



## 采煤塌陷区微生物矿化联合植被固土研究

高颖 李涛 郑恺丹 范立民 白如鸿 孙强

引用本文：

高颖, 李涛, 郑恺丹, 等. 采煤塌陷区微生物矿化联合植被固土研究[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(6): 534–546.  
GAO Ying, LI Tao, ZHENG Kaidan. Microbial mineralization combined with vegetation soil stabilization in coal mining subsidence areas[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(6): 534–546.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/est.2024-0551>

### 您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

#### 植被恢复类型对露采矿山复垦土壤丰富和稀有微生物类群的影响

Impacts of vegetation restoration type on abundant and rare microflora in reclaimed soil of open-pit mining area  
煤炭科学技术. 2024, 52(2): 363–377 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-1882>

#### 植被恢复对采煤沉陷区土壤团聚体稳定性的影响

Effect of vegetation restoration on stability of soil aggregates in coal mining subsidence area  
煤炭科学技术. 2022, 50(11): 222–229 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/29d781f3-30fb-4eea-80d5-a54e012d4d22>

#### 生态脆弱区采煤沉陷扰动下生态水位恢复程度解析研究

Analysis of ecological water level recovery degree under coal mining subsidence disturbance in ecologically fragile area  
煤炭科学技术. 2023, 51(12): 159–167 <https://doi.org/10.12438/est.2023-0971>

#### 生态脆弱煤矿区水体中微生物群落特征及矿井充水指示

Characteristics of microbial communities in water bodies of ecologically fragile coal mining areas and indications for mine water filling  
煤炭科学技术. 2024, 52(1): 255–266 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-1798>

#### 陕北不同地貌类型区采煤沉陷对土壤微生物和酶活性的影响

Effects of coal mining subsidence on soil microorganisms and enzyme activities in different landform types of northern Shaanxi  
煤炭科学技术. 2023, 51(12): 110–124 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-0924>

#### 生态脆弱矿区地表裂缝动态变化对土壤含水量的影响

Influence of dynamic variation of ground cracks on soil water content in ecological-fragile coal mining areas  
煤炭科学技术. 2020, 48(4) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/a5b898e5-f10f-4669-9690-af07549dd972>



关注微信公众号，获得更多资讯信息



高 颖, 李 涛, 郑恺丹, 等. 采煤塌陷区微生物矿化联合植被固土研究[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(6): 534–546.

GAO Ying, LI Tao, ZHENG Kaidan, et al. Microbial mineralization combined with vegetation soil stabilization in coal mining subsidence areas[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(6): 534–546.

移动扫码阅读

## 采煤塌陷区微生物矿化联合植被固土研究

高 颖<sup>1,2,3</sup>, 李 涛<sup>1,3</sup>, 郑恺丹<sup>1</sup>, 范立民<sup>4</sup>, 白如鸿<sup>5</sup>, 孙 强<sup>4</sup>

(1. 新疆工程学院 新疆煤炭资源绿色开采教育部重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830023; 2. 马来西亚理科大学 土木工程学院, 马来西亚 槟城 11950;  
3. 六盘水师范学院 矿业与机械工程学院, 贵州 六盘水 553004; 4. 中国矿业大学 矿业工程学院, 江苏 徐州 221600; 5. 陕西榆林能源集团有限公司,  
陕西 榆林 719000)

**摘要:** 生态脆弱矿区煤炭开采浅表地质环境持续劣化, 为了控制塌陷区土体失稳和水土流失, 开展采煤塌陷区微生物矿化联合植被固土试验研究。以生态脆弱的榆树湾煤矿 20107 工作面为研究背景, 在采煤沉陷、地裂缝及采动土壤理化观测的基础上, 开展了 MICP(Microbial Induced Carbonate Precipitation, 微生物矿化)对植被影响试验研究, 重点测试了 MICP 固化对植被长势、土壤养分及植被根系长势的影响; 开展了 MICP 联合植被根系对采矿扰动土体剪切强度的影响试验, 重点测试了不同根系长度、根系掺入量及菌胶比对土体剪切强度的影响; 结合不同工况 MICP 固化土体扫描电镜观测和 MICP 碳酸钙产量测试成果, 阐释了不同工况塌陷区土体复合固化差异性规律。结果表明: ①采煤对土壤含水率影响最显著, 采煤剧烈扰动区(D1)较采煤轻微扰动区(D0)含水率下降 7.7%, 土壤 pH 影响不明显, 土壤有机质、全氮、有效磷及速效钾质量分数从大到小依次为 D0、D2(一般扰动裂缝带区)、D3(一般扰动非裂缝带区)、D1; ②MICP 对植被生长作用分为 2 个阶段: 1~2 周, MICP 起到了抑制植被生长的作用, 未 MICP 固化较固化植被平均高度大 7.4%~47.7%; 3~4 周, MICP 起到了促进植被生长的作用, 未 MICP 固化较固化植被平均高度小 23.7%~32.3%; 植被根系长势和土壤理化指标验证了 MICP 对植被的整体促进作用; ③根系加入但未 MICP 固化时, 土体黏聚力和内摩擦角分别提升 42.1% 和 10.6%, 根系加入且 MICP 固化时, 土体黏聚力和内摩擦角分别提升 62.3% 和 19.4%。两者联合固化的最优参数为: 根系长度 5~10 cm、根系掺入比 0.8%, 菌胶比 1:1.5。④MICP 固化过程中碳酸钙产量 D1>D2>D3, 说明采煤扰动越剧烈, MICP 介入固化程度越高。为生态脆弱矿区采煤塌陷区固土工程提供了试验参考。

**关键词:** 生态脆弱矿区; 采煤塌陷区; 微生物矿化; 植被修复; 土体固化

**中图分类号:** TD32      **文献标志码:** A      **文章编号:** 0253-2336(2025)06-0534-13

## Microbial mineralization combined with vegetation soil stabilization in coal mining subsidence areas

GAO Ying<sup>1,2,3</sup>, LI Tao<sup>1,3</sup>, ZHENG Kaidan<sup>1</sup>, FAN Limin<sup>4</sup>, BAI Ruhong<sup>5</sup>, SUN Qiang<sup>4</sup>

(1. Key Laboratory of Green Mining of Coal Resources in Xinjiang, Ministry of Education, Xinjiang Institute of Engineering, Urumqi 830023, China;  
2. School of Civil Engineering, University of Science Malaysia, Penang 11950, Malaysia; 3. School of Mining and Mechanical Engineering, Liupanshui Normal University, Liupanshui 553004, China; 4. School of Mines, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221600, China; 5. Shaanxi Yulin Energy Group Co., Ltd., Yulin 719000, China)

**Abstract:** The shallow geological environment of coal mining in ecologically fragile mining areas continues to deteriorate. In order to con-

收稿日期: 2024-04-26      策划编辑: 黄小雨      责任编辑: 李雅楠      DOI: 10.12438/cst.2024-0551

基金项目: 新疆煤炭资源绿色开采教育部重点实验室开放基金资助项目(KLXGY-LB2413); 秦创原“科学家+工程师”队伍资助项目(2024QCY-KXJ-055); 贵州省科技计划资助项目(黔科合支撑[2024]一般 140)

作者简介: 高 颖(1984—), 女, 四川彭山人, 讲师, 博士。E-mail: 251384355@qq.com

通讯作者: 李 涛(1984—), 男, 江苏沛县人, 教授, 博士。Email: qazwdx521@163.com

trol soil instability and soil erosion in collapsed areas, experimental research on microbial mineralization combined with vegetation soil stabilization was carried out in coal mining collapsed areas. Based on the ecologically fragile Yushuwan coal mine 20107 working face as the research background, an experimental study was conducted on the impact of MICP on vegetation, specifically testing the effects of MICP solidification on vegetation growth, soil nutrients, and vegetation root growth, based on coal mining subsidence, ground fissures, and physical and chemical observations of mining soil; We conducted an experiment on the influence of MICP combined with vegetation roots on the shear strength of mining disturbed soil, specifically comparing and testing the effects of different root lengths, root dosages, and bacterial gum ratios on soil shear strength; Based on the scanning electron microscopy observation of MICP solidified soil under different working conditions and the results of MICP calcium carbonate production testing, the law of composite restoration of soil in collapsed areas was explained. The research results indicate that: ① Coal mining has the most significant impact on soil moisture content, with a 7.7% decrease in moisture content in the severely disturbed area (D1) compared to the slightly disturbed area (D0). The effect of soil pH value is not significant, while the organic matter content, total nitrogen content, available phosphorus content, and available potassium content in the soil are in descending order: D0, D2 (generally disturbed fractured zone), D3 (generally disturbed non fractured zone), and D1; ② The effect of MICP on vegetation growth can be divided into two stages: in the first stage (1–2 weeks), MICP mainly plays a role in inhibiting vegetation growth. Potted plants without MICP solidification have an average height of 7.4% to 47.7% higher than those with MICP solidification; In the second stage (3–4 weeks), MICP mainly plays a role in promoting vegetation growth. Potted plants without MICP solidification have an average height 23.7%–32.3% lower than those with MICP solidification; The growth of vegetation roots and soil physicochemical indicators verified the promoting effect of MICP on vegetation after 4 weeks; ③ The addition of root system without MICP solidification increased the cohesion and internal friction angle of solidified soil by 42.1% and 10.6%, respectively. The addition of root system with MICP solidification increased the cohesion and internal friction angle of solidified soil by 62.3% and 19.4%, respectively. The optimal parameters for joint solidification of the two are: root length of 5–10 cm, root addition ratio of 0.8%, and bacterial gum ratio of 1 : 1.5 During the solidification process of MICP, the production of calcium carbonate D1>D2>D3 indicates that the more severe the coal mining disturbance, the higher the degree of MICP intervention and repair. This study provides experimental reference for soil stabilization engineering in coal mining subsidence areas of ecologically fragile mining areas.

**Key words:** ecological fragile mining areas; coal mining subsidence area; microbial mineralization; vegetation restoration; soil solidification

## 0 引言

我国目前主要煤炭开采区域集中在西部生态脆弱矿区,煤炭开采与水资源、生态环境保护矛盾十分显著<sup>[1–5]</sup>。随着绿色矿山建设理念全面推广与应用,采煤塌陷区地质环境修复受到了广大学者和工程师的重视<sup>[6–8]</sup>。采煤塌陷区地质环境修复工程中,土壤固化是各类修复的核心内容之一,有重大的科学研究及工程实践意义。

现有采煤塌陷区土壤固化包括采煤裂缝修复、植被生态复垦、土壤及微生物群落结构再造等方面。采煤裂缝修复方面,李文平等<sup>[9]</sup>研究了采煤裂缝隔水土层再造工程地质特性,提出了基于黏土矿物弥合的采煤裂缝修复理念;侯恩科等<sup>[10]</sup>研究了采煤地裂缝发育特征,提出了不同地裂缝的回填修复方法;张嘉睿等<sup>[11]</sup>研究了MICP(Microbial Induced Carbonate Precipitation, 微生物诱导碳酸钙沉淀, 即微生物矿化)修复采煤裂缝的规律,评价了修复后生态水位响应过程。植被生态复垦方面,郑晶轮<sup>[12]</sup>研究了不同植被类型对采煤塌陷区土壤的影响,得到了研究

区最优植被选型;张梦婕<sup>[13]</sup>分析了塌陷区新生湿地生态系统特征和生态系统要素,阐明了新生湿地生态系统的调控机制及动态发展趋;刘露<sup>[14]</sup>划分了不同植被修复类型,提出了不同类型的修复关键技术。土壤及微生物群落结构再造方面,宋世杰等<sup>[15]</sup>研究了陕北不同地貌类型区采煤活动对土壤微生物和酶活性的影响,得到了采煤沉陷影响土壤微生物特性的关键指示性因素;毕银丽等<sup>[16]</sup>长期致力于采煤塌陷区微生物修复研究,取得了采煤塌陷区多类型微生物修复系列成果;胡振琪等<sup>[17]</sup>研究了黄河中下游采煤塌陷区生态修复各类问题,提出了采煤塌陷区土壤重构方法。

DREW<sup>[18]</sup>于1911年首次在海洋环境中分离出能够进行MICP过程的细菌,这是一种在液体培养基中可以促使CaCO<sub>3</sub>沉淀形成的反硝化细菌,该细菌在海洋碳酸钙沉积物形成中的重要性开始受到关注。在这一发现之后,越来越多的学者开始关注MICP研究。BOQUET等<sup>[19]</sup>在1973年首次发现土壤环境中有细菌能产生碳酸钙晶体且是一种普遍现象(MICP现象)。GOLLAPUDI等<sup>[20]</sup>通过一系列实

验来证明了使用微生物诱导矿物沉淀堵塞高渗透性通道的可能性, 实现 MICP 技术首次应用于岩土工程。相比较其他固化技术, 该技术利用细菌的代谢途径自然产出无毒无害方解石矿物, 将土壤颗粒胶结起来, 达到增强土壤刚度、强度、保水、保肥的目的, 属于绿色固化技术<sup>[21]</sup>。此后, 国内外关于 MICP 用于海底固化、修复混凝土裂缝、松散砂、古建筑裂缝修复、加固岛礁砂土、防治沙漠化等方向的研究全面发展<sup>[22-26]</sup>, 其中 MICP 固土的研究也是热点<sup>[27]</sup>。ZHANG 等<sup>[28]</sup>研究了采煤对地表生态的影响, 特别是土壤水分分布及植被的影响, 提出裂缝充填修复, 种植灌木措施来减少土壤水分流失, 维护恢复矿区土体结构。LU 等<sup>[29]</sup>通过采矿塌陷区和非塌陷区的对比研究, 发现总氮、硝态氮、铵态氮、总钾和速效钾可以促进土壤微生物群落的演化, 从而能达到草地生态系统自然恢复。JI 等<sup>[30]</sup>研究了黄土-风成沙区采矿破坏土体结构修复, 发现子囊菌门真菌群落能促使土壤原有结构恢复。常道琴等<sup>[31]</sup>研究了重金

属污染尾矿土的 MICP 固化修复效果, 得到了尾矿土最优固化修复参数; 姚姬璇等<sup>[32]</sup>研究了风沙土 MICP 固化保水特性, 得到了 MICP 固风沙土的最优参数。

综上, 土体固化技术繁多, 但多种技术综合使用, 特别是煤矿区应用 MICP 联合植被固土的研究少有报道。因此, 以生态脆弱的榆树湾煤矿为研究背景, 基于采煤塌陷规律观测结果, 模拟采煤塌陷区 3 类土体特征, 开展 MICP 联合植被固化塌陷区裂缝土体试验, 揭示了植被生长、土壤理化及固化土体力学参数变化规律, 为生态脆弱区微生物矿化联合植被固土工程提供了参考。

## 1 试验背景特征

### 1.1 研究区范围及自然地理特征

如图 1 所示, 研究区位于生态脆弱的榆神矿区一期榆树湾煤矿, 具体以 20107 采煤工作面为研究背景。

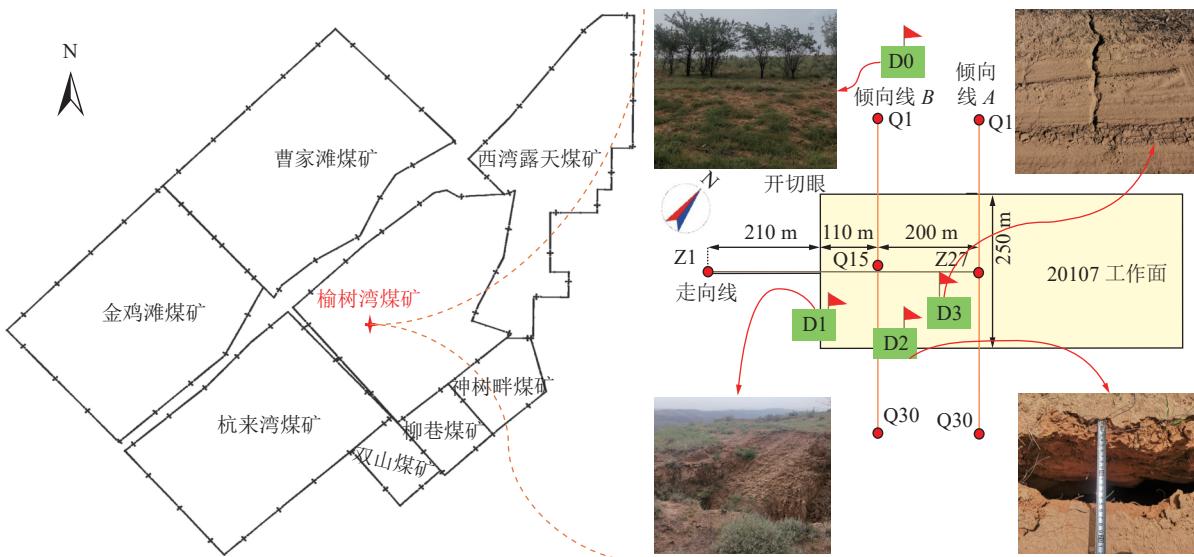


图 1 研究区及取样点位置

Fig.1 Location of research area and sampling points

研究区属于毛乌素沙地和黄土高原过渡区, 两类地貌并存, 考虑到沙层无显著胶结力, 空白对比样本力学参数无法测试, 选择黄土地貌为样品制备地貌背景。研究区为典型的中温带半干旱大陆性气候, 近 13 a 平均降水量 434.6 mm, 其中 4~5 月为植被关键生长期, 平均日降水量为 1.1 mm, 选择以该日降水量为样品制备气象背景。研究区地表植被以草本类植物为主, 灌木和乔木相对较少, 因此选择试验植被为草本类。

### 1.2 研究区塌陷特征

为充分模拟研究区工况, 以 20107 工作面为背景开展了野外地质调查和取样测试。

#### 1.2.1 工作面概况

20107 工作面位于榆树湾煤矿 201 盘区(西翼), 开采 2-2 号煤, 煤层倾角小于 1°, 无明显构造发育。该工作面 2-2 煤层为分层开采, 目前开采上分层, 厚度为 5.63 m, 埋深为 273 m。煤层上覆地层主要包括松散沙层、隔水土层和基岩层。松散沙层厚 0~

12.82 m, 一般含水。黄土及红土层厚 102.07~140.86 m, 为隔水层。基岩厚 131.15~150.28 m, 其中, 直罗组厚度 62.22~75.23 m, 含裂隙水(顶部风化层厚 11.34~20.70 m、含风化承压水), 是工作面间接充水水源; 上覆延安组层厚 62.14~78.64 m, 以粉、细砂岩为主, 含裂隙承压水、含水性弱, 是工作面直接充水水源。

### 1.2.2 地表沉陷规律

为合理的选择微生物和植被联合修复试验参数, 对采煤地表沉陷规律进行了观测, 图 1 观测布置了 3 条线, 包括走向线、倾向线 A 和倾向线 B, 走向观测线布置 27 个观测点, 倾向观测线布置 30 个观测点, 每个观测点间距为 20 m。经过连续 417 d 的观测, 20107 工作面采煤塌陷的最终达到稳定, 不同观测断面沉陷值如图 2—图 3 所示。

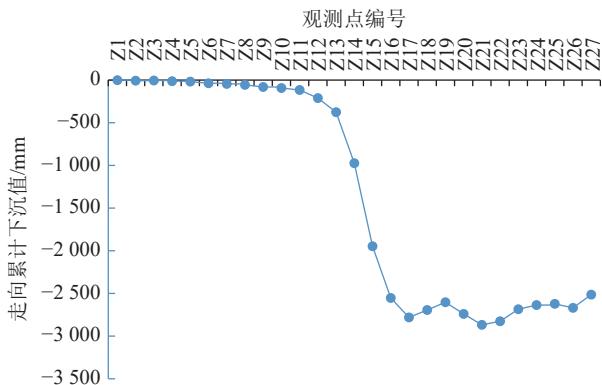


图 2 走向线下沉曲线  
Fig.2 Trend line sinking curve

由图 2—图 3 可知, 走向主断面上最大下沉值  $-2868 \text{ mm}$ , 倾向 2 个断面上最大下沉值为  $-2781 \text{ mm}$ , 最大下沉系数为 0.51。在开切眼附近( $Z11 \sim Z16$  观测点、 $Q11 \sim Q15$  观测点)下沉值变化最为剧烈, 最大

达到  $48.65 \text{ mm/m}$ , 说明这一区域是采煤剧烈扰动区。采煤工作面中线附近( $Z16 \sim Z27$  观测点、 $Q15 \sim 18$  观测点)为采煤一般扰动区。开切眼及两巷外推  $20 \text{ m}$  以上区间( $Z1 \sim Z11$  观测点、 $Q1 \sim Q11$  观测点)为采煤轻微扰动区。为进一步评价采煤扰动, 分别对这 3 类区域浅表土体进行进一步的理化特性测试。

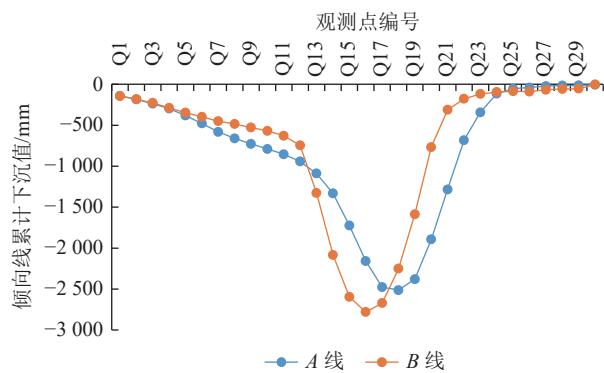


图 3 倾向线下沉曲线  
Fig.3 Dip line sinking curve

### 1.2.3 采煤后土壤理化特征

如图 1 所示, 在距离采煤工作面  $248.5 \text{ m}$  的采煤轻微扰动区, 获取土样 D0-1; 在开切眼附近采煤剧烈扰动区, 获取土样 D1-1; 在采煤一般扰动区, 裂缝点获取土样 D2-1 和非裂缝点获取土样 D3-1。每类样品分别获取 3 份, 进行相关理化指标测试(平均结果见表 1), 取样深度为  $0.5 \sim 1 \text{ m}$ 。表 1 可以看出: 采煤对土壤含水率的影响最为显著, 剧烈扰动区较轻微扰动区含水率下降  $7.7\%$ , 塌陷区裂缝带区的含水率较非裂缝带区下降  $5.5\%$ ; 土壤 pH 受采煤变化不明显; 土壤有机质、全氮、有效磷及速效钾质量分数均在轻微扰动区达到最大值, 其次是一般扰动区裂缝带, 再次为一般扰动区非裂缝带区, 最小为剧烈扰动区。

表 1 采煤扰动区土壤理化特征

Table 1 Physical and chemical characteristics of soil in coal mining disturbance areas

样品组编号	含水率/%	pH	有机质质量分数/%	全氮质量分数/%	有效磷质量分数/%	速效钾质量分数/%	扰动分区
D0-1	22.3	8.37	0.18	0.30	0.022	2.04	轻微扰动
D1-1	14.6	8.26	0.16	0.18	0.017	2.37	剧烈扰动
D2-1	16.2	8.34	0.13	0.25	0.022	2.00	一般扰动-裂缝带
D3-1	21.7	8.42	0.14	0.21	0.020	2.23	一般扰动-非裂缝带

综上, 采煤扰动对塌陷区及周边的影响程度不同, 因此研究微生物矿化联合植被固土规律, 结合前人研究成果<sup>[4]</sup>, 设置 3 种不同的工况(D1、D2、D3, 而 D0-1 样品所在区域, 为轻微扰动区不需要修复)进行后续试验研究。

## 2 试验材料与方法

### 2.1 MICP 对植被生长影响试验

#### 2.1.1 试验材料

1) MICP 材料。考虑到研究区处于较高纬度地

区,处于低温区,选择更适应低温环境的菌种。巨大芽孢杆菌具有较好的抗温性<sup>[22]</sup>,能在3~45℃下生长,在低温有限供氧条件下,具备快速沉淀碳酸钙的能力<sup>[33]</sup>,碳酸钙产率高于其他菌种<sup>[34]</sup>,与巴氏芽孢杆菌处理的样品相比,巨大芽孢杆菌处理的土壤具有更高的强度改善<sup>[35]</sup>。因此,本次MICP材料为:选自业盛旺生物的巨大芽孢杆菌粉10g+尿素-氯化钙(浓度为0.2 mol/dm<sup>3</sup>)制备0.5 L的固化液材料,用于盆栽MICP固化试验。对比的未固化盆栽同样加入尿素溶液0.5 L(浓度为0.2 mol/dm<sup>3</sup>),主要材料如图4所示。



图4 微生物矿化材料

Fig.4 Microbial mineralization materials

2)植被盆栽材料。选取MICP固化和未MICP固化(图5)各3盆栽,其中植被选用多种符合当地气候条件的草本植被。6盆植被中铺设10 cm厚的离石组黄土,分别采集自D1、D2和D3区域。每7 d对D1和D2植被浇灌330 mL水(依据大气降水入渗系数0.1计算),D3植被浇灌220 mL水(入渗系数为裂缝区的三分之二)。

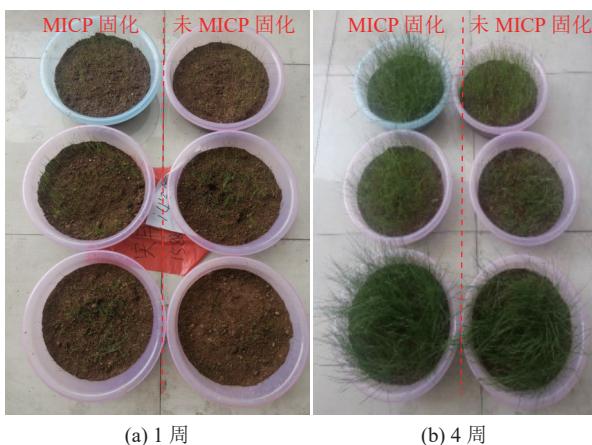


图5 盆栽植被1~4周长势图

Fig.5 Potted vegetation growth chart for 1~4 weeks

3)植被根系材料。从盆栽中收集各类草本类植

被根系,以不同长度分别制备新鲜根系组(如图6),长度分为3个级别,包括<5 cm、5~10 cm和>10 cm。



图6 收集的植被根系

Fig.6 Collected vegetation root systems

4)土样材料。土样采用离石组黄土烘干、碾碎、重塑制备直剪试验土样(直径61.8 mm,高度20.0 mm)。土样制备共性参数见表2,共分为4个组,其中第1组为空白对比组(含1类),第2组为根系长度变化组(含6类),第3组为根系掺量变化组(含6类),第4组为MICP固化菌胶比(菌液是指OD600值1.6的巨大芽孢杆菌液,胶结液是指浓度为0.2 mol/dm<sup>3</sup>的尿素-氯化钙液)变化组(含3类),除去重复试验3类,小计13类试验,每类试验制备平行样品3个,小计39个试验样品。D1、D2、D3三类工况的差异性特征见表3,3类工况均开展根系联合菌液矿化试验,共计制备土样117个。

## 2.2 试验方法

### 2.2.1 植被长势指标测定

1)植被平均高度测定方法。植被自种植1周开始,每周通过直尺测定植被露出土壤的植被干径平均高度(测定3株代表性植被,取平均值),连续测定4周。

2)植被根系平均长度、直径、鲜重及抗拔拉力测定方法。植被种植4周后,对盆内植被的根系进行拉力测试和长度、直径与鲜重测试。其中,拉力测试使用测力计进行根部拉伸试验,根部在1/3 mm范围内断裂为有效测试,测试取3株代表性长势植被,取平均值。长度、直径与鲜重分别采用直尺、游标卡尺及电子秤分别测试,测试取3株代表性长势植被,取平均值。

### 2.2.2 土壤全氮、有效磷、速效钾及pH

植被种植4周后,对6个盆内的土壤进行全氮、有效磷、速效钾及pH的测定。土壤全氮测定采用凯

**表 2 MICP 联合根系复合固化土样制备共性参数****Table 2 Preparation of common parameters for MICP combined root system composite solidification soil samples**

试验组	是否MICP 固化	根系长 度/cm	根系掺 量/%	菌胶质量比 (菌液:胶结液)	备注
1	否	—	—	—	空白对比组
		<5			
	否	5~10	0.6	—	
2		>10			根系长度组
		<5			
	是	5~10	0.6	1:1.5	
3		>10			
		0.4			
	否	5~10	0.6	—	
4		0.8			根系掺入量组
		0.4			
	是	5~10	0.6	1:1.5	
		0.8			
		1:1.0			MICP 固化菌 胶比组
	是	5~10	0.6	1:1.5	
		1:2.0			

**表 3 不同工况土样个性参数特征****Table 3 Characteristics of personality parameters of soil samples under different working conditions**

工况	含水率/%	裂缝深度×长度×宽度/ (cm×cm×cm)	裂缝内充填物
D1	14.6	1.0×4.0×0.2	黄土与风积砂1:1充填
D2	16.2	0.5×2.0×0.1	黄土与风积砂1:1充填
D3	21.7	—	—

氏定氮法; 土壤有效磷的测定采用碳酸氢钠提取钼锑抗比色法(olsen 法); 土壤速效钾采用乙酸铵浸提-火焰光度计法; 土壤 pH 的测定采用电位法。

### 2.2.3 力学试验

微生物联合植被根系联合固化土体试验 14 d 后, 对试验土样进行剪切试验, 仪器采用应变控制式直剪仪, 通过快速固结直剪试验获取土样经过微生物固化后的黏聚力和内摩擦角。

### 2.2.4 微观试验

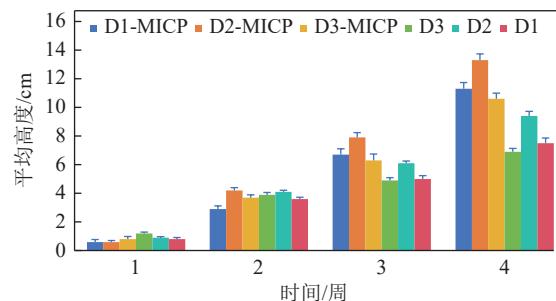
为进一步揭示微生物矿化联合植被根系固土机理, 采用微观试验(SEM 和碳酸钙产量测试)分析, 其中 SEM 主要分析 D1~D3 不同工况 MICP 修复的机理, 采用 SEM 放大 1 000 倍观察不同工况土样中碳酸钙结晶的数量。用酸洗法测量土样中碳酸钙产量。

## 3 试验结果及分析

### 3.1 植被长势结果及分析

植被总体的长势如图 6 所示, 其中左边为种植 1 周的照片, 右边为种植 4 周的照片, 可以看出 MICP 固化的样品比未 MICP 固化的长势明显要好。种植 4 周过程中植被平均高度结果如图 7 所示。由图 7 可知:

1) 第 1 周, 未 MICP 固化的植被平均高度(1.0 cm)较 MICP 固化的植被平均高度(0.7 cm)高 42.9%; 第 2 周, 未 MICP 固化的植被平均高度(3.9 cm)较 MICP 固化的植被平均高度(3.6 cm)高 8.3%; 第 3 周, 未 MICP 固化的植被平均高度(5.3 cm)较 MICP 固化的植被平均高度(7.0 cm)低 24.37%; 第 4 周, 未 MICP 固化的植被平均高度(7.9 cm)较 MICP 固化的植被平均高度(11.7 cm)低 32.5%。综上, 1~2 周未 MICP 固化的植被比 MICP 固化的植被长势较好, 但第 3~4 周结果相反。

**图 7 植被平均高度变化****Fig.7 Changes in average vegetation height**

2) 第 1 周, D1 工况植被的平均高度为 0.7 cm, D2 工况植被的平均高度为 0.8 cm, D3 工况植被的平均高度为 1.0 cm; 第 2 周, D1 工况植被的平均高度为 3.3 cm, D2 工况植被的平均高度为 4.2 cm, D3 工况植被的平均高度为 3.8 cm; 第 3 周, D1 工况植被的平均高度为 5.9 cm, D2 工况植被的平均高度为 7.0 cm, D3 工况植被的平均高度为 5.6 cm; 第 4 周, D1 工况植被的平均高度为 9.4 cm, D2 工况植被的平均高度为 11.7 cm, D3 工况植被的平均高度为 8.8 cm。综上, 植被平均高度方面, 第 1 周 D1<D2<D3, 第 2 周 D1<D3<D2, 第 3 周 D3<D1<D2, 第 4 周 D3<D1<D2。

### 3.2 植被根系长势结果及分析

种植 4 周后, 植被根系各项结果如表 4 所示。表 4 可以看出:

表4 植被根系发育特征  
Table 4 Characteristics of vegetation root development

样品组编号	是否MICP固化	根系平均长度/cm	根系平均直径/mm	根系总质量(鲜重)/g	根系平均拉力/N
D1-2	否	11.4±3.76	1.6±0.27	199.8±65.58	87.4±14.67
D2-2	否	12.8±4.22	1.7±0.36	222.4±73.16	88.5±15.62
D3-2	否	11.1±3.33	1.6±0.20	194.6±58.40	87.1±10.62
D1-2MICP	是	13.7±3.58	1.9±0.24	299.4±77.98	97.6±10.98
D2-2MICP	是	14.8±3.62	2.0±0.29	304.9±77.07	99.7±12.07
D3-2MICP	是	13.5±3.42	2.0±0.20	287.6±70.87	96.0±9.84

1) MICP 固化的根系平均长度(14.0 cm)较未 MICP 处理的根系平均长度(11.8 cm)高 18.64%; MICP 固化的根系平均直径(2.0 mm)较未 MICP 固化的根系平均直径(1.6 mm)高 25.0%; MICP 固化的根系鲜重(297.3 g)较未 MICP 固化的根系鲜重(205.6 g)高 44.6%; MICP 固化的根系平均拉力(97.8 N)较未 MICP 固化的根系平均拉力(87.7 N)高 11.5%。

2) D2 工况的根系平均长度为 13.8 cm、根系平均直径为 1.9 mm、根系总鲜重平均为 263.7 g、根系

平均拉力为 94.1 N, 整体情况最优; D1 工况的根系平均长度为 12.6 cm、根系平均直径为 1.6 mm、根系总鲜重平均为 249.6 g、根系平均拉力为 92.5 N, 整体情况次之; D3 工况的根系平均长度为 12.3 cm、根系平均直径为 1.8 mm、根系总鲜重平均为 241.1 g、根系平均拉力为 91.6 N, 整体情况最差。不同工况盆栽根系长势结果主要受降水入渗和 MICP 介入条件的控制。

### 3.3 土壤理化特征变化结果及分析

种植 4 周后, 土壤中各项理化结果见表 5。

表5 植被种植后土壤理化特征  
Table 5 Physical and chemical characteristics of soil after vegetation planting

样品组编号	是否MICP固化	全氮质量分数/%	有效磷质量分数/%	速效钾质量分数/%	pH
D1-3	否	0.29±0.048	0.016±0.005	1.96±0.27	8.13±0.26
D2-3	否	0.24±0.030	0.017±0.004	1.43±0.32	8.22±0.28
D3-3	否	0.31±0.040	0.017±0.006	1.93±0.59	8.07±0.34
D1-3MICP	是	0.28±0.036	0.028±0.004	1.88±0.48	8.53±0.29
D2-3MICP	是	0.25±0.036	0.026±0.004	1.25±0.48	8.87±0.27
D3-3MICP	是	0.30±0.015	0.030±0.003	1.72±0.13	8.73±0.26

1) 对比表 1 和表 5 可知, 植被种植后速效钾整体下降, 6 个样品速效钾质量分数由 2.20% 下降至 1.70%, 较原土壤速效钾质量分数下降 22.73%; 全氮质量分数、有效磷质量分数和 pH 整体上升, 6 个样品全氮质量分数由 0.22% 上升至 0.28%, 较原土壤全氮质量分数上升 28.24%; 6 个样品有效磷质量分数由 0.020% 上升至 0.022%, 较原土壤有效磷质量分数上升 10.00%; 6 个样品 pH 由 8.34 上升至 8.43, 较原土壤 pH 上升 1.08%。

2) MICP 固化的土壤全氮质量分数和有效磷质量分数较未 MICP 固化的土壤的全氮质量分数和速效钾质量分数分别降低 2.14% 和 9.26%; MICP 固化的土壤有效磷质量分数和 pH 较未 MICP 固化的土壤有效磷质量分数和 pH 大 64.71% 和 6.54%。

3) D2 工况的土壤全氮质量分数平均为 0.25%、有效磷质量分数平均为 0.022%、速效钾质量分数平均为 1.34%、pH 平均为 8.55, 整体土壤关键指标数据最差; D1 工况的土壤全氮质量分数平均为 0.29%、有效磷质量分数平均为 0.022%、速效钾质量分数平均为 1.92%、pH 平均为 8.33, 整体土壤关键指标降低; D3 工况的土壤全氮质量分数平均为 0.30%、有效磷质量分数平均为 0.024%、速效钾质量分数平均为 1.83%、pH 平均为 8.40, 整体土壤关键指标数据最优。

不同工况盆栽土壤关键养分结果主要受草本植被快速生长的反作用影响, 即植被长势越好, 土壤关键养分被植被吸收, 土壤中残余关键养分指标数据越差。

### 3.4 根系长度对复合土体强度的影响

不同的根系长度联合 MICP 固化土体的黏聚力和内摩擦角如图 8—图 9 所示。可以看出:

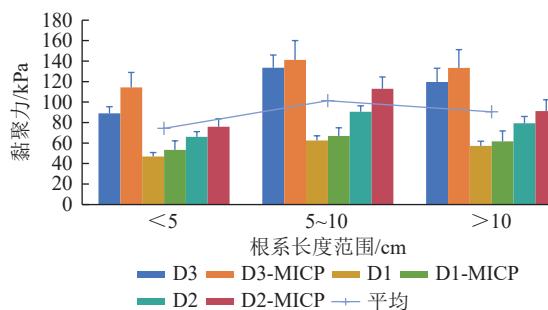


图 8 不同根系长度复合土样黏聚力

Fig.8 Cohesive force of composite soil samples with different root lengths

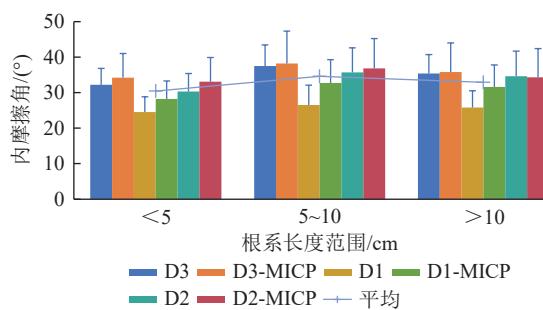


图 9 不同根系长度复合土样内摩擦角

Fig.9 Internal friction angle of composite soil samples with different root lengths

1) 3类根系长度 MICP 固化后较固化前复合土体平均黏聚力由 82.7 kPa 提升到 94.5 kPa, 提升了 14.3%, 平均内摩擦角由 31.4° 提升到 33.9°, 提升了 8.0%。

此外, 相比较空白对比样黏聚力 58.2 kPa, 内摩擦角 28.4°; 根系加入但未 MICP 固化, 固化土体黏聚力和内摩擦角分别提升 42.1% 和 10.6%; 根系加入且 MICP 固化, 固化土体黏聚力和内摩擦角分别提升 62.3% 和 19.4%, 两者相比较根系固化作用更加显著。

2) 根系长度 5~10 cm 根系固化的土样平均黏聚力和内摩擦角最大, 分别为 101.3 kPa 和 34.6°; 其次为根系长度 10 cm 以上固化的土样平均黏聚力和内摩擦角, 分别为 90.4 kPa 和 32.9°; 最低为根系长度 5 cm 以下固化的土样平均黏聚力和内摩擦角, 分别为 74.3 kPa 和 30.4°。

3) D3 工况土样平均黏聚力和内摩擦角分别为 121.9 kPa 和 35.6°, 平均力学参数最优; D2 工况土样平均黏聚力和内摩擦角分别为 86.0 kPa 和 34.1°, 平

均力学参数中等; D1 工况土样平均黏聚力和内摩擦角分别为 58.1 kPa 和 28.2°, 土样平均力学参数最差。

由于 D1 采煤扰动最为剧烈, D2 次之, D3 采煤扰动最轻微, 因此相同 MICP 和根系固化条件下土样力学参数仍然保持 D1 < D2 < D3。

### 3.5 根系掺入量对复合土体强度的影响

不同的根系掺入量联合 MICP 固化土体的黏聚力和内摩擦角值如图 10—图 11 所示。可以看出:

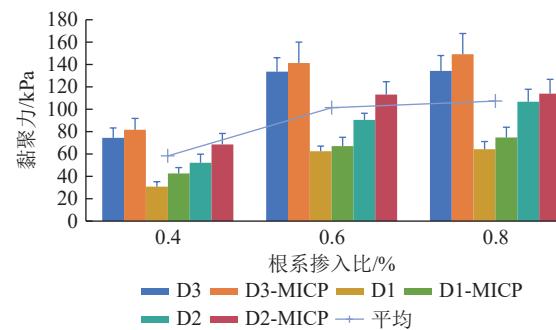


图 10 不同根系掺入量复合土样黏聚力

Fig.10 Cohesive force of composite soil samples with different root system contents

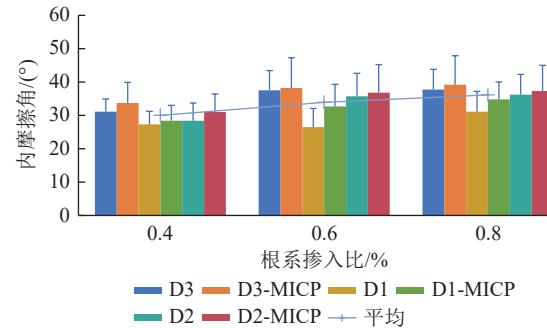


图 11 不同根系掺入量复合土样内摩擦角

Fig.11 Internal friction angle of composite soil samples with different root system contents

1) 3类根系掺入量 MICP 固化后较固化前复合土体平均黏聚力由 83.2 kPa 提升到 94.6 kPa, 提升了 13.7%, 平均内摩擦角由 32.4° 提升到 34.7°, 提升了 7.1%。相比较不同根系长度, 不同根系掺入量土样黏聚力和内摩擦角提升更为显著, 说明根系长度角掺入量影响更大。根系掺入量 0.8% 固化的土样平均黏聚力和内摩擦角最大, 分别为 107.2 kPa 和 36.1°; 其次为根系掺入量 0.6% 固化的土样平均黏聚力和内摩擦角, 分别为 101.3 kPa 和 34.6°; 最低为根系掺入量 0.4% 固化的土样平均黏聚力和内摩擦角, 分别为 58.3 kPa 和 30.0°。掺入量由 0.6% 提升到 0.8%, 平均黏聚力和内摩擦角提升了 5.8% 和 4.3%,

说明0.8%掺入量对固化土体力学性质的影响趋于平缓。

2) D3工况土样平均黏聚力和内摩擦角分别为119.0 kPa和36.2°,平均力学参数最优;D2工况土样平均黏聚力和内摩擦角分别为90.8 kPa和34.2°,平均力学参数中等;D1工况土样平均黏聚力和内摩擦角分别为57.0 kPa和30.1°,平均力学参数最差。

### 3.6 菌胶比对复合土体强度的影响

不同菌胶比根系联合MICP固化土体的黏聚力和内摩擦角值如图12—图13所示。可以看出:

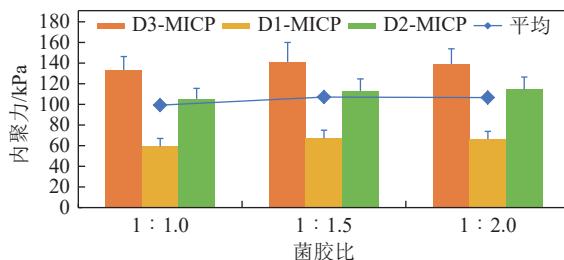


图12 不同菌胶比MICP固化土样黏聚力

Fig.12 Cohesion of MICP solidified soil samples with different bacterial gel ratios

1) MICP菌胶比1:1.5联合根系固化的土样平均黏聚力和内摩擦角最大,分别为107.1 kPa和35.9%;其次为MICP菌胶比1:2.0联合根系固化的土样平均黏聚力和内摩擦角,分别为106.5 kPa和35.8%;最低为MICP菌胶比1:1.0联合根系固化的土样平均

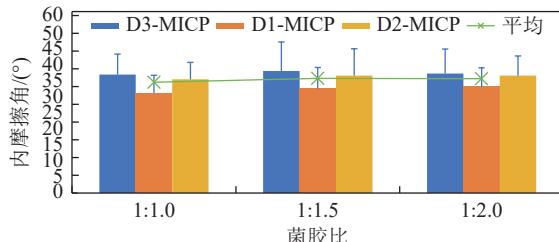


图13 不同菌胶比MICP固化土样内摩擦角

Fig.13 Internal friction angle of MICP solidified soil samples with different bacterial gum ratios

黏聚力和内摩擦角,分别为99.3 kPa和34.7°。

2) D3-MICP工况土样平均黏聚力和内摩擦角分别为137.8 kPa和37.6°,平均力学参数最优;D2-MICP工况土样平均黏聚力和内摩擦角分别为110.9 kPa和36.4°,平均力学参数中等;D1-MICP工况土样平均黏聚力和内摩擦角分别为64.2 kPa和32.4°,平均力学参数最差。

### 3.7 不同工况MICP修复SEM分析

3种采矿扰动工况下MICP固化土体结果如图14所示。可以看出:

随着采矿扰动程度的提高,MICP产生的碳酸钙密度提高。根据前人研究成果,微生物矿化受制于土体颗粒密实度的影响,采矿扰动程度越高,土体颗粒密实度越小,微生物矿化产生的碳酸钙越多<sup>[36-39]</sup>。

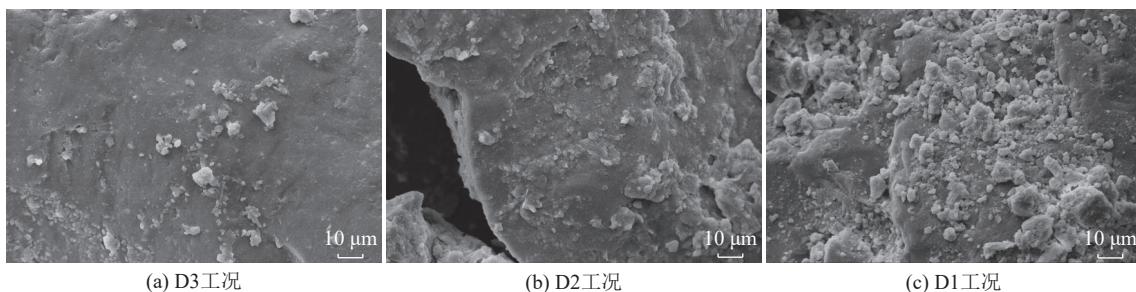


图14 不同工况土样固化后SEM图

Fig.14 SEM images of solidified soil samples under different working conditions

### 3.8 MICP碳酸钙产量分析

MICP最终产生的碳酸钙是固土效果的重要影响因素之一,结果如图15所示,图15a为D1工况0.6%掺入量不同根系长度的结果,图15b为D1工况5~10 cm根系长度不同掺入量的结果,图15c为不同工况5~10 cm根系长度0.6%掺入量的结果。可以看出:

1)根系长度5~10 cm时碳酸钙产量最大为

0.79 g。根据前人的研究认为纤维类物质过长会导致团聚现象,影响碳酸钙产量<sup>[40]</sup>。

2)根系掺入比0.8%时碳酸钙产量最大为0.82 g。根据前人的研究认为纤维类物质可以有效固载微生物,有效提升微生物碳酸钙产量<sup>[36]</sup>。

3)D1工况采矿扰动最为剧烈,但其MICP固化过程中碳酸钙产量最大,为0.79 g。根据前人的研究认为本次试验的巨大芽孢杆菌为好氧菌<sup>[39]</sup>,D1工况

环境最为开放因此碳酸钙产量最大。

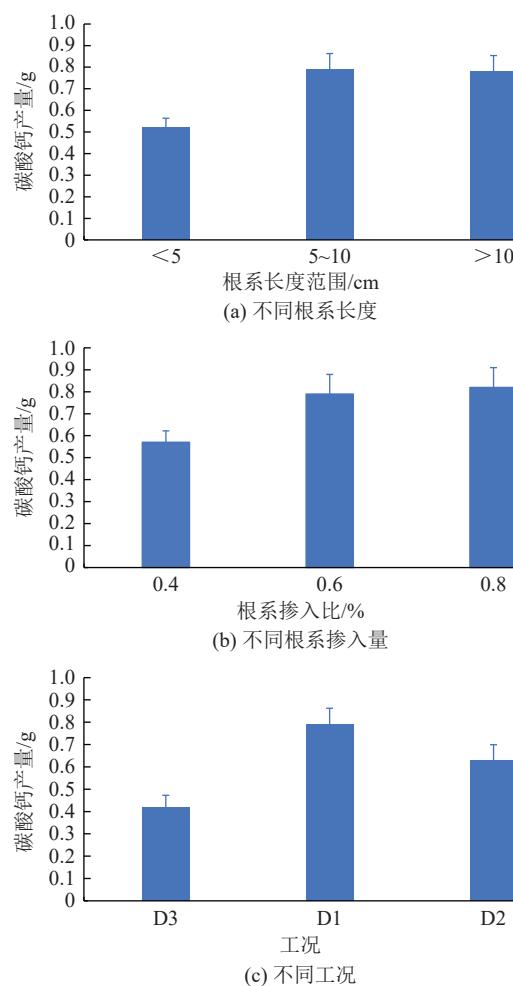


图 15 土样中 MICP 碳酸钙产量

Fig.15 Production of MICP calcium carbonate in soil samples

## 4 讨 论

### 4.1 MICP 对植被长势影响讨论

1) MICP 对植被长势 2 阶段效应。从植被长势结果来看, MICP 对植被生长的作用可以分为 2 个阶段: 第 1 阶段(1~2 周), MICP 主要起到了抑制植被生长的作用, 根据早期观察发现 MICP 过程产生的碳酸钙沉淀对植被根系扎根土壤起到了副作用, 因此这一阶段表现出 MICP 对植被长势的副作用。第 2 阶段(3~4 周), 由于巨大芽孢杆菌可以持续分解土壤中的磷肥、钾肥, MICP 过程还残余有氮肥以及 MICP 水土保持能力的作用下, MICP 对植被生长起到了正向作用。

2) 采煤扰动下 MICP 对植被长势的影响差异性。从工况对植被生长影响来看, 剧烈扰动区(D1)在试验前 2 周植被生长缓慢, 可能由于初始含水率最低影响导致; 而没有裂隙的一般扰动区(D3), 3 周后植

被生长缓慢, 可能与土壤条件不利于降雨的入渗有关; 有裂缝发育的一般扰动(D2)条件下, 植被从第 2 周以后生长快速, 结合试验初期含水率较高, 采煤裂隙土体后续又利于降水入渗原因有利于植被生长。

### 4.2 MICP 对植被根系长势影响讨论

1) 根系长度、直径及鲜重均有所提升, 说明巨大芽孢菌对植被根系长势有正向作用。

2) MICP 本身可以提升土体与根系之间的摩擦力, 特别是微生物附着在根系周边, 造成了根系的抗拉强度提升<sup>[36]</sup>。不同工况情况下对根系长势影响主要原因可能是工况控制降水入渗及 MICP 介入影响。

### 4.3 MICP 固化后土壤理化影响讨论

室内试验 MICP 固化后土壤关键指标全氮质量分数、有效磷质量分数和 pH 较背景数(表 1)数据整体上升, 速效钾质量分数整体下降。其中主要原因, 讨论如下:

1) 由于试验过程中加入了尿素, 因此全氮质量分数有所增加。

2) 由于 MICP 过程使用的微生物巨大芽孢杆菌能够将磷转化为植被可吸收的有效磷, 因此有效磷质量分数整体增加<sup>[37]</sup>。

3) 已有的研究认为草本类植被生长较快可以吸收土壤中的速效钾成分, 因此速效钾质量分数整体下降<sup>[41]</sup>。

4) 已有的研究认为 MICP 产生碳酸钙的过程中尿素的水解会释放  $\text{NH}_4^+$ , 导致 pH 的上升, 因此整体 pH 上升<sup>[41]</sup>。而室内试验 MICP 固化后的土壤全氮和速效钾质量分数较未 MICP 固化的全氮和速效钾质量分数有所降低, 结合植被生长趋势来看, MICP 可以有效促使植被更好的生长, 草本类植被快速生长吸收了大量的磷钾元素, 因此 MICP 固化后的土壤中全氮和速效钾质量分数均较低。

### 4.4 采煤塌陷区 MICP 联合植被固土耦合效应讨论

已有的研究认为 MICP 和植被根系都有较好的固土效果, 两者联合产生了进一步的耦合效应, 具体讨论如下:

1) 煤炭开采扰动造成相对开放的环境, 有利于巨大芽孢杆菌介入, 从而诱导碳酸钙沉淀带来土壤关键养分, 促进植被根系发育, 更加密集和粗壮的植被根系对采煤卸载扰动土体有较好的修复作用, 从而促进采煤塌陷区复合固化土体强度的提升<sup>[37]</sup>。

2) 煤炭开采扰动相对开放的环境不利于微生物的定植。植被根系的大量发育可有效吸附微生物, 提升微生物定植面积<sup>[42]</sup>, 促进微生物周围发生更大

规模的碳酸钙沉淀,进而提升采煤塌陷区复合固化土体强度。

3)煤炭开采扰动会造成水资源的流失,植被非雨季时由于缺乏土壤水,会进一步吸收土体中有限的水资源,雨季补水土壤孔隙水大规模提升,根据有效应力原理会造成土体失稳和流失,而MICP的介入在非雨季时碳酸钙充填了部分土体孔隙,减少了土体的孔隙度,可有效控制雨季有效应力下降<sup>[42]</sup>,达到提升复合土体的强度。

## 5 结 论

1)采煤对土壤含水率影响最显著,采煤剧烈扰动区(D1)较采煤轻微扰动区(D0)含水率下降7.7%,土壤pH影响不明显,土壤有机质、全氮、有效磷及速效钾质量分数从大到小依次为D0、D2(一般扰动裂缝带区)、D3(一般扰动非裂缝带区)、D1。

2)未MICP固化的盆栽较MICP固化的盆栽1~4周植被平均高度差异分别为:+47.7%、+7.4%、-23.7%和-32.3%。说明MICP对植被生长作用分为2个阶段:第1阶段(1~2周),MICP主要起到了抑制植被生长的作用。第2阶段(3~4周),MICP主要起到了促进植被生长的作用。总体上,正作用较副作用更显著,这一结论得到最终植被根系长势指标和土壤理化指标的验证。

3)MICP联合植被根系对土体有良好的固化作用,其中根系的固化作用最大,而MICP进一步促进固化效果。两者联合固化的最优参数为:根系长度5~10 cm、根系掺入比0.8%,菌胶比1:1.5。

4)依据扫描电镜和碳酸钙产量测试结果,MICP固化过程中碳酸钙产量D1>D2>D3,说明采煤扰动越剧烈,MICP介入修复程度越高。

## 参考文献(References):

- [1] 范立民,孙强,马立强,等.论保水采煤技术体系[J].*煤田地质与勘探*,2023,51(1):196~204.  
FAN Limin, SUN Qiang, MA Liqiang, et al. Technological system of water-conserving coal mining[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2023, 51(1): 196~204.
- [2] 范立民,马雄德,蒋泽泉,等.保水采煤研究30年回顾与展望[J].*煤炭科学技术*,2019,47(7):1~30.  
FAN Limin, MA Xiongde, JIANG Zequan, et al. Review and thirty years prospect of research on water-preserved coal mining[J]. *Coal Science and Technology*, 2019, 47(7): 1~30.
- [3] 张东升,李文平,来兴平,等.我国西北煤炭开采中的水资源保护基础理论研究进展[J].*煤炭学报*,2017,42(1):36~43.  
ZHANG Dongsheng, LI Wenping, LAI Xingping, et al. Development on basic theory of water protection during coal mining in northwest of China[J]. *Journal of China Coal Society*, 2017, 42(1): 36~43.
- [4] SONG S J, ZHENG B B, SUN T, et al. Influence of different mining damage types on soil erodibility in coal mining areas of northern Shaanxi in the middle reaches of the Yellow River in China[J]. *Sustainability*, 2023, 15(6): 5434.
- [5] XU Chuanyang, MA Shouchen, ZHANG Hebing, et al. Effect of cracks on soil characteristics and crop growth in subsided coal mining areas[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2015, 23(5): 597~604.
- [6] 许家林.煤矿绿色开采20年研究及进展[J].*煤炭科学技术*,2020,48(9):1~15.  
XU Jialin. Research and progress of coal mine green mining in 20 years[J]. *Coal Science and Technology*, 2020, 48(9): 1~15.
- [7] 武强,刘宏磊,敖嫩,等.矿山环境正效应开发利用理论模式与工程应用[J].*煤炭学报*,2022,47(4):1405~1415.  
WU Qiang, LIU Honglei, AO Nen, et al. Development and utilization models for the positive environmental impacts in mines[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(4): 1405~1415.
- [8] GUO P Y, SUN F Q, HAN X Y. Study on comprehensive evaluation of environmental pollution treatment effect in coal mine subsidence area: Taking Xinglongzhuang mining area of Yanzhou energy as an example[J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2023, 30(3): 6132~6145.
- [9] 李文平,王启庆,李小琴.隔水层再造:西北保水采煤关键隔水层N<sub>2</sub>红土工程地质研究[J].*煤炭学报*,2017,42(1):88~97.  
LI Wenping, WANG Qiqing, LI Xiaoqin. Reconstruction of aquifuge: The engineering geological study of N<sub>2</sub> laterite located in key aquifuge concerning coal mining with water protection in northwest China[J]. *Journal of China Coal Society*, 2017, 42(1): 88~97.
- [10] 侯恩科,谢晓深,冯栋,等.浅埋煤层开采地面塌陷裂缝规律及防治方法[J].*煤田地质与勘探*,2022,50(12):30~40.  
HOU Enke, XIE Xiaoshen, FENG Dong, et al. Laws and prevention methods of ground cracks in shallow coal seam mining[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2022, 50(12): 30~40.
- [11] 张嘉睿,李涛,夏玉成,等.基于MICP方法固化采煤下行裂隙土体力学特性试验研究[J].*煤矿安全*,2021,52(9):64~70.  
ZHANG Jiarui, LI Tao, XIA Yucheng, et al. Experimental study on mechanical properties of reinforced downward cracked soil based on MICP method[J]. *Safety in Coal Mines*, 2021, 52(9): 64~70.
- [12] 郑晶伦.海州露天矿生态修复区不同绿化植被类型的土壤改良效应[D].阜新:辽宁工程技术大学,2023.  
ZHENG Jinglun. Soil improvement effects of different types of green vegetation in the ecological restoration area of Haizhou open-pit mine[D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2023.
- [13] 张梦婕.基于系统动力学的采煤塌陷区新生湿地Eco-exergy评价研究[D].重庆:重庆大学,2021.  
ZHANG Mengjie. Study on eco-exergy evaluation of newborn wetland in coal mining subsidence area based on system dynamics[D]. Chongqing: Chongqing University, 2021.
- [14] 刘露.矿山废弃地植被生态修复设计研究:以马鞍山南山矿高

- 村排土场为例 [D]. 合肥: 安徽农业大学, 2022.
- LIU Lu. Study on vegetation ecological restoration design of mine-abandoned land: a case study of Gaocun dump in Nanshan mine, Ma'an shan[D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2022.
- [15] 宋世杰, 王艺, 彭芮思, 等. 陕北不同地貌类型区采煤沉陷对土壤微生物和酶活性的影响 [J]. *煤炭科学技术*, 2023, 51(12): 110–124.
- SONG Shijie, WANG Yi, PENG Ruisi, et al. Effects of coal mining subsidence on soil microorganisms and enzyme activities in different landform types of northern Shaanxi[J]. *Coal Science and Technology*, 2023, 51(12): 110–124.
- [16] 毕银丽, 彭苏萍, 杜善周. 西部干旱半干旱露天煤矿生态重构技术难点及发展方向 [J]. *煤炭学报*, 2021, 46(5): 1355–1364.
- BI Yinli, PENG Suping, DU Shanzhou. Technological difficulties and future directions of ecological reconstruction in open pit coal mine of the arid and semi-arid areas of Western China[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(5): 1355–1364.
- [17] 胡振琪, 袁冬竹. 黄河下游平原矿区采煤塌陷地治理的若干基本问题研究 [J]. *煤炭学报*, 2021, 46(5): 1392–1403.
- HU Zhenqi, YUAN Dongzhu. Research on several fundamental issues of coal mining subsidence control in plain coal mining area of the Lower Yellow River[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(5): 1392–1403.
- [18] DREW G H. The action of some denitrifying bacteria in tropical and temperate seas, and the bacterial precipitation of calcium carbonate in the sea [J]. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 1911, 9(2): 142–155.
- [19] BOQUET E, BORONAT A, RAMOS-CORMENZANA A. Production of calcite (calcium carbonate) crystals by soil bacteria is a general phenomenon [J]. *Nature*, 1973, 246: 527–529.
- [20] GOLLAPUDI U K, KNUTSON C L, BANG S S, et al. A new method for controlling leaching through permeable channels [J]. *Chemosphere*, 1995, 30(4): 695–705.
- [21] MUJAH D, SHAHIN M A, CHENG L. State-of-the-art review of biocementation by microbially induced calcite precipitation (MICP) for soil stabilization [J]. *Geomicrobiology Journal*, 2017, 34(6): 524–537.
- [22] JIANG N J, YOSHIOKA H, YAMAMOTO K, et al. Ureolytic activities of a urease-producing bacterium and purified urease enzyme in the anoxic condition: Implication for subseafloor sand production control by microbially induced carbonate precipitation (MICP) [J]. *Ecological Engineering*, 2016, 90: 96–104.
- [23] POURFALLAHI M, NOHEGOO-SHAHVARI A, SALIMIZADEH M. Effect of direct addition of two different bacteria in concrete as self-healing agent [J]. *Structures*, 2020, 28: 2646–2660.
- [24] LIU S Y, YU J, PENG X Q, et al. Preliminary study on repairing tabia cracks by using microbially induced carbonate precipitation [J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 248: 118611.
- [25] YU X N, RONG H. Seawater based MICP cements two/one-phase cemented sand blocks [J]. *Applied Ocean Research*, 2022, 118: 102972.
- [26] CHANG I, PRASIDHI A K, IM J, et al. Soil treatment using microbial biopolymers for anti-desertification purposes [J]. *Geoderma*, 2015, 253–254: 39–47.
- [27] ZHANG H N, JIA C Q, WANG G H, et al. Physical-mechanical properties of microbially induced calcite precipitation-treated loess and treatment mechanism [J]. *Journal of Mountain Science*, 2022, 19(10): 2952–2967.
- [28] ZHANG K, YANG K, WU X T, et al. Effects of underground coal mining on soil spatial water content distribution and plant growth type in northwest China [J]. *ACS Omega*, 2022, 7(22): 18688–18698.
- [29] LU D Q, MAO Z, TANG Y, et al. Driving factors influencing soil microbial community succession of coal mining subsidence areas during natural recovery in Inner Mongolia grasslands [J]. *Microorganisms*, 2024, 12(1): 87.
- [30] JI C N, HUANG J, YU H C, et al. Do the reclaimed fungal communities succeed toward the original structure in eco-fragile regions of coal mining disturbances? A case study in North China loess-aeolian sand area [J]. *Frontiers in Microbiology*, 2022, 13: 770715.
- [31] 常道琴, 宋乃平, 岳健敏, 等. 干旱区重金属污染尾矿土 MICP 注浆修复效果 [J]. *生态学杂志*, 2023, 42(12): 2864–2873.
- CHANG Daoqin, SONG Naiping, YUE Jianmin, et al. Remediation effect of MICP cementation on heavy metal contaminated tailings soil in an arid area [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2023, 42(12): 2864–2873.
- [32] 姚姬璇, 吴雨瑶, 陈卓, 等. 微生物固化风沙土的保水性能试验研究 [J]. *水土保持通报*, 2023, 43(2): 104–112, 128.
- YAO Jixuan, WU Yuyao, CHEN Zhuo, et al. Experimental study on water retention properties of microbially stabilized aeolian sand soil [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2023, 43(2): 104–112, 128.
- [33] VELLOSO C C V, CAMARGO B C P, DEL BIANCO SOUSA M, et al. High yield of heat-resistant spores of *Bacillus megaterium* in bioreactors [J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2023, 198: 109030.
- [34] SUN X H, MIAO L C. Application of bio-remediation with *Bacillus megaterium* for crack repair at low temperature [J]. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 2020, 18(5): 307–319.
- [35] ATASHGAHI S, TABARSA A, SHAHRYARI A, et al. Effect of carbonate precipitating bacteria on strength and hydraulic characteristics of loess soil [J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2020, 79(9): 4749–4763.
- [36] 郑俊杰, 宋杨, 吴超传, 等. 玄武岩纤维加筋微生物固化砂力学特性试验 [J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2019, 47(12): 73–78.
- ZHENG Junjie, SONG Yang, WU Chaochuan, et al. Experimental study on mechanical properties of basalt fiber reinforced MICP-treated sand [J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2019, 47(12): 73–78.
- [37] 李涛, 高颖, 闫敬旺, 等. 采煤地裂缝 MICP 修复规律及影响因素实验研究 [J]. *煤田地质与勘探*, 2023, 51(11): 99–108.
- LI Tao, GAO Ying, YAN Jingwang, et al. MICP restoration law of coal mining induced ground fissures and its influencing

- factors[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2023, 51(11): 99–108.
- [38] 段金贵. 黄土边坡微生物矿化加固及植被恢复技术试验研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2023.
- DUAN Jingui. Experimental study on microbial solidification reinforcement and vegetation restoration technology of loess slope[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2023.
- [39] 孙潇昊, 缪林昌, 吴林玉, 等. 低温条件下微生物诱导固化对比研究[J]. 岩土力学, 2018, 39(S2): 224–230.
- SUN Xiaohao, MIAO Linchang, WU Linyu, et al. Comparative study of microbially induced carbonate precipitation under low temperature conditions[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2018, 39(S2): 224–230.
- [40] 梁仕华, 曾伟华, 肖雪莉, 等. 纤维长度对微生物胶结砂力学性能的影响[J]. 工业建筑, 2019, 49(10): 136–140.
- LIANG Shihua, ZENG Weihua, XIAO Xueli, et al. Influence of fiber length on mechanical properties of sand cemented by micp[J]. *Industrial Construction*, 2019, 49(10): 136–140.
- [41] 彭勘, 何想, 刘志明, 等. 低温条件下微生物诱导碳酸钙沉积加固土体的试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2016, 38(10): 1769–1774.
- PENG Jie, HE Xiang, LIU Zhiming, et al. Experimental research on influence of low temperature on MICP-treated soil[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2016, 38(10): 1769–1774.
- [42] 吴旭恒. 微生物固化植被根土复合体力学特性研究[D]. 重庆: 重庆科技学院, 2022.
- WU Xuheng. Study on mechanical properties of microbial solidified vegetation root-soil complex[D]. Chongqing: Chongqing University of Science & Technology, 2022.