

Research on the Adaptability of Soil Heavy Metal Pollution Plant Remediation Technologies and Field Application Strategies

Shuguang Zhang

Guangxi Jiude Environmental Protection Consulting Co., Ltd., Nanning, Guangxi, 530000, China

Abstract

With the acceleration of industrialization and agricultural intensification, soil heavy metal pollution has become a global environmental issue. According to statistics, over 19% of the cultivated land in China is affected by heavy metal pollution, resulting in decreased agricultural product quality, degradation of the ecosystem, and increased health risks for humans. Traditional physical and chemical remediation technologies have limitations such as high costs and potential secondary pollution. In contrast, plant remediation technology, with its advantages of environmental friendliness, low cost, and strong sustainability, has become a research hotspot for contaminated soil remediation. However, the remediation efficiency of plant remediation technology is influenced by multiple factors such as soil type, types of heavy metals, climatic conditions, and plant characteristics. Its field-scale application still faces challenges such as insufficient technical adaptability and the lack of systematic management strategies. This paper first elaborates on the relevant content of plant remediation technology, then specifically studies the adaptability of plant remediation technology, and finally proposes specific field application strategies, with the aim of providing useful references and inspirations for related research.

Keywords

Soil heavy metal pollution; Plant remediation technology; Adaptability research; Field application strategies

土壤重金属污染植物修复技术适配性研究与田间应用策略

张树广

广西九德环保咨询有限公司, 中国·广西南宁 530000

摘要

随着工业化和农业集约化进程加速, 土壤重金属污染已成为全球性环境问题。据统计, 我国受重金属污染的耕地占比超 19%, 导致农产品质量下降、生态系统退化及人体健康风险加剧。传统物理化学修复技术存在成本高、易二次污染等局限, 而植物修复技术凭借其环境友好、成本低廉、可持续性强等优势, 成为污染土壤修复的研究热点。然而, 植物修复技术的修复效率受土壤类型、重金属种类、气候条件及植物特性等多因素影响, 其田间规模化应用仍面临技术适配性不足、管理策略缺乏系统性等挑战。本文先是详细阐述了植物修复技术的相关内容, 随后具体研究了植物修复技术的适配性, 最后提出了具体的田间应用策略, 以期为相关研究提供有益参考与借鉴。

关键词

土壤重金属污染; 植物修复技术; 适配性研究; 田间应用策略

1 引言

土壤重金属污染具有隐蔽性、累积性与不可逆性, 给生态环境和人类健康带来严重威胁。我国每年受重金属污染影响, 粮食减产超 1000 万吨, 直接经济损失高达 200 亿元。传统修复技术, 像客土法、化学淋洗等, 虽能快速降低土壤中重金属含量, 但存在成本高昂、破坏土壤结构以及引发二次污染等问题, 难以满足大规模污染治理的要求。而植物修

复技术借助超积累植物或微生物-植物联合体系, 可实现重金属的提取、稳定或挥发, 具有成本低、对环境干扰小、能同步修复与利用土壤等优势, 堪称“绿色修复”的典范。不过, 该技术修复效率受土壤 pH、有机质含量、重金属形态及植物生长周期等因素影响, 田间应用常因技术适配性不足效果不稳定。所以, 系统探究其适配性规律并优化田间应用策略, 对推动该技术规模化应用十分关键。

2 植物修复技术概述

土壤重金属修复技术主要有植物提取、植物稳定和植物挥发三类。植物提取是通过超积累或诱导积累植物将土壤

【作者简介】张树广 (1983—), 男, 中国山东泰安人, 本科, 环境影响评价工程师, 从事生态环境保护研究。

重金属吸收至地上部并收割移除。超积累植物对特定重金属有超强耐受和积累能力，如遏蓝菜对镉、蜈蚣草对砷的积累量惊人，它们通过根系分泌物活化重金属，依赖转运蛋白运输；诱导积累植物则靠外源添加螯合剂或微生物辅助增强普通植物吸收能力，但要注意螯合剂可能引发重金属淋溶风险^[1]。植物稳定是利用植物根系吸附、沉淀或络合作用减少重金属迁移性和生物有效性，机制包括根系固定、微生物协同和土壤改良。植物挥发是利用植物或根际微生物将重金属转化为挥发性形态释放到大气，主要针对汞、硒等元素，但可能引发大气污染，需严格控制应用场景。

土壤重金属修复受土壤性质、植物特性及环境条件三方面关键因素影响。土壤性质上，pH影响重金属溶解性和形态，酸性土利于镉、锌吸收，碱性土使铅、铜沉淀；有机质可固定或活化重金属；重金属形态决定生物有效性，水溶态和交换态易被吸收。植物特性方面，生长周期短的植物修复快但生物量低，长周期植物反之；生物量决定重金属提取总量，高生物量植物总吸收量可能更高；植物对重金属的耐受性取决于抗氧化系统和金属隔离机制，超积累植物耐受性更强，如蜈蚣草可在高砷土壤中生长。环境条件中，气候影响植物生长和重金属活性，湿润气候修复效率高；水文影响重金属迁移和植物吸收；根际微生物通过多种方式间接影响修复效率。

3 植物修复技术适配性研究

3.1 技术适配性评价框架

对植物修复技术的适配性进行综合评估，需构建系统性框架，其核心包含四大关键指标。修复效率着重考量重金属去除率与修复周期；成本效益需权衡投入产出比及长期维护成本；生态安全性要关注对土壤微生物和非靶标生物的影响；可操作性则评估技术复杂程度与规模化应用潜力。评估采用“实验室模拟-田间试验”双阶段验证模式。实验室阶段精准控制变量，如调节土壤pH、设定重金属浓度梯度等，以此筛选出高效的植物或微生物组合。田间试验则将其置于真实环境，检验技术的稳定性与实际效果。例如对比实验室与田间条件下遏蓝菜对镉的提取效率，分析环境因素对修复效果的作用，进而优化修复参数，保障技术从理论到实践精准适配，为重金属污染土壤治理提供科学可行的方案。

3.2 不同重金属污染场景的适配性分析

在土壤重金属污染修复中，针对不同污染场景需采取不同策略。单一重金属污染场景下，超积累植物是核心修复工具。像东南景天处理镉污染时，地上部镉含量能高达1000 mg/kg，远超普通植物，可大幅提升修复效率；蜈蚣草对砷积累量超干重1%，是砷污染土壤修复的优选。综合对比不同超积累植物的生物量、重金属积累能力及环境耐受性，能精准筛选出适配特定场景的最优植物，实现修复效果最大化。而面对复合重金属污染，单一植物修复受限，多植

物协同策略更为有效。如在铅-镉复合污染土壤中，印度芥菜与玉米间作，前者活化铅，后者吸收镉，形成双重修复机制，可使铅、镉去除率分别提升35%和22%。此外，引入微生物-植物联合修复技术，也能为复合污染治理提供更全面的方案。

3.3 土壤类型与植物修复的适配性

土壤性质对植物修复效果有着极为显著的影响。就土壤酸碱度而言，在酸性土壤(pH < 5.5)里，镉、锌等重金属溶解度较高，超积累植物修复效率远超碱性环境。像遏蓝菜，在pH 4.5的土壤中对镉的提取效率是pH 7.5时的2.3倍。而碱性土壤(pH > 7.5)中，铅、铜易形成氢氧化物沉淀，此时要么添加柠檬酸等螯合剂活化重金属，要么选用耐碱植物如碱蓬辅助修复^[2]。土壤质地也不容忽视，砂质土孔隙大、保水性差，虽利于根系扩展，但易造成重金属淋溶，可添加生物炭改良结构增强固定效果；黏质土质地紧密会限制根系生长，需选择根系发达的植物如向日葵，或深耕松土来提升修复效率。例如在砂质镉污染土壤中添加5%生物炭，玉米对镉吸收量降低40%，生物量还增长15%。

3.4 气候与植物修复的适配性

气候条件对植物修复重金属污染土壤的效果有着深刻影响。在干旱区，水分不足会削弱植物蒸腾作用，使重金属向地上部迁移受阻。为此，可借助滴灌或覆盖保墒材料来维持土壤湿度。像在干旱区种植耐旱超积累植物蜈蚣草，配合每周2次的滴灌，砷提取效率能达到湿润区的85%。湿润区降水充沛，但过量水分易引发重金属淋溶，此时需构建排水系统，或选用耐涝植物如水稻来防控风险。季节性变化也不容忽视，温带地区一年生超积累植物遏蓝菜仅夏季生长，冬季就需种植耐寒的黑麦草保持土壤覆盖；热带地区则能全年种植高生物量的向日葵，通过多茬轮作加快修复。而且，雨季与旱季交替的降水模式，要求动态调整水分管理策略，兼顾避免旱季土壤干旱影响植物活性与防止雨季重金属流失，实现精准平衡。

4 田间应用策略优化

4.1 植物选择与配置策略

在重金属污染土壤修复工作中，将超积累植物与本地植物组合应用，能有效平衡修复效率与生态稳定性。超积累植物，像遏蓝菜、蜈蚣草等，对特定重金属有着强大的吸收能力，然而它们也存在生物量低、抗逆性弱等短板。与之相比，本地植物如黑麦草、紫花苜蓿，适应性强且生物量大，恰好能弥补超积累植物的不足。二者混种可提升系统生物多样性，增强对极端气候和病虫害的抵御能力。以镉污染土壤为例，遏蓝菜与黑麦草间作，遏蓝菜专注于镉的提取，黑麦草则凭借高生物量固定土壤中的重金属，还能抑制扬尘，降低二次污染风险^[3]。

此外，轮作与间作模式的设计要充分考虑植物生长周

期和重金属吸收特性。轮作通过交替种植不同植物，避免单一作物长期消耗土壤养分，比如夏季种植超积累植物印度芥菜提取重金属，冬季改种绿肥植物紫云英恢复土壤肥力。间作利用植物空间互补性提高资源利用率，像玉米与苋菜间作，玉米高秆提供遮阴，苋菜低秆高效吸收土壤重金属，二者协同延长修复周期、改善土壤结构，构建起可持续的修复体系。

4.2 田间管理措施

土壤改良作为重金属污染修复的关键基础，作用重大。添加石灰调节酸性土壤 pH，能有效降低镉、铅等重金属的生物有效性；施用腐熟堆肥等有机肥，可增加土壤有机质，促使重金属与腐殖酸结合成稳定复合物，减少植物吸收。对于难溶性重金属，适量添加 EDTA 或柠檬酸等螯合剂能将其活化，但必须严格控制用量，防止重金属渗入地下水引发二次污染。

水分与养分管理要因地制宜。干旱区采用滴灌维持土壤湿度，可增强植物蒸腾作用，推动重金属向地上部迁移；湿润区则需构建排水系统，避免重金属淋溶。合理施用氮磷肥能提升植物生物量，但过量会使土壤酸化，增加重金属活性。如在镉污染土壤中适量增施磷肥，可促进镉与磷酸盐沉淀，降低其可利用性。病虫害防治方面，应优先选用生物防治手段，利用瓢虫等天敌昆虫或苏云金杆菌等微生物制剂控制虫害，减少化学农药对超积累植物的伤害。同时结合轮作、间作等农艺措施，破坏病虫害栖息环境，构建起生态可持续的修复体系。

4.3 修复效率提升技术

微生物辅助修复在提升植物修复重金属污染土壤效能方面成效显著。根际促生菌 (PGPR) 能分泌吲哚乙酸等植物激素，刺激植物根系生长，让根系更加发达，进而扩大对土壤中重金属的吸收范围；重金属转化菌，像硫酸盐还原菌，可将剧毒的可溶性六价铬转化为低毒的三价铬，极大降低重金属的生态风险。例如，在铅污染土壤中接种 PGPR 后，印度芥菜对铅的吸收量能提升 30%，修复效率大幅提高。农艺措施的优化要紧密切合植物生长特性。深耕可打破土壤板结层，促使重金属在土层中均匀分布，提高植物根系与重金属的接触效率^[4]；覆盖生物降解地膜既能保持土壤水分，又能抑制杂草生长，减少养分竞争；收割时间需精准拿捏，应选在植物体内重金属含量达到峰值时进行，比如蜈蚣草在抽穗期对砷的积累量最高，此时收割可实现修复效率最大化。

微生物辅助修复与优化后的农艺措施协同发挥作用，能够构建出更高效、可持续的植物修复技术体系，为重金属污染土壤治理提供有力支撑。

4.4 环境风险防控

重金属污染土壤修复需统筹阻断迁移与安全处置残体两大环节。在重金属迁移阻断方面，需构建多级防护体系：在修复区域周边设置隔离带，例如种植柳树等深根系植物，其发达的根系不仅能吸收固定土壤中的重金属，还可通过减缓水流速度降低土壤侵蚀，有效拦截重金属随径流扩散；同时，在修复区底部铺设防渗膜或添加膨润土等黏土矿物，可切断重金属向地下水迁移的路径，形成立体防护屏障。针对植物残体处理，超积累植物收割后残体中富集的重金属若处理不当易造成二次污染，因此需采用安全处置技术：将残体压缩制成生物炭，既能通过高温炭化过程固定重金属，又可实现资源化利用；或通过热解技术将残体转化为灰分，进一步加工成低重金属含量的建筑材料，从而在消除污染风险的同时实现废弃物循环利用。

5 结语

本文系统研究了土壤重金属污染植物修复技术的适配性并提出了田间应用策略。研究表明，植物修复技术受土壤类型、重金属种类、气候条件及植物特性等多因素影响，通过构建适配性评价框架，可针对不同污染场景、土壤类型及气候条件精准筛选修复植物与技术组合，优化田间管理措施能显著提升修复效率并降低环境风险。未来研究需进一步深化多因素交互作用机制，探索新型微生物-植物联合修复体系及智能化田间管理技术，如利用遥感监测与物联网技术实现修复过程的动态调控。同时，应加强修复技术的经济性评估与政策支持，推动产学研协同创新，加速植物修复技术从实验室研究向规模化田间应用的转化，为全球土壤重金属污染治理提供可持续的“绿色解决方案”。

参考文献

- [1] 李京芳,郭婷,李叶欢,等.有色金属矿区重金属污染土壤的植物修复技术研究[J].农业开发与装备,2026,(01):75-77.
- [2] 王海滨,邓萍,史静静.重金属污染土壤植物修复技术的强化策略探讨[J].皮革制作与环保科技,2025,6(23):115-117.
- [3] 申文红,陈香伊,孙健,等.土壤重金属污染植物修复技术研究[J].中国轮胎资源综合利用,2025,(06):186-188.
- [4] 冯桐桐.土壤重金属污染植物修复技术应用效果研究[J].黑龙江科学,2025,16(06):132-135.