昆明 650510

摘要

随着工业化进程的加快, 重金属污染成为土壤污染中的重要问题, 严重影响生态环境与人类健康。微生物修复技术作为一种环境友好、成本低廉的污染治理方法, 已成为重金属污染土壤修复的重要途径。通过微生物的代谢作用, 能够有效降解或转化重金属污染物, 实现土壤的恢复。本文综述了重金属污染土壤的特征与危害, 阐述了微生物修复技术的基本原理与应用, 并重点探讨了微生物修复效果的监测与评估方法。通过分析土壤中重金属浓度、微生物种群活性等指标, 评估修复过程中的效果与影响因素。此外, 本文还探讨了如何优化微生物修复技术, 提高修复效率, 并展望了该技术在未来环境治理中的应用前景。研究表明, 微生物修复为重金属污染土壤提供了一条可持续的解决方案, 具有广阔的发展空间。

关键词

重金属污染; 土壤修复; 微生物修复; 效果监测; 环境评估

1 引言

重金属污染土壤是全球环境污染问题之一, 广泛存在于工业区、农业区及矿业区。重金属元素如铅、镉、汞等, 由于其不易降解、易于积累的特性, 长期存在于土壤中, 给生态系统和人类健康带来了显著威胁。传统的土壤修复方法通常成本高、时间长且对环境产生二次污染, 而微生物修复技术作为一种新型的绿色修复手段, 因其能够通过自然过程去除或转化重金属污染, 成为研究的热点。微生物修复不仅具有环保性, 而且能够显著降低修复成本, 提高修复效率。

然而, 微生物修复效果的监测与评估是其广泛应用的关键问题之一。如何科学、准确地评估修复效果, 成为目前研究的重要课题。基于此, 本文将探讨微生物修复技术的原理与应用, 重点分析修复效果的监测与评估方法, 为未来的实践提供理论依据与技术支持。

2 重金属污染土壤的特点与危害

2.1 重金属污染的来源与类型

重金属污染土壤的来源多样, 主要包括工业排放、农业施肥、矿业开采以及城市垃圾处理等。工业废气、废水、固体废物中往往含有大量的重金属元素, 这些污染物通过大气沉降、地表径流或直接排放进入土壤。农业活动中的化肥、农药使用不当, 也会使重金属进入土壤, 特别是在施用含有

【作者简介】张磊(1983-), 男, 中国云南昆明人, 本科, 工程师, 从事环境监测研究。

重金属污染物的有机肥料时。此外,矿业开采过程中的废石、尾矿等也含有重金属,长期堆积在土壤中,导致污染加剧。常见的土壤中重金属污染物包括铅、镉、汞、铬、砷等,这些重金属具有高度的毒性、持久性和积累性,长期存在于环境中,逐渐影响土壤健康和生物链的稳定。

2.2 重金属在土壤中的迁移与富集特性

重金属在土壤中的迁移与富集特性受多种因素的影响,主要包括土壤的物理化学性质、重金属的化学形态和微生物活动。重金属在土壤中一般以离子、络合物等形式存在,能够通过水分渗透、毛细作用等途径向下迁移,进入地下水或邻近区域。部分重金属能够与土壤中的有机质或矿物质结合,形成较为稳定的复合物,从而减缓其迁移速度。同时,土壤酸碱度、温度以及有机质含量等因素也会影响重金属的迁移与富集程度。在污染源附近,重金属容易在土壤中积累,形成高浓度区域,长期累积可能导致土壤生态系统的退化和生物多样性的减少。

2.3 重金属污染对生态环境与人类健康的影响

重金属污染对生态环境具有广泛且深远的影响。土壤中的重金属污染会影响植物的生长发育,降低其产量和质量。植物通过根系吸收土壤中的重金属后,这些金属元素会在植物体内积累,最终进入食物链,影响动物和人类健康。重金属污染还会破坏土壤的微生物群落,降低土壤的肥力和生物活性。对于人类健康而言,长期暴露于重金属污染的环境中,可能导致慢性中毒,表现为神经系统、肾脏、肝脏等器官功能损害。特别是铅、汞、镉等重金属具有致癌、致畸等毒性作用,对儿童和孕妇的健康危害更为严重。整体而言,重金属污染是全球面临的重大环境问题,亟需采取有效的修复和防治措施。

3 微生物修复技术的基本原理与应用

3.1 微生物修复的基本概念与机制

微生物修复技术是一种利用微生物降解、转化或固定污染物以恢复环境质量的方法。微生物通过代谢作用能够转化重金属,将其从有毒的形态转化为无毒或低毒的化合物,进而减少污染对环境的危害。微生物修复的机制主要包括生物吸附、还原、氧化、甲基化等过程。在这些过程中,微生物通过特定的酶系统或代谢途径改变重金属的化学形态,使其从易于被植物或动物吸收的溶解态转变为难溶的固态,进而降低其生物可利用性。部分微生物通过改变环境的 pH 值或通过分泌有机酸等物质,提高重金属的稳定性或将其转化为较为稳定的复合物,从而有效减轻重金属对土壤的污染。

3.2 微生物在重金属污染土壤修复中的作用

在重金属污染土壤修复过程中,微生物发挥着重要的作用。微生物通过其独特的代谢途径,将土壤中重金属污染物转化为低毒或无毒的物质,从而减少其对环境和生物的危害。某些微生物通过其细胞表面吸附重金属,降低其在溶液

中的浓度,同时通过生物还原或氧化作用改变重金属的化学形态,使其变得不易被植物吸收。某些微生物还能通过甲基化作用,将重金属转化为不易溶解的形态,减少其迁移性和生物可利用性。此外,微生物还能够通过分泌特定的有机酸,促进土壤中重金属的解吸作用,从而进一步降低重金属的污染程度。

3.3 微生物修复技术的应用领域与发展趋势

微生物修复技术在环境治理中具有广泛的应用前景,尤其在土壤和水体重金属污染的修复方面表现出显著效果。该技术已被广泛应用于农业、工业废弃物处理以及矿区废弃地的修复中。在农业领域,微生物修复帮助改善土壤质量,提高土地的可持续利用性。在工业废弃物处理过程中,微生物能够高效降解有毒有害物质,减少二次污染。随着技术的不断发展,微生物修复的研究重点逐渐转向提高修复效率、拓宽应用范围和降低成本。此外,未来的研究将注重微生物与其他修复技术的结合,如化学修复、物理修复等,以实现更全面、高效的污染治理。随着对微生物修复机理和技术的深入了解,其在环境保护领域的应用将不断扩展和深化。

4 微生物修复效果的监测方法

4.1 土壤中重金属浓度的测定方法

土壤中重金属浓度的测定是评估微生物修复效果的基础。常用的土壤中重金属浓度测定方法包括原子吸收光谱法(AAS)、电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)、荧光光谱法等。原子吸收光谱法是一种经典且常用的方法,其通过测量重金属元素在特定波长下吸收的光强度,来定量分析土壤样品中的重金属浓度。电感耦合等离子体质谱法具有高灵敏度和高精度,能够同时测定多种重金属元素,适用于复杂样品的分析。荧光光谱法则适合于快速检测某些特定重金属,如汞和铅等。此外,土壤样品的前处理也是影响测定结果的重要因素,常见的前处理方法包括酸溶、火焰消解、微波消解等,确保重金属充分提取。通过定期测量重金属浓度变化,能够反映微生物修复过程中重金属的去除效率和修复进度,从而评估修复效果。

4.2 微生物种群结构与活性监测技术

微生物种群结构与活性监测是评估微生物修复效果的关键指标。常用的监测方法包括传统的培养法和分子生物学技术。培养法通过选择性培养基从土壤中分离微生物,观察微生物的生长情况,进而推测微生物的活性和种群结构。然而,该方法只能检测到能够在特定条件下生长的微生物,难以全面反映土壤微生物的多样性。分子生物学技术,如 16S rRNA 基因测序,能够通过高通量分析,揭示土壤中微生物的种群组成和功能基因,准确评估微生物的多样性和丰度。此外,微生物活性监测还可以通过酶活性测定、呼吸速率测定等方式进行,这些指标能够反映微生物的代谢活动和环境适应能力。在微生物修复过程中,监测微生物的活性和种群

结构变化能够帮助评估修复效果,了解微生物的修复能力和生物降解过程。

4.3 修复效果的评价指标与标准

修复效果的评价指标与标准是确保微生物修复技术有效性的核心。常见的评价指标包括重金属去除率、土壤健康恢复情况、微生物群落变化等。重金属去除率是评价微生物修复效果的重要量化指标,通常通过比较修复前后的土壤重金属浓度来确定。去除率较高通常意味着修复效果较好。土壤健康恢复情况则包括土壤的理化性质、微生物多样性等指标的恢复程度。修复过程中,土壤 pH 值、营养成分以及有机质含量的变化能够反映土壤质量的恢复情况。微生物群落的变化也是评估修复效果的关键因素之一,修复后的微生物种群结构、功能多样性及其活性变化能够说明微生物是否成功参与了污染物的降解与转化。具体的修复效果标准可能因土壤类型、重金属污染程度及修复目标的不同而有所差异,因此在实际应用中需根据具体情况设定相应的评价标准。

5 微生物修复效果的评估与优化策略

5.1 微生物修复效果的定量评估方法

微生物修复效果的定量评估方法主要通过测量重金属的去除率以及土壤环境的改善情况来实现。去除率通常通过比较修复前后土壤中重金属的浓度差异来计算,反映了微生物对重金属的降解或转化能力。该方法可以结合土壤中不同深度的重金属浓度变化进行分析,确保评估结果的准确性。除了重金属去除外,土壤中微生物群落结构和活性也是评估的重要指标,通过分子生物学技术和酶活性测试等手段,可以对微生物的代谢活动进行量化分析,进一步确认其在污染物降解中的作用。综合考虑这些因素,定量评估方法可以全面、准确地反映微生物修复效果,为优化修复方案提供依据。

5.2 修复过程中的环境因素对效果的影响

修复过程中的环境因素对微生物修复效果具有重要影响,主要包括土壤 pH、温度、水分、氧气供应以及土壤有机质含量等。土壤 pH 值直接影响微生物的代谢活动和重金属的化学形态,过低或过高的 pH 值都会抑制微生物的生长与活性,从而影响修复效果。温度和水分也会影响微生物的生长和代谢,温度过高或过低均可能导致微生物活性降低。适宜的氧气供应是许多微生物代谢反应的前提,缺氧环境可能限制某些微生物的修复作用。土壤有机质的含量则影响微

生物的生存条件以及重金属的吸附与迁移行为。因此,修复过程中,合理调控这些环境因素,可以显著提高微生物修复的效果。

5.3 提高修复效果的技术优化途径

为了提高微生物修复效果,优化技术途径至关重要。首先,优化微生物的选择与培养条件,可以通过筛选具有高降解能力的重金属耐受菌种,或者通过基因工程改造增强微生物的修复能力。其次,结合化学修复或物理修复手段,通过协同作用提高修复效率。例如,利用添加有机酸或植物根际分泌物等方法促进重金属的解吸,配合微生物的转化作用,可以加速修复过程。进一步地,调节土壤的理化性质,如调整 pH、湿度、温度等,为微生物提供更适宜的生存环境,也是提高修复效果的重要手段。此外,适时的监测与评估,及时调整修复策略和方法,能够确保修复效果达到最佳状态。

6 结语

微生物修复技术作为一种环保、经济的污染治理方法,在重金属污染土壤修复中展现出广泛的应用潜力。通过利用微生物的代谢作用,能够有效降低土壤中重金属的浓度,减少其对生态系统和人类健康的危害。然而,微生物修复效果的实现仍受到多种因素的制约,环境条件、微生物种群特性以及修复策略等都会对修复效果产生重要影响。因此,未来的研究应加强对微生物修复机理的深入探索,并结合其他修复技术进行协同作用,以提高修复效率和稳定性。随着技术的不断优化与发展,微生物修复将在重金属污染土壤的治理中发挥更大作用,为实现环境可持续发展贡献力量。

参考文献

- [1] 张鹏,崔金英.重金属污染土壤与地下水修复工程环境监测策略[J].中国资源综合利用,2025,43(03):175-177.
- [2] 王水锋,郭敬华.蓖麻修复重金属污染土壤的研究进展[J].广东化工,2025,52(04):103-104+110.
- [3] 宋亚儒,杨金强,李媛媛,魏明俐.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.
- [4] 黄金鹏,韦行,孙梦强,黄玲,邹奇,陈志良.重金属污染土壤电动修复技术研究进展及展望[J].土壤,2024,56(06):1173-1183.
- [5] 曾微,王强,江湘婷,万灿,张立志,黎洁.磁性纳米功能材料MFC对镉污染稻田土壤微生物和酶活性的影响[J].西南大学学报(自然科学版),2025,47(02):122-132.