

生物修复技术提升农田土壤重金属污染治理效率的研究

杨晓宇

邯郸市环境保护研究所, 中国·河北 邯郸 056001

摘要: 生物修复技术在农业土壤污染治理中潜力显著, 聚焦土壤重金属污染问题成效突出, 工业化与农业活动强度提升, 土壤重金属污染日趋严峻, 威胁农业生产秩序与生态环境稳定。植物、微生物等生物体的吸附、转化、降解能力被生物修复技术运用, 土壤重金属浓度得以有效降低, 土壤质量同步改善。现有研究围绕生物修复机理、技术落地路径及各类影响要素展开, 目标指向修复效率提升与技术可持续性实现。现代生物技术与传统修复手段融合推进, 生物修复技术未来将成长为效能优异、应用范围广阔的土壤重金属治理方案。

关键词: 生物修复; 土壤污染; 重金属; 农业; 生态治理

Study on the Improvement of the Efficiency of the Treatment of Heavy Metal Pollution in Farmland Soil by Bioremediation Technology

Yang Xiaoyu

Handan Institute of Environmental Protection, China Hebei Handan 056001

Abstract: Bioremediation technology demonstrates remarkable potential in agricultural soil pollution remediation, particularly effective in addressing heavy metal contamination. With the intensification of industrialization and agricultural activities, soil heavy metal pollution has become increasingly severe, threatening agricultural production and ecological stability. By leveraging the adsorption, transformation, and degradation capabilities of organisms such as plants and microorganisms, bioremediation technology effectively reduces soil heavy metal concentrations while simultaneously improving soil quality. Current research focuses on the mechanisms of bioremediation, implementation pathways, and influencing factors, aiming to enhance remediation efficiency and achieve technological sustainability. The integration of modern biotechnology with traditional remediation methods will propel bioremediation technology to become a highly effective and widely applicable solution for soil heavy metal management in the future.

Keywords: Bioremediation; Soil pollution; Heavy metals; Agriculture; Ecological restoration

0 引言

土壤重金属污染已成为全球农业发展中亟待解决的重要课题, 工业废水排放, 农业化肥、农药过量施用, 导致大量重金属侵入土壤, 直接影响农作物生长与食物安全。传统物理、化学修复手段成本高昂, 还可能引发二次污染, 生物修复技术凭借环境友好与可持续特性, 正成为备受关注的解决方案。它能降低土壤重金属浓度, 改善土壤生态, 助其恢复健康与功能。微生物降解、植物吸附重金属的能力, 让这项技术彰显独特优势。深化生物修复技术的研究与应用, 对提升土壤质量、保障农业生产意义重大。

1 生物修复技术概述与在土壤重金属污染治理中的应用现状

1.1 生物修复技术的基本原理与分类

生物修复技术利用生物体降解、转化或去除环境污染物, 核心原理依托植物、微生物或其代谢产物, 实现土壤污染物的吸收、降解或稳定化, 降低污染物毒性, 重塑土壤健康状态。修复过程差异划分出植物修复、微生物修复、动物修复等技术类型。植物根系吸附、积累、转化重金属或有机污染物, 微生物借助代谢作用降解污染物, 动物依

靠摄食行为间接削减污染物浓度。生物修复涵盖生物刺激与生物强化等方法, 外源添加物质用以提升微生物或植物的修复效率。

1.2 土壤重金属污染的主要成因与危害

土壤重金属污染主因与人类活动紧密相关, 工业废水排放、农业化肥农药过量施用, 构成重金属污染核心来源。矿山开采、垃圾填埋及废物处置失当, 同样造成重金属侵入土壤^[1]。铅、汞、砷、镉等重金属可长期蓄积于土壤, 毒性显著, 破坏土壤微生物群落结构, 抑制植物生长, 影响农作物产量与品质。土壤中蓄积的重金属可经过食物链传递至人体, 还会造成水源污染, 重金属污染破坏土壤理化性质, 引发养分失衡, 削弱土壤可持续利用潜力。

1.3 生物修复技术的优势与局限性

生物修复技术在土壤重金属污染治理中优势显著, 核心特质体现为环保、低成本与可持续性, 相较传统物理化学修复手段, 该技术操作成本更低, 且不会诱发二次污染。植物与微生物可吸收转化污染物, 恢复土壤生物活性, 改善土壤生态环境。实际应用中, 生物修复技术存在一定局限性, 修复效率受土壤类型、重金属种类及环境因素影响,

可能造成修复进程迟缓或效果欠佳。重金属污染浓度较高的土壤中,生物修复技术的应用会受制约,需结合其他修复手段协同发挥作用。

2 微生物在土壤重金属修复中的作用及其应用研究

2.1 微生物的降解与吸附机制

微生物在土壤重金属污染的修复中作用关键,主要经过降解转化与物理吸附两大核心机制清除污染物。它们依托自身活跃的代谢活动,将土壤中剧毒的重金属离子逐步转化为无毒或低毒的稳定形态。一些功能特异的微生物,能启动还原、氧化、甲基化等系列生化反应,改变重金属固有化学形态,大幅降低其对生态环境与生物群落的危害程度。微生物细胞壁表面密布的负电荷基团,可与游离的重金属离子产生强烈静电吸附,显著削减重金属在土壤中的生物可利用性。这些降解与吸附的协同作用下,微生物既能直接清除土壤污染物,又能优化土壤的理化性质,为后续植物扎根与微生物群落繁衍创造更适宜的环境条件。

2.2 微生物群落的影响因素与优化

微生物群落的结构与功能受多种因素影响,涵盖土壤物理化学性质、污染物浓度、温度、湿度、pH 值等环境要素,这些要素作用于微生物的活性、种群组成及其修复能力^[2]。污染较重的土壤中,特定耐污染微生物群落易占据主导地位,这类微生物在重金属降解和吸附方面具备更强效能。优化微生物修复效果,可调节土壤环境条件,扩增有利微生物群体,或借助生物刺激和生物强化方法推动有益微生物生长。相关研究证实,基因工程技术改造微生物群落,赋予其更强重金属降解能力,是未来提升微生物修复效率的有效手段之一。

2.3 微生物修复技术的实践案例

微生物修复技术在实际土壤重金属污染治理项目中成效显著,部分重工业聚集区的土壤修复工作中,研究人员精准筛选特定微生物群落,成功清除土壤中累积的铅、镉等典型重金属污染物。某专项铅污染修复试验中,定向投加可降解铅的功能微生物后,土壤铅含量指标大幅下降,该微生物群落对铅的靶向吸附能力在不同温湿度、pH 值的环境条件下始终维持稳定状态。污染区域人工引入耐受高浓度重金属的优势微生物种群,生物强化技术的科学运用进一步提升整体修复成效。这些典型实践案例充分证明,微生物修复具备较强环境适应性,能在复杂实际土壤污染治理场景中释放较大应用潜力。

3 植物修复技术在土壤重金属污染中的应用与发展

3.1 植物修复的原理与流程

植物修复技术借助植物根系的吸收、积累、转化与固定作用,作用于土壤中的重金属,削减其对周边环境的污染程度,植物修复的核心原理囊括植物对重金属的吸附、

转化、挥发等多样化作用机制。植物根系可吸附土壤中游离的重金属离子,继而运输至植物体内贮存,部分特有植物能依靠细胞内的酶系统,将重金属进行还原、氧化或甲基化反应,转化为无毒或低毒的稳定形态。植物修复的实施流程一般包含筛选适配的植物种类、田间种植与苗期培养、阶段性土壤监测与植物生态长势评估等关键环节。修复推进过程中,植物除直接吸收重金属外,还能借助根际微生物群落的协同作用,进一步加速土壤中残存污染物的降解进程。

3.2 重金属吸收与转化的植物种类

不同植物吸收转化重金属的能力存在明显差异,部分植物被称作“超积累植物”,具备强劲的重金属吸收、积累与转化效能。这类植物可在自身组织内富集高浓度重金属,且不会出现生长损伤。金属菊、羽扇豆、海滨麻均属常见超积累植物,它们能于污染土壤中快速摄取铅、镉、铜等重金属^[3]。一些植物依靠根系分泌有机酸、酶类或硫化物,提升重金属溶解性与生物可利用性,进而强化自身吸收效率。植物根、茎、叶、果实等部位的重金属吸收能力各不相同,筛选适配植物种类及对应部位,可提升污染土壤修复工作的实际成效。

3.3 植物修复的效果与面临的挑战

植物修复技术在土壤重金属污染治理中展现良好潜力,适配低至中等浓度污染场景,植物修复实际应用仍面临诸多挑战。修复效率受土壤酸碱度、重金属种类浓度等因素影响,部分植物修复能力因此受限,重金属长期积累会对植物生长产生负面影响,造成修复效果难以持续。修复过程重金属移除效率偏低时,治理目标达成需要消耗较长时间,修复成本随之增加。选育高效超积累植物、改良植物生长条件、优化修复流程,有望克服现有挑战,提升植物修复技术实际应用成效。

4 生物修复效率提升的关键因素与技术优化策略

4.1 环境因素对生物修复效率的影响

生物修复技术的实际效果在极大程度上受到各类环境因素的直接影响,土壤的 pH 值对参与修复的微生物活性与植物自身的重金属吸收能力产生显著作用。酸性土壤通常能够增强土壤中某些重金属的化学溶解度,进而提高此类重金属的生物可利用性,但过酸或过碱的极端环境则可能直接抑制相关生物体的正常生长与基础代谢。温度和空气湿度两项指标同样在生物修复的整个过程中起着不可忽视的关键作用,适宜的高温环境可能促进微生物的快速代谢活动,而过高或过低的极端温度则可能大幅限制整体修复效率。土壤中重金属污染的具体种类和实际浓度也会直接影响修复技术的最终效率,某些特定微生物或植物对于某一类特定金属有较强的针对性修复能力,但对其余类型金属的实际处理效果却相对较差。

4.2 修复剂与外源物质的协同效应

生物修复进行时,修复剂与外源物质的协同效应可大幅提升修复效率,修复剂特指一类物质,它们能推动植物或微生物对污染物完成吸附、转化乃至降解,有机酸、营养添加剂、微生物代谢产物都在此列。这类物质可增加土壤中污染物的可溶性,强化植物根系吸收能力,或提升微生物降解效能,由此有效改善污染物去除效果^[4]。部分有机酸能调节土壤中金属离子状态,降低其稳定性以利于植物摄取,外源补充的营养物质则可为微生物提供能量,加快其生长并提升活性,进而强化污染物降解能力。选定适配的修复剂,精准调控外源物质添加量,生物修复的协同作用会更突出,整体修复效果也将进一步提高。

4.3 生物修复技术的综合优化路径

提升生物修复技术整体效果,需综合考量多类因素实施优化,选定适配的生物修复对象,针对特定污染物具备高吸附能力的植物或微生物种群,是提升修复效率的核心要点。调整土壤物理化学特性,pH 值、湿度和温度等指标的调控,能为微生物和植物生长营造更适宜的环境条件。修复剂和外源物质的合理运用,是优化修复效果的重要路径,二者科学搭配可大幅增强生物体对污染物的吸收转化能力。技术实施阶段融入现代生物技术,基因工程技术的引入能够强化微生物或植物的修复效能。整合上述各项措施,生物修复技术的应用成效可实现有效提升,这项技术也有望在更广泛的土壤污染治理场景中落地应用。

5 生物修复技术的未来展望与创新方向

5.1 基因工程与转基因植物的应用前景

基因工程与转基因植物在生物修复领域展现广阔应用前景,借助基因工程技术,科学家可将特定基因导入植物体内,赋予植株更强的重金属吸收、转化及耐受能力。转基因植物可改变自身代谢路径,强化对特定重金属的积累与解毒效能,部分转基因植物能在高浓度污染土壤中正常生长,将重金属转化为无害形态,有效降低土壤污染程度。基因工程技术可提升植物根系活性,促进根系分泌有机酸,进一步推动重金属的吸收与转化进程,该技术可提升修复效率,缩短修复周期,是未来生物修复技术发展的重要方向。

5.2 新型修复材料与方法的探索

新型修复材料与方法的探索为生物修复技术发展拓宽更多可能性,近年,纳米材料和生物基复合材料成研究领域关注热点。纳米材料凭借较大比表面积与独特表面性质,可与重金属离子产生强烈物理化学作用,增强重金属吸附去除效果^[5]。生物基复合材料结合微生物、植物提取物和

天然矿物,发挥协同效应,提升整体修复效率,部分纳米材料与微生物联合作用,能加速重金属还原转化,改善土壤修复成效。绿色修复手段利用微生物合成的天然多糖或植物根系分泌的有机酸,实现土壤污染物的无害化去除,这类新型修复材料与方法将为土壤污染治理难题提供更高效环保的解决方案。

5.3 生物修复技术的政策支持与实践推广

生物修复技术的推广与实际应用,始终离不开相关政策的有力支持与科学引导,为切实促进这项技术的全面普及,全球诸多国家和地区已针对性制定系列支持政策,具体包含财政专项补贴、阶段性税收优惠以及技术创新成果奖补等配套措施。这些政策为专业研发机构和相关企业提供稳定资金支持,有效推动生物修复技术在实践中不断创新、持续优化升级。政府主管部门同步发布相关法规文件,积极推动污染土壤修复工作规范开展,明确界定修复过程中的具体标准与执行要求。实际应用场景中,生物修复技术的应用范围正逐步推广,尤其在农业耕地和工业遗留地的污染土壤治理项目里,这种绿色环保的技术方案正逐步取代传统高成本的物理化学修复方法。

6 结语

本文聚焦生物修复技术,探讨其在土壤重金属污染治理中的应用与发展,核心分析微生物和植物修复的原理、优势及面临的挑战。技术持续进步,基因工程与转基因植物实现修复效率新突破,新型修复材料和方法的探索为提升治理效果提供多元解决方案。政策支持与实践推广筑牢技术应用根基,推动其在农业和工业污染治理领域普及。现代生物技术与传统修复方法结合,未来将进一步提升生物修复的效率与可持续性,为土壤污染问题提供更有效的技术路径。

参考文献:

- [1] 陈冉,李晗蕊,李宇轩等. 重金属污染植物修复技术研究进展[J]. 草学, 2025,(06):1-8+26.
- [2] 张洁允. 镉污染农田土壤修复技术的研究进展[J]. 云南化工, 2025,52(09):28-31.
- [3] 王羿驰,林颖仪,吴美青等. 强化植物对重金属污染土壤的修复技术研究进展[J]. 农学学报, 2025,15(09):58-70.
- [4] 王志强. 基于生态修复的重金属污染土壤综合治理技术研究[J]. 中国轮胎资源综合利用, 2025,(09):147-149.
- [5] 季妹旭. 农村生活污水多介质土壤渗滤系统研究[D]. 黑龙江八一农垦大学, 2025.

作者简介: 杨晓宇(1972.07-),男,汉族,河北省磁县人,大学本科,高级工程师,研究方向:环境保护。