

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20230824001

豆皮脲酶诱导碳酸盐沉淀固化砂土抗风蚀性能 试验研究*

谭慧明^{1,2}, 赵祥运¹, 徐 焯³

(1. 河海大学港口海岸与近海工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学海岸灾害及防护教育部重点实验室, 江苏 南京 210098; 3. 江苏省震灾风险防治中心, 江苏 南京 210014)

摘要: 为控制海岸风沙侵蚀灾害、探索可行高效的海岸防风固沙新技术, 基于酶诱导碳酸钙沉淀(EICP)原理开发以浓缩海水为可溶性钙盐溶液、以废弃豆皮为脲酶源的EICP固沙技术, 开展了固化砂土风蚀试验, 研究分析了脲酶活性、反应液喷洒量、处理次数、固化时间以及海盐浓度对固化效果的影响。研究发现, 大豆种皮脲酶的活性在10~65℃范围内随温度升高而增加, 随豆皮用量增大而增加, 但脲酶提取时的离心时间和离心转速对脲酶活性无明显影响。采用大豆种皮与海水作为原料的EICP固化试样, 能达到防风固沙的效果。当脲酶活性固定时, 增加处理次数、喷洒量和固化时间可提高表面贯入强度, 但达到一定阈值后效果逐渐减弱。在反应液总量相同的情况下, 分批多次处理的碳酸盐沉淀生成率更高; 起动风速较大, 抗风蚀效果较好, 相比之下, 一次集中处理的效果较差。为获得较好的抗风蚀效果, 浓缩海水的浓度不应低于0.6 mmol/L, 固化时间不超过12 h。

关键词: EICP; 豆皮; 脲酶; 活性; 砂土; 风蚀

中图分类号: TU411 **文献标识码:** **文章编号:** 1672-2132(2024)06-1408-10

Experimental Study on Wind Erosion Resistance of Sandy Soil Stabilized by Enzyme-Induced Carbonate Precipitation with Urease from Soybean Skin

TAN Huiming^{1,2}, ZHAO Xiangyun¹, XU Ye³

(1. College of Harbour, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Key Laboratory of Coastal Disaster and Defence-Hohai University, Ministry of Education, Nanjing 210098, China;

2. Jiangsu Earthquake Disaster Risk Mitigation Center, Nanjing 210014, China)

Abstract: To control coastal wind erosion and explore feasible and efficient new technologies for coastal windbreaks and sand fixation, this study developed the Enzyme-Induced Calcium Carbonate Precipitation (EICP) sand stabilization technique. The technique used concentrated seawater as a soluble calcium salt solution and discarded soybean husks as a source of enzyme urease. Wind erosion tests on stabilized sand were conducted, and the effects of urease activity, spray volume of the reaction fluid, number of treatments, curing time, and seawater salinity on stabilization efficacy were analyzed. Results indicated that the activity of urease from soybean skin increased with rising temperatures within the range of 10-65°C and also increased with the amount of soybean skin used. Centrifugation time and speed during urease extraction had no significant effect on urease activity. Samples solidified with soy-

* 收稿日期:2023-08-24;修回日期:2023-12-11

基金项目:国家自然科学基金项目(52078187)资助

作者简介:谭慧明(1980—),男,教授,博导,博士。主要从事生物岩土与防灾减灾研究。E-mail: thming2008@163.com

bean skin and seawater demonstrated effective windbreak and sand fixation. When urease activity was fixed, an increased number of treatments, spray volume, and curing time enhanced surface penetration strength, though the effect gradually diminished beyond a certain threshold. With the same total volume of reaction fluid, multiple incremental treatments resulted in higher carbonate precipitation rates, higher threshold wind velocities, and better wind erosion resistance compared to a single centralized treatment. For optimal wind-erosion resistance, the concentration of concentrated seawater should not be lower than 0.6 mmol/L, and the curing time should not exceed 12 hours.

Keywords: EICP; soybean skin; urease; activity; sandy soil; wind erosion

0 引言

我国海岸线绵长,其中风沙活动频繁的沙丘海岸的长度约 585 km,广东、福建、海南等省份在历史上均出现过严重的风沙灾害,新的海港建设、旅游景点开发等工程设施在施工过程中或建成后,都不同程度上存在风沙危害^[1]。随着“一带一路”和“海洋强国”战略的实施和持续推进,我国在海岸开展了风电场、大型码头、国防设施等重大工程建设,海上也兴建了人工岛礁,为保障国防安全和人民生活需要,海岸风沙防治已成为一项急迫任务^[2]。值得注意的是,现存的风沙加固技术主要依赖于物理化学手段,如机械加固或人工灌浆材料,然而,这些方法普遍存在成本高、维护费用昂贵、不利于环保和能源节约等问题^[3]。

近年来,脲酶诱导碳酸钙沉积技术(Enzyme induced calcite precipitation, EICP)作为一种新型的土体加固方式得到了各相关领域研究者的广泛关注。EICP的作用机理是利用脲酶作为催化剂,催化尿素水解生成碳酸根离子和铵根离子,然后,这些碳酸根离子与体系中的 Ca^{2+} 结合,从而不断生成 CaCO_3 晶体,填充并连接土壤孔隙。EICP主要应用于重金属污染土修复^[4]、土壤强度增强^[5],以及防风固沙^[6]等领域,与传统的固沙方法相比,EICP技术具备成本效益较高以及对土壤扰动小等诸多优点^[7]。

张建伟等^[8]、Y. Gao等^[9]利用EICP技术对风积沙和粉土的进行加固,试验表明EICP技术能使土体表面生成一层硬壳层,达到了良好的抗风蚀固沙效果。其EICP技术中采用的脲酶来自大豆,活性为 $4\sim 10 \text{ mmol}\cdot(\text{L}\cdot\text{min})^{-1}$ 。研究发现大豆种子由种皮和胚构成,大豆种皮中亦含有少量大豆脲酶^[10]。我国每年通过去皮制油产生的豆皮数量高达百万

吨。虽然这些豆皮主要用作反刍动物和家畜的饲料,但因大豆种皮提供能量较少,其需求量有限,经济效益较低,导致其中蕴含的大豆脲酶被浪费。此外,我国大豆多从国外进口,为减少运输成本,港口新建的油脂加工企业逐渐增多,已经初步形成了以进口大豆为来源、沿海地区为中心的大豆压榨加工带。因此,采用大豆脲酶诱导矿化技术治理我国海岸风沙时,以大豆种皮为原料取代目前基本采用的大豆进行大豆脲酶提取,不仅可以变废为宝,降低脲酶提取成本,还能就近解决沿海油脂加工企业榨油副产物处理问题。值得注意的是,EICP技术的大部分研究都是在淡水环境下进行的^[4-9]。至于在海水环境下进行土壤加固的研究,以及在近海条件下进行资源替代的研究还相对较少。杨司盟等^[11]用海盐取代钙盐,得出海水可以替代氯化钙溶液的处理效果。另外,海水环境下生成的碳酸盐晶体呈现出更加卓越的加固效果^[12-14]。因此,在实际固化沙滩时,利用就地取材的方式采用海水,为试验提供所需的盐离子,可以显著降低试验成本。

本文研究了借助大豆种皮提取脲酶的可行性,并探究了豆皮用量等因素对所提取脲酶活性的影响,进而利用浓缩海水作为盐离子源进行了EICP技术在防风固沙方面的试验,系统研究了豆酶活性、固化时间、喷洒量、处理次数以及海盐浓度对风蚀效果的影响。

1 材料和方法

1.1 砂样制备

本文采用石英砂进行砂盘加固试验,颗粒级配如图1所示。粒径集中分布于 $0.1\sim 0.25 \text{ mm}$, $d_{10}=0.11$, $d_{30}=0.15$, $d_{60}=0.22$, $C_u=2$, $C_c=0.9$,计算得所用砂为均粒级配不良砂。

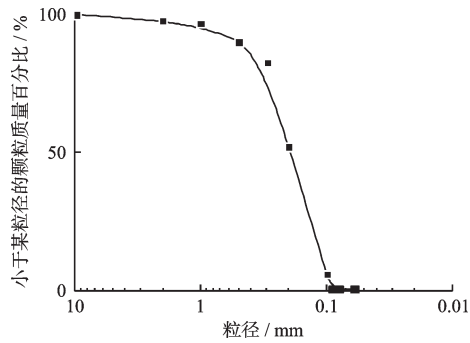


图1 颗粒级配曲线

Fig.1 Particle size distribution curve

1.2 豆皮脲酶制备

本研究使用豆皮作为脲酶的提取材料。首先,大豆种皮经 60 °C 烘箱干燥 2 h,然后物理破碎并过 100 目筛网得到豆粉。在破碎过程中,特别注意控制腔体温度以防脲酶失活。接着,豆粉在去离子水中溶解并静置 30 min,过滤去除不溶物后,使用低速冷冻离心机在 4 °C、4 000 r/min 的条件下离心 15 min。最后,取离心后上清液作为试验所需的豆皮脲酶溶液。

1.3 豆皮脲酶基本特性试验

在本试验中,由于直接测定脲酶活性具有一定的困难,试验采用间接方法来评估其活性。初始步骤包括配制 1.11 mmol/L 浓度的尿素溶液,并将 27 ml 样本转移到试管中。随后,向其中加入 3 ml 待测豆皮脲酶溶液,同时确保混合溶液的温度近似于室温。此后,利用电导率仪,以 5 min 为间隔,对混合溶液的电导率进行三次测量,旨在计算 15 min 时间范围内的平均电导率变化。根据 V. S. Whiffin 等^[15]的研究,这一电导率变化可以转换为豆皮脲酶每分钟水解尿素的活性指标。本节探讨不同豆粉浓度与脲酶活性的关系,豆粉浓度设置见表 1。通过电导率法测定豆皮脲酶活性,图 2 为室温下,不同浓度的大豆种皮溶液脲酶活性变化曲线。豆皮脲酶活性随豆皮溶液浓度的增加而近似线性增长,脲酶区间为 0.2~2.25 mmol·(L·min)⁻¹。

温度^[16]是影响反应的重要因素之一。为了探究温度对脲酶活性的影响规律,本研究采用 HJ-6A 型数显多头磁力恒温搅拌仪水浴恒温加热提供高温环境,以及温控培养箱提供低温环境。通过电导

表 1 大豆种皮溶液浓度设置

Table 1 Concentration settings of soybean seed skin solution

试验编号	豆粉浓度/(g·L ⁻¹)	试验编号	豆粉浓度/(g·L ⁻¹)	试验编号	豆粉浓度/(g·L ⁻¹)
1	10	8	80	15	150
2	20	9	90	16	160
3	30	10	100	17	170
4	40	11	110	18	180
5	50	12	120	19	190
6	60	13	130	20	200
7	70	14	140		

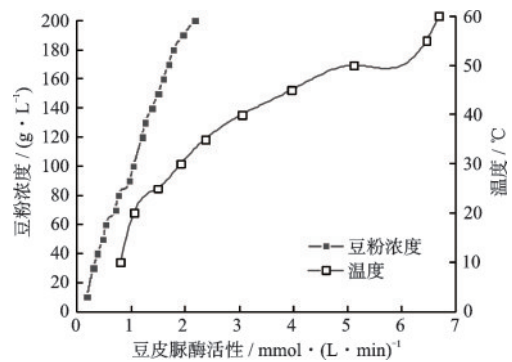


图2 脲酶活性随豆粉浓度和温度变化曲线

Fig.2 Urease activity variation with changes in soy flour concentration and temperature

率法测定不同温度下 100 g/L 豆粉浓度的脲酶活性,得到了豆皮脲酶活性随温度变化的规律,如图 2 所示。在低温环境中,观察到脲酶活性受到显著抑制。然而,当温度提升至室温水平时,脲酶活性恢复至正常范围。进一步的研究揭示,随着温度的升高,脲酶活性呈现增长趋势,从而证明温度对豆皮脲酶活性具有重要影响。此外,本项研究还涉及对豆皮脲酶提取方法的调整,特别是考察了离心时间和转速对脲酶活性的影响。试验在室温条件下进行,使用电导率法来测定不同提取工艺条件下,100 g/L 豆粉浓度的脲酶活性,其结果展示在图 3 中。试验结果表明,脲酶的提取工艺,包括离心时间和转速,对脲酶活性无明显影响。在综合评估多个参数后,本研究选定了离心转速为 4 000 r/min 和离心时间为 15 min 作为试验条件,并进一步采用了 1.0、1.5、2.0 mmol·(L·min)⁻¹ 的豆皮脲酶活性进行后续的贯入及风蚀试验。

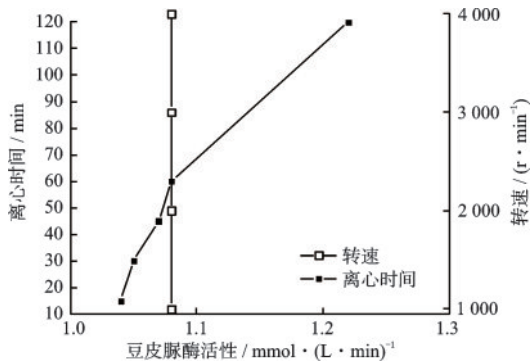


图3 脲酶活性随离心转速和离心时间变化曲线

Fig.3 Urease activity variation with changes in centrifugal speed and centrifugation time

1.4 反应液制备

在本研究中,所采用的反应液由两种主要组分构成,分别是胶结液和豆皮脲酶溶液。这两者按照体积比1:1混合而成。重要的是,胶结液是通过将尿素溶液与浓缩海盐溶液以1:1的体积比混合得到的。对于海水的主要离子成分,详细数据已列于表2。在EICP反应过程中,大豆脲酶催化尿素的分解,生成碳酸根离子。这些碳酸根离子与反应体系中的游离钙、镁离子结合,进而形成具有胶结作用的碳酸盐沉淀。

表2 海水中主要离子成分表

Table 2 Main ion components in seawater

单位:mg/L				
Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻
426.53	1 219.86	11 078.58	140.16	18 690.10

本研究依据预定的级配标准对砂样进行筛选和120℃的预烘干处理。随后,这些预处理过的沙样填充到经过清洁和烘干的统一规格(18 cm×23.5 cm×5.5 cm)的金属盘内。在沙样表面经过精细的平整和密实化操作后,小型喷壶以气雾状均匀地喷洒反应溶液,并设定了特定的固化时间。最终,试样在80℃的环境中进行了烘干处理,以完成整个试验流程。

C. Lang等^[17]指出脲酶催化反应中尿素与盐离子的摩尔比对加固效果具有重要影响。合适的尿素与盐离子摩尔比可以显著提高矿化反应效果。因此,本研究考察了通过调整海盐和尿素浓度来优化固化材料强度的可能性。特别地,最优贯入强度被视为一个重要指标,旨在从宏观和微观层面评估

碳酸盐晶体与砂土颗粒间的胶结效果及其对风蚀的抵抗能力。为系统地探究这一问题,本研究采用了三种不同活性的豆皮脲酶,并针对不同海盐与尿素浓度的试样进行了表面贯入强度试验。为了精确地量化样本硬化壳层的表面贯入强度,本研究采用了一种专用的数显式推拉力计,该设备装配有一个底面积为19.62 mm²的圆柱形探头。以最大程度地降低试验误差,本文对每一组试验方案分别准备了三个平行试样,并以其贯入强度的平均值作为该方案的代表性结果。操作步骤如下:首先,从烘箱中取出加固过的试样,让其回到室温。然后,把试样放在推拉力计的载物台上,并调整探头位置。以2~3 mm/s速度旋转手柄,使探头贯入样本,记录最大贯入力。最后,用公式计算出贯入强度。图4数据揭示,随着尿素和海盐的浓度比例逐渐增加,试样的表面贯入强度呈现“先升后降”的趋势。尤其值得注意的是,当尿素与海盐的浓度比达到3:2时,表面贯入强度观测到了其最大值。从成本效益的角度分析,增加尿素浓度不仅会导致生产成本上升,还可能增加废弃物的生成。综合考量反应效率和经济性因素后,本研究确定了以3:2的浓度比,等体积混合尿素溶液与浓缩海盐溶液,作为胶结液的最优配方。

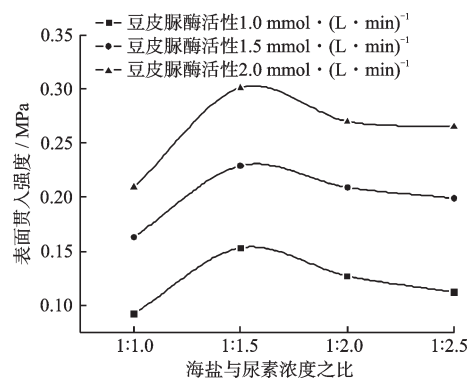


图4 不同海盐与尿素浓度比的贯入强度变化

Fig.4 Penetration strength variation at different ratios of sea salt to urea concentration

2 试验方案

2.1 贯入试验及碳酸盐含量测定

为了精确评估EICP试样处理工艺中五个核心变量(脲酶活性、处理次数、反应液总体积、固化持续时间以及海盐浓度)对固化性能的综合影响,本

研究设计了四组独立的试验方案。四组试验采用了严格的控制变量法,即在每个试验组别中仅针对一个特定变量进行调整。该试验设计的核心目标是深入探究不同脲酶活性水平,分别为 1.0、1.5、2.0 $\text{mmol}\cdot(\text{L}\cdot\text{min})^{-1}$ 下,各影响因素对固化后盘状砂样的表面贯入强度及其不同深度处碳酸盐沉淀含量的定量影响。碳酸盐沉淀含量的测量严格依据了《水质钙和镁总量的测定—EDTA 滴定法》^[18] 的标准来执行。

2.2 风蚀试验方案

为了更精练地量化加固试样的抗风蚀性能,本研究设计了一系列风蚀破坏试验,专门针对脲酶活性为 $2.0 \text{ mmol}\cdot(\text{L}\cdot\text{min})^{-1}$ 条件下的四个关键影响因素:处理次数、反应液的总量、固化持续时间以及海水浓度。这些因素在 EICP 过程中的抗风蚀特性得到了深入分析,具体的试验组合请参见表 3。风蚀试验采用高功率风洞机(如图 5 所示)作为风力源,以模拟现场侵蚀破坏的实际条件。

表 3 风蚀试验方案表

Table 3 Wind erosion test plan

试验组次	豆酶活性/ $\text{mmol}\cdot(\text{L}\cdot\text{min})^{-1}$	尿素 浓度/ $(\text{mol}\cdot\text{L}^{-1})$	海盐 浓度/ $(\text{mol}\cdot\text{L}^{-1})$	反应液 喷洒量/ ml	处理 次数	固化 时间/h
TP0 (原砂)	—	—	—	—	—	—
TP1	1	0.3	0.2	100	1	10
TP2	1.5	0.3	0.2	100	1	10
TP3	2	0.3	0.2	100	1	10
TP4	2	0.3	0.2	100	1	10
TP5	2	0.3	0.2	200	1	10
TP6	2	0.3	0.2	300	1	10
TP7	2	0.3	0.2	400	1	10
TP8	2	0.3	0.2	100	1	10
TP9	2	0.3	0.2	100	2	10
TP10	2	0.3	0.2	100	3	10
TP11	2	0.3	0.2	100	4	10
TP12	2	0.3	0.2	100	1	6
TP13	2	0.3	0.2	100	1	8
TP14	2	0.3	0.2	100	1	10
TP15	2	0.3	0.2	100	1	12
TP16	2	0.3	0.2	100	1	10
TP17	2	0.3	0.6	100	1	10
TP18	2	0.3	1.0	100	1	10
TP19	2	0.3	1.4	100	1	10
TP20	2	0.3	1.8	100	1	10

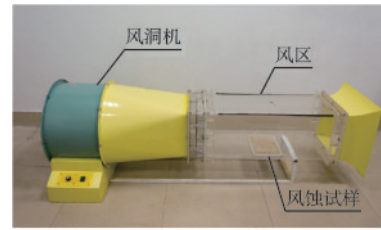


图 5 风洞机

Fig.5 Wind tunnel machine

风蚀程度与颗粒从试样表面脱离的难度紧密相关,因此与起动风速有直接的联系。试验过程中逐步提升风速,一旦观测到试样表面的沙土有起动现象,便记录下此时的风速作为起动风速。风蚀破坏试验的风力设定为 20 m/s (即 8 级风)。整个风蚀试验周期为 15 min ,每隔 3 min 对试样进行称重,然后通过相互减去的方法来计算每 3 min 内的风蚀量,进一步绘制风蚀量的时间序列曲线图。这一设计有助于详细揭示试样在风蚀过程中的质量动态变化。

3 结果与讨论

3.1 豆皮 EICP 处理对贯入强度以及盘状砂样不同深度处碳酸盐沉淀含量的影响

在豆皮脲酶活性保持恒定的条件下,其他影响因素的增强会促进表面贯入强度的上升。然而,如图 6 所示,该增长在某一阶段后呈现出明显的递减特性。具体来说,在反应液量由 100 ml 增至 300 ml 时,表面贯入强度的平均增幅达到 23% ;与之相类似,在处理次数由 1 次增至 3 次时,其平均增幅为 26% 。然而,在反应液量进一步增至 400 ml 或处理次数增至 4 次的试验条件下,观察到的增幅仅不足 5% 。这种递减趋势可能源于初期在盘状砂样表面形成的硬壳层,该层在后续试验阶段对反应液的渗透起到阻碍作用,导致表面贯入强度的增长速度呈递减态势。进一步地,图 7 的分析显示,在增加海盐浓度和延长固化时间方面的影响规律与增加反应液量或处理次数大致相似,然而,值得注意的是,提高海盐浓度时,可观察到表面贯入强度的快速增长。具体而言,在海盐浓度为 1.4 mmol/L 及豆皮脲酶活性为 $2 \text{ mmol}\cdot(\text{L}\cdot\text{min})^{-1}$ 的特定条件下,表面贯入强度达到 0.83 MPa ,显著高于海盐浓度为 0.2 mmol/L 时的 2.76 倍。综上所述,这些观察结果明确指出,在豆皮脲酶活性一致的前提下,海盐浓

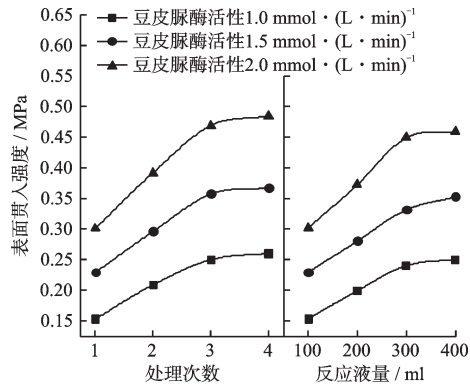


图6 表面贯入强度与试样喷洒反应液量及处理次数关系
Fig.6 Relationship between surface penetration strength with sample sprayed reactant volume and number of treatments

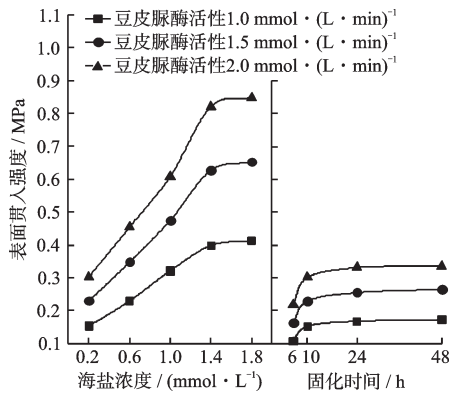


图7 表面贯入强度与试样海盐浓度及固化时间关系
Fig.7 Relationship between surface penetration strength with sample seawater salinity and curing time

度的提高在促进表面贯入强度增长方面具有更优的效率。这一发现为进一步优化试验参数和理解表面贯入强度影响因素提供了重要的参考依据。

在脲酶活性为 $2.0 \text{ mmol} \cdot (\text{L} \cdot \text{min})^{-1}$ 的条件下,本研究量化了四个关键因素对不同深度碳酸盐沉淀含量的影响,并据此绘制了图8、图9。结果显示,这四个影响因素在自然渗透深度方面具有近乎一致的表现,该深度大致范围为 $0 \sim 3.5 \text{ cm}$ 。从试样表面至 3.5 cm 深度,碳酸盐沉淀呈现非线性减少的趋势,而在 3.5 cm 深度处,碳酸盐沉淀量近乎为零。综合分析得出,当其他条件保持不变时,单独增加每一个影响因素会导致相同深度下碳酸盐沉淀呈几乎匀速增加的趋势。唯一的例外是固化时间这一变量。具体而言,当固化时间从 6 h 增至 8 h 时,相同深度下碳酸盐沉淀的平均增幅为 27.3% 。然而,当固化时间从 10 h 延长至 48 h 时,相应深度下的碳酸盐沉淀平均增幅不足 5% ,这表明碳酸盐沉

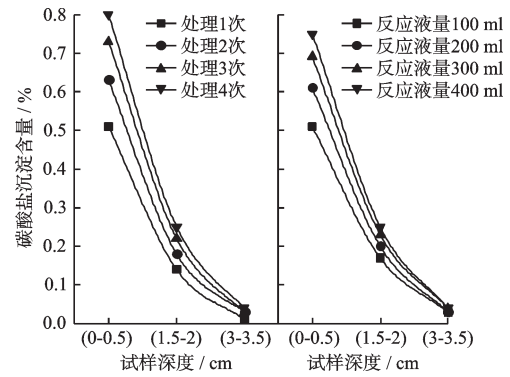


图8 碳酸盐沉淀含量与试样喷洒反应液量及处理次数关系

Fig.8 Relationship between carbonate precipitation content with sample sprayed reactant volume and number of treatments

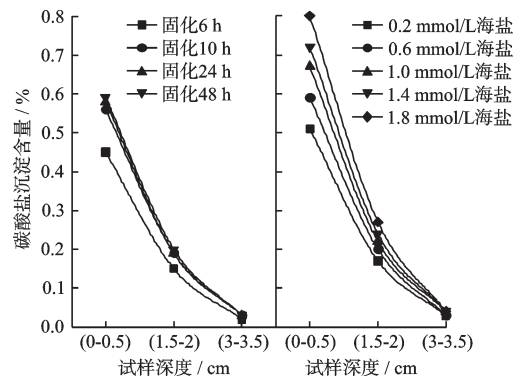


图9 碳酸盐沉淀含量与试样海盐浓度及固化时间关系
Fig.9 Relationship between carbonate precipitation content with sample seawater salinity and curing time

淀的生成速度逐渐减缓。因此,从经济性的角度考虑,固化时间以 10 h 为最优,延长固化时间将导致效益递减。

3.2 豆皮EICP处理对砂土风蚀的影响

从图10与图11的数据分析中明显可见,各影响因素的增加与起动风速的逐步提升有密切关系。具体来说,在豆酶活性为 $1.0 \text{ mmol} \cdot (\text{L} \cdot \text{min})^{-1}$ 的条件下,观察到的最低起动风速为 9.2 m/s ,而在豆酶活性为 $2.0 \text{ mmol} \cdot (\text{L} \cdot \text{min})^{-1}$ 且海盐浓度为 1.8 mmol/L (TP20) 的条件下,起动风速达到了最大值,即 21.7 m/s 。这组试验结果表明,与单纯增加处理液量相比,增加处理次数在提升砂土间粘结性方面显得更为有效。特别值得指出的是,一次性过量增加处理液可能导致砂土表层脲酶与胶结液反应生成的碳酸盐沉淀过多,这样会堵塞砂土的微孔结构。这种堵塞会阻碍后续反应液渗透至样品底层,

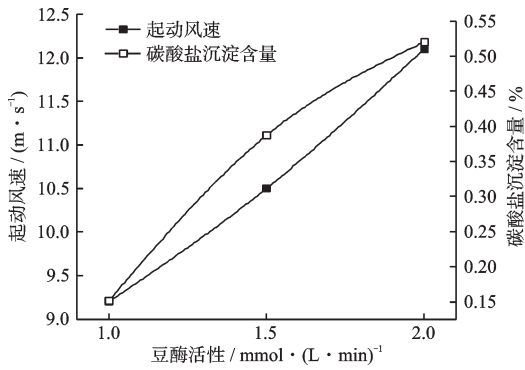


图10 不同脲酶活性对应的起动风速与碳酸盐含量

Fig.10 Start-up wind speed and carbonate content at different urease activities

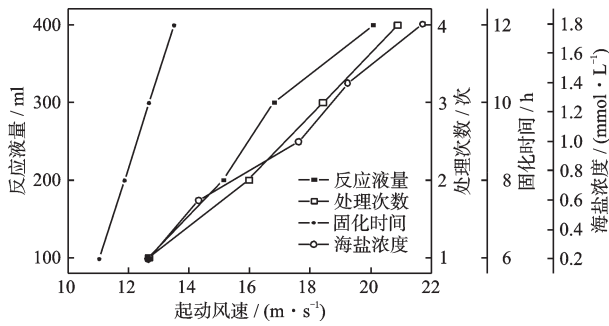


图11 不同处理量、处理次数、固化时间、海盐浓度下试样的起动风速

Fig.11 Start-up wind speed of the sample under different processing volumns, number of treatments, curing times, and seawater salinity

从而降低整体反应的速率。此外,在其他条件相同的情境下,固化时间较短的样品展现出较低的起动风速,这一现象表明EICP(酶诱导碳酸盐沉淀)需要充足的固化时间以达到最佳的抗风蚀效果。在海盐浓度低于 1.0 mmol/L 的条件下,增大海盐浓度能显著提升起动风速;然而,在海盐浓度高于 1.0 mmol/L 的情况下,起动风速的增加速率会相对减缓。

当脲酶浓度从 1.0 增至 $2.0 \text{ mmol} \cdot (\text{L} \cdot \text{min})^{-1}$ 土体的抗风蚀能力显著提升(见图12、图13)。具体而言,脲酶活性为 2.0 的情况下,风蚀量相较于 1.0 的条件下减少了一个数量级。对于持续时间为 15 min 的风蚀试验,后者的风蚀曲线显然更为平缓,这种现象可能归因于脲酶活性越高,催化尿素的速率越快,从而在试样表面形成更高强度的胶结层。

在低脲酶活性条件下,处理次数与处理液量的增加对风蚀量有相似的影响趋势(图14),综合考虑,相较于增加处理液量,增加处理次数在提高抗

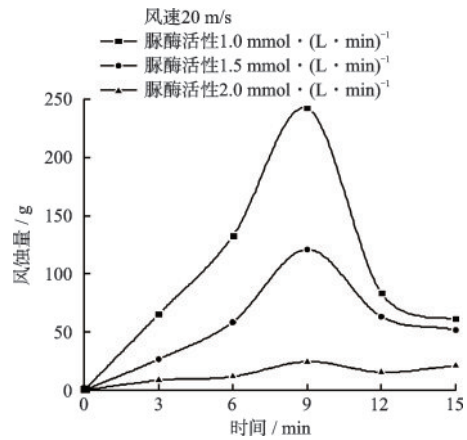


图12 脲酶活性梯度风蚀量变化

Fig.12 Changes in wind erosion quantity with urease activity gradients

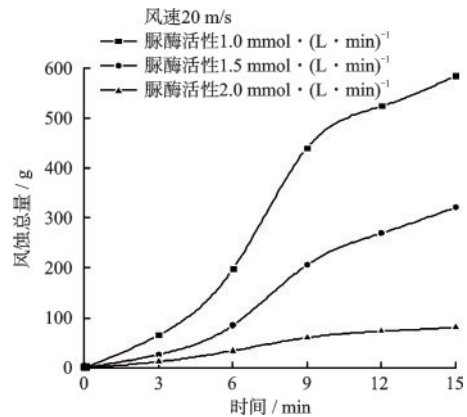


图13 脲酶活性梯度累计风蚀量变化

Fig.13 Changes in cumulative wind erosion quantity with urease activity gradients

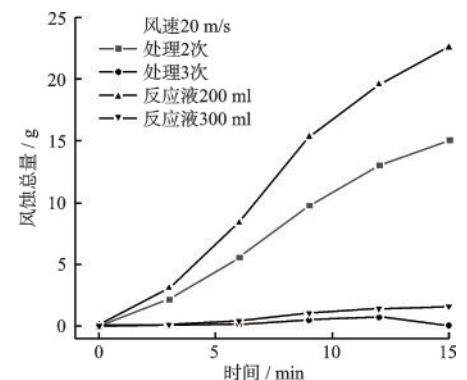


图14 处理液总量相同情况下单次集中处理与多次分批处理对比

Fig.14 Comparison of single treatment and multiple treatments with equal total volume of treatment liquid

风蚀性方面具有更显著的效果,尽管这会增加处理时间成本。

通过图 15 和图 16, 可以观察到针对不同固化时间梯度的试样, 风蚀量变化趋势基本一致。然而, 延长固化时间并没有明显提高抗风蚀效果, 表明固化时间并非 EICP 过程的决定性因素。

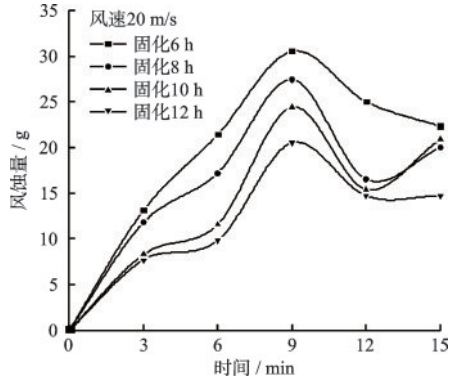


图 15 固化时间梯度风蚀量变化

Fig.15 Changes in wind erosion quantity with curing time gradients

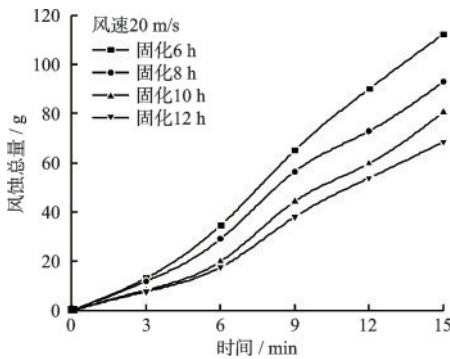


图 16 固化时间梯度风蚀总量变化

Fig.16 Changes in total wind erosion quantity with curing time gradients

在涉及海盐浓度的五组试验中, 风蚀量变化趋势基本一致(图 17 与图 18)。特别是当海盐浓度为 0.2 mmol/L 时, 风蚀效果最为显著。相比之下, 在海盐浓度为 1.0~1.8 mmol/L 的情况下, 15 min 内风蚀量近乎为零。此外, 相对于固化时间等变量, 增加海盐浓度能够显著提升抗风蚀性能。为了实现最佳的抗风蚀效果, 浓缩海盐的浓度不应低于 0.6 mmol/L。

最终, 在五组影响因素的对比试验中, 发现 0~15 min 的风蚀变化趋势在各组中大体一致。具体地, 该趋势初步呈现上升, 随后下降, 最终再次上升, 如图 12、17、19 所示。然而, 同一时间段内的累计风蚀量实际上展示了缓慢上升的动态, 如图 13、

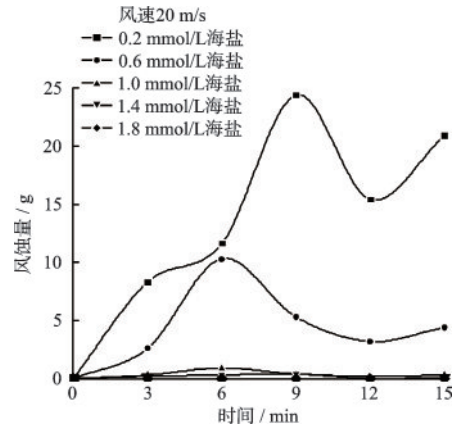


图 17 海盐浓度梯度风蚀量变化

Fig.17 Variation in wind erosion quantity with seawater salinity gradients

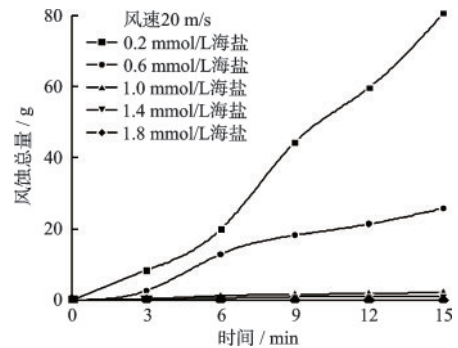


图 18 海盐浓度梯度累计风蚀量变化

Fig.18 Changes in in cumulative wind erosion quantity with seawater salinity gradients

16、18 所示。以 TP16 样本(图 17, 0.2 mmol/L 海盐浓度曲线)为例, 0~6 min 的风蚀量逐渐增大, 6~9 min 则加剧, 9~12 min 稍有减缓, 而在 12~15 min 之间再次上升。试验观察表明, EICP 处理在砂土表面形成了一层胶结物。在试验初阶段的 0~6 min 内, 风力作用促成了局部区域内微量沙粒以及颗粒和碎片状态遭受风蚀, 从而导致相应区域的胶结层逐渐变薄并开始剥落。在接下来的 6~9 min 时间段中, 上述局部区域的胶结层因减薄和剥离而失去其保护作用, 进一步使其下方的沙粒受到加剧的风力侵蚀, 导致风蚀量明显增大。在第三个阶段, 即 9~12 min 内, 尽管该区域下方的沙粒已开始逐步脱离, 其上方的胶结层却依然保持部分结构完整, 从而有效地减缓了风蚀速率。然而, 在最后的 12~15 min 阶段, 由于该区域下方土壤的进一步空洞化, 上层原有的胶结层最终完全剥离, 致使风蚀量剧增。

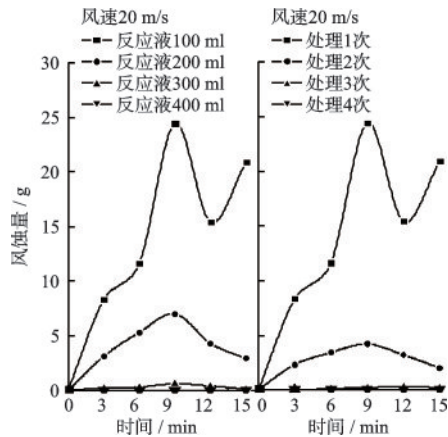


图19 反应液量梯度与处理次数梯度风蚀量变化

Fig.19 Changes in wind erosion quantity with gradients of reactant volume and number of treatments

3.3 豆皮EICP处理砂土表面碳酸盐沉淀生成率对比分析

随着各影响因素变量的增加,试样表面碳酸盐沉淀的析出量逐渐增加。具体而言(图10),在豆皮脲酶活性为 $1.0 \text{ mmol} \cdot (\text{L} \cdot \text{min})^{-1}$ 的情境下,碳酸盐沉淀的生成量表现为最低水平,仅占0.15%。然而,在豆皮脲酶活性达到 $2.0 \text{ mmol} \cdot (\text{L} \cdot \text{min})^{-1}$ 且海盐浓度为 1.8 mmol/L (标记为TP20)的条件下,该生成量最高,达到8%。在TP4-TP7与TP8-TP11的试验组中,尽管两组试验的处理液总量保持一致,但TP8-TP11组的钙离子析出率微幅高于TP4-TP7组。这一观察结果进一步证实,在低豆酶活性条件下,逐次提高处理次数相较于单次增加处理液量对于风蚀抵抗的改善更为显著。

值得注意的是,提高海盐浓度虽然能促进碳酸盐沉淀的生成;然而,即使在TP20组的海盐浓度相对于TP16组增加了8倍,沉淀生成量仅增加了60%,表明仅依赖海盐浓度增加并非一种经济有效的经济策略。

在低脲酶活性环境中,豆皮脲酶活性显著地主导碳酸盐沉淀的生成速率。以TP3和TP1为对照,当TP3的脲酶活性提升了100%,相应地,碳酸盐沉淀的生成量也呈现了240%的增幅,远超出处理次数的影响。相较之下,固化时间对生成速率的贡献微乎其微。通过图11与图20的详细比较,可以明确地观察到,碳酸盐沉淀生成率与起动风速和表面贯入强度呈正相关关系,从而具有更显著的风蚀防护效能。

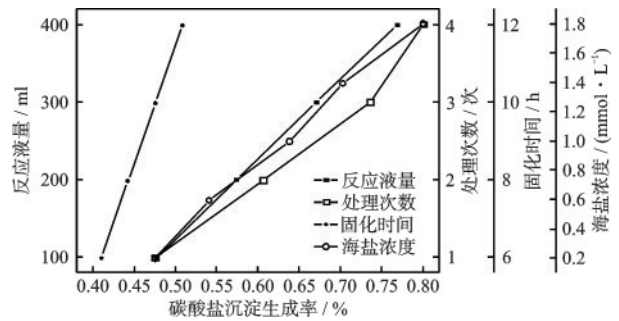


图20 不同处理量、处理次数、固化时间、海盐浓度下试样碳酸盐沉淀的生成率

Fig.20 Carbonate precipitation formation rate in samples under different treatment volumes, number of treatments, curing times and seawater salinity

4 结论

本文提出了基于大豆种皮提取脲酶并以浓缩海盐提供盐离子进行酶诱导碳酸盐沉积(EICP)加固技术,并开展了固化砂土抗风蚀性能及主要影响因素研究。研究结果揭示了,豆皮脲酶活性、处理次数、反应液总量、固化时间以及海盐浓度等变量对砂样风蚀抗性的显著影响。试验结果归纳如下:

(1)在一定的豆粉浓度下,低温环境会抑制豆皮源脲酶的活性。然而,当温度上升至室温,该活性可得以恢复,并在 $10 \sim 65 \text{ }^\circ\text{C}$ 呈正比增加。在常温条件下,脲酶提取的离心时间和离心转速对脲酶活性无明显影响。

(2)利用大豆种皮提取脲酶并借助浓缩海水提供盐离子,进行酶诱导碳酸盐沉积加固(EICP)试验可以有效增强砂样的抗风蚀能力。

(3)在脲酶活性恒定的前提下,处理次数、反应液总量、固化时长和海盐浓度的增加初步促进了表面贯入强度的提升,但其增长率在超过一定阈值后呈递减趋势。值得注意的是,在这四个影响因素中,海盐浓度的提升在促进表面贯入强度增长方面表现出了更为优越的效能。

(4)在EICP固化处理的 $0 \sim 3.5 \text{ cm}$ 自然渗透深度,碳酸盐沉淀的生成率在各种影响因素方案下均呈非线性下降趋势,至 3.5 cm 处接近零。

(5)在五组不同影响因素的风蚀试验中,风蚀过程可分为四个阶段,并发现在低脲酶活性环境

下,豆皮脲酶活性是EICP处理试样抗风蚀能力的主导因素,而固化时间和海盐浓度的影响相对较小;抗风蚀能力还与碳酸盐沉淀生成率和表面贯入强度正相关,且最佳条件为海盐浓度不低于0.6 mmol/L,固化时间不超过12 h。

参考文献:

- [1] 何岩雨,刘建辉,蔡锋,等.潮汐作用下的海滩风沙运动若干特征研究:以福建平潭岛远垵澳海滩为例[J].海洋学报,2018,40(9):90-102.
He Y Y, Liu J H, Cai F, et al. Several characteristics of beach aeolian sand transport influenced by tide: A case study in the Yuandangao Beach, Pingtan Island, Fujian Province [J]. Haiyang Xuebao, 2018, 40(9): 90-102. (in Chinese)
- [2] 屈建军,凌裕泉,刘宝军,等.我国风沙防治工程研究现状及发展趋势[J].地球科学进展,2019,34(3):225-231.
Qu J J, Ling Y Q, Liu B J, et al. Research status and development trends of wind-sand engineering in China[J]. Advances in Earth Science, 2019, 34(3): 225-231. (in Chinese)
- [3] 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 J Y, 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)
- [4] 陆爱灵,朱东云,张宏,等.EICP联合生物炭固化修复重金属污染土试验[J].环境工程,2023,41(8):176-180.
Lu A L, Zhu D Y, Zhang H, et al. Experimental study on remediation of heavy metal contaminated soil by EICP combined with biochar[J]. Environmental Engineering, 2023, 41(8): 176-180. (in Chinese)
- [5] Yang Y, Li M, Tao X, et al. The effect of nucleating agents on enzyme-induced carbonate precipitation and corresponding microscopic mechanisms [J]. Materials, 2022, 15(17): 5814.
- [6] 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)
- [7] 原华,刘帅星,刘康.EICP联合Na-Mt固化粉砂抗剪特性[J].中国科技论文,2022,17(12):1358-1362,1375.
Yuan H, Liu S X, Liu K. Shear resistance of silty sand treated by EICP combined with Na-Mt[J]. China Sciencepaper, 2022, 17(12): 1358-1362, 1375. (in Chinese)
- [8] 张建伟,韩一,边汉亮,等.大豆脲酶诱导碳酸钙固化粉土抗风侵蚀性能的试验研究[J].工业建筑,2020,50(12):19-24,118.
Zhang J W, Han Y, Bian H L, et al. Experimental research on wind resistance of silty soil cemented by soybean urease induced calcium carbonate precipitation[J]. Journal of Industrial Architecture, 2020, 50(12): 19-24, 118. (in Chinese)
- [9] Gao Y, 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.
- [10] 冯丽娟,符浩东,窦润雪,等.大豆种皮中脲酶提取的研究进展[J].绿色科技,2018(12):173-174,177.
Feng L J, Fu H D, Dou R X, et al. Research progress on urease extraction from soybean seed coats[J]. Journal of Green Science and Technology, 2018(12): 173-174, 177. (in Chinese)
- [11] 杨司盟,彭劼,温智力,等.浓缩海水作为钙源在微生物诱导碳酸钙加固砂土中的应用[J].岩土力学,2021,42(3):746-754.
Yang S M, Peng J, Wen Z L, et al. Application of concentrated seawater as calcium source solution in sand reinforcement using MICP[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(3): 746-754. (in Chinese)
- [12] 肖瑶,邓华锋,李建林,等.海水环境下巴氏芽孢杆菌驯化及钙质砂固化效果研究[J].岩土力学,2022,43(2):395-404.
Xiao Y, Deng H F, Li J L, et al. Study on the domestication of *Sporosarcina pasteurii* and strengthening effect of calcareous sand in seawater environment [J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, 43(2): 395-404. (in Chinese)

(本文编辑:张艺)

(下转第1427页)