

# Optimization and application effects of phytoremediation technology for heavy metal contaminated soil

Xiaolan Liu

Xinghe Branch, Ulanqab Municipal Bureau of Ecology and Environment, Inner Mongolia, Ulanqab, Inner Mongolia, 013650, China

## Abstract

With the acceleration of industrialization and urbanization, soil heavy metal pollution has been worsening, posing serious threats to ecosystems and human health. Traditional physical and chemical remediation methods struggle to effectively address these challenges due to their high costs, significant ecological impacts, and poor sustainability. In this context, phytoremediation technology—characterized by its green, low-consumption, and efficient nature—has emerged as a research hotspot. This paper systematically reviews major remediation approaches including plant extraction, stabilization, volatilization, and rhizosphere regulation, analyzing their applicable scenarios and technical key points. By comparing the heavy metal accumulation characteristics of different plants, strategies are proposed to enhance remediation effectiveness through soil conditioner application, genetically engineered super-enriched plants, optimized plant combinations, and microbial synergy. Case studies demonstrate that rational optimization of remediation systems and site-specific technological configurations can significantly improve the efficiency and stability of phytoremediation.

## Keywords

Heavy metal pollution; phytoremediation; technology optimization; ecological restoration; application evaluation

## 重金属污染土壤的植物修复技术优化与应用效果

刘晓兰

内蒙古乌兰察布市生态环境局兴和分局, 中国·内蒙古 乌兰察布 013650

## 摘要

随着工业化和城市化进程加速, 土壤重金属污染状况不断恶化, 严重危及生态系统与人类健康。传统物理、化学修复方法因成本高、生态影响大、可持续性差, 难以有效应对污染修复难题。在此形势下, 植物修复技术凭借绿色、低耗、高效的特点, 成为研究热点。本文详细梳理了植物提取、稳定、挥发及根际调控等主要修复方式, 剖析其适用场景与技术关键。通过对比不同植物对重金属的富集特性, 提出借助土壤调理剂改善土壤环境、运用遗传工程培育超富集植物、设计合理植物组合以及利用微生物协同作用等提升修复效果的策略。结合实际应用案例评估发现, 合理优化修复体系、根据场地特点配置技术, 能显著提高植物修复的效率与稳定性。

## 关键词

重金属污染; 植物修复; 技术优化; 生态恢复; 应用评价

## 1 引言

土壤是维系陆地生态系统稳定的基础资源, 但随着工业“三废”排放、农业过量施肥和城市扩张等活动的加剧, 重金属在土壤中的累积日益严重, 形成典型的区域性和结构性污染问题。据中国生态环境部发布的数据显示, 我国部分地区耕地重金属超标率已达 10% 以上, 主要以镉、铅、砷和汞为主, 直接威胁农产品安全、地下水系统以及人群健康。

相较于传统修复方式如土壤置换、固化/稳定化和化学淋洗等, 植物修复 (Phytoremediation) 技术因其绿色低碳、

可持续性强、生态效益良好等特点逐渐成为重金属污染修复的重要方向。然而, 在实际应用过程中, 植物修复仍面临修复周期长、富集能力有限、区域适应性不足等问题, 亟须通过技术优化与集成创新提高其实用性和工程化水平。

本文从植物修复技术的基本机制出发, 分析不同修复模式的技术特征与适用范围, 探讨关键影响因素与技术瓶颈, 进而提出优化策略与协同手段, 结合典型应用案例评估实际效果, 旨在为重金属污染土壤的生态治理提供理论基础与技术支撑。

## 2 植物修复技术体系及基本原理

### 2.1 植物提取修复 (Phytoextraction) 机制与适应性

植物提取修复 (Phytoextraction) 是一种绿色、经济且

【作者简介】刘晓兰 (1980–), 女, 中国内蒙古乌兰察布人, 本科, 工程师, 从事生态环境保护研究。

环境友好的重金属污染土壤治理技术，其基本原理是利用特定植物对重金属元素的选择性吸收能力，将其吸收并富集于地上部，通过收割植物体将污染物一并移除，实现土壤净化。该方法特别适用于处理镉（Cd）、铅（Pb）、锌（Zn）等可移动性较强的重金属污染土壤<sup>[1]</sup>。

植物的修复潜力通常以富集系数（Bioconcentration Factor, BCF）和转运系数（Translocation Factor, TF）来衡量。BCF为植物地上部或整体重金属浓度与土壤中该金属浓度的比值，TF为地上部与根部金属含量的比值。BCF和TF均大于1的植物被认为具有较高的提取能力和良好的转运效率，是优良的修复候选植物。

目前常见的提取型植物包括印度芥菜（*Brassica juncea*）、向日葵（*Helianthus annuus*）、香根草（*Vetiveria zizanioides*）等。这些植物不仅具有较强的重金属耐受性，还兼具生物量大、生长周期短等优势，在中低浓度重金属污染场地表现出较好的修复效果。特别是在镉和锌污染治理中，印度芥菜因其对Cd的高富集能力受到广泛关注<sup>[2]</sup>。

然而，该技术在实际应用中仍面临一些瓶颈。例如，不少提取型植物在面对多金属复合污染或高浓度污染时生长受限，抗逆性差；此外，一些植物虽对金属有较强的吸收能力，但转运至地上部效率低，影响整体去除效果。为提高修复效率，需通过农业措施如施肥、种植密度调控、联合修复（如与螯合剂配合）等方式增强其生理活性；同时，也可借助分子生物学技术进行基因工程改良，提高其金属转运相关基因表达，从根本上提升其修复潜能。

## 2.2 植物稳定化（Phytostabilization）控制机制

植物稳定化是一种以“固定污染物、防止迁移”为核心思路的植物修复技术，主要通过植物根系及其分泌物实现对土壤中重金属的吸附、络合、沉淀或氧化还原转化，从而将污染物限制在根际区域或转化为低活性的形态。这种技术特别适用于治理砷（As）、铬（Cr）等迁移性较差或生态毒性较强的重金属污染场地。

在稳定化过程中，植物根系通过形成立体根网结构，有效增强土壤结构稳定性，减少水力侵蚀带来的重金属迁移风险；同时，根际分泌有机酸、黏液质等，可与金属离子形成络合物或促进其沉淀，进一步降低其生物可利用性。此外，部分植物还能通过调节根际pH值和氧化还原状态，改变重金属的化学形态，使其从活性态转变为非生物可利用态。

典型的稳定化植物包括狗牙根（*Cynodon dactylon*）、羊茅（*Festuca arundinacea*）等草本植物，以及荆条（*Vitex negundo*）、胡枝子（*Lespedeza bicolor*）等耐污染灌木类植物。这些植物普遍具有较强的根系发育能力和耐逆性，可在污染土壤中长期生存并发挥生态恢复作用<sup>[3]</sup>。

但稳定化修复并不直接去除土壤中的重金属，其长期效果易受自然因素干扰，如降雨冲刷、土壤pH波动等可能引发重金属再次活化与迁移。因此，稳定化修复往往需结合

土壤调理剂，如生物炭、石灰、磷酸盐或矿物掺合物等，提高土壤缓冲能力与金属固定能力，从而增强其修复持久性和生态安全性。

## 2.3 植物挥发修复与根际调控路径

植物挥发修复（Phytovolatilization）是一种相对特殊的植物修复方式，适用于汞（Hg）、硒（Se）等具有一定挥发性和植物代谢转化能力的元素。其原理是植物通过根系吸收土壤中的重金属后，经过体内酶促转化过程生成气态或低毒性物质，最终释放至大气，从而实现土壤污染浓度的降低。

尽管该方式在特定元素处理方面具有独特优势，然而其应用受到诸多限制：一是挥发性金属元素种类较少，适用范围有限；二是释放至大气中的金属气体可能引发二次污染风险，对大气环境构成潜在威胁。因此，该技术在实际工程中应用相对较少，多作为其他修复路径的补充手段。

相比之下，根际调控（Rhizosphere Manipulation）是一种更具普适性的修复策略。植物根际是一个微生态系统，其通过根系分泌物（如有机酸、酚类物质等）以及与微生物（如根瘤菌、解磷菌、铁氧化菌等）共生互动，显著改变了土壤中的化学环境，从而增强重金属的活化、吸收与固定能力。

例如，豆科植物与根瘤菌共生形成根瘤，能够提升植物氮素吸收效率，同时改善土壤结构和营养环境；特定功能微生物如硫酸盐还原菌、铁还原菌、放线菌等能分泌酶类或胞外聚合物，参与重金属氧化还原反应，提高植物对重金属的吸收效率。此外，根际微生物还可通过竞争抑制病原菌，增强植物抗逆性，保障修复植被稳定生长<sup>[4]</sup>。

## 3 影响植物修复效果的关键因素分析

### 3.1 植物种类选择与地理适配性问题

植物修复技术效果高度依赖于所选植物的生物学特性及其与目标土壤条件的匹配程度。在不同地区、不同重金属污染情境下，植物表现出显著的适应性差异。例如，某些品种的向日葵在北方酸性土壤中可有效吸收铅元素，而在南方红壤区则表现出吸收效率下降现象。

因此，选育本地化高富集植物品种，并开展区域性植物种质资源调查，是提高修复效率的基础。同时，需结合土壤类型、气候条件与重金属形态进行精准配置，提升植物与环境之间的协同作用。

### 3.2 土壤理化性质对修复行为的调节作用

土壤pH、有机质含量、阳离子交换量（CEC）及重金属形态对植物吸收路径具有显著影响。在强酸性土壤中，重金属多以可溶性离子存在，易于植物吸收；而碱性条件则促使金属形成难溶盐，降低生物可利用性。

调节剂如腐殖酸、生物炭、柠檬酸等可以改善土壤结构，提高金属活化程度或稳定性，同时促进植物根系发育，增强重金属吸收能力。调理剂的应用需根据具体污染特征与植物类型科学配置，以避免引发次生污染<sup>[5]</sup>。

### 3.3 微生物群落协同与根际生态机制

植物修复系统中,根际微生物在重金属溶解、螯合及转运过程中扮演重要角色。某些根际细菌可分泌有机酸、合成金属螯合物,增强植物对重金属的吸收能力。内生真菌如丛枝菌根(AMF)不仅提升植物耐逆性,还能改善营养获取效率,提升修复系统的稳定性。

构建以植物为核心、微生物为助力的协同生态修复体系,是提升修复效率与生态兼容性的关键方向,未来需加强植物-微生物互作机制研究与工程化应用示范。

## 4 植物修复技术优化策略探索

传统植物修复技术存在效率低、周期长等局限,为突破这些限制,需从修复体系结构、技术手段集成及工程化管理等方面进行优化设计,以下将详细阐述相关策略。

### 4.1 植物组合配置,实现功能互补

通过合理搭配不同特性的植物,能充分发挥各自优势,实现功能互补。采用“高富集+高生物量”模式组合植物,可在提升金属提取效率的同时,增加生物量积累。例如,在镉污染场地中,向日葵对镉具有较强的富集能力,而紫云英生物量较大且能改善土壤结构。将二者搭配种植,向日葵负责提取土壤中的镉,紫云英则通过根系活动改良土壤,促进向日葵生长,实现提取与土壤改良同步进行,大大提高了修复效果。

### 4.2 遗传工程改良,提升植物性能

利用遗传工程手段对植物进行耐重金属转基因改良,是提升植物修复能力的有效途径。通过表达特定基因,可增强植物的金属吸收能力与抗逆性能。例如,转基因烟草通过表达金属转运蛋白或谷胱甘肽合成酶,能够更高效地吸收重金属,并在重金属浓度较高的区域保持良好生长状态。这种改良后的植物在恶劣的污染环境中具有更强的适应性和修复能力,为植物修复技术的应用提供了更广阔的空间。

### 4.3 构建监测平台,实现动态调整

构建基于智能感知与大数据支持的修复监测平台,可实时跟踪植物生长状态和土壤重金属变化趋势。借助远程感知技术和无人机辅助调查,能够及时获取准确的数据信息,为修复过程的动态调整提供科学依据。通过分析监测数据,可了解植物修复的进展情况,及时发现问题并采取相应措施,提升项目实施效率与安全性,确保植物修复技术能够达到预期的修复效果。

## 5 典型应用案例及成效评估

在湖南省某镉污染稻田修复工程中,研究团队创新性

地采用“油菜-水稻轮作”模式,结合生物炭与柠檬酸复配调理剂,实现了对土壤镉的协同治理。三年内,耕层土壤中镉含量从1.8 mg/kg降至0.9 mg/kg,稻米中镉含量稳定控制在国家限量标准以内,有效实现了农田生态修复与粮食安全的双重目标。

广东某电子废弃物拆解区则采取香根草与百喜草的组合种植策略,并辅以特定功能微生物接种与钝化剂喷施,显著抑制了铅、锌等重金属在土壤中的迁移与活化。经过治理,区域植被覆盖率由不足30%提升至85%以上,土壤质量指数显著改善,生态系统逐步恢复。

这些典型案例表明,植物修复的有效性依赖于多技术融合与因地制宜的系统设计。通过科学选配植物种类、土壤调理剂与微生物菌剂,并结合轮作、覆盖、管护等生态工程手段,可在提升修复效率的同时增强区域生态韧性。在推广应用过程中,还需加强阶段性评估与长期运维机制建设,确保修复成效持续稳定。

## 6 结语

植物修复作为一种绿色、可持续的土壤污染治理手段,已在国内外众多污染场地中得到应用验证,其生态兼容性与成本优势使其在重金属污染防治中展现出广阔前景。然而,受限于植物富集能力、生境适应性与系统稳定性,其修复效率仍有较大提升空间。本文系统总结了植物修复的主要技术路径、影响因素及优化策略,并结合工程实例分析其应用成效,为今后相关研究与实践提供借鉴。

未来,应加强多学科交叉融合,推进植物遗传改良、根际微生物利用及修复智能监测平台建设;同时,应健全修复工程全过程监管与评价机制,推动从试点项目向大规模工程化治理转型。随着国家生态文明建设步伐加快,植物修复将在土壤环境治理与生态恢复领域发挥更大作用。

### 参考文献

- [1] 黄金鹏,韦行,孙梦强,等.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.
- [2] 黄晓东,王雁梅,张佳宝,等.重金属污染废水的研究与治理[J].工业微生物,2024,54(06):109-111.
- [3] 韩佳睿.甘肃省某历史遗留河道重金属污染底泥治理工程实例[J].广东化工,2024,51(23):104-107+135.
- [4] 王霞霞,刘静霖,Zanariah Jasmani.银杏叶生物炭基肥修复重金属污染土壤方法研究[J].矿冶工程,2024,44(06):104-107.
- [5] 梁秀玉.农田土壤重金属污染修复技术研究[J].农村实用技术,2024,(12):123-124.