

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2026.001



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



大豆脲酶诱导碳酸钙沉积防风固沙的耐久性 试验研究

万愉快¹, 罗贵¹, 穆朋燕¹, 李瑞瑞¹, 王钰轲²

(1. 宁夏大学土木与水利工程学院, 银川 750021; 2. 郑州大学水利与交通学院, 郑州 450001)

摘要: 为了提升大豆脲酶诱导碳酸钙沉淀(SICP)技术固化风积沙的耐久性, 将SICP技术与黄原胶(XG)协同应用, 通过设置不同胶结液浓度、喷洒次数和喷洒体积, 选取3组XG浓度梯度, 对试样的风蚀量、贯入阻力和碳酸钙含量等关键指标进行定量评估, 分析SICP+XG协同作用下的固化规律与增强机理, 结合冻融循环和干湿循环试验考察固化风积沙的耐久性。结果表明: XG的加入能显著提高SICP固化试样的抗风蚀性能和表面强度, 其中SICP+XG试样的贯入力峰值达68.4 N, 较纯SICP与纯XG(2 g/L)处理约分别提高69%和338%; 在分别经历9次冻融循环和干湿循环后, 经SICP+XG处理的试样风蚀率控制在0.03%~0.68%, 仍具有较高的抗风蚀性能; 扫描电镜观察发现, XG在砂粒表面形成了网状薄膜结构, 增强了碳酸钙沉积黏结效用, 且生成的碳酸钙主要以结构稳定的方解石形式存在。

关键词: 大豆脲酶诱导碳酸钙沉淀(SICP); 风积沙; 冻融循环; 干湿循环; 防风蚀

中图分类号: TU411 文献标志码: A 文章编号: 2096-6717(2026)03-0067-12

Wind erosion resistance durability of aeolian sand treated by soybean-urease induced calcium carbonate precipitation

WAN Yukuai¹, LUO Gui¹, MU Pengyan¹, LI Ruirui¹, WANG Yuke²

(1. School of Civil and Hydraulic Engineering, Ningxia University, Yinchuan 750021, P. R. China; 2. School of Water Conservancy and Transportation, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, P. R. China)

Abstract: To enhance the durability of soybean-urease-induced calcium carbonate precipitation (SICP) in stabilizing aeolian sand, this study integrated SICP with xanthan gum (XG). By varying cementation solution concentration, spraying frequency, and spraying volume, together with three levels of XG concentration, the wind erosion mass loss, penetration resistance, and CaCO₃ content of the treated specimens were quantitatively evaluated. The solidification behavior and reinforcement mechanism under the synergistic action of SICP and

收稿日期: 2025-10-09

基金项目: 宁夏回族自治区重点研发计划引才专项(2022BSB03067); 宁夏回族自治区教育厅高等学校科学研究项目(NYG2024018); 国家自然科学基金(52408373)

作者简介: 万愉快(1990-), 男, 博士, 副教授, 主要从事边坡稳定性和可靠度分析研究, E-mail: wanyukuai@163.com。

李瑞瑞(通信作者), 女, 博士, E-mail: lrr1027@163.com。

Received: 2025-10-09

Foundation items: The Key Research and Development Program of Ningxia Hui Autonomous Region (No. 2022BSB03067); Ningxia Hui Autonomous Region Department of Education Scientific Research Program for Higher Education Institutions (No. NYG2024018); National Natural Science Foundation of China (No. 52408373)

Author brief: WAN Yukuai (1990-), PhD, associate professor, main research interests: slope stability and reliability analysis, E-mail: wanyukuai@163.com.

LI Ruirui (corresponding author), PhD, E-mail: lrr1027@163.com.

XG were analyzed, and the durability of the stabilized sand was further assessed through freeze-thaw and wet-dry cycle tests. The results show that the incorporation of XG substantially enhances both the wind erosion resistance and surface strength of SICP-treated samples. The peak penetration force of the SICP+XG specimens reached 68.4 N, representing increases of approximately 69% and 338% compared with pure SICP and pure XG (2 g/L), respectively. After undergoing nine freeze-thaw and wet-dry cycles, the wind erosion rate of the SICP+XG-treated samples remained at a low level of 0.03%-0.68%, indicating excellent erosion resistance. Scanning electron microscopy further revealed that XG forms a reticulated film on the sand grain surface, enhancing the binding efficiency of CaCO_3 precipitation, while the deposited CaCO_3 predominantly appears in the structurally stable calcite form.

Keywords: soybean-urease-induced calcium carbonate precipitation (SICP); aeolian sand; freeze-thaw cycles; wet-dry cycles; wind erosion prevention

土地荒漠化是当今世界面临的重大环境问题之一。荒漠化面积占全球陆地面积的1/4,超过110个国家、近10亿人口受到荒漠化影响,中国的荒漠化问题尤为严重^[1-2]。在干旱和半干旱地区,风蚀导致土壤细粒含量减少、养分流失,从而降低了土壤的保水能力和肥力,这也是引起土地荒漠化和沙尘暴的主要原因^[3-4]。同时,由风蚀引起的土壤侵蚀会对人类健康产生影响^[5]。因此,控制干旱和半干旱地区的土地荒漠化显得尤为重要。

针对风蚀问题,学界已提出一系列应对策略,包括工程防护法^[6]、生物植被法^[7]以及化学固结法^[8]等主流技术途径^[9],已在风沙流阻滞、地表抗蚀性增强及土壤结构稳定化等防风固沙核心环节展现出显著成效^[10]。酶诱导碳酸钙沉积(EICP)技术作为一种生态友好型土体改良加固技术,近年来受到越来越多的关注。室内试验和现场试验证明了大豆脲酶诱导固化技术用于沙漠地区防风固沙的可行性^[11-13]。

EICP技术通过在土壤表面形成碳酸钙硬壳层实现对表层沙土的固化。但EICP技术难以为碳酸钙提供成核位点,可能形成比方解石溶解度更高的无定形和亚稳相碳酸钙,导致处理后的土体耐久性较差^[14-15]。为了提高EICP的固化效果,近年来一些研究者尝试用生物聚合物联合EICP固化土体。Almajed等^[16]采用海藻酸钠辅助EICP稳定风积沙,结果显示,EICP联合海藻酸钠处理的样品风蚀率最低;张建伟等^[17]对固化后的砂土进行11次干湿循环后发现,EICP结合掺量0.2%的纤维固化砂土的强度为290.9 kPa,而纯EICP处理砂土的强度仅35 kPa。王知乐等^[18]研究了EICP联合壳聚糖固化排土场边坡的抗侵蚀能力,发现EICP联合壳聚糖能有效提高边坡的抗侵蚀性能,处理后土体的冲蚀量降低了91.6%。吴敏等^[19]从富含脲酶的大豆中提取脲酶,用大豆脲酶(SICP)联合黄原胶固化风积

沙,发现该组合能显著提高土体表面强度与抗风蚀性能,质量损失率明显降低,且强度与抗风能力呈正相关。在此基础上,一些学者^[20-23]开展了SICP技术固化风积沙的研究,取得了丰富的研究成果,但主要集中在表面强度、碳酸钙产率及微观结构特征等方面,对固化风积沙在冻融、干湿循环下的风蚀研究较少。因此,需研究固化风积沙的抗环境侵蚀能力,以促进SICP技术的工程应用。

黄原胶(XG)是一种多糖类生物聚合物,溶于水后提高溶液黏度,增强颗粒间的黏结作用,可用于改善土体结构稳定性^[19, 24-25]。笔者联合SICP技术和XG协同固化沙漠沙,开展固化沙漠沙的冻融循环和干湿循环试验,分析冻融或干湿循环后的质量损失、风蚀量和表面强度,以评价其耐久性。采用扫描电子显微镜(SEM)和X射线衍射,从微观角度分析SICP联合XG固化风积沙的机制。

1 材料和方法

1.1 风积沙

试验用沙来自中国腾格里沙漠,颗粒级配曲线如图1所示,不均匀系数为2.35,曲率系数为0.98,属于级配不良砂。测得砂粒比重为2.65,最大、最小干密度分别为1.72、1.46 g/cm³。

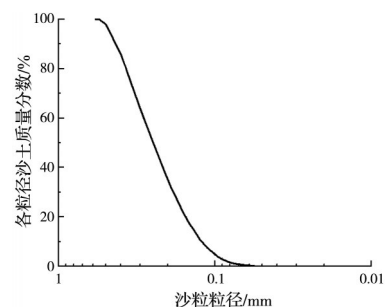


图1 风积沙的级配曲线

Fig. 1 Gradation curve of aeolian sand

1.2 大豆脲酶

大豆粗脲酶提取步骤^[26-28]:1)将新鲜的大豆在40℃下烘干,然后将干燥的大豆分批放入粉碎机中,直至粉碎为粉末形式;2)用100目筛去除残渣,得到大豆细粉,将豆粉按1:25配比溶解在去离子水中,用磁力搅拌器搅拌30 min,得到均匀悬浊液,置于冰箱中保鲜24 h;3)将悬浊液在4℃温度下以3 000 r/min离心15 min。取含有脲酶的离心上清液用于后续试验。胶结液由尿素和氯化钙(摩尔比为1:1)组成,为矿化反应提供酶促反应物和钙源。

1.3 黄原胶

试验用黄原胶为食品级黄原胶,常被用作增稠剂或黏结剂来固化土壤。将黄原胶逐渐加入去离子水中,以防止其聚集,在高速搅拌器中混合10 min,直到获得均质溶液,再与大豆脲酶溶液和胶结液的混合液按体积1:1混合,即得到处理液。

1.4 样品制备与处理

风蚀装置如图2所示,将处理后的风积沙填入尺寸为21 cm×15 cm×4 cm的金属盘中,制备试样。用喷壶将SICP处理液(包括酶溶液、胶结液及与黄原胶按比例配制的混合溶液)均匀地喷洒在试样表面,每次喷洒时间间隔为24 h。待反应完成后,将试样在60℃下烘干备用。为研究胶结液浓度、喷洒体积、喷洒次数对土体表面加固效果的影响,依据表1设定的方案开展试验。



图2 风蚀装置图

Fig. 2 Wind erosion device schematic

1.5 风沙侵蚀试验

根据腾格里沙漠现场气象监测,测试风速设为5~15 m/s,使用风速计测量通过土壤样本表面的瞬时速度。每个试样在5、10、15 m/s三种风速下各吹15 min,记录各风速下试样吹风前后的质量变化,根据式(1)计算试样风蚀后的质量损失率。

$$R = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \quad (1)$$

式中: R 为试样的质量损失率; m_1 为风蚀前试样的质量; m_2 为风蚀后试样的质量。

1.6 表面强度

使用数显式推拉力计测定试样贯入力峰值,测量探头为平头,直径为6 mm。在固化烘干的土壤试样表面随机取5个点,去除最大值和最小值后取平均值作为其表面强度。

1.7 碳酸钙含量的测量

对经过表面强度试验后的样品,取表面硬壳层约5 g,按《水质 钙的测定 EDTA 滴定法》^[29]规定的步骤测定溶液中钙离子的含量。

1.8 干湿循环

对经SICP-XG处理后的试样进行干湿循环试验,在湿润阶段,将固化试样称重后喷洒250 mL去离子水,静置8 h,然后在60℃下干燥16 h,此过程为一次干湿循环。如此循环1、3、6、9次,后将试样在60℃下干燥至恒重,再进行后续试验。

1.9 冻融循环

经SICP-XG处理后的试样依次经历-20℃冻结12 h与室温(20℃)融化12 h,此过程为一次冻融循环,如此循环1、3、6、9次,然后将试样在60℃下干燥至恒重,再进行后续试验。

1.10 质量损失率

固化风积沙在干湿循环和冻融循环过程中会发生土体结构破坏、砂粒剥落,造成试样质量损失,质量损失率计算式为

$$\omega_n = \frac{m_0 - m_n}{m_0} \times 100\% \quad (2)$$

式中: ω_n 为第 n 次干湿或冻融循环后的试样质量损失率; m_0 为试样固化后的质量; m_n 为试样第 n 次干湿或冻融循环后的质量。

1.11 微观测试

用扫描电子显微镜观察试样,测试前将样品直接黏附在导电胶上,并在二次电子成像模式下观察碳酸钙的胶结形貌,同时进行能谱(EDS)分析。XRD试验使用X射线衍射仪鉴定粉末的结晶相,衍射角范围为10°~90°,扫描速率为2(°)/min。

2 结果与分析

2.1 SICP固化风积沙

图3~图5所示为经过不同胶结液浓度、喷洒体积、喷洒次数处理后风积沙的表面强度和碳酸钙含量。从图中可见,随着胶结液浓度的增加,CaCO₃含量呈上升趋势。对于0.6 mol/L的胶结液,峰值力和碳酸钙浓度随着喷洒次数和喷洒体积的增加而增大,如喷洒1、2、3次的试样峰值力分别为33.5、77.15、97.05 N。经不同喷洒体积胶结液处理的沙土也出现了类似趋势,与Liu等^[21]的研究结果一致。

施加更大体积的SICP溶液或增加喷洒次数能提供更多反应物,促使 CaCO_3 沉淀覆盖更多的孔隙区域,并形成更深层次的胶结区,从而显著提升试样的整体强度^[30]。不同胶结液浓度、喷洒体积与喷洒次数条件下,经SICP处理后的风积沙试样在5~15 m/s风速范围内的风蚀率结果见表1。由表1可知,各处理试样的风蚀率均低于0.11%,表明经SICP处理后风积沙具有良好的抗风蚀性。

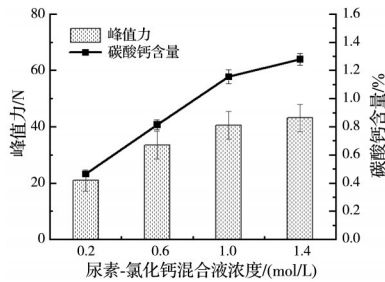


图3 不同胶结液浓度下的峰值力和碳酸钙含量变化

Fig. 3 Variations in peak force and CaCO_3 content under different cementation solution concentrations

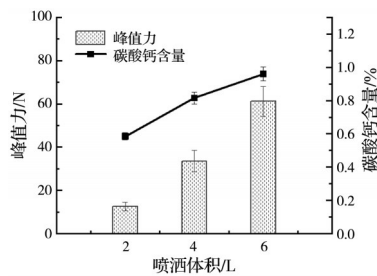


图4 不同喷洒体积下的峰值力和碳酸钙含量变化

Fig. 4 Variations in peak force and CaCO_3 content under different spraying volumes

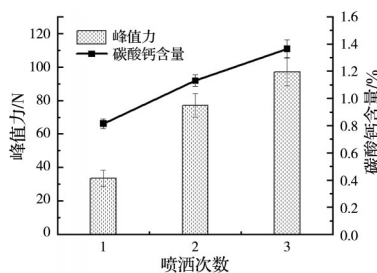


图5 不同喷洒次数下的峰值力和碳酸钙含量变化

Fig. 5 Variations in peak force and CaCO_3 content under different numbers of spraying cycles

2.2 SICP联合XG固化风积沙

风积沙固化方案如表2所示。根据表2对风积沙进行处理(未固化、XG处理、SICP处理、SICP与XG联合处理)。对于联合处理,先将大豆脲酶溶液与胶结液混合,再与XG溶液等体积混合,并以 4 L/m^2 的量喷洒在试样表面。

如图6所示,经SICP与XG处理的试样表面强度均显著提升,其最大贯入力为68.43 N,较单一

表1 SICP固沙试样处理方案及其风蚀率

Table 1 Treatment scheme and wind erosion rate of sand specimens stabilized by SICP

组别	尿素浓度/(mol/L)	氯化钙浓度/(mol/L)	喷洒体积/L	喷洒次数	风蚀后的质量损失率/%		
					5 m/s	10 m/s	15 m/s
1	0.2	0.2	4	1	0	0.04	0.08
2	0.6	0.6	4	1	0	0.05	0.07
3	1.0	1.0	4	1	0	0	0
4	0.6	0.6	2	1	0	0.07	0.11
5	0.6	0.6	4	1	0	0	0.02
6	0.6	0.6	6	1	0	0	0
7	0.6	0.6	4	1	0	0	0.02
8	0.6	0.6	4	2	0	0	0
9	0.6	0.6	4	3	0	0	0

SICP(1 mol/L)和单一XG(2 g/L)处理的试样表面强度分别提高了69.0%与338.7%。从作用机理看,大豆脲酶溶液通过诱导碳酸钙沉积生成碳酸钙晶体胶结土颗粒,固化土体脆性较大,而XG溶于水可增加其黏度,起到黏结作用,从而表现出更好的固化作用^[31]。表2为不同处理方式下试样的风蚀率,天然沙的风蚀率分别为6.7%、53.6%和93.6%。研究发现,XG和SICP技术均能显著降低风蚀,两者联合处理的试样风蚀率接近0,表现出优异的抗风蚀性能。

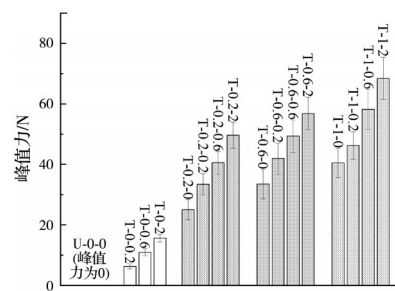


图6 不同浓度处理液处理试样的表面强度

Fig. 6 Surface strength of specimens treated with treatment solutions at varying concentrations

图7所示为不同胶结液浓度与XG浓度组合下碳酸钙含量的变化。随着胶结液浓度从0.2 mol/L增加到1 mol/L,碳酸钙含量显著上升,说明反应底物浓度对碳酸钙沉积具有决定性影响。而XG浓度的影响则较为复杂,碳酸钙含量表现为一定的波动性,可能与其调节溶液黏度影响反应物扩散特性有关^[32]。

2.3 冻融循环分析

2.3.1 表面强度和风沙吹蚀试验

图8所示为SICP-XG处理试样在不同冻融循

表 2 不同处理液配方以及不同风速下试样的质量损失率
Table 2 Mass loss rates of specimens with different treatment formulations under different wind velocities

试样	尿素 浓度/ (mol/L)	氯化钙 浓度/ (mol/L)	XG 质量 浓度/ (g/L)	风蚀后的质量损失率/%		
				5 m/s	10 m/s	15 m/s
U-0-0	0	0	0	6.7	53.60	93.60
T-0-0.2	0	0	0.2	0	0.02	0.11
T-0-0.6	0	0	0.6	0	0.03	0.04
T-0-2	0	0	2	0	0	0
T-0.2-0	0.2	0.2	0	0	0.04	0.08
T-0.2-0.2	0.2	0.2	0.2	0	0	0.01
T-0.2-0.6	0.2	0.2	0.6	0	0.01	0.02
T-0.2-2	0.2	0.2	2	0	0	0
T-0.6-0	0.6	0.6	0	0	0.05	0.07
T-0.6-0.2	0.6	0.6	0.2	0	0.01	0.02
T-0.6-0.6	0.6	0.6	0.6	0	0	0
T-0.6-2	0.6	0.6	2	0	0	0
T-1-0	1	1	0	0	0	0
T-1-0.2	1	1	0.2	0	0	0
T-1-0.6	1	1	0.6	0	0	0
T-1-2	1	1	2.0	0	0	0

注:试样编号中的字母U表示未处理的样品;T表示处理后的样品;第1个数字表示尿素浓度和钙离子浓度;第2个数字表示XG的质量浓度。

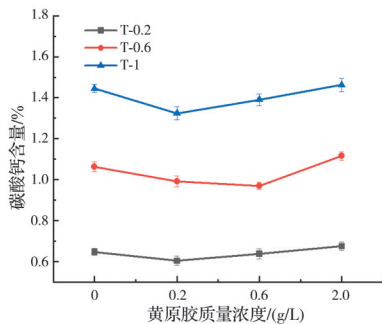


图 7 不同浓度处理液处理试样的碳酸钙含量

Fig. 7 Calcium carbonate content of specimens treated with treatment solutions of varying concentrations

环次数下的峰值贯入力变化规律。随着冻融循环次数的增加,所有试样表面强度均呈下降趋势,但高低浓度组表现存在差异。低浓度组(T-0.2-0.2、T-0.2-2)的峰值贯入力下降幅度较大,其中试样T-0.2-0.2在9次冻融循环后下降超过54%,试样T-0.2-2约下降31%,表明低浓度处理对抗冻融劣化能力的影响有限;高浓度组(T-0.6-0.2、T-0.6-2)峰值贯入力绝对值明显高于低浓度组,下降幅度相对较小,其中试样T-0.6-2在3次冻融循环后下降15.54%。总体来看,随着冻融循环次数的增加,强度劣化幅度逐渐减缓,主要与冻融过程中冰晶膨胀破坏颗粒结构、未结冰的水与冰晶之间的吸附差异

削弱颗粒间胶结有关^[33-34]。该结果表明SICP联合XG处理浓度不仅影响峰值贯入力的大小,也能提高试样的抗劣化能力。

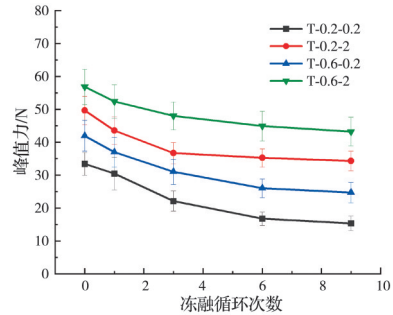


图 8 不同冻融次数下试样的表面强度

Fig. 8 Surface strength of specimens subjected to varying freeze-thaw cycles

图 9 所示为各处理组在不同冻融循环次数下风蚀后的质量损失率。在冻融 1~9 次期间,低浓度组(T-0.2-0.2)15 m/s 风速下风蚀率从 0.10% 增至 1.14%,呈现典型的“结构逐步劣化”趋势,而提高 XG 浓度后(T-0.2-2),其 15 m/s 风蚀率在整个冻融过程中始终控制在 0.02%~0.15%。对于高浓度组,试样 T-0.6-0.2 初期风蚀率 < 0.1%,但冻融 6 次后,15 m/s 风速下风蚀率突然升至 0.65%,表明单纯依赖较高 CaCO₃ 产量形成的刚性结构在重复冻融中易出现脆性破坏;相比之下,试样 T-0.6-2 在整个冻融周期内均保持极低的风蚀率,说明高胶结液浓度与高 XG 浓度的协同效应能同时提升结构强度与结构韧性,实现最优的耐久性表现。

2.3.2 质量损失

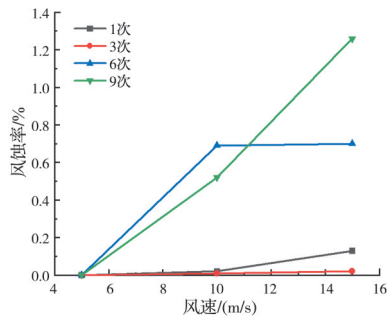
图 10 所示为冻融循环对试样质量损失的影响。随着冻融循环的进行,试样中冰晶生成与融化造成体积变化,引起裂隙扩展和颗粒松脱,表面砂粒脱落导致质量损失^[35]。在第 9 个冻融循环后,试样 T-0.2-0.2、T-0.2-2、T-0.6-0.2 和 T-0.6-2 质量损失率分别为 3.77%、3.00%、3.45% 和 2.46%,表明胶结程度的增加会削弱砂粒剥落的影响。

2.4 干湿循环分析

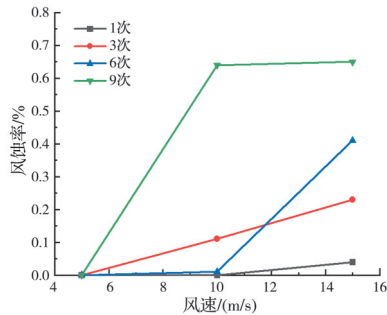
2.4.1 表面强度和风沙吹蚀试验

图 11 所示为干湿循环对峰值力的影响。随着干湿次数的增加,SICP 联合 XG 处理的试样峰值力逐渐减小,但下降幅度逐渐减缓,在未进行干湿循环时,试样 T-0.6-2 固化沙土的峰值力为 56.8 N,经过 3 次干湿循环后,贯入力下降了 21.17%,经过 6、9 次干湿循环后分别下降了 26.45% 和 30.32%。

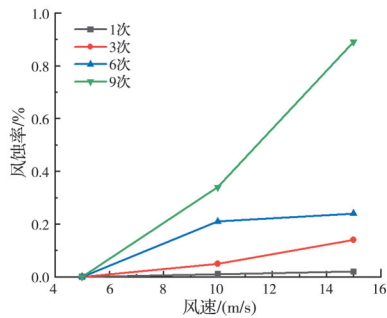
图 12 所示为干湿循环后试样的风蚀率。低浓度组(T-0.2-0.2)经 6 次循环后在 10、15 m/s 风速下



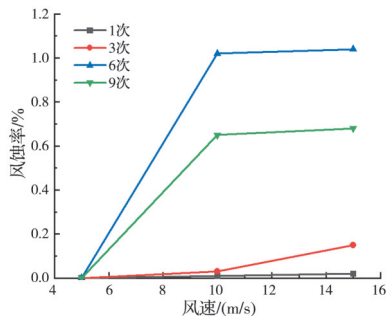
(a) T-0.2-0.2



(b) T-0.2-2



(c) T-0.6-0.2



(d) T-0.6-2

图 9 不同冻融次数下试样风蚀后的质量损失率

Fig. 9 Mass loss rate of specimens subjected to different freeze-thaw cycles after wind erosion

风蚀率分别为 0.69% 和 0.70%，经 9 次循环后进一步升至 1.26%。提高 XG 浓度 (T-0.2-2) 虽能改善其早期表现,但仍难弥补因碳酸钙沉淀量不足导致的结构松弛。高胶结液浓度组 (T-0.6-0.2) 在低风速下保持稳定,但对高风速较敏感;相比之下,试样 T-0.6-2 经 9 次干湿循环后在 15 m/s 风速下的风蚀率仅 0.68%,表现最稳定。表明 CaCO_3 提供的矿物

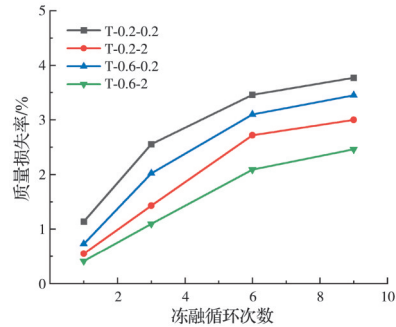


图 10 不同冻融循环次数下试样的质量损失

Fig. 10 Mass loss of specimens subjected to different freeze-thaw cycles

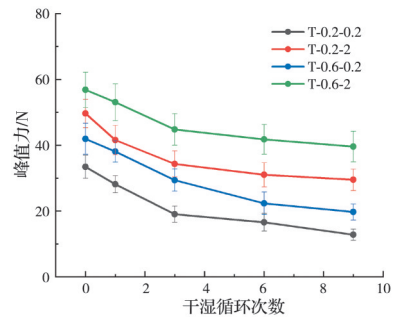


图 11 不同干湿循环次数下试样的表面强度

Fig. 11 Surface strength of specimens subjected to different wet-dry cycles

胶结与 XG 增强的黏弹性网络共同构成稳定双重胶结体系,使材料在孔隙重排、晶体脱落和水分反复扰动等干湿循环破坏机制作用下仍能维持较强整体性,从而展现出显著的抗风蚀优势。

2.4.2 质量损失

图 13 所示为干湿循环对试样质量损失的影响,随着干湿循环次数的增加,试样的质量损失率逐渐增大。在干湿循环过程中,水分在沙土中往复运动数次,使得试样内部孔隙扩大,沙土的黏聚力降低^[36]。不同配方处理的试样质量损失率存在差异,低浓度组 T-0.2-0.2 在 1、9 次干湿循环后损失率由 1.8% 增至 6.4%,增长最快;提升 XG 浓度后,试样 T-0.2-2 质量损失降低,但仍受 CaCO_3 沉淀量不足的限制。相比之下,高浓度胶结液与高浓度 XG 组合的试样 T-0.6-2 在整个循环过程中表现最优,损失率增加最小。

2.5 SEM 试验

图 14 所示为不同处理方式下试样的微观结构。由图 14(f) 可以看出,纯 SICP 处理能在砂粒表面形成 CaCO_3 沉积,但晶体多呈离散分布,颗粒间仍存在较多未被填充的孔隙。掺入 XG 后(图 14(h)),局部出现较大的碳酸钙晶体,孔隙明显减少,说明 XG 的掺入提供了更多的成核位点,促进了碳酸钙

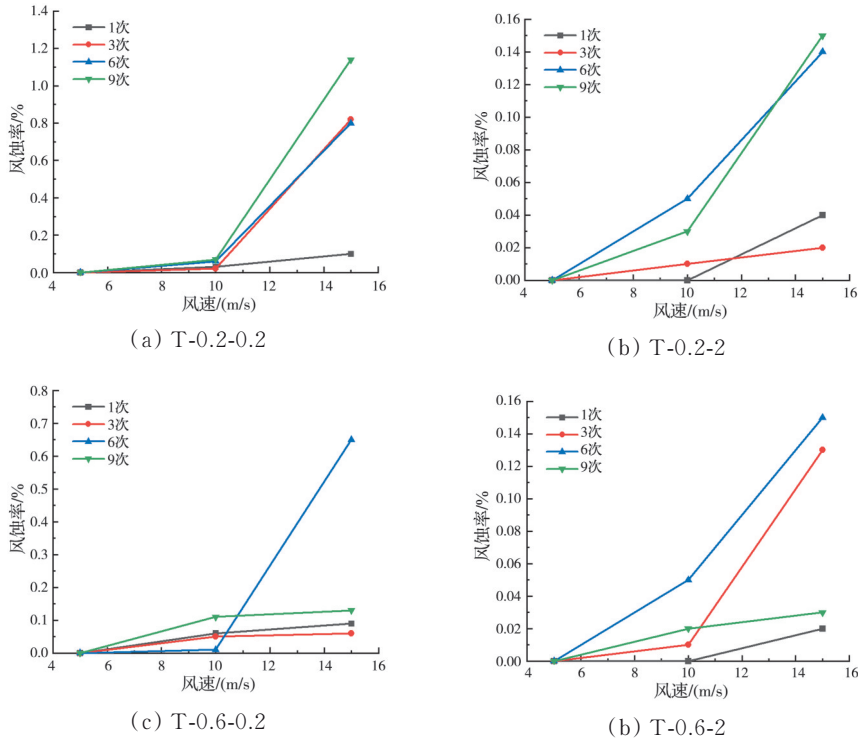


图 12 不同干湿循环次数下试样风蚀后的质量损失率

Fig. 12 Mass loss ratio in specimens subjected to different wet-dry cycles after wind erosion

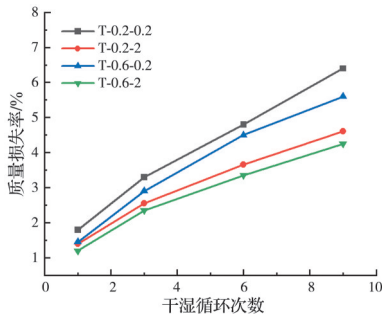


图 13 不同干湿循环次数下试样的质量损失

Fig. 13 Mass loss of specimens subjected to differential wet-dry cycles

沉积^[37-38]。

为进一步定量表征不同处理方式对孔隙结构的影响,采用 Image J 软件对 50 倍的 SEM 图像进行处理分析。具体步骤包括图像裁剪、灰度分割及二值化处理,以提取孔隙区域并计算孔隙数量、孔隙率和平均孔隙面积等指标^[18, 39]。图像分析结果见表 3, XG 组样品共识别出 3 769 个孔隙,孔隙率为 28.47%,平均孔隙面积为 282.34 μm^2 ,表明其内部孔隙较大,结构相对疏松,具有一定连通性。相比之下, SICP 处理后的试样孔隙数量为 6 244 个,孔隙率为 34.18%,而平均孔隙面积下降至 204.71 μm^2 ,反映出孔隙结构趋于更小且分散。在 SICP 与 XG 联合处理条件下,样品孔隙数量降至 4 236 个,孔隙率减小至 25.22%,平均孔隙面积为 222.70 μm^2 。该结果表明, XG 的加入在一定程度上抑制了孔隙

的发育,限制了 CaCO_3 沉淀的无序扩散与团聚,从而提升了结构致密性,类似机制已被报道^[38, 40]。

表 3 不同处理方式下试样的孔隙结构定量表征

Table 3 Quantitative characterization of pore structures in differently treated specimens

组别	SEM 图像	孔隙数/个	孔隙率/%	平均孔隙面积/ μm^2
XG 组		3 769	28.47	282.34
SICP 组		6 244	34.18	204.71
SICP-XG 组		4 236	25.22	222.70

图 15 所示分别为 XG 组(T-0-2)、SICP 组(T-1-0)和 SICP-XG 组(T-1-2)放大 500 倍时 SEM 图像中 Ca、O、C 等 5 种元素的能谱扫描图和 EDS 分析结果。XG 处理的试样中, Ca 元素无明显分布,其质量百分比和原子百分比分别为 1.03% 和 0.42%,

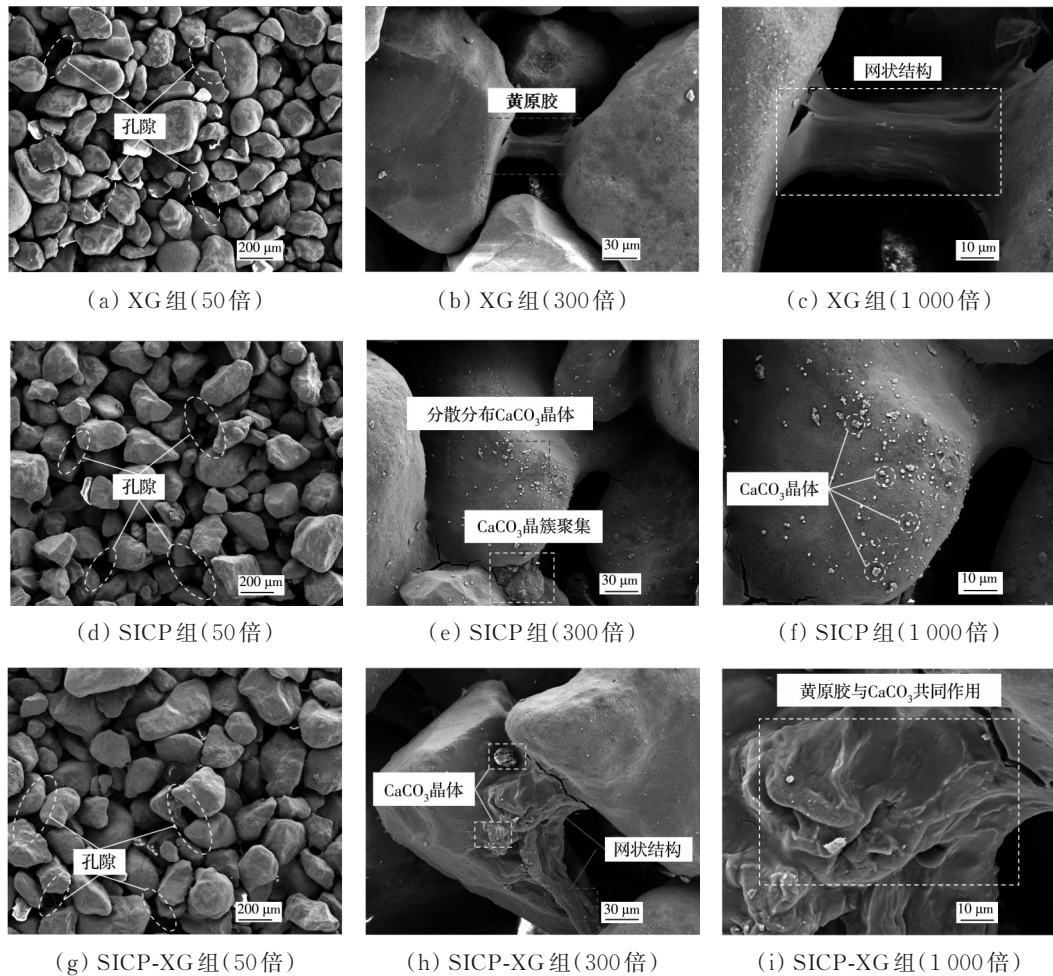


图 14 不同处理方式下试样的电镜扫描结果

Fig. 14 Scanning electron microscopy (SEM) results of differently treated specimens

CaCO₃含量较低。经 SICP 处理后 Ca 元素升至 4.21%，且呈明显富集，验证了 CaCO₃ 沉淀的有效发生。SICP 联合 XG 共同处理风积沙时，Ca 元素质量分数进一步提升至 4.67%，并呈更均匀的空间分布，与 SEM 中观察到的致密结构一致。该结果表明，XG 能促进 CaCO₃ 晶体均匀沉积并增强界面胶结，从而显著改善固化结构的整体性。

2.6 XRD 试验

图 16 所示为固化风积沙试样的 X 射线衍射 (XRD) 分析结果。由图 16 可以看出，检测出的主要矿物包括石英、方解石、钠长石、正长石，其他学者也在风积沙中发现了类似的矿物成分^[41-42]。3 组样品 (XG 组、SICP 组和 SICP-XG 组) 中主要矿物组成基本一致，但碳酸钙生成情况存在明显差异。XG 组未观察到明显的方解石衍射峰，SICP 组峰值较弱，而 SICP-XG 组峰值最强，说明 XG 在促进方解石沉淀方面发挥了积极作用。XRD 分析证实了碳酸钙的生成，这与 SEM 观察结果吻合。同时，SICP+XG 处理生成的碳酸钙以稳定的方解石晶体

存在，进一步证明了 XG 对 SICP 矿化产物生成的促进作用。

2.7 固化机理分析

EICP 与黄原胶在固化风积沙过程中表现出明显的协同效应，其作用机理可从界面结构调控、成核行为强化和复合胶结体形成三方面展开，如图 17 所示。首先，黄原胶在溶液中形成具有高度黏弹性的三维链团结构，能覆盖在砂粒表面并跨越颗粒间孔隙，使原本表面光滑的砂粒获得一定的“界面黏附能力”。这些薄膜状聚合物不仅增加了颗粒间的接触面积，也在局部形成黏结桥，改善砂粒之间的初始力学联系，为后续矿化反应提供稳定的微环境。

其次，XG 分子链上的羧基、羟基具有明显的金属离子吸附能力，能促进 Ca²⁺ 在聚合物链团附近富集，使其成为 EICP 体系中的优先成核区。随着脲酶水解产生 CO₃²⁻，Ca²⁺ 与 CO₃²⁻ 在 XG 覆盖区域更易发生局部过饱和，诱导 CaCO₃ 沉淀以链团为中心定向生长。因此，能观察到 CaCO₃ 在含 XG 的体系

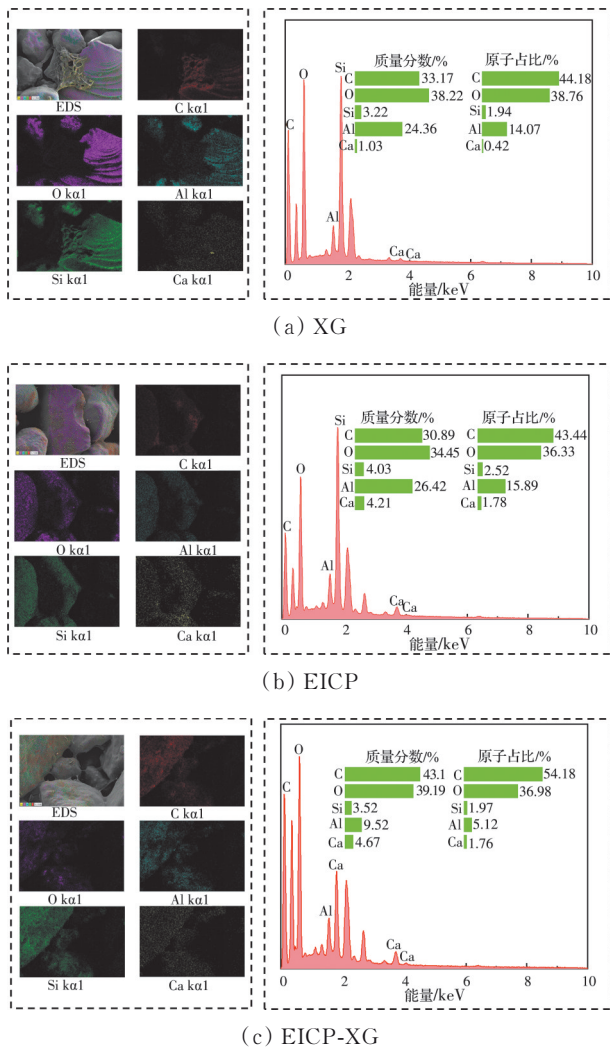


图 15 不同处理方式下试样的 EDS 分析结果

Fig. 15 EDS analysis results of differently treated specimens

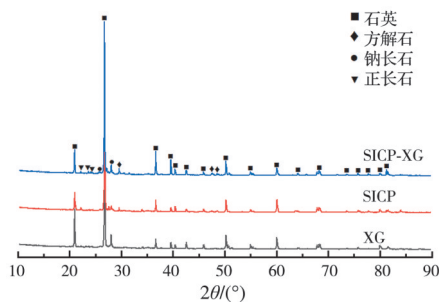


图 16 不同处理方式下试样的 XRD 分析结果

Fig. 16 XRD analysis results of differently treated specimens

中呈现更大的晶体尺寸、更连续的沉积形态及更高的有效沉积效率。这一过程不仅提高了有效 CaCO₃ 的沉积量,也使生成物呈现更均匀和更具黏结性的空间分布。相较于单独的 EICP 反应,黄原胶的存在显著增加了成核位点密度,提高了 CaCO₃ 晶体的结合度和堆叠完整性,使生成的沉淀结构更适合在颗粒间形成稳定的骨架。

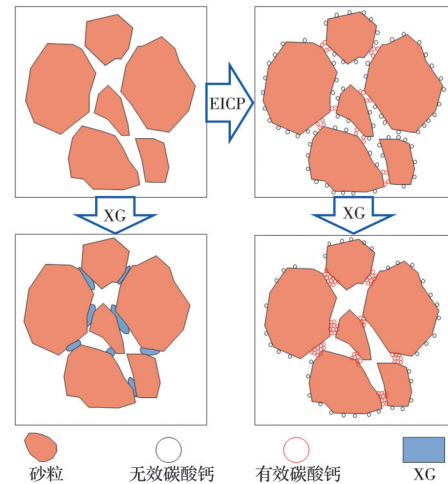


图 17 EICP 联合黄原胶加固机理

Fig. 17 Reinforcement mechanism of EICP combined with xanthan gum

3 结论

从大豆中提取粗脲酶应用于风积沙的生物胶结处理,系统探讨了胶结液浓度、喷洒次数、喷洒体积及 XG 掺量对固化性能的影响,并通过设置干湿循环与冻融循环试验评估硬壳层的耐久性。主要结论如下:

1)随着胶结液浓度、喷洒体积和喷洒次数的增加,SICP 固化风积沙的表面强度与抗风蚀性能显著提升。这主要归因于碳酸钙含量的增加使更多颗粒间孔隙被填充,从而提高了固结体的整体强度。

2)SICP 与 XG 协同固化风积沙的作用显著优于单一组分处理。当 SICP 的浓度为 1 mol/L、XG 的质量浓度为 2 g/L 时,贯入力峰值达 68.4 N,较单独 SICP (1 mol/L) 与 XG (2 g/L) 处理约分别提高 69% 与 338.7%,且 XG 的引入有助于改善 SICP 固化土体的脆性特征。

3)SICP+XG 固化层在冻融和干湿循环中均表现出一定的耐久性。尽管循环作用会导致强度衰减(如试样 T-0.6-2 在 3 次冻融与干湿循环后贯入力下降 15.54% 与 21.17%),但质量损失率始终较低(分别为 0.13% 与 0.18%),表明固化层仍能保持较高的结构稳定性与抗风蚀能力;综合初始强度、抗风蚀性与耐久性指标,0.6 mol/L SICP+2 g/L XG 可作为更具应用潜力的推荐配方。

4)SEM 观察表明,SICP 与 XG 在砂粒表面沉积,形成网状薄膜并促进稳定方解石型 CaCO₃ 沉积,显著增强孔隙填充与颗粒胶结,从微观层面解释了固化风积沙的表面强度提升与抗风蚀性增强机制。

参考文献

- [1] Huang J P, Zhang G L, Zhang Y T, et al. Global desertification vulnerability to climate change and human activities[J]. *Land Degradation & Development*, 2020, 31(11): 1380-1391.
- [2] Akthar-Schuster M, Stringer L C, Metternicht G, et al. Assessing the impact of science in the implementation of the united nations convention to combat desertification[J]. *Land*, 2022, 11(4): 568.
- [3] 李斌鹏, 陈新闯, 董智, 等. 不同土壤水分条件对内蒙古荒漠草原地表风蚀影响的风洞模拟研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2022, 36(9): 126-132.
- Li B P, Chen X C, Dong Z, et al. Simulation of influence of soil moisture content on near-surface wind erosion in desert steppe of Inner Mongolia[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2022, 36(9): 126-132. (in Chinese)
- [4] 吕楠, 葛楠, 王博, 等. 沙质草原风蚀坑发育过程中植物-土壤系统碳动态: 以锡林郭勒盟草原为例[J]. *干旱区地理*, 2025, 48(9): 1612-1622.
- Lyu N, Ge N, Wang B, et al. Carbon dynamics of the plant-soil system during the development of wind erosion pits in a sandy grassland: a case of Xilin Gol League grassland[J]. *Arid Land Geography*, 2025, 48(9): 1612-1622. (in Chinese)
- [5] 王国宇, 李晶, 张娅. 无定河流域防风固沙服务流动模拟[J]. *生态学报*, 2024, 44(6): 2323-2336.
- Wang G Y, Li J, Zhang Y. Simulation and assessment of sand fixation service in the Wuding River Basin, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(6): 2323-2336. (in Chinese)
- [6] Shehata W, Al-Rehaili M. A review on sand dune stabilization[R]. *Saudi Geological Survey*, 2003.
- [7] Zhang J P, Jia Z Q, Li Q X, et al. Determine the optimal vegetation type for soil wind erosion prevention and control in the Alpine sandy land of the Gonghe Basin on the Qinghai Tibet Plateau[J]. *Forests*, 2023, 14(12): 2342.
- [8] Homaouoni Z J, Yasrobi S S. Stabilization of dune sand with poly(methyl methacrylate) and polyvinyl acetate using dry and wet processing[J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2011, 29(4): 571-579.
- [9] 范广才, 缪林昌, 孙潇昊, 等. 脲酶抑制剂对EICP防风固沙效果的影响研究[J]. *防灾减灾工程学报*, 2022, 42(5): 1019-1027.
- Fan G C, Miao L C, Sun X H, et al. Effects researches of urease inhibitor on wind-breaking and sand-fixation of EICP[J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2022, 42(5): 1019-1027. (in Chinese)
- [10] Grainger A. *The threatening desert: controlling desertification*[M]. London: Routledge, 2013.
- [11] Wang H X, Sun X H, Miao L C, et al. Sand and dust storms control for sustainable anti-desertification: large-scale EICP-PVAc treatment field demonstration and insights[J]. *Acta Geotechnica*, 2025, 20(5): 2201-2219.
- [12] Xu J, Li X H, Liu Y H, et al. Evaluation of wind erosion resistance of EICP solidified desert sand based on response surface methodology[J]. *Construction and Building Materials*, 2024, 447: 138119.
- [13] Sun X H, Miao L C, Wang H X, et al. Enzymatic calcification to solidify desert sands for sandstorm control[J]. *Climate Risk Management*, 2021, 33: 100323.
- [14] Zehner J, Røyne A, Sikorski P. A sample cell for the study of enzyme-induced carbonate precipitation at the grain-scale and its implications for biocementation[J]. *Scientific Reports*, 2021, 11: 13675.
- [15] Yang Y J, Li M D, Tao X Q, et al. The effect of nucleating agents on enzyme-induced carbonate precipitation and corresponding microscopic mechanisms[J]. *Materials*, 2022, 15(17): 5814.
- [16] Almajed A, Lemboye K, Arab M G, et al. Mitigating wind erosion of sand using biopolymer-assisted EICP technique[J]. *Soils and Foundations*, 2020, 60(2): 356-371.
- [17] 张建伟, 吕子壮, 李想, 等. 干湿循环作用下聚丙烯纤维对酶诱导碳酸盐沉淀固化砂土的耐久性研究[J]. *复合材料学报*, 2025, 42(2): 1000-1009.
- Zhang J W, Lyu Z Z, Li X, et al. Durability study of polypropylene fibers on enzyme-induced carbonate precipitation cured sandy soil under dry-wet cycling[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2025, 42(2): 1000-1009. (in Chinese)
- [18] 王知乐, 田雨, 周伟, 等. 壳聚糖联合EICP对露天矿排土场边坡抗侵蚀性影响机制[J]. *煤炭学报*, 2024, 49(12): 4713-4727.
- Wang Z L, Tian Y, Zhou W, et al. Mechanism of the effect of chitosan combined with EICP on the erosion resistance of slopes in open-pit mine dump[J]. *Journal of China Coal Society*, 2024, 49(12): 4713-4727. (in Chinese)
- [19] 吴敏, 高玉峰, 何稼, 等. 大豆脲酶诱导碳酸钙沉积与黄原胶联合防风固沙室内试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2020, 42(10): 1914-1921.
- Wu M, Gao Y F, He J, et al. Laboratory study on use of soybean urease-induced calcium carbonate precipita-

- tion with xanthan gum for stabilization of desert sand against wind erosion[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(10): 1914-1921. (in Chinese)
- [20] 亓永帅, 高玉峰, 何稼, 等. 可溶性大豆多糖对大豆脲酶诱导碳酸钙沉积固化风积沙效果的影响研究[J]. 岩土工程学报, 2024, 46(4): 823-832.
- Qi Y S, Gao Y F, He J, et al. Effects of soluble soybean polysaccharides on solidifying aeolian sand by soybean urease-induced carbonate precipitation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2024, 46(4): 823-832. (in Chinese)
- [21] Liu Y, Gao Y F, He J, et al. An experimental investigation of wind erosion resistance of desert sand cemented by soybean-urease induced carbonate precipitation[J]. Geoderma, 2023, 429: 116231.
- [22] He J, Liu Y, Liu L X, et al. Recent development on optimization of bio-cementation for soil stabilization and wind erosion control[J]. Biogeotechnics, 2023, 1(2): 100022.
- [23] Gao Y F, Meng H, He J, et al. Field trial on use of soybean crude extract for carbonate precipitation and wind erosion control of sandy soil[J]. Journal of Central South University, 2020, 27(11): 3320-3333.
- [24] 付贵永, 肖杨, 史金权, 等. 干湿循环下EICP联合黄原胶加固钙质粉土劣化特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2024, 46(11): 2341-2351.
- Fu G Y, Xiao Y, Shi J Q, et al. Experimental study on degradation of EICP and xanthan gum treated calcareous silt under wetting-drying cycles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2024, 46(11): 2341-2351. (in Chinese)
- [25] 白玉霞, 李林, 肖衡林, 等. EICP-黄原胶加固砂土强度特性及微观机制研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2025, 53(8): 136-144.
- Bai Y X, Li L, Xiao H L, et al. Study on strength characteristics and microscopic mechanism of sand reinforced by EICP-Xanthan gum[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2025, 53(8): 136-144. (in Chinese)
- [26] Gao Y F, He J, Tang X Y, et al. Calcium carbonate precipitation catalyzed by soybean urease as an improvement method for fine-grained soil[J]. Soils and Foundations, 2019, 59(5): 1631-16
- [27] 张建伟, 蒋洪亮, 尹悦, 等. 脲酶矿化胶结砂土的单轴压缩离散元分析[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2026, 48(3): 21-29.
- Zhang J W, Jiang H L, Yin Y, et al. Discrete element analysis of the uniaxial compression test of EICP cemented sand soil[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2026, 48(3): 21-29. (in Chinese)
- [28] 赖汉江, 罗开伟, 崔明娟, 等. 明矾含量对豆酶液及其生物固化效果的影响[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2026, 48(2): 1-7.
- Lai H J, Luo K W, Cui M J, et al. Effect of alum content on soybean urease solution and its biocementation [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2026, 48(2): 1-7. (in Chinese)
- [29] GB 7476—87 水质 钙的测定 EDTA 滴定法[S]. GB 7476—87 Water quality—Determination of calcium—EDTA titrimetric method[S].
- [30] Arab M G, Alsodi R, Almajed A, et al. State-of-the-art review of enzyme-induced calcite precipitation (EICP) for ground improvement: applications and prospects[J]. Geosciences, 2021, 11(12): 492.
- [31] Bagheri P, Gratchev I, Rybachuk M. Effects of xanthan gum biopolymer on soil mechanical properties[J]. Applied Sciences, 2023, 13(2): 887.
- [32] Albenayyan N, Murtaza M, Alarif S A, et al. Optimization of calcium carbonate precipitation during alpha-amylase enzyme-induced calcite precipitation (EICP) [J]. Frontiers in Bioengineering and Biotechnology, 2023, 11: 1118993.
- [33] Tao H, Jiang P P, Qu J L, et al. The impact of various calcium ion sources on the curing efficacy of MICP[J]. Scientific Reports, 2025, 15: 9149.
- [34] Nur Hazirah M A S P, Isa M I N, Sarbon N M. Effect of xanthan gum on the physical and mechanical properties of gelatin-carboxymethyl cellulose film blends[J]. Food Packaging and Shelf Life, 2016, 9: 55-63.
- [35] Ahenkorah I, Rahman M M, Karim M R, et al. Unconfined compressive strength of MICP and EICP treated sands subjected to cycles of wetting-drying, freezing-thawing and elevated temperature: experimental and EPR modelling[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2023, 15(5): 1226-1247.
- [36] Wang X G, Zhan H B, Wang J D, et al. On the mechanical damage to tailings sands subjected to dry-wet cycles[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2019, 78(6): 4647-4657.
- [37] Xu W, Liu H, Lou Y C, et al. Biomimetic mineralisation of calcium carbonate using xanthan gum as morphology control agent[J]. Micro & Nano Letters, 2019, 14(6): 642-644.
- [38] Kosanović C, Fermani S, Falini G, et al. Crystallization of calcium carbonate in alginate and xanthan hydrogels[J]. Crystals, 2017, 7(12): 355.

- [39] 石磊, 房佳明, 张建伟, 等. 考虑干密度影响的 EICP 矿化粉砂土渗透特性试验研究[J]. 材料导报, 2024, 38(23): 51-57.
Shi L, Fang J M, Zhang J W, et al. Experimental study on infiltration characteristics of EICP mineralized silt sand soil considering the effect of dry density[J]. Materials Reports, 2024, 38(23): 51-57. (in Chinese)
- [40] Cui M, Xiong H H, Zheng J J, et al. Experimental study on multiscale engineering properties of EICP combined with xanthan gum solidified sand[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2024, 36(6): 04024108.
- [41] Liu L X, Gao Y F, Geng W J, et al. Comparison of jack bean and soybean crude ureases on surface stabilization of desert sand via enzyme-induced carbonate precipitation[J]. Geoderma, 2023, 435: 116504.
- [42] Yin J Y, Qu W Q, Yibulayimu Z, et al. Enhancing aeolian sand stability using microbially induced calcite precipitation technology[J]. Scientific Reports, 2024, 14: 23876.

(编辑 胡英奎)