

微生物在矿业土壤修复中的作用

蓝林锋

紫金矿业建设有限公司 福建 龙岩 364200

摘要：矿业活动在带来经济效益的同时，对土壤环境造成了严重破坏，矿业土壤修复成为亟待解决的重要问题。微生物因其独特的生理生态特性，在矿业土壤修复中发挥着不可替代的作用。本文详细阐述了微生物修复矿业土壤的原理，包括生物吸附、生物转化、生物沉淀等，分析了微生物在去除重金属、降解有机污染物、改善土壤结构与肥力等方面的具体作用机制，最后对微生物修复矿业土壤的发展前景进行了展望，旨在为矿业土壤修复提供理论支持与实践指导。

关键词：微生物；矿业土壤修复；重金属；有机污染物；作用机制

1 引言

矿业是重要产业，但开采等活动产生含重金属等有害物质的废渣、废水、废气，严重污染周边土壤，导致土壤质量下降、生态受损，还威胁人类健康、制约矿区可持续发展，开展修复工作意义重大。传统修复方法虽能去污，但成本高、有二次污染、破坏土壤结构。而微生物修复技术成本低、环境友好、无二次污染、可处理多种污染物，成为研究热点。例如，广东大宝山矿区采用微生物-植物联合修复技术后，土壤镉含量下降67%，作物镉超标率从85%降至12%。微生物能将污染物转化为无害或低毒物质，研究其在修复中的作用，对推动技术发展有重要价值。

2 微生物修复矿业土壤的原理

2.1 生物吸附

微生物细胞表面通过物理化学作用，将土壤重金属离子吸附到细胞表面，细胞壁是主要场所，含多糖、蛋白质等成分，其羧基等官能团能与重金属离子发生络合、离子交换、静电吸附等作用，固定离子。如细菌细胞壁肽聚糖和脂多糖的负电荷基团，可静电吸附带正电的重金属离子；真菌细胞壁几丁质和葡聚糖通过离子交换和络合作用吸附重金属。湖南某铅锌矿区接种黑曲霉后，土壤铅离子吸附量达128mg/g，较未处理组提高3.2倍。生物吸附快速高效，能降低土壤重金属离子浓度，为后续过程创造条件。

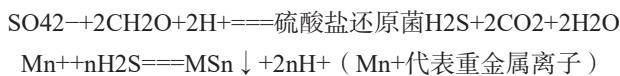
2.2 生物转化

微生物通过代谢活动将污染物转化为其他物质。对重金属，可通过氧化还原等改变其价态和化学形态，降低毒性与迁移性。如铬，六价铬毒性大、迁移性强，假单胞菌属菌株能利用还原酶，以有机物等为电子供体，将其还原为低毒、迁移性低的三价铬，三价铬更易被吸

附或沉淀。对有机污染物，微生物可通过分解和合成代谢将其降解为二氧化碳等无害物，途径有好氧和厌氧降解^[1]。好氧降解在有氧条件下，微生物以氧气为电子受体氧化分解有机物；厌氧降解在无氧条件下，以硝酸盐等为电子受体还原分解有机物，可降解难降解有机物。

2.3 生物沉淀

微生物代谢产生物质与土壤重金属离子反应生成难溶性沉淀物，固定重金属离子。如硫酸盐还原菌在厌氧条件下将硫酸盐还原为硫化氢，与铅等重金属离子生成金属硫化物沉淀，反应方程式如下：



此外，微生物还能产生碳酸盐等沉淀。如某些细菌分泌碳酸酐酶生成碳酸根离子，与钙等重金属离子结合形成碳酸盐沉淀。生物沉淀可降低重金属活性和迁移性，减少危害。

3 微生物在矿业土壤修复中的具体作用

3.1 去除重金属污染物

3.1.1 降低重金属毒性

如前文所述，微生物能够通过生物转化作用改变重金属的价态和化学形态，降低其毒性。除了铬的还原外，汞在自然界中主要以零价汞（Hg⁰）、一价汞（Hg²⁺）和二价汞（Hg²⁺）的形式存在，其中二价汞的毒性最强。某些微生物能够将二价汞还原为零价汞，零价汞的挥发性较强，可以通过挥发作用从土壤中去除，从而降低土壤中汞的毒性。砷在土壤中主要以亚砷酸盐（As³⁺）和砷酸盐（As⁵⁺）的形式存在，亚砷酸盐的毒性高于砷酸盐。一些微生物能够将亚砷酸盐氧化为砷酸盐，降低砷的毒性。同时，微生物还能够将砷酸盐还原为亚砷酸盐，但在还原过程中，部分微生物能够将砷以

气态形式挥发出去，进一步减少土壤中砷的含量。广西某砷矿区接种砷氧化菌后，土壤亚砷酸盐（As³⁺）含量下降82%，同时气态砷挥发量占比达35%。

3.1.2 固定重金属

微生物通过生物吸附和生物沉淀作用能够将重金属离子固定在土壤中，减少其在土壤中的迁移性和生物可利用性。生物吸附使重金属离子吸附在微生物细胞表面，形成稳定的复合物。例如，在铜污染土壤中，某些真菌细胞表面的多糖能够与铜离子发生强烈的吸附作用，将铜离子固定在细胞表面，防止其进入植物体内和地下水。生物沉淀则使重金属离子转化为难溶性的沉淀物，沉淀在土壤颗粒表面或孔隙中。在铅锌矿污染土壤中，接种硫酸盐还原菌后，硫酸盐还原菌产生的硫化氢与土壤中的铅、锌等重金属离子反应生成金属硫化物沉淀。这些沉淀物具有较低的溶解度，能够在土壤中长期稳定存在，有效固定了重金属，降低了重金属对环境和生物的危害。辽宁某废弃金矿修复项目显示，接种SRB后土壤铅浸出毒性从18.6mg/L降至0.8mg/L，符合《土壤环境质量标准》。

3.1.3 促进重金属的植物提取

一些微生物能够与植物形成共生关系，促进植物对重金属的吸收和积累，从而实现重金属从土壤中去除的目的。丛枝菌根真菌（AMF）是一类广泛存在于土壤中的真菌，它能够与大多数陆生植物形成共生体。AMF的菌丝可以扩展到植物根系无法到达的土壤区域，增加植物对水分和养分的吸收面积。同时，AMF还能够分泌一些有机酸和酶类物质，改变土壤的理化性质，促进重金属的溶解和活化，提高植物对重金属的吸收效率。例如，在镉污染土壤中，接种AMF后，植物对镉的吸收量显著增加^[2]。此外，某些根际细菌也能够分泌植物生长调节物质，如吲哚乙酸（IAA）、细胞分裂素等，促进植物生长，增强植物对重金属的耐受性和积累能力。这些微生物与植物形成的共生体系为重金属污染土壤的植物修复提供了一种有效的途径。

3.2 降解有机污染物

3.2.1 多环芳烃（PAHs）的降解

多环芳烃是一类具有致癌、致畸和致突变作用的持久性有机污染物，在矿业土壤中广泛存在。许多微生物能够以多环芳烃为碳源和能源进行生长代谢，将其降解为无害物质。假单胞菌、芽孢杆菌、分枝杆菌等细菌能够分泌多种加氧酶，如单加氧酶和双加氧酶，对多环芳烃进行开环氧化。以萘为例，细菌首先通过双加氧酶将萘氧化为1,2-二氢化萘-1,2-二醇，然后进一步氧化开环

生成邻苯二甲酸，邻苯二甲酸再经过一系列的代谢反应最终矿化为二氧化碳和水。真菌中的白腐菌、黄孢原毛平革菌等也能够产生木质素过氧化物酶、锰过氧化物酶和漆酶等酶类，对多环芳烃进行降解。这些酶具有广谱的氧化活性，能够攻击多环芳烃的芳香环，使其开环断裂，逐步降解为小分子有机物。

3.2.2 石油烃的降解

矿业活动中使用的润滑油、液压油等石油产品泄漏会导致土壤受到石油烃污染。微生物降解是去除土壤中石油烃的主要途径之一。许多细菌和真菌都能够降解石油烃，其中细菌是主要的降解者。细菌中的假单胞菌属、不动杆菌属、黄杆菌属等具有较强的石油烃降解能力。这些细菌能够分泌多种酶，如烷烃单加氧酶、环烷烃单加氧酶、芳香烃双加氧酶等，对石油烃中的烷烃、环烷烃和芳香烃等成分进行氧化降解。例如，对于正烷烃，细菌通过烷烃单加氧酶将其氧化为醇，醇再进一步氧化为醛和羧酸，羧酸最终进入三羧酸循环被完全矿化。此外，一些微生物还能够通过共代谢作用降解石油烃。共代谢是指微生物在利用一种基质生长的同时，能够降解另一种不能作为唯一碳源和能源的基质。中石化胜利油田针对原油泄漏导致的3.6万立方米污染土壤，采用“过硫酸盐氧化预处理+复合菌群降解”的组合工艺。化学氧化阶段通过激活过硫酸钠产生强氧化性自由基，将长链烃类分解为小分子有机物；后续接入自主研发的耐盐碱菌剂（包含假单胞菌、红球菌等7种菌株），最终使石油烃浓度从初始的8500mg/kg降至280mg/kg，低于国家《土壤环境质量建设用地标准》限值（450mg/kg）。整个修复周期仅5个月，较传统单一生物修复缩短40%时间，成本降低30%。

3.2.3 农药的降解

矿业活动中可能会使用一些农药来防治病虫害，这些农药残留会对土壤环境造成污染。微生物能够降解多种农药，如有机氯农药、有机磷农药、氨基甲酸酯类农药等。对于有机氯农药，如六六六、滴滴涕等，由于其化学性质稳定，难以降解，在土壤中残留时间较长。然而，某些细菌和真菌能够分泌脱卤酶，对有机氯农药进行脱卤反应，将其转化为相对容易降解的中间产物，最终矿化为二氧化碳和水。对于有机磷农药，微生物主要通过水解作用将其降解。有机磷农药分子中的磷-氧键或磷-硫键在微生物分泌的水解酶作用下断裂，生成无毒或低毒的产物^[3]。例如，对硫磷在微生物的作用下能够水解为对硝基酚和二乙基硫代磷酸酯，对硝基酚进一步被微生物降解，二乙基硫代磷酸酯也能够被微生物逐步分解。

3.3 改善土壤结构与肥力

3.3.1 促进土壤团聚体的形成

土壤团聚体是土壤结构的基本单位，其形成和稳定性对土壤的物理性质和肥力具有重要影响。良好的土壤团聚体结构能够改善土壤的通气性、透水性和保水性，为植物生长提供适宜的环境条件。微生物在土壤中能够分泌多糖、蛋白质等黏性物质，这些物质能够将土壤颗粒黏结在一起，促进土壤团聚体的形成。例如，根瘤菌、放线菌等微生物分泌的多糖具有较高的黏性，能够增加土壤颗粒之间的黏结力，使土壤形成良好的团粒结构。此外，微生物的菌丝也能够缠绕土壤颗粒，促进土壤团聚体的稳定。

3.3.2 分解有机物质，释放养分

矿业土壤中往往含有大量的有机废弃物，如矿渣、尾矿等，这些有机物质在微生物的作用下能够逐渐分解，释放出氮、磷、钾等养分，供植物生长利用。微生物通过分泌各种酶，如纤维素酶、蛋白酶、脂肪酶等，将复杂的有机物质分解为简单的有机物。例如，纤维素分解菌能够将土壤中的纤维素分解为葡萄糖，蛋白质分解菌能够将蛋白质分解为氨基酸，脂肪分解菌能够将脂肪分解为甘油和脂肪酸。这些简单的有机物能够被微生物进一步吸收利用，并通过代谢作用将其转化为无机养分，如铵盐、磷酸盐、钾盐等，释放到土壤中。

3.3.3 固定氮素

氮素是植物生长所必需的大量元素之一，但土壤中的氮素含量往往不能满足植物生长的需求。一些微生物具有固氮能力，能够将空气中的氮气转化为氨，为植物提供氮素营养。在矿业土壤中，接种固氮微生物可以增加土壤中的氮素含量，改善土壤肥力。例如，根瘤菌能够与豆科植物形成共生体，在根瘤中固定氮气。根瘤菌将空气中的氮气转化为氨，植物为根瘤菌提供碳水化合物等营养物质，二者形成互利共生的关系^[4]。此外，一些自生固氮菌如圆褐固氮菌、蓝细菌等也能够在土壤中独立生活，固定空气中的氮气，为土壤提供氮素来源。

4 微生物修复矿业土壤的发展前景与展望

4.1 微生物修复技术的优化与创新

未来，应进一步加强对微生物修复技术的研究，优化微生物修复工艺，提高修复效率。例如，通过基因工程技术改造微生物，使其具有更强的污染物降解能力和环境适应能力；开发新型的微生物修复载体和添加剂，

提高微生物在土壤中的存活率和活性；结合物理、化学修复方法，形成联合修复技术，发挥各种修复方法的优势，提高矿业土壤修复的效果。

4.2 微生物修复技术的规模化应用

目前，微生物修复技术大多还处于实验室研究和小规模试验阶段，要实现大规模的工程应用还面临一些挑战，如修复成本较高、修复周期较长、修复效果不稳定等。未来，应加强微生物修复技术的工程化研究，建立适合不同类型矿业土壤修复的工艺流程和技术标准，降低修复成本，提高修复效率，推动微生物修复技术的规模化应用。

4.3 微生物修复技术与生态恢复的结合

矿业土壤修复的最终目标是恢复土壤的生态功能，实现矿区的生态可持续发展。因此，在微生物修复过程中，应注重与生态恢复相结合，选择适宜的植物进行植被重建，利用植物与微生物的协同作用，促进土壤生态系统的恢复。例如，通过种植超积累植物，结合微生物修复技术，实现重金属污染土壤的植物-微生物联合修复；通过种植豆科植物，结合固氮微生物，改善土壤肥力，促进植被恢复。

结语

微生物在矿业土壤修复中作用独特、潜力巨大，能通过多种原理去除重金属、降解有机物，改善土壤。但其修复效果受微生物、环境、土壤性质等因素影响。实际应用时，要依土壤污染状况选合适微生物与策略，优化工艺提高效率。未来，随着技术优化创新及与多领域结合，微生物修复技术将在矿业土壤修复中作用更关键，为矿区生态可持续发展提供保障。还需加强研究推广，提升公众认知与接受度，推动修复事业健康发展。

参考文献

- [1] 张美,李伟,王云康,等.微生物在土壤修复中的应用进展研究[J].当代化工研究,2025,(04):100-102.
- [2] 李立军,仲惟,李涛.固定化微生物技术在小秦岭金矿区农田土壤修复中的应用[J].浙江农业科学,2024,65(08):1950-1956.
- [3] 季静.基于电动微生物法的矿山土壤重金属污染植被生态修复技术[J].能源与环保,2022,44(12):67-72.
- [4] 石浩,胡静敏,陈忻,等.矿山土壤镉污染微生物修复技术研究进展[J].矿产保护与利用,2020,40(04):17-22.