

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2026.003



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



# MICP 与优选植物协同加固热带土坡的力学及抗渗性能试验研究

苏永辉<sup>1</sup>, 崔洁<sup>1</sup>, 王浪<sup>2</sup>, 徐子堃<sup>2</sup>, 张友良<sup>1</sup>

(1. 海南大学土木建筑工程学院, 海口 570228; 2. 海南省水利电力集团有限公司, 海口 570100)

**摘要:**为提升热带土坡稳定性、解决单一加固技术缺陷并发展绿色低碳加固技术,探究微生物诱导碳酸钙沉淀(MICP)与优选植物协同加固低液限黏土的可行性,选取3种典型热带植物,通过模拟热带地区光照、温度环境及MICP加固后的土壤工况,筛选出适应性最优的地毯草,确定其适宜生长的胶结液浓度范围为0.2~0.6 mol/L;开展直剪、无侧限抗压、渗透试验,结合SEM、EDS、XRD微观分析,系统评估协同加固的宏观性能与作用机理。结果表明:经MICP-植物协同处理后,土体黏聚力、内摩擦角和无侧限抗压强度分别较未加固组提高了145.9%、100.4%和161.8%,渗透系数降至 $6.81 \times 10^{-8}$  m/s,抗渗性能提升约两个数量级;微观分析表明,MICP生成的碳酸钙与植物根系形成“胶结-加筋”复合结构,既填充了土体孔隙,又强化了根-土界面锚固效应;MICP与植物的协同作用不仅显著提升了热带低液限黏土的力学性能,又大幅度增强了其抗渗性能,有效缓解了热带暴雨条件下因降雨入渗与冲刷引发的边坡失稳问题。

**关键词:**微生物诱导碳酸钙沉淀;植物;渗透试验;微观分析;无侧限抗压强度

**中图分类号:**TU472.9 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2026)03-0079-10

## Mechanical and anti-seepage properties of tropical soil slopes reinforced synergistically by MICP and selected plants

SU Yonghui<sup>1</sup>, CUI Jie<sup>1</sup>, WANG Lang<sup>2</sup>, XU Zikun<sup>2</sup>, ZHANG Youliang<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Hainan University, Haikou 570228, P. R. China; 2. Hainan Provincial Water Conservancy and Hydropower Group Co., Ltd., Haikou 570100, P. R. China)

**Abstract:** To enhance the stability of tropical soil slopes, avoid the limitations of single reinforcement techniques, and develop green, low-carbon reinforcement techniques, this study investigates the feasibility of synergistically reinforcing low-liquid-limit clay using microbial induced calcium carbonate precipitation (MICP) and selected plants. Three typical tropical plants were selected, and carpet grass was identified as the most adaptable through simulations of tropical light, temperature, and post-MICP soil conditions, with its suitable cementation solution concentration range determined to be 0.2-0.6 mol/L. Direct shear, unconfined compression strength (UCS), and permeability tests were subsequently conducted, combined with SEM, EDS, and XRD

**收稿日期:**2025-10-23

**基金项目:**海南省重点研发计划(ZDYF2025SHFZ032)

**作者简介:**苏永辉(1999-),男,主要从事微生物岩土研究,E-mail:s741840372@163.com。

张友良(通信作者),男,教授,博士生导师,E-mail:zhangyouliang@hainanu.edu.cn。

**Received:** 2025-10-23

**Foundation item:** Hainan Provincial Key Research and Development Program (No. ZDYF2025SHFZ032)

**Author brief:** SU Yonghui (1999-), main research interest: microbial geotechnical engineering, E-mail: s741840372@163.com.

ZHANG Youliang (corresponding author), professor, doctoral supervisor, E-mail: zhangyouliang@hainanu.edu.cn.

microanalyses, to systematically evaluate the macroscopic properties and underlying mechanisms of the synergistic reinforcement. The results indicate that after the MICP-plant synergistic treatment, the soil's cohesion, internal friction angle, and UCS increased by 145.9%, 100.4%, and 161.8%, respectively, compared to the untreated group, while the permeability coefficient decreased to  $6.81 \times 10^{-8}$  m/s, representing an improvement in anti-seepage performance by approximately two orders of magnitude. Microscopic analysis reveals that the calcium carbonate precipitated by MICP and the plant roots formed a "cementation-reinforcement" composite structure, which not only filled soil pores but also enhanced the anchorage effect at the root-soil interface. The synergistic effect of MICP and plants not only significantly enhanced the mechanical properties of tropical low-liquid-limit clay but also substantially improved its anti-seepage performance, effectively mitigating slope instability caused by rainfall infiltration and erosion under tropical storm conditions.

**Keywords:** microbially induced calcium carbonate precipitation(MICP); plant; permeability test; microstructural analysis; unconfined compressive strength (UCS)

广泛分布的黏土是海南岛典型的工程地质载体,其工程性质对该地区的灾害防治尤为重要。此类黏土在干燥状态下强度较高,但因其特殊的矿物成分与结构,遇水后极易发生软化、强度骤降,表现出明显的劣化特性。在短历时、高强度的热带暴雨冲刷下,黏土边坡表层土体迅速饱和,极易诱发浅层剥落、冲蚀乃至滑塌等灾害,已成为威胁当地基础设施与生态环境安全的典型地质问题。提升土坡稳定性和抗灾能力已成为重要研究课题,且加固技术需契合生态环保的发展要求,这与近年来国家大力倡导的绿色发展理念高度契合。在此背景下,作为生态修复技术的微生物诱导碳酸钙沉淀(MICP)技术和植物加固手段受到广泛关注。

微生物诱导碳酸钙沉淀技术利用微生物活动生成碳酸钙,该物质作用于土颗粒间并产生胶结,从而稳固和强化土体<sup>[1-4]</sup>。植物根系相互交错,形成复杂网状结构,与土壤紧密结合,构成根土复合体,显著增强了抗剪强度与土体稳定性<sup>[5-8]</sup>。MICP技术能显著提升土体强度,而植物根系则通过长期物理加固进一步提高边坡的长期稳定性能。两者协同不仅增强了土体的整体力学性能,也提升了边坡的持久稳定性,显示出良好的工程应用潜力<sup>[9-10]</sup>。已有诸多研究致力于微生物与植物联合加固技术在砂土和风积沙中的应用,结果表明,联合处理不仅提高了砂土的抗压强度,还增强了其抗风蚀能力<sup>[11-13]</sup>。一些研究发现,经微生物与植物共同加固的复合体抗剪峰值和黏聚力均有显著提升<sup>[14]</sup>。除力学性能增强外,MICP还能提升某些土的抗雨水侵蚀能力,如黏土<sup>[15]</sup>、黄土<sup>[16-18]</sup>和花岗岩残积土<sup>[19]</sup>。该技术能在黏

土与花岗岩残积土表面形成保护膜,从而提高抗降雨侵蚀能力;同时也能降低黄土的湿陷系数与渗透系数,并缓解降雨侵蚀<sup>[20-21]</sup>。传统的土坡加固技术普遍存在成本高昂、能耗较大、施工复杂且严重破坏生态环境等问题。与之相比,该技术主要利用微生物代谢和植物生长,具有环境友好、能耗低、环境适应能力强等优点,为实现土坡加固的“绿色-低碳-可持续”目标提供了一种极具潜力的新途径。

目前,微生物与植物联合加固技术的研究多集中于砂土介质,且普遍忽略了微生物固化过程对植物自身生长的影响。笔者通过控制胶结液的浓度,模拟MICP处理后的土壤环境,研究胶结液对植物生长的影响,从3种植物中筛选出适应性强、抗逆性良好的热带品种,并确定适宜植物生长的胶结液浓度,同时测量相关根系参数;通过直剪试验、无侧限抗压试验、渗透试验及微观分析,系统评估MICP-植物联合加固技术对低液限黏土的加固性能。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

#### 1.1.1 试验土样

试验土样取自海南省屯昌县迈湾某水利工程副坝附近,其基本物理性质指标见表1。颗粒筛分试验表明,粒径大于0.075 mm的颗粒占比为45.91%,塑性指数 $I_p=16.3$ ,液限 $W_L=33.3\%$ 。根据《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)分类法,将该土样归类为低液限黏土。土样的颗粒级配曲线如图1所示。

表1 土颗粒基本物理参数

Table 1 Basic physical properties of soil particles

天然密度/(g/cm <sup>3</sup> )	含水率/%	最大干密度/(g/cm <sup>3</sup> )	最优含水率/%	比重	液限/%	塑限/%	塑性指数	渗透系数/(m/s)
1.76	17.03	1.97	19.5	2.65	33.3	17	16.3	$2.5 \times 10^{-6}$

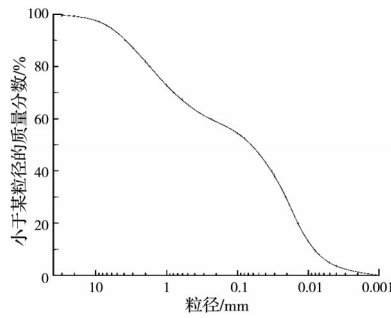


图1 土样颗粒级配曲线

Fig. 1 Grain size distribution curve of the soil sample

### 1.1.2 试验菌种

选用巴氏芽孢杆菌(购自广东省微生物菌种保藏中心)作为试验菌种,该菌种具有强大的环境适应性与高效的脲酶合成能力,即使在极端条件下仍可保持良好的存活能力<sup>[22]</sup>。试验菌液的标准为 $OD_{600} > 1.8$ ,5 min电导率变化量 $> 1.0$  mS/cm。

### 1.1.3 培养基

培养基的主要成分包括酵母提取物、氯化铵、硫酸镍、硫酸锰和去离子水(具体配比见表2)。配制完成后,使用浓度为2 mol/L的氢氧化钠溶液将培养基pH值调节至9.0,随后在121 °C条件下高温灭菌15 min,冷却后置于超净工作台备用。

表2 培养基主要成分

Table 2 Composition of the culture medium g

酵母	氯化铵	硫酸锰	氯化镍	去离子水
10	5	0.005	0.012	500

### 1.1.4 胶结液

胶结液为氯化钙与尿素的水溶液。已有研究表明<sup>[23]</sup>,当氯化钙与尿素摩尔比配比为1:1时,加固效果最佳,因此,采用等摩尔的尿素与氯化钙进行胶结液配制。为系统评估胶结液浓度对植物生长的影响,采用蒸馏水将胶结液分别配制成0.2、0.4、0.6、0.8、1.0 mol/L<sup>[24]</sup>。

### 1.1.5 试验草籽

选取地毯草、狗牙根、狼尾草3种典型热带植物作为试验材料。

## 1.2 试验方法

### 1.2.1 植物适生性生长试验

选用地毯草、狗牙根和狼尾草为试验植物,种植容器为上口径15.5 cm、底径12.3 cm、高12 cm的花盆,试验用土为项目地取回的土样。土样经橡胶锤破碎后放入105 °C烘箱中烘干,以消除原有植物种子对试验结果的干扰。处理后的土样填入花盆,将每盆土表面积控制在120 cm<sup>2</sup>,填充后充分浇水,保证水分充足。

每盆均匀播撒100粒颗粒饱满种子并覆盖适宜

厚度的土层。将花盆置于约30 °C的室内,搭配植物补光灯(灯高1 m、照度35 000 lx),每日持续照射8 h,以保证充足光照。环境参数依据项目地实测气候条件设定:温度变化范围26~35 °C,正午光照度25 994~51 771 lx;试验设定值在该范围内,其中8 h光照时长可有效模拟当地每日的核心强光照时期。

种子播撒1 d后,待土壤表面较为干燥时,依次喷洒菌液和胶结溶液。首先以0.03 mL/cm<sup>2</sup>用量喷洒菌液,静置6 h使其充分分布并吸附于土壤中;随后以0.06 mL/cm<sup>2</sup>用量喷洒胶结溶液,再次静置6 h。此为1轮加固处理,每个花盆共进行3轮。3轮加固结束后,根据实际需要进行适量补水。持续观察并记录20 d内植物的生长状况,并按式(1)计算发芽率。

$$G_p = \frac{G_N}{S_N} \quad (1)$$

式中: $G_p$ 为种子发芽率; $G_N$ 为种子发芽数量; $S_N$ 为种子总数量。

### 1.2.2 植物根系含量测定试验

为确定后续试样制备的根系参数,选取植物适生性生长试验中长势最优的植株,待其生长60 d后进行根系处理。首先剪去植物地上部分,将含根土壤从花盆中完整取出,再利用刀锯将其分割为多个不同尺寸的含根土试样。

将试样置于45 °C烘箱中烘干12 h,每隔2 h称量监测,若相邻两次测量质量损失超过0.01 g,则应延长烘干时间,直至样品达到恒重。烘干后,使用精度为0.01 g的电子天平称量含根质量,记为 $m_1$ 。随后用清水冲洗称量后的含根土,分离出根系,再次烘干,称量根系质量,记为 $m_2$ 。最后,分别按式(2)、式(3)计算土的质量和根系含量。

$$m_0 = m_1 - m_2 \quad (2)$$

$$\omega = \frac{m_2}{m_0} \times 100\% \quad (3)$$

式中: $m_0$ 为土的质量,g; $m_1$ 为含根土的质量,g; $m_2$ 为根系的质量,g; $\omega$ 为根系含量,%。

### 1.2.3 直剪试验

将土样与特定比例的植物根系混合,按最佳含水率及1:2的菌胶比掺入菌液与胶结液,拌和均匀后制成标准环刀试样(直径61.8 mm,高度20 mm),将试样置于养护缸中,在温度为(25±2) °C、湿度约95%的条件下养护7 d。养护结束后,使用直剪仪(ZJ-1D型,绍兴市容纳测控技术有限公司)进行直剪试验,法相应力分别为:100、200、300、400 kPa,剪切速率为0.8 mm/min,以剪切位移为横坐标,剪应力为纵坐标绘制曲线,记录曲线峰值。当剪切应力

持续增大时,则取位移为 6 mm 时对应的剪应力为抗剪强度值。

#### 1.2.4 无侧限抗压试验

土样拌合完成后,均分为 4 份,采用分层击实法制备标准试样,制备完成后养护 7 d。使用无侧限压缩仪(吉欧拓普 LDF,浙江吉欧科技有限公司)进行强度测试,加载速率为 1 mm/min。

#### 1.2.5 渗透性试验

将拌和好的土样压实装入标准渗透环刀(直径 61.8 mm,高度 40 mm)中,养护 7 d。将养护后的试样安装于渗透容器内,随后依据《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)中的变水头试验方法进行渗透试验。

## 2 试验结果及分析

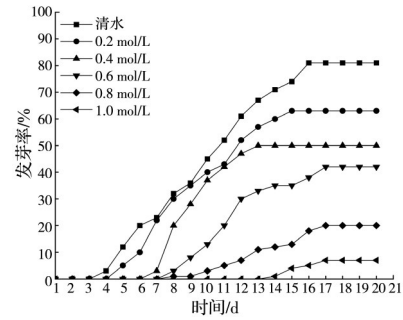
### 2.1 植物适生性生长试验结果及分析

通过对比 3 种植物在不同胶结液浓度下的生长状况可知,在 MICP 与植物协同加固边坡过程中,胶结液浓度对植物生长具有显著影响。从整体生长趋势来看,胶结液对植物的发芽时间和发芽率均产生了抑制效应。随着胶结液浓度的升高,植物发芽时间也向后推迟,发芽率也呈显著下降趋势。

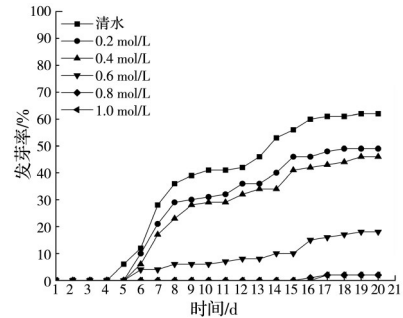
地毯草的生长曲线如图 2(a)所示,其生长过程可分为快速生长期和稳定生长期两个阶段。当胶结液浓度为 0(清水)、0.2、0.4、0.6 mol/L 时,地毯草均在 7 d 内发芽,随后进入快速生长期,并在 14 d 左右达到稳定阶段,发芽率分别为 81%、63%、50% 和 42%,较清水组分别下降了 18%、31% 和 39%。当胶结液浓度为 0.8、1.0 mol/L 时,发芽率仅为 20%、7%,生长受阻明显。

图 2(b)为狗牙根生长曲线,狗牙根发芽后 4 d 内处于快速生长期,两周后趋于稳定,但整体发芽率偏低。清水组仅 60%,浓度  $\geq 0.6$  mol/L 时,发芽率降至 20% 以下,0.8、1.0 mol/L 时仅为 2%;狼尾草生长曲线如图 2(c)所示,大约在第 7 天开始发芽且生长缓慢,发芽率均低于 25%,浓度  $\geq 0.8$  mol/L 时未发芽。

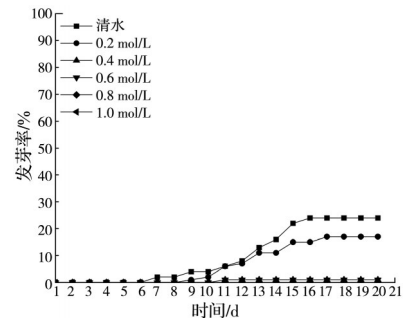
随着胶结液浓度的升高,植物发芽率呈逐渐下降趋势。主要原因在于,高浓度胶结液引起土壤中盐分积累,阻碍植物根系对水分的吸收,引发渗透胁迫,从而显著抑制种子萌发;在微生物固化过程中,高浓度溶液中的  $\text{CO}_3^{2-}$  与  $\text{Ca}^{2+}$  生成  $\text{CaCO}_3$  沉淀并填充土壤孔隙,导致孔隙率降低,进一步增加了植物获取氧气与水分的难度,影响其正常发芽<sup>[25]</sup>;另外,高浓度的胶结液和微生物在土壤中固化,导致土壤强度过大,阻碍了植物幼芽向上生长<sup>[26]</sup>。三者



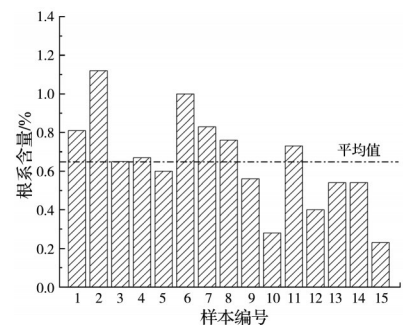
(a) 地毯草萌发曲线



(b) 狗牙根萌发曲线



(c) 狼尾草萌发曲线



(d) 不同试样中根系含量测定结果

图 2 3 种植物萌发曲线及根系含量测定结果

Fig. 2 Germination curves of the three plant species and root content measurement results

共同作用导致发芽率显著下降。

植物自身特性差异对其生长也有影响,狗牙根和狼尾草发芽率较低,可能与其植物种子的形态有关系,狗牙根种子较小,其内部存储的能量极其有限,在生长过程中容易受到更多制约。狼尾草种子外部拥有一层颖壳,在生长过程中颖壳会限制种子

吸水、气体交换和胚芽突破,将种子“闷”在里面,导致其发芽延迟或失败。

3种试验植物的发芽率均随胶结液浓度的升高而降低,该响应规律与既有研究结论一致<sup>[24]</sup>。为兼顾植物发芽率与土体加固效果,选用发芽表现相对较好的地毯草作为后续研究对象,并选取0.2、0.4、0.6 mol/L三个浓度水平的胶结液开展后续试验。

### 2.2 植物根系含量测定试验结果

植物根系含量测定结果如图2(d)所示,对生长周期为60 d的地毯草进行根系测定发现,在15个试样中,根系与土体的质量比整体较小。其中,测得最大根系含量约1.12%,最小为0.23%,极差为0.89%,平均含量为0.648%。

以测得的根系含量平均值为基准,分别向上和向下拓展,确定植物根系含量分别为0.3%、0.6%和0.9%三个水平。

根据植物适生性生长试验与根系含量测定试验的结果确定试验的配比方案,如表3所示。其中R0表示根系含量为0%,M0表示胶结液浓度为0 mol/L;M0R0表示胶结液浓度为0 mol/L且根系含量为0%,其余组合以此类推。试验共设置16组不同配比的试样。

表3 胶结液浓度和根系含量的确定

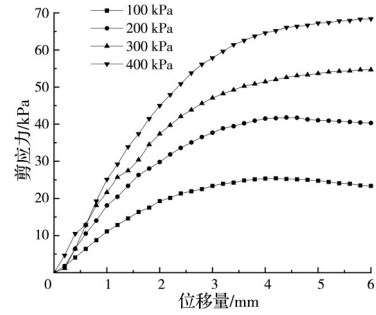
Table 3 Determination of cementation solution concentrations and root contents

影响因素	试验参数	编号
胶结液浓度/(mol/L)	0、0.2、0.4、0.6	M0、M0.2、M0.4、M0.6
根系含量/%	0、0.3、0.6、0.9	R0、R0.3、R0.6、R0.9

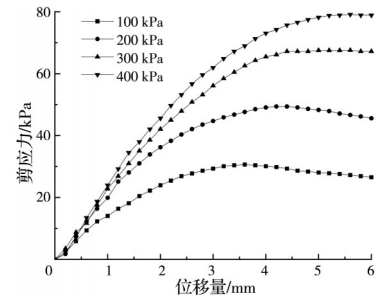
### 2.3 直剪试验结果及分析

图3为4组代表性试样的应力-应变曲线,由图3可知,在较低法向应力下,试样均表现出应变软化特征,而在较高法向应力状态下,则表现出应变硬化特征。单一根系处理组的应力-应变曲线整体上移,在100~400 kPa法向应力范围内,抗剪强度相较试样M0R0提升了15.7%~23.6%。从单一MICP处理组的应力-应变曲线可以看出,在低法向应力下,脆性破坏特征明显,高法向应力下则呈现出应变硬化特征,抗剪强度相较试样M0R0提升了23.8%~41.4%。MICP-根系复合处理组的应力-应变曲线整体高于其余3组,抗剪强度与残余强度相较M0R0提升了99.9%~136.8%。

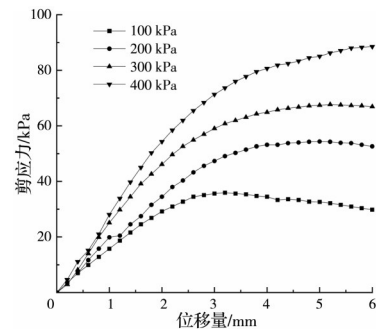
胶结液浓度与根系含量对黏聚力和摩擦角的影响如图4所示。当根系含量一定时,随着胶结液浓度的提高,黏聚力和内摩擦角呈先缓后快增长,当胶结液浓度达到0.6 mol/L时,提升最显著:黏聚力分别为18.8、22.9、31.4、33.2 kPa,相较试样



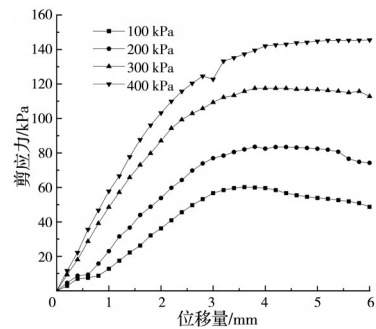
(a) M0R0



(b) M0R0.9



(c) M0.6R0



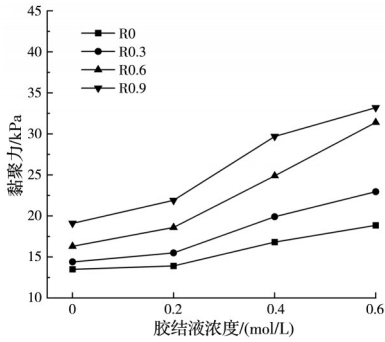
(d) M0.6R0.9

图3 不同法向应力、不同处理方式下试样的应力-应变曲线

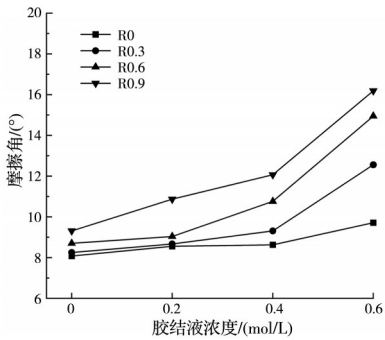
Fig. 3 Stress-strain curves of specimens under different normal stresses and treatments

M0R0,分别提升了39.3%、69.6%、132.6%和145.9%。内摩擦角分别为:9.71°、12.56°、14.95°、16.19°,增幅分别为20.2%、55.4%、85.0%、100.4%。

为了更好地解释上述现象,通过对直剪破坏面(图5)的观察以及MICP-植物根系复合加固机理的分析可知:根系在土体中形成复杂网状结构,不仅



(a) 胶结液浓度和根系含量对黏聚力的影响



(b) 胶结液浓度和根系含量对摩擦角的影响

图 4 胶结液浓度和根系含量对黏聚力和摩擦角的影响  
Fig. 4 Effects of cementation solution concentration and root content on cohesion and friction angle

增强土颗粒间联结、提升结构密实度, 还通过根-土界面摩擦效应限制颗粒位移。MICP 产生的碳酸钙则在土颗粒及根系表面形成胶结层, 填充孔隙并强化颗粒间胶结作用。两者协同作用下, 根-土界面锚固效应显著增强, 既弥补了单一根系加固强度不足缺陷, 又改善了单一 MICP 加固脆性较大的问题, 最终实现抗剪性能的大幅提升。

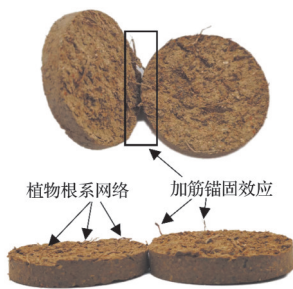


图 5 含根系试样的剪切破坏面

Fig. 5 Shear failure surface of root-reinforced specimens

2.4 无侧限抗压试验结果及分析

图 6 为无侧限抗压试验结果。由图 6 可以看出, 随着胶结液浓度和根系含量的增加, 试样的无侧限抗压强度呈现出不同程度的增加。胶结液浓度为 0、0.2 mol/L 时, 随着根系含量的增加, 试样的无侧限抗压强度增幅较小, 根系含量达到 0.9% 时, 试样的无侧限抗压强度达到 310、361 kPa, 相较试样

MOR0, 分别提高了 53.5% 和 78.7%。胶结液浓度为 0.4、0.6 mol/L 时, 随着根系含量的增加, 试样的无侧限抗压强度增幅较大, 根系含量为 0.9% 时, 无侧限抗压强度达到 487、529 kPa, 相较试样 MOR0, 分别提高了 141.1% 和 161.8%。

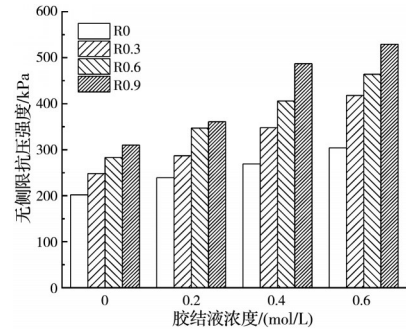


图 6 不同处理方式下试样的无侧限抗压强度  
Fig. 6 Unconfined compressive strength of specimens under different treatments

为了更好地解释无侧限抗压强度的增长趋势, 选取 4 个代表试样的破坏形态进行对比分析, 如图 7 所示。由图 7 可见, 4 种试样的剪切均呈典型的“鼓胀-剪切”复合形态, 但鼓胀幅度、裂缝开展方式随着胶结液和根系含量的不同而明显分化。未加固的试样破坏时鼓胀明显, 如图 7(a) 所示, 试样沿 45° 形成一条贯通上下的斜裂缝, 裂缝宽而长并伴随少

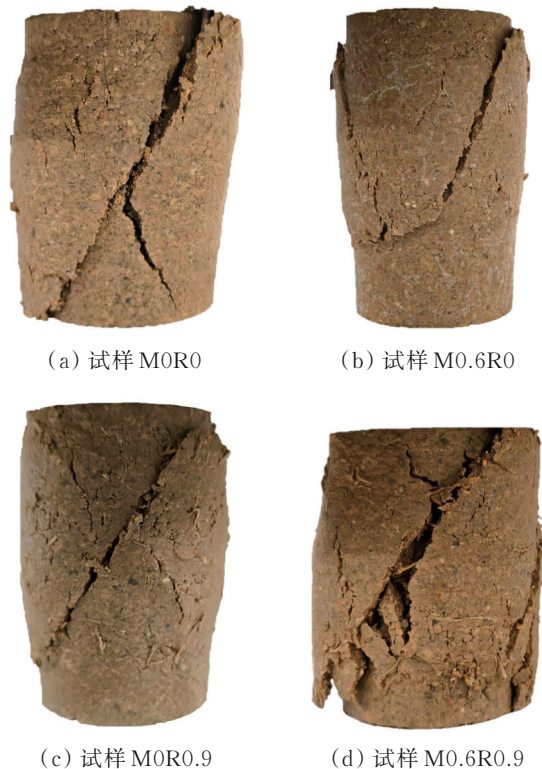


图 7 无侧限抗压试样的破坏形态

Fig. 7 Failure modes of specimens in unconfined compression tests

量细微的斜裂缝。仅MICP加固的试样发生轻微鼓胀,如图7(b)所示,试样表面呈现出多条相对较短的45°斜裂缝,并未出现过多细小裂缝,这是因为碳酸钙与土颗粒胶结提高了土体的强度同时也增加了材料的脆性。图7(c)为仅植物根系加固的试样,相较未加固试样,其鼓胀现象更加明显,破坏形态同样沿45°斜裂缝展开,并伴随少量竖向裂缝,但其破坏面并未贯通上下平面且裂缝宽度较小。这是因为根系网络通过三维空间约束作用限制颗粒位移,并通过根-土界面摩擦及自身抗拉强度有效地提高试样的延性和韧性,抑制裂缝扩展,从而延缓峰后应力跌落。图7(d)为MICP-植物根系联合加固试样,其破坏时鼓胀量最小,除一条贯通的长裂缝外,试样表面出现更多竖向和斜向短裂隙。这是因为MICP产生的碳酸钙不仅胶结土颗粒,更关键的是在根-土界面形成复合胶结层,将原本可能被拔出的根系牢牢锚固在土体中。这种结构将根系的延性与胶结物的刚性完美结合,使试样能够承受更高的荷载,并在破坏时表现出更好的整体性和韧性。

## 2.5 渗透试验结果及分析

变水头渗透试验结果表明(图8),不同加固方式对土体渗透性能的改善效果存在显著差异,且渗透系数随胶结液浓度与根系含量的协同增加呈显著降低趋势。在低浓度区间(0~0.2 mol/L)内,渗透系数下降最显著;当浓度升至0.4 mol/L时,衰减速率开始放缓;胶结液浓度为0.6 mol/L时,各组渗透系数趋于稳定,最高达 $10^{-8}$  m/s量级。其中,随着胶结液浓度的增加,无根系对照组(R0)的渗透系数从 $1.68 \times 10^{-6}$  m/s降至 $1.89 \times 10^{-7}$  m/s,抗渗性能提高一个数量级;仅含植物根系的试样渗透系数最高达 $9.99 \times 10^{-7}$  m/s;相较试样M0R0,试样M0.6R0.9渗透系数从 $1.68 \times 10^{-6}$  m/s降至 $6.81 \times 10^{-8}$  m/s,抗渗性能提高两个数量级。

由图8可以看出,根系含量同样对渗透系数产生系统性影响。在胶结液浓度为0~0.4 mol/L范

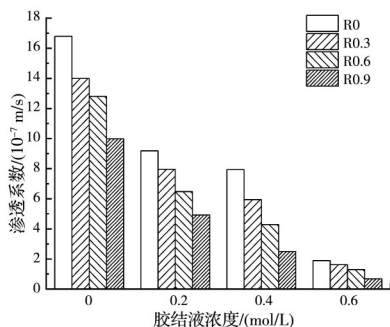


图8 胶结液浓度和根系含量对渗透性能的影响

Fig. 8 Effects of cementation solution concentration and root content on hydraulic conductivity

围内,渗透系数随根系含量的增加显著降低;当浓度达到0.6 mol/L时,根系含量继续增加仍会引起渗透系数小幅下降。值得注意的是,在0.2、0.4、0.6 mol/L胶结液浓度下,无论根系含量多少,试样抗渗性能均优于未添加胶结液试样,且浓度越高,提升效果越显著。这是因为当试样中仅含有植物根系时,根系含量会影响试样的抗渗能力,虽然根系含量较少,但其密度相对较低,导致相同质量下含根土的体积大于纯土。在制备根-土复合试样时,根系对土样产生的密实作用提高了试样的抗渗性能。当使用MICP处理后,MICP产生的碳酸钙对试样的抗渗性能起到主导作用,随着胶结液浓度的提高,溶液中钙离子含量增加,因此碳酸钙的生成量逐渐增多。生成的碳酸钙沉淀不仅填充土体孔隙,还在土颗粒与根系表面形成胶结层,将分散的土颗粒与根系牢固胶结,进一步减少有效渗透通道,降低孔隙连通度。

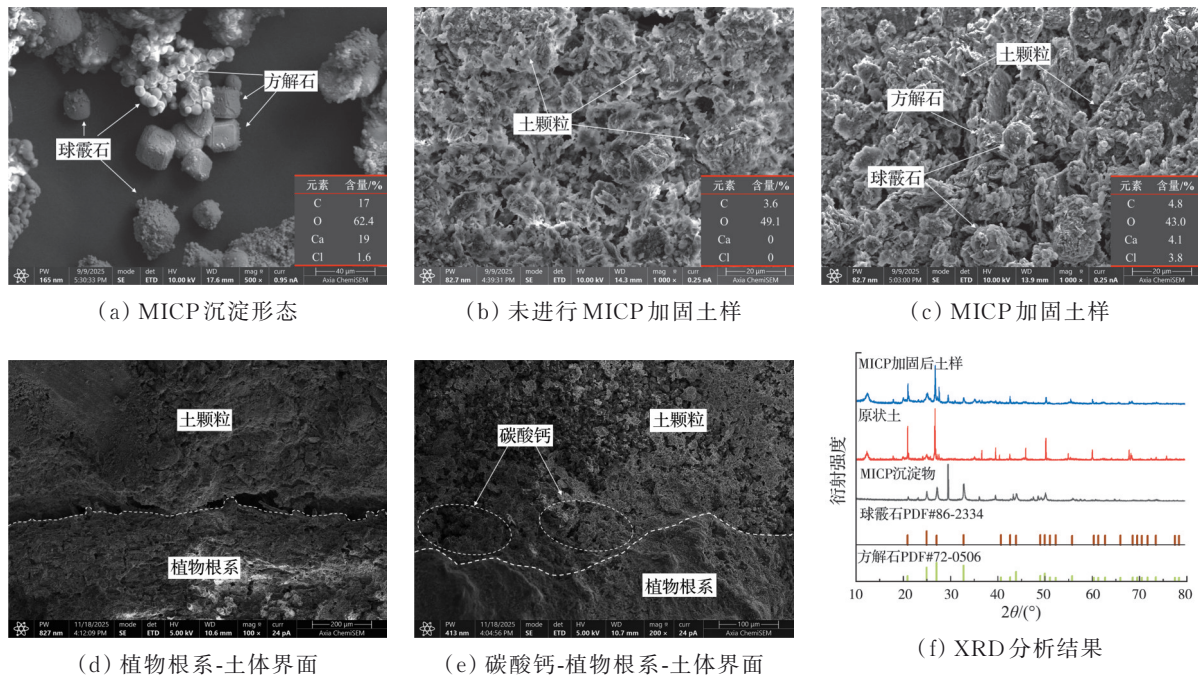
## 2.6 加固机理分析

为了更好地研究MICP协同植物的加固机理,对MICP诱导出的碳酸钙沉淀物、未加固土样和MICP加固土样进行SEM和XRD微观结构分析。

MICP沉淀形态如图9(a)所示,MICP技术产生的沉淀物主要有立方体形态的方解石和圆球形态的球霏石两种,通过微观图可以看到,碳酸钙表面有细小孔洞,这是因为碳酸钙沉淀过程中以微生物为成核点位,微生物死后便在晶体表面留下孔洞<sup>[27]</sup>。通过EDS能谱分析可知,在该区域沉淀物中Ca含量达19%,O、C占比均较高,这与碳酸钙的化学组成相符,为沉淀物为含钙化合物提供了初步佐证。未进行MICP加固的土样如图9(b)所示,土样表面微观结构大多数为不规则形态,通过EDS能谱分析可知,未加固土样中C、O、Al、Si含量较高,而Ca和Cl元素的信号强度极低,含量为0%,表明原始土样中几乎不含钙盐和氯化物。

MICP加固后的土样如图9(c)所示。在土样表面可以看到部分圆形和立方体结构的碳酸钙沉淀物。通过EDS能谱分析可知,相较未进行MICP加固处理的土样,经过MICP加固后的土样中存在Ca和Cl两种元素,这表明经过MICP加固处理后的土样中确实存在含钙化合物。

图9(d)为植物根系-土体界面的微观结构图。由图9(d)可见,植物根系填充了土体的内部孔隙,其表面紧密附着微小的土颗粒。在植物根系-土体结构中,根系主要起到加筋作用,在土体中形成骨架结构,提高了根系-土界面的摩擦性能。图9(e)为碳酸钙-植物根系-土体界面微观结构图,碳酸钙晶



(d) 植物根系-土体界面

(e) 碳酸钙-植物根系-土体界面

(f) XRD 分析结果

图 9 SEM 和 XRD 分析结果

Fig.9 SEM and XRD analysis results

体附着在根系和土颗粒表面。碳酸钙沉积与根系网络共同作用,在填充孔隙的同时强化骨架体系,显著改善了土体力学特性。

图 9(f) 为 3 种物质通过 XRD 测试出的衍射图, MICP 沉淀物与方解石和球霰石的衍射图谱高度吻合,进一步证实沉淀物为碳酸钙。通过定量分析可知,球霰石含量为 64.8%,方解石含量为 35.2%,表明 MICP 沉淀物的主要成分为球霰石。对于未加固土样和加固后土样,经 XRD 分析,其主要成分为石英,碳酸钙含量较少。通过对比衍射图谱可以发现,经加固后的土样在方解石和球霰石的特征衍射峰位置出现了明显增强峰值,表明加固处理后的土样中碳酸钙晶体含量增加。

微观分析表明, MICP-植物协同的本质是“物理架构”与“化学胶结”的互补与增强:植物根系在土体内形成三维网络,实现物理加筋作用; MICP 生成的碳酸钙在土颗粒和植物根系间起到覆膜、胶结与填充孔隙的作用<sup>[28]</sup>。并且,随着碳酸钙生成量的增加,碳酸钙的覆膜、胶结及孔隙填充效应愈发显著。

宏观上, MICP-植物协同加固效应体现在两方面:一方面,土颗粒间的胶结与根-土界面的锚固共同作用,显著增强了土体的抗剪强度和无侧限抗压强度;另一方面,碳酸钙对孔隙的高效填充实现了渗透系数的数量级降低。

## 2.7 胶结液残留组分的影响分析与讨论

在对 MICP 沉淀物和 MICP 加固后土样进行

EDS 能谱分析时均检测到 Cl 元素<sup>[29]</sup>,表明胶结液中的  $\text{CaCl}_2$  可能并未完全参与微生物诱导的碳酸盐沉淀反应,部分  $\text{CaCl}_2$  可能以未反应的晶体形式残留在土体孔隙中。该部分  $\text{CaCl}_2$  可能在短期内提供物理胶结作用,从而短暂提高土体强度,但当遇到降雨后,  $\text{CaCl}_2$  晶体易发生溶解并随雨水流失,可能导致这部分强度消失,从而影响加固土体的长期耐久性<sup>[30]</sup>。研究未能准确量化该部分强度对整体加固效果的影响,未来的研究有必要通过精密的对比试验来定量解析残余  $\text{CaCl}_2$  损失后对整体强度的影响。

## 3 结论

通过控制胶结液的浓度,模拟 MICP 处理后的土壤环境,从 3 种热带植物中筛选出具有较高适应性与抗逆性的地毯草,并确定其适宜生长的胶结液浓度范围。通过系统试验,验证了 MICP-植物根系协同加固土体的可行性,主要结论如下:

1) 由植物适生性生长试验可知,胶结液浓度对植物生长影响显著。当胶结液浓度不超过 0.6 mol/L 时,地毯草发芽率可保持在 40% 以上;当浓度超过 0.6 mol/L 时,发芽率显著降低,仅为 20% 和 7%。

2) 通过对植物根系含量的测定可知,植物根系在土体中的占比普遍较低。测定结果显示,根系含量最高为 1.12%,最低为 0.23%,平均值为 0.648%。

3) 随着胶结液浓度与根系含量的提高,试样的黏聚力与内摩擦角均显著增强。当根系含量为 0.9%、胶结液浓度为 0.6 mol/L 时,黏聚力与内摩

擦角分别达到 33.2 kPa 和 16.19°, 较未加固组分别提高了 145.9% 和 100.4%。

4) MICP-植物根系联合加固能显著提升土体的无侧限抗压强度与抗渗性能。无侧限抗压强度最高达 529 kPa, 较未加固组提升 161.8%; 渗透系数最低为  $6.81 \times 10^{-8}$  m/s, 抗渗性能提高两个量级。

5) MICP 生成的碳酸钙与植物根系形成“胶结-加筋”复合结构, 既填充了土体孔隙, 又强化了根-土界面的锚固效应。MICP 与植物的协同作用不仅显著提升热带低液限黏土的力学性能, 又大幅加强其抗渗性能, 有效缓解了热带暴雨条件下因降雨入渗与冲刷而引发的边坡失稳问题。该方法兼具生态友好性与工程有效性, 为热带地区边坡加固提供了一种新型的生态加固技术路径。但该方法目前仅在室内可控环境下完成验证, 实际工程中降雨、干湿循环等复杂环境因素的影响尚未明确; 同时, 胶结液中未反应  $\text{CaCl}_2$  残留晶体的水环境稳定性待评估, 且地毯草根系较短, 仅能覆盖边坡浅层区域。后续研究可聚焦于: 设计针对性试验量化  $\text{CaCl}_2$  残留对土体长期强度的影响; 开展现场试验, 验证该技术在实际环境下的耐久性与加固效果; 探索其与深根乔、灌木的组合模式, 构建“深层锚固-表层稳定”的复合生态护坡体系, 进一步拓展其工程适用范围。

## 参考文献

- [1] Sun X H, Miao L C, Tong T Z, et al. Study of the effect of temperature on microbially induced carbonate precipitation[J]. *Acta Geotechnica*, 2019, 14(3): 627-638.
- [2] Wang Y Z, Soga K, Dejong J T, et al. A microfluidic chip and its use in characterising the particle-scale behaviour of microbial-induced calcium carbonate precipitation (MICP)[J]. *Géotechnique*, 2019, 69(12): 1086-1094.
- [3] 梁仕华, 谢运鹏, 邓尤术. 微生物诱导碳酸钙沉淀技术的工程应用进展与评述[J]. *广东工业大学学报*, 2024, 41(2): 11-22.  
Liang S H, Xie Y P, Deng Y S. Microbially induced calcium carbonate precipitation technique progress and review of engineering applications[J]. *Journal of Guangdong University of Technology*, 2024, 41(2): 11-22. (in Chinese)
- [4] 刘汉龙, 肖鹏, 肖杨, 等. 微生物岩土技术及其应用研究新进展[J]. *土木与环境工程学报(中英文)*, 2019, 41(1): 1-14.  
Liu H L, Xiao P, Xiao Y, et al. State-of-the-art review of biogeotechnology and its engineering applications[J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2019, 41(1): 1-14. (in Chinese)
- [5] Wu T H, Mckinnell W P, Swanston D N. Strength of tree roots and landslides on Prince of Wales Island, Alaska[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1979, 16(1): 19-33.
- [6] Waldron L J. The shear resistance of root-permeated homogeneous and stratified soil[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1977, 41(5): 843-849.
- [7] 陆桂红, 杨顺, 王钧, 等. 植物根系固土力学机理的研究进展[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2014, 38(2): 151-156.  
Lu G H, Yang S, Wang J, et al. The mechanism of plant roots reinforcement on soil[J]. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 2014, 38(2): 151-156. (in Chinese)
- [8] Song X H, Tan Y, Lu Y. Microscopic analyses of the reinforcement mechanism of plant roots in different morphologies on the stability of soil slopes under heavy rainfall[J]. *Catena*, 2024, 241: 108018.
- [9] 毕银丽, 罗睿, 柯增鸣, 等. 接菌对根土复合体抗剪拉作用机理及其矿山生态修复潜力[J]. *煤炭科学技术*, 2023, 51(1): 493-501.  
Bi Y L, Luo R, Ke Z M, et al. Mechanisms of shear tension resistance of root-soil complexes by inoculated bacteria and potential for ecological restoration in mines [J]. *Coal Science and Technology*, 2023, 51(1): 493-501. (in Chinese)
- [10] 刘静, 苏永辉, 苏进臣, 等. 微生物协同地毯草根系对热带土坡的加固作用[J]. *科学技术与工程*, 2025, 25(11): 4713-4723.  
Liu J, Su Y H, Su J C, et al. Microbial synergies with the root system of blanket grass on the reinforcement of tropical soil slopes[J]. *Science Technology and Engineering*, 2025, 25(11): 4713-4723. (in Chinese)
- [11] 孔剑捷, 陈萍, 黄顺心, 等. 微生物矿化与植物共同作用下荒漠风积沙固化试验研究[J]. *浙江理工大学学报(自然科学版)*, 2019, 47(5): 688-696.  
Kong J J, Chen P, Huang S X, et al. Experimental investigation on solidifying the desert aeolian sand under combined action of MICP and vegetation[J]. *Journal of Zhejiang Sci-Tech University (Natural Sciences)*, 2019, 47(5): 688-696. (in Chinese)
- [12] 谢约翰, 唐朝生, 尹黎阳, 等. 纤维加筋微生物固化砂土的力学特性[J]. *岩土工程学报*, 2019, 41(4): 675-682.  
Xie Y H, Tang C S, Yin L Y, et al. Mechanical behavior of microbial-induced calcite precipitation (MICP)-treated soil with fiber reinforcement[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2019, 41(4): 675-682. (in Chinese)
- [13] 赵志杰, 李驰, 高瑜, 等. MICP 技术与超旱生植物联合治理流沙试验研究[J]. *人民黄河*, 2022, 44(8): 119-122, 127.  
Zhao Z J, Li C, Gao Y, et al. Experimental study on the treatment of mobile dunes by MICP technology combined with super xerophytes[J]. *Yellow River*, 2022, 44

- (8): 119-122, 127. (in Chinese)
- [14] Zheng X G, Huang W, Tan Z J, et al. Experimental study on strengthening root-soil composite with different root contents by using MICP[J]. *Advances in Civil Engineering*, 2022, 2022: 3468900.
- [15] Liu B, Xie Y H, Tang C S, et al. Bio-mediated method for improving surface erosion resistance of clayey soils [J]. *Engineering Geology*, 2021, 293: 106295.
- [16] Cheng Y J, Tang C S, Pan X H, et al. Application of microbial induced carbonate precipitation for loess surface erosion control[J]. *Engineering Geology*, 2021, 294: 106387.
- [17] Sun X H, Miao L C, Chen R F, et al. Surface rainfall erosion resistance and freeze-thaw durability of bio-cemented and polymer-modified loess slopes[J]. *Journal of Environmental Management*, 2022, 301: 113883.
- [18] Sun X H, Miao L C, Wang H X, et al. Bio-cementation for the mitigation of surface erosion in loess slopes based on simulation experiment[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2022, 22(6): 1804-1818.
- [19] Wang Y N, Li S K, Li Z Y, et al. Exploring the application of the MICP technique for the suppression of erosion in granite residual soil in Shantou using a rainfall erosion simulator[J]. *Acta Geotechnica*, 2023, 18(6): 3273-3285.
- [20] Sun X H, Miao L C, Wang H X, et al. Improvement of characteristics and freeze-thaw durability of solidified loess based on microbially induced carbonate precipitation [J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2021, 80(6): 4957-4966.
- [21] Sun X, Miao L, Chen R. The application of bio-cementation for improvement in collapsibility of loess[J]. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2021, 18(9): 2607-2618.
- [22] Dejong J T, Fritzges M B, Nüsslein K. Microbially induced cementation to control sand response to undrained shear[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2006, 132(11): 1381-1392.
- [23] Tian X W, Xiao H B, Li Z Y, et al. A fractional order creep damage model for microbially improved expansive soils[J]. *Frontiers in Earth Science*, 2022, 10: 942844.
- [24] 李中义, 邵光辉, 马志刚. 微生物固化粉土坡面的植物适应性研究[J]. *林业工程学报*, 2020, 5(2): 158-163.  
Li Z Y, Shao G H, Ma Z G. Plant adaptability of silty soil slope protected by microbial solidification[J]. *Journal of Forestry Engineering*, 2020, 5(2): 158-163. (in Chinese)
- [25] 侯文帅, 赵永刚, 赵卫全, 等. MICP与高羊茅联合加固黏土的抗冲刷和抗崩解性能试验研究[J/OL]. *西安理工大学学报*, 2024-06-28. <https://link.cnki.net/urlid/61.1294.N.20240627.1034.002>  
Hou W S, Zhao Y G, Zhao W Q, et al. Experimental study on anti-erosion and anti-disintegration of reinforced clay by MICP and *Festuca arundinacea* [J/OL]. *Journal of Xi'an University of Technology*, 2024-06-28. <https://link.cnki.net/urlid/61.1294.N.20240627.1034.002>. (in Chinese)
- [26] Daba S. Note on effects of soil surface crust on the grain yield of sorghum (*Sorghum bicolor*) in the Sahel[J]. *Field Crops Research*, 1999, 61(3): 193-199.
- [27] de Muynck W, de Belie N, Verstraete W. Microbial carbonate precipitation in construction materials: a review [J]. *Ecological Engineering*, 2010, 36(2): 118-136.
- [28] 刘静, 王昊, 杨鑫, 等. 微生物诱导碳酸钙沉淀加固热带土质边坡现场试验研究[J]. *岩土力学*, 2025, 46(增刊1): 343-353.  
Liu J, Wang H, Yang X, et al. Field test study on reinforcement of tropical soil slope using microbial induced calcium carbonate precipitation[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2025, 46(Sup 1): 343-353. (in Chinese)
- [29] 江昭明, 陈永贵, 文子豪, 等. pH值对MICP固化修复镉污染尾矿的影响研究[J]. *岩土工程学报*, 2025, 47(1): 38-47.  
Jiang Z M, Chen Y G, Wen Z H, et al. Effects of pH on MICP curing of cadmium-contaminated tailings[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2025, 47(1): 38-47. (in Chinese)
- [30] Han Y, Wang Q, Wang N, et al. Effect of freeze-thaw cycles on shear strength of saline soil[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2018, 154: 42-53.

(编辑 王秀玲)