

基于丛枝菌根真菌的矿区多重污染土壤修复机制及应用前景

拓宁 杨耀梅 李芳 高芳

神木职业技术学院, 陕西省榆林市, 719300;

摘要: 矿区长期开采活动导致土壤面临重金属与养分匮乏、酸化等多重污染叠加问题, 严重破坏生态系统结构与功能。丛枝菌根真菌 (Arbuscular Mycorrhizal Fungi, AMF) 作为一类广泛存在的土壤共生微生物, 可与多数陆地植物形成共生体系, 通过多种途径调控土壤-植物系统中污染物的迁移转化, 增强植物逆境适应性。本文系统阐述了 AMF 修复矿区多重污染土壤的直接与间接机制, 分析了影响修复效果的关键因素, 结合典型应用案例探讨其实际应用价值, 最后指出当前技术瓶颈并展望未来发展方向, 为矿区生态修复技术的优化与推广提供理论参考。

关键词: 丛枝菌根真菌; 矿区土壤; 多重污染; 修复机制

DOI: 10.69979/3029-2727.26.03.085

引言

矿产资源开发是国民经济发展的重要支撑, 但长期露天开采、尾矿堆积及废水排放等活动, 导致矿区土壤形成以重金属污染为核心, 伴随土壤酸化、养分贫瘠、结构破坏的多重污染格局。其中, 铅、锌、镉、铬、砷等重金属具有强毒性、难降解性和生物累积性, 不仅抑制植物生长, 还可通过食物链传递威胁人体健康; 而土壤有机质匮乏、氮磷流失及 pH 值失衡, 则进一步加剧生态系统退化, 阻碍植被自然恢复。

当前矿区污染土壤修复技术主要包括工程措施、物理化学修复和生物修复三大类。工程措施与物理化学修复虽见效快, 但存在成本高、二次污染风险大、破坏土壤结构等弊端, 难以大规模应用。生物修复因具有环境友好、成本低廉、可持续性强的优势, 成为矿区生态修复的研究热点。其中, 植物-微生物联合修复凭借协同增效作用, 显著提升修复效率, 逐渐取代单一修复模式。

丛枝菌根真菌作为土壤微生物区系的关键组成部分, 与宿主植物形成的共生体系在逆境适应中发挥重要作用。研究发现, 重金属污染区域常存在高多样性的 AMF 群落, 这些耐性 AMF 可通过增强植物养分吸收、调控重金属迁移转化等方式, 帮助植物在污染土壤中存活生长, 同时改善土壤理化性质, 加速生态系统重建进程。本文聚焦 AMF 在矿区多重污染土壤修复中的作用机制与应用实践, 深入剖析其技术优势与现存问题, 为推动菌根技术在矿区生态修复中的规范化应用提供科学依据。

1 丛枝菌根真菌修复矿区多重污染土壤的核心机制

AMF 对矿区多重污染土壤的修复作用通过直接调控污染物行为和间接改善植物生长环境两条路径实现,

形成真菌-植物-土壤三位一体的协同修复体系, 有效缓解重金属毒害与土壤贫瘠的双重胁迫。

1.1 直接修复机制

菌丝对重金属的吸附与固持 AMF 的菌丝网络可在土壤中广泛延伸, 显著扩大根际作用范围。菌丝细胞壁含有的几丁质、纤维素等成分及表面的功能基团 (如羟基、羧基、磷酸基团), 可通过静电吸附、配位结合等方式直接固定土壤中的重金属离子, 形成稳定的复合物, 降低重金属的生物有效性。研究表明, AMF 菌丝可有效吸附多种重金属离子, 且菌丝体的固持作用可减少重金属向植物地上部的转运, 降低植物毒害风险。

改变根际重金属形态 AMF 通过分泌有机酸、磷酸酶等代谢产物, 调控根际土壤 pH 值和氧化还原电位, 进而改变重金属的化学形态。例如, AMF 分泌的有机酸可与重金属离子形成络合物, 促进难溶性重金属的溶解, 提升植物萃取效率; 同时, 有机酸还可通过调节土壤 pH 值, 促进重金属与土壤胶体结合形成沉淀, 增强土壤固定效果。此外, AMF 还可通过影响根际微生物群落结构, 间接调控重金属形态转化, 进一步降低污染风险。

强化土壤碳固存与结构改良矿区土壤普遍存在有机质含量低、团聚体稳定性差等问题。AMF 与植物共生过程中, 可将从宿主植物获取的碳水化合物转化为球囊霉素相关土壤蛋白 (GRSP) 分泌到土壤中。GRSP 作为一种重要的有机胶结物质, 可促进土壤微团聚体的形成与稳定, 提升土壤孔隙度和保水保肥能力; 同时, GRSP 还可通过络合作用固定重金属, 减少其迁移扩散, 实现污染修复与土壤改良的同步进行。

1.2 间接修复机制

提升植物养分吸收效率矿区土壤的严重养分匮乏

是制约植被恢复的关键因素。AMF的菌丝网络可突破植物根系的吸收限制,高效吸收土壤中的氮、磷、钾等矿质养分,尤其是在低磷土壤中,AMF可通过分泌磷酸酶活化土壤难溶性磷,显著提升磷的生物有效性。研究显示,接种AMF的植物幼苗,根际土壤活性磷含量较对照显著提升,植株生物量显著增加。充足的养分供应可增强植物光合作用和抗逆性,为重金属修复提供物质基础。

增强植物抗氧化胁迫能力重金属胁迫会导致植物体内活性氧自由基大量积累,破坏细胞膜结构和生理代谢。AMF可通过调控宿主植物的抗氧化系统,增强超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)等抗氧化酶活性,降低丙二醛(MDA)含量,减轻氧化损伤。例如,接种耐重金属促生菌与AMF的复合体系后,植物叶片SOD和CAT活性显著提升,有效缓解了重金属胁迫对植株的伤害。

调控植物根系形态与微生物互作AMF可促进宿主植物根系生长,增加根长、根表面积和侧根数量,提升根系对水分和养分的吸收能力。同时,AMF还可与根际促生菌、放线菌等有益微生物形成协同互作,改善根际微生态环境。例如,AMF与根际促生菌联合作用时,可通过分泌生长调节剂等物质,进一步促进植物生长,同时增强重金属富集能力,植株重金属积累量显著提升。

2 影响AMF修复效果的关键因素

AMF在矿区多重污染土壤中的修复效果受生物与非生物因素的综合调控,明确各因素的影响规律是优化修复策略的前提。

2.1 生物因素

AMF菌株特异性不同AMF菌株的耐性、定殖能力和功能存在显著差异。部分AMF菌株更适应养分贫瘠的污染土壤,而另一些菌株在肥沃土壤中表现更优。此外,土著AMF菌株因长期适应本地污染环境,其修复效果通常优于外来菌株,且可降低微生物入侵风险。因此,筛选本地耐性AMF菌株是提升修复效率的关键。

宿主植物兼容性AMF与植物的共生兼容性直接影响共生体系的建立效率。豆科、禾本科等植物易与AMF形成共生关系,而部分十字花科植物则难以定殖。在矿区修复中,选择兼具重金属耐性和菌根依赖性的植物,可显著提升AMF的定殖率和修复效果。例如,耐性植物与AMF共生后,不仅生物量增加,还可显著提升土壤磷有效性,是重金属尾矿区修复的优选模式。

根际微生物互作根际微生物群落结构对AMF的功能发挥具有重要调控作用。有益微生物(如固氮菌、溶

磷菌)可与AMF协同增效,增强植物抗逆性;而病原微生物则可能抑制AMF定殖,降低修复效果。研究表明,土壤病原真菌丰度是预测AMF接种成功的关键因素,调控根际微生物平衡可显著提升修复效率。

2.2 非生物因素

污染特征重金属种类、浓度及复合污染程度直接影响AMF的耐性和修复效果。低浓度重金属可诱导AMF产生耐性机制,而高浓度重金属则会抑制AMF孢子萌发和菌丝生长。此外,重金属与有机污染物的复合污染会增加修复难度,需结合AMF与降解菌的协同作用提升修复效果。

土壤理化性质土壤pH值、有机质含量、质地等理化性质通过影响AMF定殖和重金属形态调控修复效果。极端pH值会抑制AMF生长,而适宜的pH值范围可提升定殖率;土壤有机质可通过改善土壤结构、络合重金属等方式,为AMF和植物生长提供良好环境。

环境条件温度、湿度、光照等环境因素通过影响AMF代谢活性和植物生长,间接调控修复效果。适宜的温度和湿度可促进AMF菌丝生长和孢子萌发,提升共生体系的稳定性;而极端气候条件则可能导致修复效率下降。

3 AMF在矿区污染土壤修复中的应用实践与案例

近年来,AMF修复技术已在多种类型矿区污染土壤修复中开展应用,形成了AMF-耐性植物-土壤改良剂的复合修复模式,取得了显著的生态和经济效益。

3.1 重金属矿区修复案例

在重金属矿区酸性矿山废水污染区,采用AMF与矿物吸附材料复合修复技术,构建生物-化学协同治理工艺。AMF与本地优势植物形成的共生体系,不仅提升了植物对重金属的耐性,还通过调节根际pH值,促进重金属沉淀;配合矿物吸附材料,实现了废水达标排放,处理后水质pH值恢复至中偏碱性,重金属去除率显著提升,处理成本远低于传统物理化学方法。该技术已逐步植入矿山现有水处理系统,实现规模化应用。

在重金属尾矿区,筛选出耐性AMF菌株与本地耐性植物构建联合修复体系。接种AMF后,植物根系定殖率显著提升,植株生物量明显增加,叶片抗氧化酶活性显著提升,重金属富集系数达较高水平。同时,土壤活性磷含量显著提升,酸化程度明显缓解,为植被恢复提供了良好条件。该模式已被推荐为重金属尾矿区生态修复的优选方案。

3.2 稀土矿区修复案例

在废弃稀土矿区,采用AMF-多功能土壤改良剂-植被重建综合技术。AMF通过改善土壤结构、提升养分有效性,配合天然黏土矿物改良剂,显著降低了水土流失率和氮污染程度。修复后矿区植被覆盖率显著提升,生物多样性显著增加;引入经济作物种植后,果实重金属含量符合国家标准,实现了生态修复与经济增值的双赢。

3.3 复合污染场地修复案例

针对化工场地重金属-有机污染物复合污染问题,采用AMF与电动力学技术联用模式。通过电动力学技术将污染物聚集至特定区域,再利用AMF与降解菌的协同作用,实现重金属固定和有机污染物降解。修复后土壤重金属和有机污染物去除率均达到较高水平,修复成本较市场平均价格显著降低,为复合污染场地修复提供了经济高效的技术方案。

4 AMF 修复技术的应用前景与挑战

4.1 应用前景

随着生态修复需求的不断提升,AMF修复技术凭借其独特优势,在矿区生态修复领域具有广阔的应用前景。一是在低中浓度多重污染土壤修复中,可构建标准化的AMF-耐性植物联合修复模式,实现大规模推广;二是与工程技术、化学改良剂等联用,可提升高浓度污染土壤修复效率,拓展应用范围;三是结合生态农业模式,实现矿区修复后土地的增值利用,推动生态修复产业化发展。此外,AMF在碳汇提升、生物多样性保护等方面的协同作用,可为双碳目标实现提供支撑。

4.2 现存挑战

尽管AMF修复技术已取得显著进展,但在实际应用中仍面临诸多挑战:一是接种剂质量不稳定,商业接种剂普遍存在活性孢子密度低、污染风险高、田间表现波动大等问题,仅有少数产品能显著促进植物生长;二是修复效果受环境条件影响显著,缺乏针对不同矿区类型的差异化修复策略,一刀切模式导致应用效果不佳;三是AMF群落动态监测技术滞后,难以精准评估其在修复过程中的功能变化;四是土著AMF群落恢复技术不成熟,外来菌株引入可能引发生态风险。

4.3 未来发展方向

针对上述挑战,未来应重点开展以下研究:一是建立AMF接种剂标准化生产体系,明确活性孢子密度、纯度等质量基准,开发适配不同矿区环境的专用接种剂;二是构建修复前评估-策略性接种-生态支持系统的技术

框架,根据矿区污染特征和退化程度,制定差异化修复方案;三是研发AMF群落动态监测技术,利用长读测序等新兴技术,精准追踪接种菌株的定殖和功能变化;四是强化土著AMF资源挖掘与利用,通过土壤改良、信号物质调控等方式,促进土著AMF群落恢复,提升修复的生态安全性;五是推动AMF修复技术的标准化和产业化,加强与企业的合作,加速技术成果转化应用。

5 结论

丛枝菌根真菌通过直接固持重金属、调控污染物形态和间接提升植物抗逆性、改善土壤理化性质等机制,在矿区多重污染土壤修复中发挥着不可替代的作用。实践证明,AMF与植物、土壤改良剂等联用的复合修复模式,可实现污染治理与生态重建的同步进行,具有显著的经济和生态效益。然而,该技术仍面临接种剂质量不稳定、环境适应性差、监测技术滞后等挑战。未来通过建立标准化技术体系、强化土著资源利用、推动多技术联用等措施,可进一步提升AMF修复技术的稳定性和规模化应用能力,为矿区生态修复提供更高效、可持续的解决方案。

参考文献

- [1]张淑娟,陈昕龙,亓静凡,等.基于丛枝菌根的钒污染土壤修复[J].生态环境学报,2025,34(4):631-641. DOI:10.16258/j.cnki.1674-5906.2025.04.012.
- [2]魏莹等."丛枝菌根真菌-植物共生体系在石油污染土壤修复上的研究进展."#i{陕西农业科学}70.1(2024):92-97.
- [3]李少朋,毕银丽,孔维平,等.丛枝菌根真菌在矿区生态环境修复中应用及其作用效果[J].环境科学,2013,34(11):5. DOI:CNKI:SUN:HJKZ.0.2013-11-050.
- [4]毕银丽等."矿区复垦地接菌驱动植物土壤系统中光合碳分配与稳定机制."#i{煤炭学报}50.1(2025):572.
- [5]赵昕,吴子龙,吴运东,等.丛枝菌根真菌-植物修复矿区重金属污染土壤的研究进展[J].化工环保,2018,038(004):369-372.
- [6]张弘,王丽萍,张莉,等.丛枝菌根真菌与矿区复垦土壤固碳指标的相关性研究[J].2011.

作者简介:拓宁,1992.07,汉,女,学位:硕士研究生,助教,研究方向:生物化学与分子生物学。课题编号:2024ZK04,主办单位:神木职业技术学院,课题名称:微生物对矿区土壤的改良及修复研究