

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2024.118



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



钙源及处理轮次对砂黄土 MICP 覆膜效果的影响

李佳良^a, 杜强^{a,b,c}, 刘旭梅^a, 曲立强^a

(内蒙古工业大学 a. 土木工程学院; b. 沙旱区地质灾害与岩土工程防御自治区高等学校重点实验室; c. 地质技术与岩土工程内蒙古自治区工程研究中心, 呼和浩特 010051)

摘要: 钙源与处理轮次是影响砂黄土 MICP 覆膜效果的重要因素。为探究二者对砂黄土 MICP 覆膜效果的影响规律, 选用氯化钙、乙酸钙、乳酸钙 3 种钙源, 设置 4 种不同轮次开展坡面 MICP 覆膜加固试验, 并通过碳酸钙含量测试、室内降雨冲刷试验及微型贯入试验, 系统分析不同工况下土体的加固效果。结果表明: 不同钙源的土体覆膜形式存在显著差异, 氯化钙、乙酸钙主要依靠土体孔隙内生成的碳酸钙胶结土颗粒, 提升颗粒间黏聚力以实现土体加固; 乳酸钙在土体内部生成的碳酸钙含量较低, 加固方式以土体表层覆膜防护为主。不同钙源对砂黄土 MICP 覆膜效果的影响主要体现在碳酸钙含量、晶体类型及固化深度 3 方面, 且不同钙源在不同处理轮次下的覆膜效果存在差异。其中, 以氯化钙为钙源时, 生成的碳酸钙主要为方解石, 3 轮及以上处理可实现良好的覆膜加固效果, 处理轮次超过 5 轮后, 土体防护性能提升趋于平缓; 以乙酸钙、乳酸钙为钙源时, 生成的碳酸钙主要为文石; 乙酸钙 1 轮处理的覆膜效果较差, 但随着处理轮次的增加, 防护性能显著提升, 多轮次加固条件下可替代氯化钙使用; 乳酸钙仅 1 轮处理即可达到最优覆膜效果, 适用于短工期应急加固场景, 但其 3 轮及以上多轮次处理的加固效果显著弱于氯化钙与乙酸钙。

关键词: 微生物诱导碳酸钙沉淀; 钙源; 处理轮次; 微生物覆膜; 砂黄土; 坡面侵蚀

中图分类号: TU444 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2026)05-0160-11

Influence of calcium sources and treatment cycles on MICP coating effect of sandy loess

LI Jialiang^a, DU Qiang^{a,b,c}, LIU Xumei^a, QU Liqiang^a

(a. Civil Engineering College; b. Key Laboratory of Geological Hazards and Geotechnical Engineering Defense in Sandy and Drought Regions at Universities of Inner Mongolia Autonomous Region; c. Inner Mongolia Engineering Research Center of Geological Technology and Geotechnical Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, P. R. China)

Abstract: Calcium sources and treatment rounds are important factors that influence the MICP coating effect. To explore the influence of the two factors on the MICP coating effect on sandy loess, three calcium sources

收稿日期: 2024-08-11

基金项目: 内蒙古自然科学基金(2022LHMS05010); 内蒙古自治区直属高校基本科研业务费(JY2022096、ZTY2023058、ZTY2023056)

作者简介: 李佳良(2001-), 男, 主要从事环境岩土工程研究, E-mail: ljl_22@163.com。

杜强(通信作者), 男, 副教授, E-mail: dq410@imut.edu.cn。

Received: 2024-08-11

Foundation items: Inner Mongolia Natural Science Foundation (No. 2022LHMS05010); Basic Scientific Research Business Fee Project of Colleges and Universities Directly under the Inner Mongolia Autonomous Region (Nos. JY2022096, ZTY2023058, ZTY2023056)

Author brief: LI Jialiang (2001-), main research interest: microbial geotechnology, E-mail: ljl_22@163.com.

DU Qiang (correspondence author), associate professor, E-mail: dq410@imut.edu.cn.

(calcium chloride, calcium acetate and calcium lactate) were selected to treat the model slope for four different rounds, and the calcium carbonate content, lab rainfall scouring test and micro-penetration test were carried out on the samples after coating. The results show that the coating forms of different calcium sources are different. Calcium chloride and calcium acetate mainly strengthen the soil by increasing the cohesion between soil particles through the cementation of calcium carbonate in the pores of the soil, while the soil treated with calcium lactate has a low content of calcium carbonate, and calcium carbonate is more likely to form a coating on the surface of the soil. The influence of different calcium sources on the MICP coating effect of sandy loess is mainly reflected in three aspects: calcium carbonate content, calcium carbonate crystal form and curing depth, and the coating effects of different calcium sources under different treatment rounds are also different. When calcium chloride is used as a calcium source, the calcium carbonate is mainly calcite. When the treatment is more than three rounds, the effect of coating is better, but after more than five rounds of treatment, the effect of coating is not obvious. When calcium acetate and calcium lactate are used as calcium sources, the generated calcium carbonate is mainly aragonite. Although the effect of coating is poor when the soil is treated with calcium acetate for one round, the effect of coating increases significantly with the number of rounds; when used for multiple rounds, calcium acetate can be used to replace calcium chloride. With calcium lactate as a calcium source, the effect of coating is the best. When the treatment is more than three rounds, the effect is not as good as that with calcium chloride and calcium acetate; calcium lactate is suitable for short-term urgent treatment.

Keywords: microbially induced calcium carbonate precipitation (MICP); calcium source; treatment rounds; microbial coating; sandy loess; slope erosion

黄土高原自北向南分为砂黄土带、黄土带和黏黄土带,砂黄土带是黄土高原地质灾害最为严重的区域^[1]。砂黄土土体结构松散,颗粒间黏聚力较小,存在高渗透性、弱湿陷性、易崩解等不良特性,土体抗侵蚀能力弱,易遭受雨水冲刷侵蚀。鄂尔多斯市地处砂黄土带,年均土壤侵蚀量为3 541.572 t/km²,水土流失对当地生态环境、能源开发、交通运输产生较大不利影响,做好边坡土体侵蚀防护是鄂尔多斯水土保持工作的重中之重^[2]。传统坡面防护措施存在施工复杂、工期长、环保性差等不足,因此研发施工简便、工期短、环保性能优良的坡面加固技术具有重要意义。

微生物诱导碳酸钙沉积(microbially induced carbonate precipitation,简称MICP)是利用自然界细菌新陈代谢生成脲酶,脲酶水解尿素后与环境钙源发生矿化反应,生成碳酸钙沉淀。与化学法生成的碳酸钙晶体不同,微生物矿化形成的碳酸钙具备胶结作用,可黏结松散土颗粒^[3],同时具有低能耗、环境污染小^[4]等优点。自Whiffin等^[5]将该技术应用于砂土固化后,MICP技术已大量运用于土体防护领域^[6-10]。MICP反应生成的碳酸钙可填充土体孔隙,既可提高土体强度,也能显著改善土体防渗与抗侵蚀性能^[11]。MICP覆膜能对土体表层形成有效防护,现有学者尝试借助其治理土体冲刷侵蚀病害。Jiang等^[12]、程瑶佳等^[13]、Chung等^[14]、Salifu等^[15]、Liu

等^[16]分别针对填土、粉质黄土、砂土、花岗岩残积土等开展MICP覆膜试验并评价其抗侵蚀性能,结果表明,覆膜处理可显著降低土体侵蚀速率与侵蚀量,提升土体抗渗能力。但砂黄土在颗粒级配、物质组分等方面与粉质黄土、砂土存在明显区别,工程特性差异较大,MICP覆膜处理砂黄土的作用效果仍有待深入研究。

钙源是影响MICP处理效果的重要因素^[17]。Abo-El-Enin等^[18]研究发现,氯化钙填充裂缝的修补效果优于乙酸钙与硝酸钙;张永杰等^[19]采用不同钙源对花岗岩残积土进行处理,结果表明,以氯化钙为钙源时试验的无侧限抗压强度高于氯化镁、乙酸钙组。而Zhang等^[20-21]发现,以乙酸钙为钙源胶结砂土时试样强度高于硝酸钙、氯化钙组。王维大等^[22]采用不同钙源对含金属土进行处理,结果同样表明乙酸钙的加固效果优于氯化钙。程瑶佳等^[23]分别采用氯化钙、石灰石与乙酸复配自制的乙酸钙对砂土进行胶结,结果表明,采用自制乙酸钙处理的砂柱无侧限抗压强度要高于氯化钙组。综上,现有研究关于钙源对MICP加固效果的影响规律结论尚不统一,有待进一步研究。

此外,不同钙源在不同处理轮次下的表现也不尽相同。刘涛等^[24]、梁仕华等^[25]采用蠕动泵法开展循环注浆试验,探究钙源与注浆轮次对MICP处理效果的影响,但蠕动泵法难以应用于实际坡面加固

工程,采用喷洒、滴灌等简易方式开展覆膜处理显得尤为重要^[26]。固化方式会显著改变不同钙源、不同处理轮次下的加固效果^[27],采用喷洒法处理砂黄土时,处理轮次对土体覆膜效果的影响仍有待细致研究。

砂黄土因其独特的地理位置,砂质含量较高,土体性质不同于普通粉质黄土。针对黄土高原北部砂黄土土体结构松散、颗粒间黏聚力低、易受雨水冲刷破坏的问题,可采用 MICP 技术开展加固处理,但钙源、处理轮次对砂黄土覆膜效果的影响尚不明确。采用氯化钙、乙酸钙、乳酸钙 3 种钙源对鄂尔多斯砂黄土坡面模型开展 1、3、5、7 轮共 4 组轮次的覆膜处理,对覆膜试样开展扫描电镜(SEM)、X 射线衍射(XRD)测试及数码显微镜观测。在此基础上开展室内降雨冲刷试验,测定试样碳酸钙含量与固化深度,以坡面侵蚀量、坡面径流量为评价指标,分析钙源与处理轮次对 MICP 覆膜加固效果的作用规律。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

试验所用砂黄土取自鄂尔多斯市准格尔旗,天然密度为 1.7 g/cm^3 ,孔隙比为 0.75。土样经土壤粉碎机粉碎后过 2 mm 筛备用,依据《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)^[28]测定砂黄土的基本物理性质,结果如表 1 所示。

表 1 土的基本性质
Table 1 Basic soil properties

液限 ω_L	塑限 ω_P	天然含水量/%	塑性指数 I_P	相对密度 d_s
22.4	15.6	5.6	6.8	2.7

试验用菌为巴氏芽孢杆菌(ATCC11859),购于上海保藏微生物中心,为好氧革兰氏阳性菌,属化能异养型,能在 $15\sim 37^\circ\text{C}$ 条件下生长^[29],新陈代谢过程中可分泌大量脲酶。为保障细菌正常生长繁殖,试验采用巴氏液体培养基,每 1 L 培养基含 20 g 酵母粉、10 g 硫酸铵、15.748 g 氨基丁三醇缓冲物。试验所用胶结液浓度为 0.5 mol/L ,主要由尿素与钙源配制而成,其中钙源分别为氯化钙、乙酸钙、乳酸钙。

1.2 试验方法

1.2.1 细菌培养与参数测定

将配制好的培养基置于高温灭菌箱内, 120°C 条件下灭菌 20 min,冷却至室温后于超净工作台按 1% 体积比接种。接种后的培养基放入振荡培养

箱,在 30°C 、 200 r/min 条件下振荡培养 48 h 制得菌液。取 3 mL 菌液与 27 mL 尿素溶液于试管中混合,每 1 min 测定一次电导率,连续监测 5 min 电导率变化;5 min 内平均电导率变化值乘以稀释倍数 10,即为菌液初始酶活性^[30]。采用分光光度计在 600 nm 波长下测定菌液吸光度 OD_{600} 。试验测得菌液初始酶活性为 $13.33 \text{ mmol}/(\text{L}\cdot\text{min})$, OD_{600} 为 1.60。

1.2.2 覆膜试验

将土样装入 $36.5 \text{ cm}\times 26.5 \text{ cm}\times 4.8 \text{ cm}$ 模具中,按照目标密度 1.7 g/cm^3 分层压实制样。分别采用氯化钙、乙酸钙、乳酸钙 3 种钙源,设置 1、3、5、7 轮共 4 组处理轮次开展 MICP 覆膜处理,试验流程如图 1 所示。

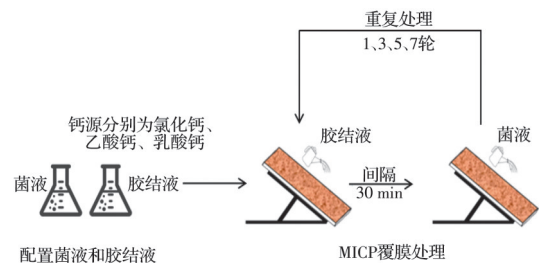


图 1 覆膜试验流程

Fig. 1 Coating test process

目前采用喷洒法改良土体时,多采用先喷洒菌液、后喷洒胶结液的施工顺序^[31-32]。但选用乳酸钙作为钙源时,因乳酸钙溶解度偏低,且砂黄土孔隙细小,胶结液中未完全溶解的乳酸钙易堆积于试样表层。表层乳酸钙颗粒难以参与 MICP 矿化反应,钙源利用效率偏低;同时,表层会覆盖未溶解乳酸钙,渗入土体内的钙离子数量有限,最终试样碳酸钙生成量较少。为此,覆膜试验调整喷洒顺序,采用先喷胶结液、后喷菌液的方式。后续喷洒的菌液可带动胶结液向土体内部入渗,同时与表层滞留的乳酸钙充分反应,提升钙源利用率。参考 Sun 等^[33]的覆膜处理方法,确定胶结液喷洒量为 1 L/m^2 ,菌液喷洒量为 0.5 L/m^2 ;单次先喷胶结液,间隔 30 min 喷洒菌液,记为 1 轮处理;每完成 1 轮后静置 24 h,然后开展下一轮处理。全部覆膜完成后,试件置于室内通风处静置 7 d,再开展降雨冲刷试验。试验除 MICP 覆膜组别外,另设置未覆膜砂黄土坡面作为对照组,试验方案如表 2 所示。3 种钙源处理后的覆膜试样如图 2 所示。

1.2.3 碳酸钙含量测定

试验土样为重塑砂黄土,为节约用料,在控制密度、含水率、压实度与前述覆膜试样保持一致的前提下,采用 $10 \text{ cm}\times 10 \text{ cm}\times 5 \text{ cm}$ 透明模具制备试

表 2 试验方案
Table 2 Test plan

钙源	组别	轮次	浓度/(mol/L)	营养物质质量浓度/(g/L)
氯化钙	C11	1	0.5	15
	C13	3		
	C15	5		
	C17	7		
乙酸钙	Y1	1	0.5	15
	Y3	3		
	Y5	5		
	Y7	7		
乳酸钙	R1	1	0.5	15
	R3	3		
	R5	5		
	R7	7		
对照组	S0	0	0	15

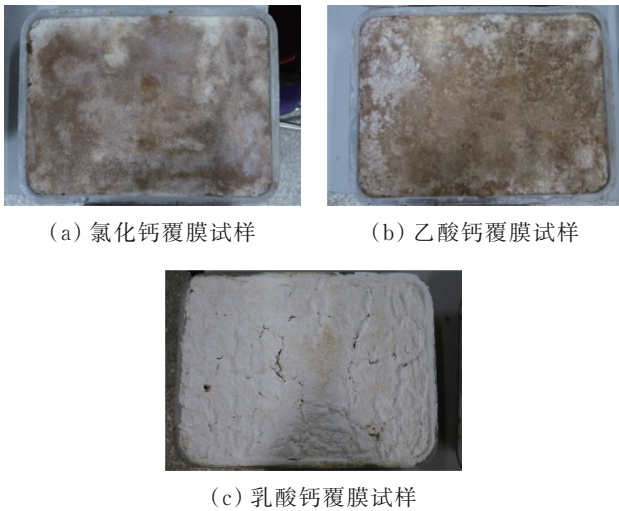


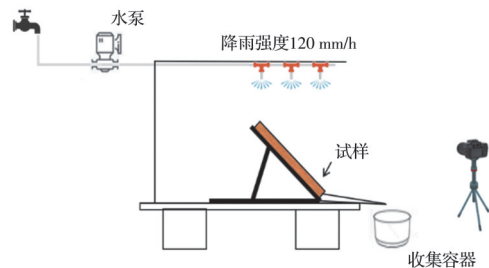
图 2 覆膜试样
Fig.2 Coated sample

样。依据试样表面积换算,胶结液喷洒量取 1 L/m²、菌液喷洒量取 0.5 L/m²覆膜,覆膜完成后测定碳酸钙含量。土样按 1 cm 分层装填,每层称取 170 g 土料压实,后续 MICP 处理参照前述覆膜试验方案执行。养护完成后,以 0.5 cm 为分层厚度逐层测定碳酸钙含量。

碳酸钙含量测定采用酸洗法^[34]:将每层土样放入试管,置于烘箱烘干后称重,空试管净重记为 m_1 ;烘干后试样与试管总重记为 m_2 ;然后向试管中滴加 1 mol/L 盐酸溶解碳酸钙,直至试管内无气泡产生;采用去离子水对反应后的样品反复离心冲洗,冲洗干净后放入烘箱干燥至恒重,此时土样与试管干燥后的总干重为 m_3 。碳酸钙含量计算式为 $C_{CaCO_3} = \frac{m_2 - m_3}{m_2 - m_1} \times 100\%$ 。

1.2.4 室内降雨冲刷试验

室内降雨冲刷试验如图 3 所示,将覆膜处理后的试样置于模型箱内,设定坡角 60°,与取土现场坡面角度保持一致。采用雾化喷头模拟降雨,鄂尔多斯地区汛期暴雨降雨强度可达 117.6 mm/h,试验设置降雨强度为 120 mm/h,降雨时长为 10 min,模拟短时强降雨条件下的坡面冲蚀过程,试验全程使用相机记录坡面冲蚀形态。



(a) 室内降雨冲刷试验示意图



(b) 降雨冲刷中的试样

图 3 室内降雨冲刷试验
Fig.3 Indoor rainfall scouring test

坡面径流指降雨期间未渗入坡体、沿坡面汇流至坡脚的水流,坡面径流量可反映土体入渗性能变化。大量坡面侵蚀会造成土层变薄、土壤退化,破坏区域生态平衡,坡面侵蚀量可直观评价土体抗侵蚀能力。坡面径流量测定采用体积法:冲刷试验过程中收集试样表面冲刷混合液,收集完成后置于阴凉处静置 24 h,待土颗粒完全沉淀,倒出上清液并测定体积,即为坡面径流量;剩余沉淀物烘干至恒重后称重,得到坡面侵蚀量。

1.2.5 微型贯入试验

采用贯入仪分别对冲刷前后的覆膜试样开展贯入试验,获取试样降雨冲刷前后的坡面强度。先测定初始坡面强度,再开展降雨冲刷试验;冲刷完成后的试样置于室内通风处静置 1 d,再次开展贯入试验,得到残余坡面强度。选取试样中部侵蚀区域四角与中心点位进行微型贯入,操作步骤为:将测头垂直坡面按压,达到规定贯入深度后停止,读取刻度数值,得到该点贯入强度。取所有测点贯入强度平均值作为该试样坡面强度,微型贯入试验如图 4 所示。



图 4 微型贯入试验

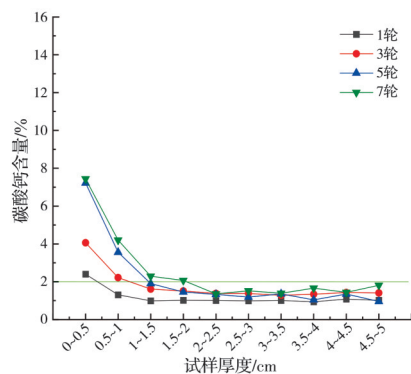
Fig. 4 Micro-penetration test

2 试验结果

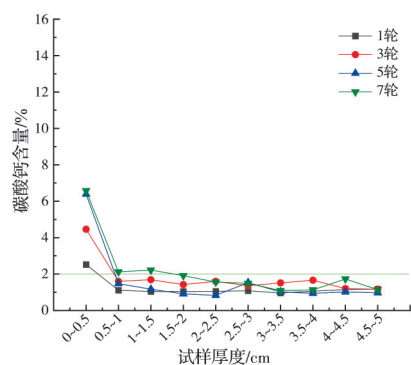
2.1 碳酸钙含量

在 MICP 技术固化过程中,菌液与胶结液在土体表层及孔隙内扩散流动,在坡面形成具备一定厚度的碳酸钙固化层,可有效提升土体抗渗性能、表层强度与抗侵蚀能力,该效应即为 MICP 覆膜作用。MICP 覆膜效果受碳酸钙含量与固化深度共同影响,砂黄土原生碳酸钙含量通常不超过 1%;为对比不同钙源、处理轮次对覆膜效果的影响,本文将碳酸钙含量大于 2% 的土层厚度界定为覆膜层厚度。图 5 为不同钙源、不同处理轮次下试样各深度的碳酸钙含量测试结果。由图 5 可见,随着处理轮次的增多,试样同一深度的碳酸钙含量逐步升高,覆膜层厚度同步增大,不同钙源的作用效果存在明显差异。

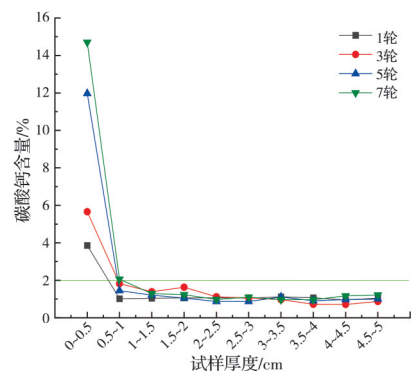
以氯化钙为钙源开展 1 轮、3 轮处理时,试样表层 0.5 cm 范围内碳酸钙含量低于乙酸钙、乳酸钙处理组,0.5~1.0 cm 范围内碳酸钙含量在 3 类钙源中最高;随着处理轮次的增加,试样各土层内碳酸钙含量逐步升高,覆膜层厚度同步增大;处理 5 轮、7 轮时,表层 0.5 cm 范围内碳酸钙含量高于乙酸钙组、低于乳酸钙组,经 7 轮处理试样的覆膜层厚度最大,可达 2.0 cm。以乙酸钙为钙源开展处理时,随着处理轮次的增加,同一深度土层内碳酸钙含量有所上升;经 1、3、5 轮处理后,碳酸钙主要集中于表层 0.5 cm 范围内,覆膜层厚度无明显增长,经 7 轮处理后覆膜层厚度为 1.5 cm。以乳酸钙为钙源开展 1 轮处理时,试样表层 0.5 cm 范围内碳酸钙含量高于氯化钙、乙酸钙处理组,0.5~1.0 cm 范围内碳酸钙含量偏低;随着处理轮次的增加,试样表层 0.5 cm 范围内碳酸钙含量大幅提升,有效固化深度增长缓慢,经 7 轮处理后仅 0~1 cm 土层内碳酸钙含量高于 2%,覆膜层厚度在 3 类钙源中最小。综合对比,覆膜层厚度整体表现为:氯化钙组>乙酸钙组>乳酸钙组。



(a) 氯化钙



(b) 乙酸钙



(c) 乳酸钙

图 5 不同钙源及处理轮次下的碳酸钙含量

Fig. 5 Calcium carbonate content under different calcium sources and treatment rounds

2.2 坡面强度

图 6 为不同钙源、不同处理轮次下通过微型贯入试验所得降雨冲刷前、后试样的坡面强度。结果表明,随着处理轮次的增加,3 种钙源固化试样经降雨冲刷后坡面强度整体呈上升趋势,但三者的增长趋势差异显著。

以氯化钙为钙源时,经 3 轮及以上处理试样的坡面强度远高于乙酸钙、乳酸钙组,经 7 轮处理试样的强度可达 9 MPa,降雨冲刷后的残余强度同样最高。以乙酸钙为钙源时,经 1~5 轮处理试样的坡面强度低于乳酸钙组,冲刷后的残余强度与乳酸钙组相近;经 7 轮处理后,试样的坡面强度与乳酸钙组接近,但残余强度更高,与经 7 轮氯化钙处理试样的残

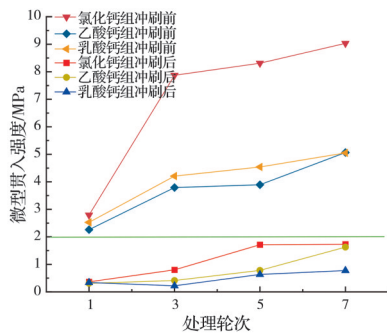


图6 不同钙源及处理轮次下冲刷前、后的坡面强度

Fig. 6 Slope strength before and after scouring under different calcium sources and treatment rounds

余强度差距较小。以乳酸钙为钙源时,经1~5轮处理试样的坡面强度略高于乙酸钙组,但残余强度较低;仅经1轮处理的残余强度与乙酸钙组相近,经7轮及以下处理试样的坡面强度均低于1 MPa,经7轮处理试样的坡面强度仅分别为氯化钙组、乙酸钙组试样的45%、48%。

2.3 坡面径流量

不同钙源、不同处理轮次覆膜后砂黄土坡面在降雨冲刷过程中的坡面径流量如图7所示。由图7可知,随着处理轮次的增加,坡面径流量呈上升趋势,但不同钙源组的增加速度差异显著。

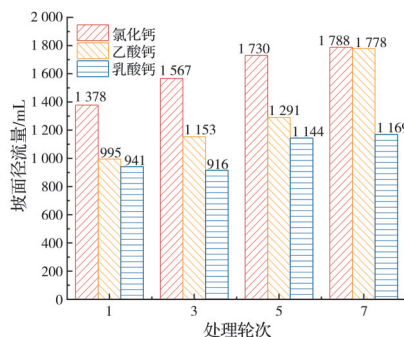


图7 不同钙源及处理轮次下的坡面径流量

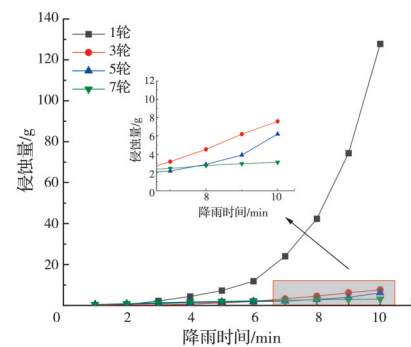
Fig. 7 Slope runoff under different calcium sources and treatment rounds

以氯化钙为钙源时,相同处理轮次下试样的坡面径流量最大;随着处理轮次的增加,坡面径流量逐步上升,相较经5轮处理试样,经7轮处理试样的坡面径流量仅提升3.4%。以乙酸钙为钙源时,试样的坡面径流量介于氯化钙、乳酸钙组之间,经7轮处理试样的坡面径流量较经5轮处理试样增长37.7%。结合碳酸钙含量测试与残余强度试验结果可知,相较经5轮处理试样,经7轮处理后的乙酸钙试样固化深度显著增大,强度提升幅度也更大。以乳酸钙为钙源时,试样的坡面径流量整体偏小,经7轮以下处理试样的坡面径流量极差,为228 mL;随着处理轮次的增加,坡面径流量增幅较低。经3

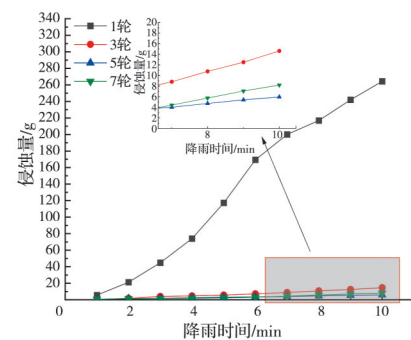
轮处理试样的坡面径流量变化趋势与残余强度变化规律一致,均出现小幅下降。上述结果表明,乳酸钙固化试样的抗渗性能弱于氯化钙、乙酸钙固化试样,且其坡面径流量随处理轮次提升的增幅更小,该规律与明道贵等^[35]的试验结论相符。

2.4 坡面侵蚀量

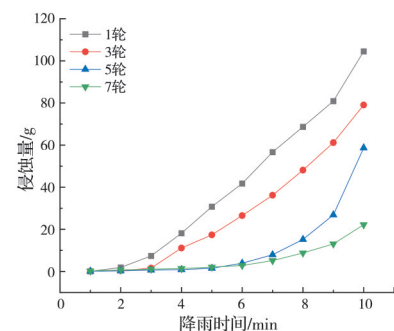
图8为不同钙源、不同处理轮次试样降雨冲刷后的坡面侵蚀量。未处理坡面侵蚀量为395.45 g;由图8可知,随着处理轮次的增加,3种钙源处理试样的坡面侵蚀量均逐步降低,但降幅存在明显差异。



(a) 氯化钙



(b) 乙酸钙



(c) 乳酸钙

图8 不同钙源及处理轮次下砂黄土的坡面侵蚀量

Fig. 8 Erosion amount of sandy loess slope under different calcium sources and treatment rounds

以氯化钙为钙源时,经1轮处理试样的坡面侵蚀量较未处理坡面降低67.7%;经3轮及以上处理后,坡面侵蚀量大幅下降,较未处理坡面减少98%

以上,这表明,经3轮及以上处理可增厚土体覆膜,有效提升土体抗侵蚀性能。以乙酸钙为钙源时,经1轮处理试样的抗侵蚀性能最弱,其坡面侵蚀量较未处理坡面仅降低33.16%;经3轮及以上处理后,坡面侵蚀量大幅下降,较未处理坡面可降低96%,加固效果与氯化钙组相近。以乳酸钙为钙源时,经1轮处理试样的抗侵蚀性能最优,坡面侵蚀量较未处理坡面降低73.57%;处理轮次提升至3轮及以上后,坡面侵蚀量持续下降,但仍显著高于氯化钙、乙酸钙组。

综上,采用不同钙源、不同轮次开展MICP覆膜处理后,土体固化深度存在差异,覆膜防护效果具有一定区别。以氯化钙为钙源时,土体固化深度最大、强度较高,多轮次处理后土体的抗渗性能与抗侵蚀能力优异。以乙酸钙为钙源时,经1轮处理的覆膜效果较差,随着处理轮次的增加,覆膜效果逐步提升。以乳酸钙为钙源时,土体固化深度较浅,多轮次处理效果不佳,但经1轮处理试样表层生成的碳酸钙含量较高,覆膜效果优于氯化钙、乙酸钙组。

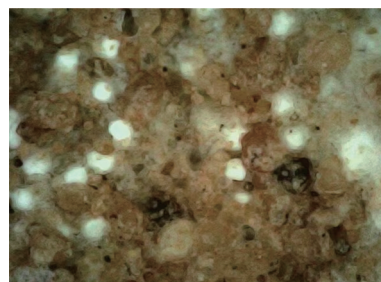
3 讨论

3.1 钙源对覆膜形式的影响

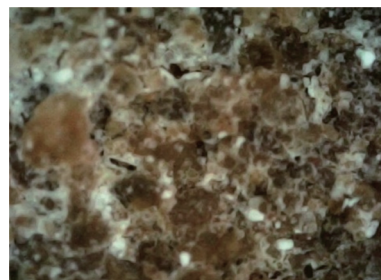
为进一步探究不同钙源MICP处理后砂黄土内部的碳酸钙分布特征,采用1 600倍数码显微镜与SEM对覆膜结构进行观测,观测结果如图9、图10所示。SEM观测结果表明,MICP反应生成的碳酸钙主要附着于土颗粒表面,对土颗粒形成包覆,并在颗粒间发挥胶结作用。3种钙源所生成的碳酸钙对土体的覆膜形式存在差异。结合图2可知,以氯化钙、乙酸钙为钙源时,碳酸钙主要在土体孔隙内生成,试样表面无明显钙层,主要通过胶结土颗粒形成固化层,提升土体各项性能。而以乳酸钙为钙源时,试样表面可形成一层白色钙层。通过观察乳酸钙组试样的喷洒与养护过程发现,由于砂黄土孔隙较小,胶结液中的乳酸钙悬浮颗粒大量积聚于土体表面,随液体下渗的量较少。喷洒菌液时,菌液与土体表面的乳酸钙颗粒反应生成碳酸钙;随着处理轮次的增加,碳酸钙生成量增多,土体表面生成的碳酸钙与未完全反应的乳酸钙共同形成覆膜层。

3.2 钙源及处理轮次对覆膜效果的影响

氯化钙、乙酸钙、乳酸钙处理试样的XRD检测结果如图11所示。由图11可知,氯化钙处理试样主要生成方解石,乙酸钙、乳酸钙处理试样主要生成文石及少量方解石。氯化钙溶解度较高,相较乙酸钙、乳酸钙可生成大量方解石并在土颗粒间形成



(a) 氯化钙



(b) 乙酸钙



(c) 乳酸钙

图9 不同钙源处理试样在土体中的碳酸钙分布情况

Fig. 9 Distribution of calcium carbonate in soil treated with different calcium sources

胶结结构;方解石具备优异的热力学稳定性与耐久性^[36-38],因此在降雨冲刷过程中可维持稳定的胶结作用。以氯化钙为钙源时,经5~7轮处理后,试样的强度、坡面径流量与侵蚀量变化幅度均较小。结合覆膜观测图像及SEM扫描结果可知,氯化钙体系生成的碳酸钙填充土体表层孔隙至一定程度后,会形成致密的覆膜层,土体强度与抗渗性能已处于较高水平,难以进一步大幅提升^[39],因此强度与抗渗性能的增长速度逐渐放缓。

以乙酸钙为钙源时,经1轮处理试样的强度偏低、坡面侵蚀量较大,原因可能是乙酸钙体系主要生成大量文石与少量方解石,而文石对土体的胶结稳定性弱于方解石^[40]。随着处理轮次的增加,乙酸钙处理试样的强度成倍提升;经3轮及以上处理后其强度高于乳酸钙组,经7轮处理试样强度与氯化钙组相近。这是因为随着处理轮次的增加,土体羧基含量与文石生成量同步增多,乙酸钙解离产生的羧基可改善土体内文石的力学性能^[41]。

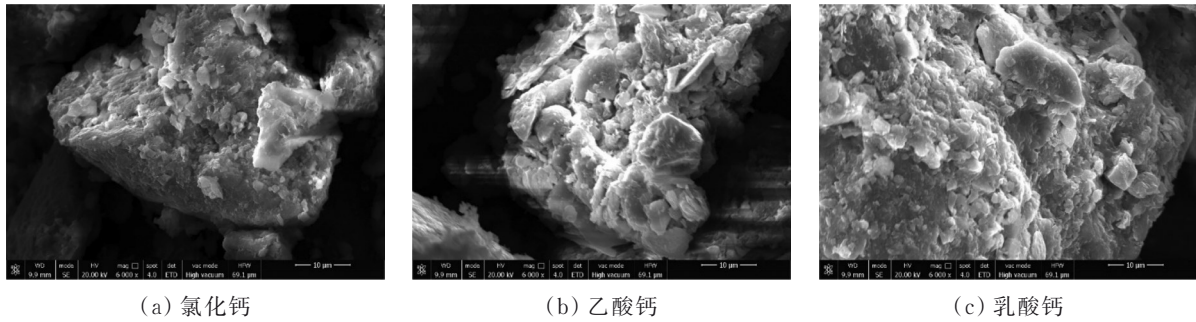
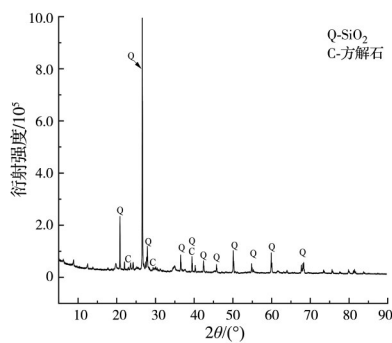
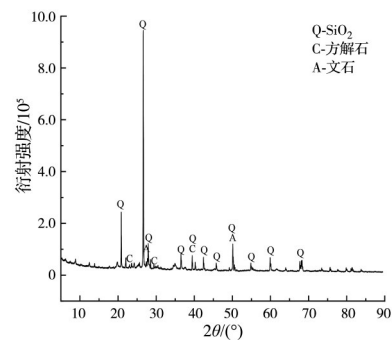


图10 不同钙源处理试样的SEM扫描电镜结果

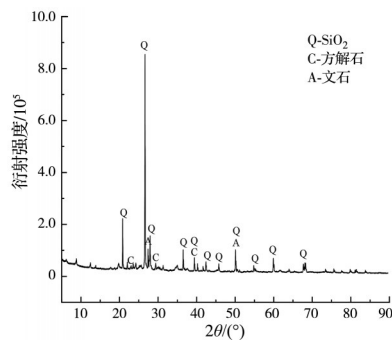
Fig. 10 SEM results of samples treated with different calcium sources



(a) 氯化钙



(b) 乙酸钙



(c) 乳酸钙

图11 不同钙源处理试样的XRD检测结果

Fig. 11 XRD test results of samples treated with different calcium sources

以乳酸钙为钙源时,经1轮处理试样的强度、坡面径流量高于乙酸钙组,坡面侵蚀量甚至低于氯化钙组;但随着处理轮次的增加,试样强度、坡面径流量与坡面侵蚀量提升幅度均较小,经3轮处理时部

分指标还出现下降。这是因为经1轮处理即可生成大量碳酸钙并在试样表层形成钙层,可改善土体力学性能;但乳酸钙溶解度低,难以渗入土体内部,碳酸钙大多富集于土体表层,土体渗透性随之降低^[42]。两类因素共同作用下,后续菌液与胶结液更难下渗,土体加固深度有限,内部碳酸钙生成量少、胶结作用微弱;同时,表层钙层残留大量乳酸钙,遇水易软化失效。上述双重作用共同造成土体抗渗、抗侵蚀性能提升幅度偏低。

4 结论

为探究钙源与处理轮次对砂黄土MICP覆膜效果的影响,采用氯化钙、乙酸钙、乳酸钙3种钙源,开展不同处理轮次的MICP覆膜试验,并结合室内降雨冲刷试验,测定试样碳酸钙含量、覆膜微型贯入强度、坡面径流量及坡面侵蚀量。通过分析3种钙源覆膜效果的差异化机制,得出以下结论:

1)不同钙源的土体覆膜形式存在差异。氯化钙、乙酸钙处理试样主要在土体孔隙内生成碳酸钙,通过碳酸钙胶结土颗粒形成厚度较大的固化层;乳酸钙处理试样虽可形成覆膜层,但覆膜厚度相对较薄,碳酸钙多集中于土体表层,并与未完全反应的乳酸钙共同形成表层覆膜。该覆膜遇水易软化失效,整体防护效果相对较差。

2)钙源对MICP覆膜效果的影响主要体现在碳酸钙晶型、生成含量及固化深度3个方面。氯化钙作为钙源固化砂黄土时,生成的碳酸钙以方解石为主,乙酸钙、乳酸钙则以生成文石为主。当土体碳酸钙含量较高、固化深度较深时,覆膜防护效果较好。

3)不同钙源在各处理轮次下的覆膜效果存在明显差异。以氯化钙为钙源时,试样经3~5轮处理后覆膜效果最优,经5轮处理后覆膜性能的提升不再显著;以乙酸钙为钙源时,经1轮处理覆膜效果较差,经3轮及以上处理后防护效果显著提升,抗冲刷

能力与氯化钙组接近,多轮次加固工况下可采用乙酸钙替代氯化钙;以乳酸钙为钙源时,胶结液可形成表层覆膜,经1轮处理试样覆膜效果最佳,适用于短工期应急处置,但经3~7轮多轮处理的覆膜效果弱于另外两种钙源。

参考文献

- [1] 王永焱,林在贯.中国黄土的结构特征及物理力学性质[M].北京:科学出版社,1990.
Wang Y Y, Lin Z G. Structural characteristics and physical and mechanical properties of loess in China[M]. Beijing: Science Press, 1990. (in Chinese)
- [2] 赵蒙恩,闫庆武,刘政婷,等.鄂尔多斯市土壤侵蚀时空演变及影响因子分析[J].干旱区研究,2022,39(6): 1819-1831.
Zhao M E, Yan Q W, Liu Z T, et al. Analysis of temporal and spatial evolution and influencing factors of soil erosion in Ordos City[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(6): 1819-1831. (in Chinese)
- [3] Qian C X, Yu X N, Wang X. A study on the cementation interface of bio-cement[J]. Materials Characterization, 2018, 136: 122-127.
- [4] 陈玥如,高文艳,陈虹任,等.场地重金属污染土壤固化及MICP技术研究进展[J].环境科学,2024,45(5): 2939-2951.
Chen Y R, Gao W Y, Chen H R, et al. Research progress on solidification and MICP remediation of soils in heavy metal contaminated site[J]. Environmental Science, 2024, 45(5): 2939-2951. (in Chinese)
- [5] Whiffin V S, van Paassen L A, Harkes M P. Microbial carbonate precipitation as a soil improvement technique[J]. Geomicrobiology Journal, 2007, 24(5): 417-423.
- [6] 贺桂成,唐孟媛,李咏梅,等.改性黄麻纤维联合微生物胶结铀尾砂的抗渗性能试验研究[J].岩土力学,2023,44(12): 3459-3470.
He G C, Tang M Y, Li Y M, et al. Experiment on the impermeability of uranium tailings treated by microbial induced calcium carbonate precipitation combined with modified jute fiber[J]. Rock and Soil Mechanics, 2023, 44(12): 3459-3470. (in Chinese)
- [7] 练继建,吴昊潼,闫玥,等.基于微生物诱导碳酸钙沉积的生物覆膜防渗研究[J].水利水电技术,2019,50(8): 128-136.
Lian J J, Wu H T, Yan Y, et al. Study on anti-seepage with microbially induced calcium carbonate precipitation (MICP)-based bio-membrane[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2019, 50(8): 128-136. (in Chinese)
- [8] 李驰,王硕,王燕星,等.沙漠微生物矿化覆膜及其稳定性的现场试验研究[J].岩土力学,2019,40(4): 1291-1298.
Li C, Wang S, Wang Y X, et al. Field experimental study on stability of bio-mineralization crust in the desert[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(4): 1291-1298. (in Chinese)
- [9] 朱飞龙,李庚英,杜虹,等.一种基于微生物沉积的水泥砂浆表面改性技术[J].功能材料,2013,44(5): 700-703, 708.
Zhu F L, Li G Y, Du H, et al. A new surface-modified technology of cement mortar using calcium carbonate biodeposition[J]. Journal of Functional Materials, 2013, 44(5): 700-703, 708. (in Chinese)
- [10] 王瑞兴,钱春香,王剑云,等.水泥石表面微生物沉积碳酸钙覆膜的不同工艺[J].硅酸盐学报,2008,36(10): 1378-1384.
Wang R X, Qian C X, Wang J Y, et al. Different treated methods of microbiologically deposited CaCO_3 layer on hardened cement paste surface[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2008, 36(10): 1378-1384. (in Chinese)
- [11] 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.
- [12] Jiang N J, Soga K. The applicability of microbially induced calcite precipitation (MICP) for internal erosion control in gravel-sand mixtures[J]. Géotechnique, 2017, 67(1): 42-55.
- [13] 程瑶佳,唐朝生,泮晓华,等.微生物矿化作用(MICP)-铺砂联合提高黄土抗侵蚀性试验研究[J].防灾减灾工程学报,2022,42(5): 1010-1018.
Cheng Y J, Tang C S, Pan X H, et al. Experimental study on erosion resistance improvement in loess through coupled microbial mineralization(MICP)-sand paving[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2022, 42(5): 1010-1018. (in Chinese)
- [14] Chung H, Kim S H, Nam K. Application of microbially induced calcite precipitation to prevent soil loss by rainfall: effect of particle size and organic matter content[J]. Journal of Soils and Sediments, 2021, 21(8): 2744-2754.
- [15] Salifu E, Maclachlan E, Iyer K R, et al. Application of microbially induced calcite precipitation in erosion mitigation and stabilisation of sandy soil foreshore slopes: a preliminary investigation[J]. Engineering Geology, 2016, 201: 96-105.
- [16] Liu W P, Song X Q, Huang F M, et al. Experimental study on the disintegration of granite residual soil under the combined influence of wetting-drying cycles and acid rain[J]. Geomatics, Natural Hazards and Risk, 2019, 10

- (1): 1912-1927.
- [17] 刘汉龙, 赵常, 肖杨. 微生物矿化反应原理、沉积与破坏机制及理论: 研究进展与挑战[J]. 岩土工程学报, 2024, 46(7): 1347-1358.
- Liu H L, Zhao C, Xiao Y. Reaction principles, deposition and failure mechanisms and theories of biomineralization: Progress and challenges[J]. Chinese Journal of geotechnical engineering, 2024, 46(7): 1347-1358. (in Chinese)
- [18] Aao-El-Enein S A, Ali A H, Talkhan F N, et al. Utilization of microbial induced calcite precipitation for sand consolidation and mortar crack remediation[J]. HBRC Journal, 2012, 8(3): 185-192.
- [19] 张永杰, 刘涛, 黄万东, 等. 胶结剂对花岗岩残积土微生物固化特性的影响规律[J]. 中国公路学报, 2023, 36(8): 181-189.
- Zhang Y J, Liu T, Huang W D, et al. Research on the effect of cementing agents on the biocemented characteristics of granite residual soil[J]. China Journal of Highway and Transport, 2023, 36(8): 181-189. (in Chinese)
- [20] Zhang Y, Guo H X, Cheng X H. Influences of calcium sources on microbially induced carbonate precipitation in porous media[J]. Materials Research Innovations, 2014, 18(S2): S2-79-S2-84.
- [21] Zhang Y, Guo H X, Cheng X H. Role of calcium sources in the strength and microstructure of microbial mortar[J]. Construction and Building Materials, 2015, 77: 160-167.
- [22] 王维大, 秦思远, 肖宇, 等. 不同钙源对MICP固化氰化尾渣的影响[J]. 有色金属(冶炼部分), 2022(7): 131-137, 149.
- Wang W D, Qin S Y, Xiao Y, et al. Effects of different calcium sources on MICP cured cyanidation tailings[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2022(7): 131-137, 149. (in Chinese)
- [23] 程瑶佳, 唐朝生, 刘博, 等. 基于石灰石粉钙源的微生物固化砂土试验研究[J]. 高校地质学报, 2021, 27(6): 746-753.
- Cheng Y J, Tang C S, Liu B, et al. Experimental study on microbial solidified sand based on calcium source extracted from limestone powder[J]. Geological Journal of China Universities, 2021, 27(6): 746-753. (in Chinese)
- [24] 刘涛, 杨懿, 张永杰, 等. 固化次数与钙源对MICP固化花岗岩残积土均匀性的影响研究[J]. 公路与汽运, 2023(4): 61-65.
- Liu T, Yang Y, Zhang Y J, et al. Study on the influence of solidification times and calcium source on the uniformity of MICP solidified granite residual soil[J]. Highways & Automotive Applications, 2023(4): 61-65. (in Chinese)
- [25] 梁仕华, 牛九格, 戴君, 等. 循环灌浆次数对微生物固化砂土效果的影响[J]. 工业建筑, 2018, 48(7): 22-26.
- Liang S H, Niu J G, Dai J, et al. Effect of the number of grouting cycles on bio-cemented sand[J]. Industrial Construction, 2018, 48(7): 22-26. (in Chinese)
- [26] 邵新航, 李晓丽, 王海军, 等. MICP固化松散砒砂岩抗水蚀机理研究[J]. 水土保持研究, 2024, 31(6): 261-270.
- Shao X H, Li X L, Wang H J, et al. Study on the mechanism of resistance to water erosion of loose pisha sandstone solidified by microorganisms[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(6): 261-270. (in Chinese)
- [27] 王双娇, 李志清, 田怡帆, 等. 微生物岩土工程技术的过去、现在与未来[J]. 工程地质学报, 2024, 32(1): 236-264.
- Wang S J, Li Z Q, Tian Y F, et al. The past, present and future of technology in microbial geotechnical engineering[J]. Journal of Engineering Geology, 2024, 32(1): 236-264. (in Chinese)
- [28] GB 50007—2011 建筑地基基础设计规范[S].
- GB 50007—2011 Code for design of building foundation [S]. (in Chinese)
- [29] Roeselers G, van Loosdrecht M C M. Microbial phytase-induced calcium-phosphate precipitation—a potential soil stabilization method[J]. Folia Microbiologica, 2010, 55 (6): 621-624.
- [30] 王子玉, 喻文晔, 齐超楠, 等. 海水环境下MICP的反应机理与影响因素[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2022, 44(5): 128-135.
- Wang Z Y, Yu W Y, Qi C N, et al. Reaction mechanism and influencing factors of MICP in seawater environment[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2022, 44(5): 128-135. (in Chinese)
- [31] 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.
- [32] Jiang N J, Tang C S, Yin L Y, et al. Applicability of microbial calcification method for sandy-slope surface erosion control[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2019, 31(11): 04019250.
- [33] Sun X H, Miao L C, Wu L Y. Applicability and theoretical calculation of enzymatic calcium carbonate precipitation for sand improvement[J]. Geomicrobiology Journal, 2020, 37(4): 389-399.
- [34] 张锦程, 李俊, 肖鹏, 等. MICP加固砂土方法对比研究[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2023, 45(6): 151-157.
- Zhang J C, Li J, Xiao P, et al. Comparative study on

- MICP-treatment schemes for sands[J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2023, 45(6): 151-157. (in Chinese)
- [35] 明道贵, 邱明喜, 殷立静, 等. 钙源对微生物固化风积沙效果影响的试验研究[J]. *人民黄河*, 2020, 42(4): 85-88, 111.
- Ming D G, Qiu M X, Yin L J, et al. Experimental study on effect of calcium source on bio-cementation of aeolian sand[J]. *Yellow River*, 2020, 42(4): 85-88, 111. (in Chinese)
- [36] 段重达, 姚小伟, 朱家华, 等. 环境因素对克雷白氏杆菌诱导碳酸钙沉淀的影响[J]. *化工学报*, 2023, 74(8): 3543-3553.
- Duan C D, Yao X W, Zhu J H, et al. Effects of environmental factors on calcium carbonate precipitation induced by *Klebsiella aerogenes*[J]. *CIESC Journal*, 2023, 74(8): 3543-3553. (in Chinese)
- [37] 刘浩, 唐朝生, 吕超, 等. 砂颗粒矿物成分对MICP过程的影响及机理[J]. *岩土工程学报*, 2024, 46(9): 1956-1964.
- Liu H, Tang C S, Lü C, et al. Effects and mechanisms of mineral composition of sand on MICP process[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2024, 46(9): 1956-1964. (in Chinese)
- [38] Dhami N K, Mukherjee A, Watkin E L J. Microbial diversity and mineralogical-mechanical properties of calcitic cave speleothems in natural and in vitro biomineralization conditions [J]. *Frontiers in Microbiology*, 2018, 9: 40.
- [39] 段金贵, 王怀星, 姚姬璇, 等. 黄土坡面的微生物矿化加固及抗侵蚀性能试验研究[J]. *水土保持通报*, 2022, 42(5): 33-40.
- Duan J G, Wang H X, Yao J X, et al. Experimental study on microbial mineralization reinforcement and erosion resistance of loess slope surface[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2022, 42(5): 33-40. (in Chinese)
- [40] 徐溪晨, 郭红仙, 程晓辉, 等. 钙源对微生物矿化胶结砂土材料均匀性的影响[J]. *土木与环境工程学报(中英文)*, 2024, 46(5): 57-63.
- Xu X C, Guo H X, Cheng X H, et al. Effect of calcium sources on uniformity of bio-cemented sand materials[J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2024, 46(5): 57-63. (in Chinese)
- [41] Xu X C, Guo H X, Cheng X H. Effects of different calcium sources and cementation environments on microbially induced calcium carbonate precipitation[C]//*Geo-Congress 2022*: 219-226.
- [42] 姜启武, 黄明, 崔明娟, 等. 钙源和 Ca^{2+} 浓度对EICP固化钙质砂效果影响的试验研究[J]. *工程地质学报*, 2025, 33(3): 908-918.
- Jiang Q W, Huang M, Cui M J, et al. Experimental study on the effect of calcium sources and Ca^{2+} concentration on EICP cured calcareous sand[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2025, 33(3): 908-918. (in Chinese)

(编辑 朱备)