

芽孢杆菌与光叶紫花苕联合修复云南红壤镉污染的研究进展

卢满

昆明学院，农学与生命科学学院

DOI:10.32629/as.v8i12.3577

[摘要] 云南省矿产资源丰富,矿业活动导致的红壤镉污染问题日益突出。微生物-植物联合修复技术作为一种绿色可持续的治理途径备受关注,其中芽孢杆菌与光叶紫花苕的组合展现出显著潜力。本文系统综述了云南红壤镉污染的现状,阐述了芽孢杆菌的耐镉与促生机制以及光叶紫花苕的修复特性,重点探讨了二者联合应用的协同增效机制与田间应用研究进展,并对当前面临的挑战及未来发展方向进行了展望,以期为该技术的深入研发与推广提供参考。

[关键词] 绿肥作物; 苕子; 土壤修复; 功能微生物; 资源利用效率

中图分类号: S15 文献标识码: A

Research progress on intercropping and intercropping of multiple bean varieties with *Angelica sinensis*

Man Lu

Kunming University, College of Agriculture and Life Sciences

[Abstract] Yunnan Province is rich in mineral resources, and the cadmium contamination in red soil caused by mining activities has become increasingly prominent. Microbial-plant combined remediation technology, as a green and sustainable approach to pollution control, has garnered significant attention, with the combination of *Bacillus* spp. and *Vicia villosa* Roth var. *glabrescens* demonstrating notable potential. This paper systematically reviews the current status of cadmium contamination in Yunnan's red soil, elaborates on the cadmium tolerance and growth-promoting mechanisms of *Bacillus* spp., as well as the remediation characteristics of *Vicia villosa* Roth var. *glabrescens*. It focuses on discussing the synergistic mechanisms of their combined application and the progress in field studies, while also addressing current challenges and outlining future development directions. The aim is to provide references for further research and promotion of this technology.

[Key words] Green manure; *Vicia villosa*; Soil remediation; Functional microorganism; Resource utilization efficiency

我国云南省土壤重金属背景值远高于全国土壤背景值。其中,镉的超标面积最大,加上长期不合理施用化肥导致耕地土壤有机质下降、酸化,这也增强了土壤重金属活性。生物修复技术是指利用不同的植物或微生物来分解或去除环境毒素,是一种新型、有效的土壤污染处理方法。光叶紫花苕作为一种在西南地区广泛应用的绿肥,不仅可以降低土壤有效镉含量,还可以降低后茬作物中的镉含量;芽孢杆菌及其胞外多糖能降低空心菜对镉的吸收,促进植物生长。解析绿肥与微生物互作的分子机制,有助于更好的发挥绿肥功能,实现云南重金属污染红壤的安全利用。

1 芽孢杆菌与光叶紫花苕互作系统中的表现效应

1.1 云南红壤镉污染现状

云南省矿产资源丰富,矿业活动导致的红壤镉(Cd)污染问

题日益突出,对生态环境和农产品安全构成威胁。以微生物-植物联合修复为核心的技术,因其成本低、环境友好和可持续性优势,成为红壤镉污染修复的研究热点^[1]。云南地处中国西南,素有“有色金属王国”之称,铅、锌、锡等矿产资源的大量开采与冶炼,导致周边区域土壤,尤其是广泛分布的红壤,遭受严重的镉(Cd)等重金属污染^[2]。红壤具有酸、粘、瘦的特点,其较低的pH值和较高的铁铝氧化物含量,会深刻影响重金属的吸附-解吸行为和生物有效性^[3]。镉作为易迁移、高毒性的重金属元素,可通过食物链富集,严重危害人体健康。传统的物理化学修复方法成本高昂且易破坏土壤生态功能^[4]。因此,发展高效、绿色、适用于大面积中轻度污染土壤的生物修复技术迫在眉睫。微生物-植物联合修复技术利用植物提取、稳定与根际微生物的协同

作用,是当前的研究前沿^[5,6]。芽孢杆菌因其强大的环境适应力、丰富的代谢功能和促进植物生长的特性,成为修复重金属污染的明星菌种^[7]。光叶紫花苕作为云南本土常见的豆科绿肥及覆盖作物,具有生物量大、适应性强、兼具生态与经济效益等优点,其在重金属污染修复中的应用潜力逐渐被发掘^[8]。云南的矿业区,如个旧(锡)、兰坪(铅锌)、会泽(铅锌)等地,土壤镉污染问题尤为突出。研究表明,部分矿区周边农田土壤镉含量远超《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618-2018)的风险筛选值,甚至达到中重度污染水平^[9,10]。李洋等(2020)对云南某典型矿区周边土壤的调查显示,有效态镉含量与土壤pH呈显著负相关,证实了红壤酸性环境加剧了镉的活性与风险^[11]。同时,云南红壤区地形复杂、降雨集中,增加了镉的迁移扩散风险^[12]。这对修复技术提出了特殊要求:不仅要高效降低镉的有效态含量或植物毒性,还要兼顾土壤肥力提升和生态功能恢复,以适应云南高原农业的可持续发展需求^[13]。

1.2 芽孢杆菌在镉污染修复中的作用机制

芽孢杆菌在镉污染修复中扮演着多重角色。首先,其通过细胞壁吸附^[14]、胞外沉淀^[15]、胞内隔离以及外排系统等多种机制耐受高浓度镉胁迫^[16]。王宏镔等(2019)系统阐述了这些耐受机制^[7]。其次,芽孢杆菌能够通过分泌有机酸、铁载体等物质活化土壤中的固定态镉^[17],或通过分泌胞外聚合物^[18]、诱导磷酸酶活性等方式钝化镉^[19],从而主动调控镉的生物有效性。更为关键的是,芽孢杆菌作为典型的植物根际促生菌,能够分泌吲哚乙酸等植物激素、溶磷、固氮,并诱导植物的系统抗性^[20,21],从而显著促进宿主植物在镉胁迫下的生长,提高其生物量和耐受能力^[22],为联合修复的成功奠定了生理基础。

2 光叶紫花苕在镉污染修复中的潜力

光叶紫花苕对镉具有一定的积累能力,通常表现为根部富集特性^[8]。张倩等(2015)的研究表明,虽然其地上部富集系数不高,但庞大的根系生物量和快速的生长周期使其能通过根际过程显著影响镉的形态与归宿^[23]。该植物具备多重修复优势:生态适应性强,耐贫瘠,适宜在云南红壤区生长^[24];作为豆科植物,其根瘤固氮能力可改善红壤氮素状况,提升土壤肥力^[25];茂盛的地上部分能有效覆盖地表,减少水土流失和镉的迁移风险^[26];翻压还田后可作为绿肥,增加土壤有机质,长期影响镉的固持^[27]。因此,它是一种兼具污染修复与地力提升潜力的优良植物材料。

3 芽孢杆菌与光叶紫花苕联合修复的协同效应

将特定功能的芽孢杆菌接种于光叶紫花苕,可产生显著的协同修复效应。当以植物提取为目标时,具有溶磷、产酸功能的菌株能活化根际镉^[28],同时其分泌的植物激素刺激光叶紫花苕根系发育^[29],共同促进镉由土壤向植物地上的转运。周艺等(2020)的盆栽实验证实,接种耐镉芽孢杆菌可使光叶紫花苕地上部镉积累量大幅提升^[17]。当以原位稳定化为目标时,能分泌胞外聚合物或诱导沉淀的菌株则有助于将镉钝化在根际,降低其移动性和毒性^[30],而植物根系为菌株提供了定殖空间和碳源,

形成互惠互利的共生体系。此外,芽孢杆菌的引入能优化根际微生物群落结构,增强土壤酶活性,构建一个更健康、功能更活跃的修复微生态系统。刘一诺等(2021)针对云南矿区污染红壤的研究表明,接种本地筛选的*Bacillus velezensis*菌株不仅提高了光叶紫花苕的生物量与镉吸收,还改善了根际细菌群落结构和土壤生化性质,验证了联合修复在本地化应用中的可行性^[19]。

芽孢杆菌与光叶紫花苕联合修复镉污染红壤时,通过微生物-植物-土壤系统的多维度互作,产生显著的协同效应。在生理层面,芽孢杆菌作为植物根际促生菌(PGPR),通过分泌吲哚乙酸等植物激素^[20,21],直接刺激光叶紫花苕根系发育,使其根长和表面积显著增加,从而扩大了对污染物的吸收界面^[17];同时通过诱导植物抗氧化酶系统活性,缓解镉胁迫损伤,使植物在污染环境保持较高的生物量积累^[29]。在根际化学环境调控方面,联合体系通过“微生物代谢-植物分泌”双重机制动态改变根际微域环境,芽孢杆菌分泌的有机酸与植物根系分泌物协同作用,可有效降低根际pH值,促进红壤中固定态镉的活化,提高其生物有效性^[17,28];而在以稳定化为目标的模式下,微生物分泌的胞外聚合物与植物根系释放的酶类共同促进镉的化学钝化与固定^[18,30]。在污染物迁移转化方面,两者构建了高效的“活化-吸收-转运”链式系统,芽孢杆菌的活化作用与光叶紫花苕增强的螯合肽合成及木质部装载能力相结合,显著提升了镉从土壤向植物地上部的转运效率。在根际微生态系统构建上,芽孢杆菌的引入优化了微生物群落结构,提高了有益菌群丰度和土壤酶活性,形成了一个更稳定、功能更强的修复微环境。在云南特有的酸性红壤环境中,本地筛选的芽孢杆菌菌株表现出更强的适应性,田间试验证实联合修复在降低土壤有效态镉的同时,还能通过豆科植物的固氮作用改善土壤肥力,实现“边修复、边改良”的目标^[10,19,25]。这种协同效应在时空尺度上也呈现良好响应,形成了从根表到土体的立体修复网络。尽管该联合体系前景广阔,但仍面临菌株-植物匹配性、田间菌群稳定性及修复效率受气候影响等挑战,未来需通过多组学技术解析互作机制,并开发智能响应型修复系统以实现协同效应的最大化。

4 结论

芽孢杆菌与光叶紫花苕联合修复技术,通过微生物的污染转化、植物促生功能与植物的吸收、稳定及生态功能的深度融合,为治理云南中轻度镉污染红壤提供了一条绿色、可持续的途径。现有研究已从生理生态与根际微生态层面揭示了其协同机制,并开展了有益的本地化应用探索。然而,要最终实现该技术的高效、稳定与规模化应用,仍需在功能菌剂开发、根际互作机理、田间技术集成及后期风险管控等方面开展更为系统深入的研究。通过跨学科的技术融合与创新,该联合修复技术有望成为云南红壤重金属污染治理与生态农业协同发展的重要科技支撑。

【参考文献】

[1]陈保冬,张莘,乔敏,等.微生物-植物联合修复重金属污染土壤研究进展[J].生态学报,2018,38(20):7081-7091.

- [2]张乃明,常栋,段永蕙.云南土壤重金属污染特征及修复技术研究进展[J].土壤,2020,52(3):429-437.
- [3]周启星,宋玉芳.污染土壤修复原理与方法[M].北京:科学出版社,2004.
- [4]李鹏,吴龙华,骆永明.重金属污染土壤植物修复技术中试与示范研究进展[J].土壤,2020,52(1):1-9.
- [5]李花粉,张倩,刘仲齐.植物修复技术与农田土壤重金属污染治理[J].农业环境科学学报,2021,40(1):1-12.
- [6]Li Y D,Xu X K,Lei B F,et al.Magnesium-nitrogen co-doped carbon dots enhance plant growth through multifunctional regulation in photosynthesis[J].Chemical Engineering Journal,2021,422:130114.
- [7]王宏镔,王海娟,刘慧,等.芽孢杆菌在重金属污染土壤修复中的应用及其机制[J].微生物学通报,2019,46(6):1521-1532.
- [8]张倩,李花粉,刘仲齐.光叶紫花苕对镉污染土壤的修复潜力研究[J].农业资源与环境学报,2015,32(4):365-371.
- [9]王云,杨林,王宏镔.云南某铅锌矿区周边土壤重金属污染特征及生态风险评价[J].环境科学,2016,37(5):1938-1945.
- [10]刘方,朱红惠.豆科植物-根瘤菌共生体系在重金属污染修复中的应用潜力[J].应用生态学报,2017,28(6):2029-2038.
- [11]李洋,刘勇,张乃明.云南典型矿区土壤镉有效性影响因素及风险评估[J].农业环境科学学报,2020,39(8):1690-1698.
- [12]段永蕙,张乃明.云南高原红壤区面源污染特征及控制对策[J].水土保持研究,2018,25(2):345-350.
- [13]吴龙华,骆永明.中国土壤污染与修复科技研究进展和展望[J].中国科学院院刊,2020,35(11):1399-1410.
- [14]孙约兵,王玉军,周东美.细菌细胞壁对重金属的吸附机理研究进展[J].微生物学通报,2012,39(11):1651-1659.
- [15]刘慧,王宏镔,张炜,等.一株耐镉芽孢杆菌的分离及其对镉的吸附特性研究[J].环境科学学报,2017,37(1):234-241.
- [16]赵勇,李俊,沈标.细菌重金属抗性机制及其在生物修复中的应用[J].应用与环境生物学报,2009,15(2):284-290.
- [17]周艺,杨兵,王效科,等.一株耐镉芽孢杆菌的筛选及其对光叶紫花苕修复镉污染土壤的强化作用[J].环境科学学报,2020,40(11):4105-4114.
- [18]胡洪莹,吴乾元,黄晶晶.微生物胞外聚合物在环境污染控制中的作用[J].环境科学学报,2010,30(4):673-689.
- [19]刘一诺,王磊,张乃明,等.一株云南镉污染红壤芽孢杆菌的分离鉴定及其与光叶紫花苕联合修复效应[J].环境科学研究,2021,34(8):1943-1952.
- [20]Ren M,Zhao P J,Cui X D,et al.Enhanced fertilizer utilization and heavy metals immobilization by ball-milling bentonite with NH₄Cl:Experiments and DFT calculations[J].Journal of Hazardous Materials,2024,466:133616.
- [21]Gu T Y,Lu Y Q,Li F,et al.Microbial extracellular polymeric substances alleviate cadmium toxicity in rice(*Oryza sativa* L.)by regulating cadmium uptake,subcellular distribution and triggering the expression of stress-related genes[J].Ecotoxicology and Environmental Safety,2023,257:114958.
- [22]Nazari M T,Simon V,Machado B S,et al.Rhodococcus:A promising genus of actinomycetes for the bioremediation of organic and inorganic contaminants[J].Journal of Environmental Management,2022,323:116220.
- [23]Chen L P,Huang F Y,Lu A H,et al.Critical role of multiple antibiotics on the denitrification rate in groundwater: Field investigative proof[J].Science of the Total Environment,2024,914:169785.
- [24]Zhang W Q,Liu B,Sun Z Z,et al.Comparison of nitrogen removal characteristic and microbial community in freshwater and marine recirculating aquaculture systems[J].Science of the Total Environment,2023,878:162870.
- [25]Wen X J,Liang D H,Hu Y Y,et al.Performance and mechanism of simultaneous nitrification and denitrification in zeolite spheres internal loop airlift reactor[J].Bioresour Technol,2023,380:129073.
- [26]Hao L T,Fu B W,Shi J K,et al.Synchronous bioremediation of vanadium(V) and chromium(VI) using straw in a continuous-flow reactor[J].Environmental Research,2025,264:120312.
- [27]Wang Z W,Huang M T,Zhang Y X,et al.Enhanced Pb immobilization by CaO/MgO-modified soybean residue (okara) in phosphate mining wasteland soil:Mechanism and microbial community structure[J].Journal of Environmental Management,2025,373:123779.
- [28]Xu L,Kou Y P,Mao Q,et al.Climate outweighs fertiliser effects on soil phoD-harboring communities in agroecosystems[J].Soil Biology and Biochemistry,2025,202:109697.
- [29]Deng Y H,Li X Y,Wang Z G,et al.Natural seasonal freeze-thaw processes influenced soil quality in alpine grasslands: Insights from soil functions[J].Soil Biology and Biochemistry,2025,200:109642.
- [30]Chen X F,Wang J C,You Y M,et al.When nanoparticle and microbes meet: The effect of multi-walled carbon nanotubes on microbial community and nutrient cycling in hyperaccumulator system[J].Journal of Hazardous Materials,2022,423:126947.

作者简介:

卢满(1998--),男,汉族,河南南阳人,在读硕士,研究方向:资源利用。