

DOI: 10.11779/CJGE20240881

# 土著微生物固化增强盐漠土力学性能及其抗侵蚀效果

白振宇<sup>1</sup>, 张 文<sup>\*1,4</sup>, 袁 媛<sup>2</sup>, 张玉蓉<sup>3</sup>, 王如泽<sup>1</sup>, LASHARI Zuhaib ul Hassan<sup>1</sup>

(1. 青海大学土木水利学院, 青海 西宁 810016; 2. 青海职业技术大学, 青海 西宁 810016; 3. 杭州市水利水电勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州 310009; 4. 青海省建筑节能材料与工程安全重点实验室, 青海 西宁 810016)

**摘 要:** 利用微生物矿化的原理开展荒漠沙土的固化抑尘研究, 已成为中国西北地区荒漠生态修复领域的科技前沿。然而, 在高原环境下通用脲解型微生物的脲酶活性受到不同程度的抑制。因此, 筛选寒旱荒漠环境中原生(土著)极优脲解型微生物用以固化荒漠沙土成为该领域研究的新思路。从青海高原干旱区盐漠土中筛选极优脲解型微生物, 通过灌注法、喷洒法及水侵蚀法, 对盐漠土进行固化试验研究, 分析土著微生物固化盐漠土的物理化学特征、力学强度变化及其抗侵蚀能力。结果表明: 青海高原盐漠土中存在极优脲解型微生物(Z7)属于益生菌, 在5%盐浓度环境下, Z7脲活最高值为2.075 U/mL。Z7固化盐漠土的无侧限抗压强度提高了26.8倍, 表层土抗剪强度提高了9倍左右, 表面失土速度平均降低70.5%, 抗侵蚀能力提高了6.5倍。研究结果表明土著脲解型微生物对松散盐漠土具有固化抗蚀的应用潜力, 为高原干旱区盐漠环境生态修复提供了新的策略支持。

**关键词:** 高原寒旱环境; 盐漠土; MICP; 土著极优脲解型微生物; 固沙抗蚀

中图分类号: TU432

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2025)12-2591-11

**作者简介:** 白振宇(1998—), 男, 硕士研究生, 主要从事岩土工程及防灾减灾方面的研究工作。E-mail: 18637750382@163.com。

## Mechanical properties enhancement and erosion resistance effect of salt desert soil solidified by indigenous microorganisms

BAI Zhenyu<sup>1</sup>, ZHANG Wen<sup>\*1,4</sup>, YUAN Yuan<sup>2</sup>, ZHANG Yurong<sup>3</sup>, WANG Ruze<sup>1</sup>, LASHARI Zuhaib ul Hassan<sup>1</sup>

(1. College of Civil Engineering and Water Conservancy, Qinghai University, Xining 810016, China; 2. Qinghai Vocational and Technical University, Xining 810016, China; 3. Hangzhou Water Resources&Hydropower Survey Designing Institute, Hangzhou 310009, China; 4. Qinghai Provincial Key Laboratory of Building Energy-saving Materials and Engineering Safety, Xining 810016, China)

**Abstract:** The research on solidifying and dust-suppressing desert sands by using the principle of microbial mineralization has become a technological frontier in the field of desert ecological restoration in the arid regions of Northwest China. However, the urease activity of common ureolytic microorganisms is inhibited to varying degrees in plateau environments. Therefore, screening native (indigenous) superior ureolytic microorganisms from cold and arid desert environments for the solidification of desertified soil has been emerged as a new approach in this field. This paper isolates superior ureolytic microorganisms from the saline desert soil in the arid region of the Qinghai Plateau. Through perfusion, spraying, and water erosion methods, solidification experiments are conducted on the saline desert soil, analyzing the physicochemical characteristics, mechanical strength changes, and erosion resistance of the soil solidified by indigenous microorganisms. The results show that a superior ureolytic microorganism (Z7), belonging to the probiotic group, is found in the saline desert soil of the Qinghai Plateau. In an environment with a 5% salt concentration, the maximum enzyme activity of Z7 is 2.075 U/mL. The unconfined compressive strength of the Z7-solidified saline desert soil increases by 26.8 times, the shear strength of the surface soil improves by approximately 9 times, the surface soil loss rate decreases by an average of 70.5%, and the erosion resistance increases by 6.5 times. The results demonstrate the potential of indigenous ureolytic microorganisms in solidifying and erosion-resistant applications for loose saline desert soils, providing new strategic support for ecological restoration in the arid saline desert

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(51468055); 青海省重点研发与转化项目(2022-QY-224) This work was supported by National Natural Science Foundation of China (Grant No.51468055), Qinghai Provincial Key R&D and Transformation Program (Grant No.2022-QY-224).

收稿日期(Received): 2024-09-03 修回日期(Revised): 2025-02-16 接受日期(Accepted): 2025-03-13 网络出版日期(Online): 2025-03-14

\*通信作者(E-mail: 516061874@qq.com)

environments of plateau regions.

**Key words:** plateau cold and arid environment; salt desert soil; MICP; Indigenous extremely excellent ureolytic microorganisms; sand fixation and erosion resistance

0 引言

盐漠土是寒旱气候环境下形成的高含盐荒漠沙化土，简称盐漠土。盐漠土具有土颗粒均匀、不易压实的松散结构及盐腐蚀、溶陷和盐胀等特殊岩土工程特性，是中国西北寒旱地区生态环境修复研究和土木工程安全研究的重要对象<sup>[1]</sup>。青海柴达木盆地是青藏高原发育大面积盐漠土的代表性地区，也是中国西北寒旱地区盐漠沙尘爆发飞扬的主要源区，不断造成工程覆压及其结构腐蚀等工程安全隐患<sup>[2]</sup>，通常采用传统的物理化学方法对其进行防治和生态环境修复<sup>[3-4]</sup>。然而，这些传统方法存在对岩土环境和水体环境的二次污染及原材料缺乏等问题。近年来，随着微生物诱导碳酸钙沉淀（microbial induced calcite precipitation, MICP）研究的快速发展，已拓展至土体固化加固、混凝土及石质文物裂隙修复等领域<sup>[5-7]</sup>。相对于上述传统方法，MICP 降低了对工程土水环境的扰动和污染，受到学术界重视<sup>[8]</sup>。然而，MICP 研究通用的巴氏芽孢微生物，在寒旱盐渍环境中存在耐受性差的问题<sup>[9-11]</sup>。由此，利用原生（土著）尿解型微生物开展 MICP 研究引起了众多学者的关注，尽管对其研究尚不够深入，但对于盐漠土固化固定研究意义深远<sup>[8]</sup>。

本文筛选青海柴达木盆地盐漠土中的土著极优尿解型微生物，利用其开展高原寒旱区盐漠土 MICP 固化研究。基于土著微生物 MICP 固化盐漠土的物理化学特征，分析其表层力学强度变化及其抗侵蚀能力变化规律，以期阐明土著微生物 MICP 固化盐漠土生物力学机制，对于提升高原寒旱区盐漠化防治研究具有借鉴意义。

1 研究区概况

研究区位于青藏高原柴达木盆地中部（图 1），平均高原海拔 3350 m，年均降雨量仅有 41.5 mm，年蒸发量高至 3000 mm 以上<sup>[12]</sup>。盆地中部的冲积、湖积平原地表发育不连续分布的盐漠土（图 1（a），（b）），面积约为  $1.57\times10^4\text{ km}^2$ <sup>[13]</sup>。

2 材料与方法

2.1 试验材料

（1）盐漠土

研究区发育的盐漠土外观呈黄褐色，土体粒径较细且均匀，地表偶见盐颗粒及零星盐结皮<sup>[14]</sup>。野外采

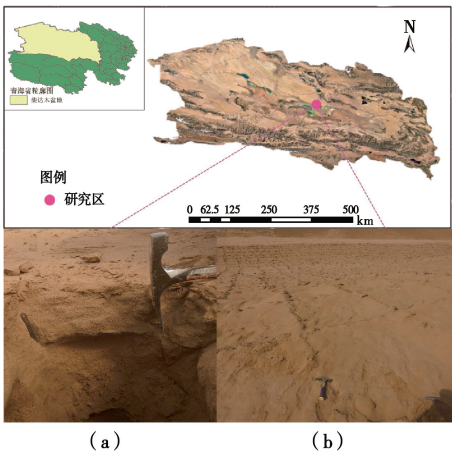


图 1 研究区位置示意图<sup>[13]</sup>

Fig. 1 Location diagram of study area<sup>[13]</sup>  
用探井刻槽法取土样及生物土样（图 2）。在采取生物土样之前，需要清除表层厚为 2 cm 土层后，使用无菌铲挖取生物土样，封装于无菌离心管内，立刻保存于液氮罐，运回实验室保存至 4℃ 的冰箱中。同时，利用环刀法削取原状土，用于测定盐漠土基本物理力学特性。采用对角四分法挖取扰动土样，分别用于易溶盐含量测定和 MICP 固化试验研究。

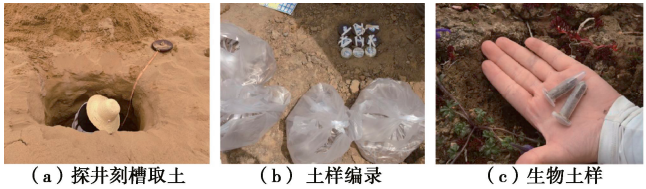


图 2 野外盐漠土及微生物土取样

Fig. 2 Field salt desert soil and microbial soil sampling  
对研究区盐漠土基本物理性质分析结果表明（图 3），其易溶盐平均含量为在 1.0%~6.66%，随地表深度的增加而降低。其中，近地表处 Na<sup>+</sup>、Cl<sup>-</sup>的含量最高，说明 Na<sup>+</sup>、Cl<sup>-</sup>具有较明显的表聚性特征，这是土体易溶盐离子随毛细水运移和地表土层强烈蒸发共同作用的结果。在 0.4~0.8 m 深度范围内 Na<sup>+</sup>、Cl<sup>-</sup>有一个上升的趋势，说明在土层一定深度存在中溶盐和难溶盐富集形成的一个低渗透性隔板，阻滞了易溶盐离子的向下淋滤运移，在这个深度形成小规模富集。同时，Cl<sup>-</sup>占比最高，平均含量为 1.176%，按含盐性质划分，野外所取土属于氯盐/亚氯盐型盐漠土<sup>[15]</sup>。  
根据研究区盐漠土的试验级配曲线（图 4），盐漠土粒径主要集中于 1.00~1.13 mm，计算得到其不均



匀系数为 2.067, 曲率系数为 0.993, 表明该土属于颗粒均匀、级配不良的细沙。

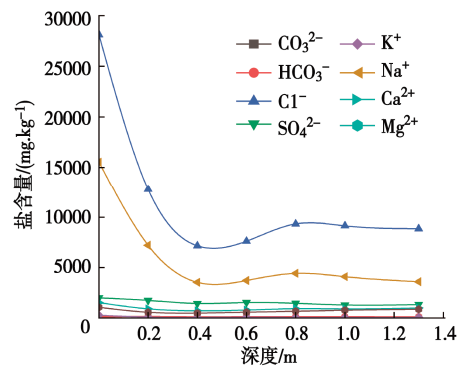


图 3 研究区盐离子随深度分布特征

Fig. 3 Distribution characteristics of salt ions with depth in study area

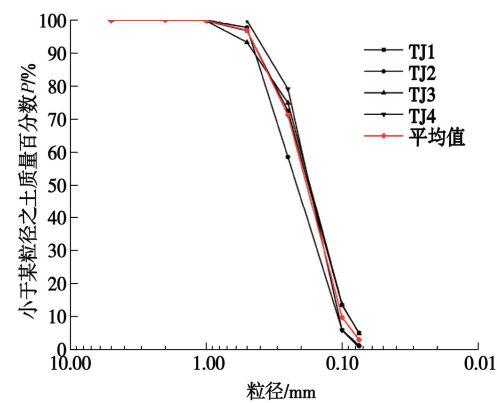


图 4 研究区盐漠土的颗粒级配曲线

Fig. 4 Particle size distribution curve of salt desert soil in study area

此外, 盐漠土土粒平均相对质量密度  $G_s=2.673$ , 初始干密度为  $1.676\text{ g/cm}^3$ 、天然含水率为  $1.063\%$ ,  $\text{pH}=8.43$ , 属于呈弱碱性土。休止角为  $33.55^\circ$ , 最优含水率为  $12\%$ , 在天然干密度下的压缩系数为  $0.098\text{ MPa}^{-1}$ , 溶陷系数为  $0.010$ 。综上表明, 该土级配不良、氯盐含量高、低压缩性、具有溶陷和腐蚀特性的松散中氯盐型盐漠土。

(2) 试样制备及胶结液制备

利用三轴试样静压制样器, 在盐漠土最佳含水率 (含水率为  $12\%$ ) 条件下制备试验土柱。土柱制作完成后烘干, 装入柔性边界模具 (选用土工布制作内径  $39.1\text{ mm}$ , 高度  $80\text{ mm}$  的透水透气柔性边界模具), 再装入硬性边界模具 (选用内径  $50\text{ mm}$ , 高度  $160\text{ mm}$  的塑料针筒作为硬性边界模具)。此外, 制备物质的量比例  $1:1$  的尿素和无水氯化钙为胶结液, 尿素即提供菌株生长繁殖所需的氮源, 又通过菌株自身的脲酶水解尿素, 生成  $\text{CO}_3^{2-}$ 。无水氯化钙提供所需的钙源, 即  $\text{Ca}^{2+}$ 。

2.2 试验方法

(1) 土著极优脲解型微生物筛选

采用平板划线法获得单一土著盐脲解型微生物<sup>[15]</sup>, 通过培养基颜色变红的程度 (图 5), 可以初始判断产脲酶菌株及其在一段时间内脲酶产量的高低, 由此初步确定极优脲解型微生物。

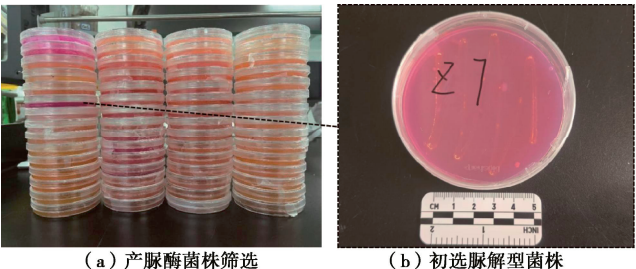


图 5 产脲酶菌株导致培养基变红

Fig. 5 Urease-producing strains cause medium to turn red

(2) 极优耐盐脲解型微生物培养

选用大豆酪蛋白琼脂 (tryptose soya agar, TSA) 培养基对上述微生物进行扩大培养 (表 1)。

表 1 TSA 培养基配制

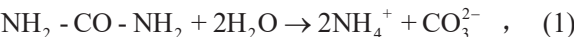
Table 1 Tryptose Soya Agar (TSA) medium	
TSA 培养基成分	用量/(g·L <sup>-1</sup> )
胰蛋白胨	17.0
大豆蛋白胨	3.0
NaCl	5.0
K <sub>2</sub> PHO <sub>4</sub>	2.5
葡萄糖	2.5

(3) 极优脲解型微生物酶活的测定

在极优耐盐脲解型微生物培养的基础上采用多功能酶标仪 (thermo scientific™ varioskans LUX) 测定脲酶活力值 (单位简称为 U), 筛选出极优耐盐土柱脲解型微生物菌株<sup>[14]</sup>。根据青海高原寒旱区环境条件, 针对 Z7、巴氏芽孢杆菌 (下文简称“巴杆”)、巴氏生孢八叠球菌 (下文简称“巴球”), 分别测定 3 株菌株在环境温度为  $0, 5, 15, 25, 35^\circ\text{C}$  时,  $5\%$  盐浓度条件下采用前述多功能酶标仪测定其脲酶活力值随时间变化规律。

(4) 极优脲解型微生物致钙能力测定

将菌株接种在盐浓度为  $5\%$  的 TSA 液体培养基中, 在  $35^\circ\text{C}$  的环境下培养  $56\text{ h}$  至酶活最佳时刻, 各取  $15\text{ mL}$  菌液加入已配置好  $15\text{ mL}$  胶结液 ( $2\text{ mol/L}$  尿素和  $2\text{ mol/L}$  无水氯化钙) 的试管中 (图 6),  $35^\circ\text{C}$  恒温培养  $7\text{ d}$ , MICP 致钙过程的主要化学反应过程如下所示:



其反应原理如图 7 所示。

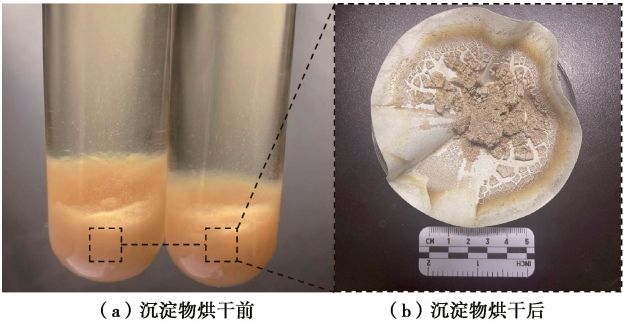


图 6 极优菌株诱导致钙试验

Fig. 6 Calcium induction test by excellent strains

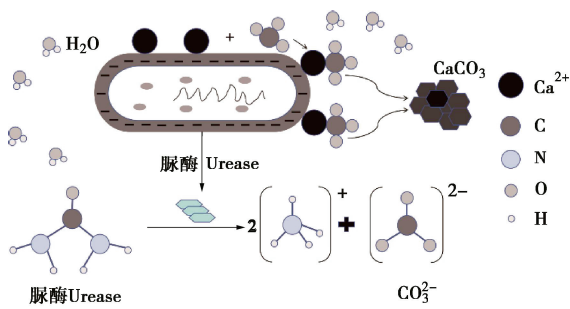


图 7 微生物诱导生成碳酸钙矿物原理

Fig. 7 Principle of microbially induced formation of calcium carbonate minerals

将已培养至最佳酶活的菌株（15 mL）加入到胶结液中（15 ml 的 2 mol/L 尿素和 2 mol/L 无水氯化钙），经过诱导产生沉淀，7 d 后过滤试管中白色沉淀并烘干。随后分别通过中和滴定法、用扫描电镜和矿物 X 射线衍射仪对沉淀形态和成分进行测定。

(5) 盐漠土土柱 MICP 固化试验

制备试件盐漠土土柱的直径和高度分别为  $D=80\text{ mm}$ ， $H=39.1\text{ mm}$ 。对土柱采用从下往上、先注入 Z7 微生物菌液随后注入前述配制胶结液、分段多次灌浆的方式，以期提高矿化的均匀性（表 2）。试验环境温度控制为  $25\pm2^{\circ}\text{C}$ ，注浆速率设置为  $1\text{ mL/min}$ ，每隔 24 h 注浆一次。试件土柱重复注浆至 6 次，养护 7 d 后烘干，将试件土柱拆模。

表 2 注浆方案

Table 2 Grouting scheme

试样编号	注浆材料
A1	20 mL 培养基+20 mL 蒸馏水（未固化）
B1	20 mL 菌液+20 mL 胶结液（0.25 mol/L）
C1	20 mL 菌液+20 mL 胶结液（0.5 mol/L）
D1	20 mL 菌液+20 mL 胶结液（0.75 mol/L）
E1	20 mL 菌液+20 mL 胶结液（1.0 mol/L）
F1	20 mL 菌液+20 mL 胶结液（1.25 mol/L）
G1	20 mL 菌液+20 mL 胶结液（1.5 mol/L）
H1	20 mL 菌液+20 mL 胶结液（2.0 mol/L）

(6) MICP 固化盐漠土强度试验

a) 抗压强度试验（UCS）及抗剪强度试验（UU）

将 MICP 固化的试件土柱脱模后放入  $100^{\circ}\text{C}$  的烘箱中，烘干 24 h 后取出进行无侧限抗压强度试验。采用 YAW4306 微机控制电液伺服压力试验机对土柱进行无侧限抗压强度试验，应变速率设定为  $1\text{ mm/min}$ 。

将养护结束后的试样烘干拆模，选用不固结不排水试验进行抗剪强度试验，剪切速率设置为  $0.8\text{ mm/min}$ ，周围压力为 100，200，300 kPa（表 3）。

表 3 抗剪强度试样

Table 3 Shear strength specimens

试样编号	围压/kPa	试样编号	围压/kPa	试样编号	围压/kPa
A1-4	100	A1-5	200	A1-6	300
B1-4	100	B1-5	200	B1-6	300
C1-4	100	C1-5	200	C1-6	300
D1-4	100	D1-5	200	D1-6	300
E1-4	100	E1-5	200	E1-6	300
F1-4	100	F1-5	200	F1-6	300
G1-4	100	G1-5	200	G1-6	300
H1-4	100	H1-5	200	H1-6	300

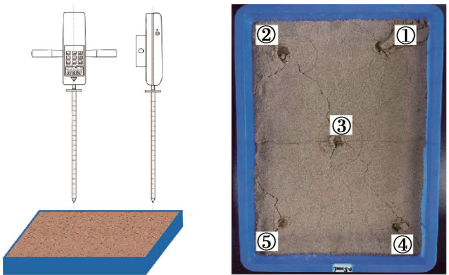
b) 碳酸钙含量测定

分别在固化无侧限抗压强度试验破坏后土柱的上、中、下 3 部分，各取相同质量的土  $m_1$ （以消除 MICP 固化土体  $\text{CaCO}_3$  沉淀不均匀性的影响），充分酸洗烘干后土样质量为  $m_2$ 。利用下式可得到 MICP 固化后盐漠土中碳酸钙含量：

$$C_{\text{CaCO}_3} = \frac{(m_1 - m_2)}{m_1} \times 100\% \quad (3)$$

c) 固化盐漠土表层强度测定

采用烘箱将 MICP 固化后盐漠土平盘烘干至其质量不再变化，选取平盘 5 个典型位置，采用 TYD-2 型土壤硬度计，测试平盘中 MICP 固化后的盐漠土固化层（0~20 mm）的贯入阻力换算为抗剪强度（图 8）。



(a) TYD-2型土壤硬度计 (b) 沙盘硬度测试采样示意图

图 8 盐漠土 MICP 固化层硬度测试位置

Fig. 8 Hardness test position of MICP solidified layer of flat salt desert soil

d) 盐漠土 MICP 固化抗侵蚀测定

称取一定量盐漠土装入规格为  $340\text{ mm}\times215\text{ mm}\times55\text{ mm}$  的沙盘中，将其表面整平，土层厚度控制为

4 cm (表 4)。采用等量菌液和 7 种浓度的胶结液对盐漠土进行 MICP 固化处理。同时, 设置空白对照组, 以消除培养基和胶结液中蒸馏水对盐漠土固化强度的影响。控制环境温度为  $25\pm2^{\circ}\text{C}$ , 采用加压式喷壶分先后将 Z7 菌液和上述 7 种浓度胶结液, 按照每 24 h 喷洒一次的间隔, 分别均匀喷洒上述盘中盐漠土表面, 共喷洒 6 次, 置于室温下进行 MICP 固化。7 d 后烘干盘中盐漠土层, 采用图 9 所示方法, 进行水侵蚀试验 (电动喷出水量为  $95\text{ mL/min}$ )。待盐漠土坡面完全侵蚀崩解后收集松散失土, 烘干后对失土进行称重。由于每个浓度胶结液固化的盐漠土完全崩解时间不同, 可以对各个盐漠土盘平均每分钟的失土量进行比较, 用以判定抗侵蚀能力的变化及不同固化条件下的对盐漠土固化效果。

表 4 盐漠土表层 MICP 固化方案

Table 4 MICP curing program for salt desert soil surfaces

试样编号	喷洒材料	胶结液浓度梯度
A2	60 mL 培养基+60 mL 蒸馏水 (0 mol/L)	
B2	60 mL 菌液+60 mL 胶结液 (0.25 mol/L)	低
C2	60 mL 菌液+60 mL 胶结液 (0.50 mol/L)	浓
D2	60 mL 菌液+60 mL 胶结液 (0.75 mol/L)	度
E2	60 mL 菌液+60 mL 胶结液 (1.00 mol/L)	
F2	60 mL 菌液+60 mL 胶结液 (1.25 mol/L)	高
G2	60 mL 菌液+60 mL 胶结液 (1.50 mol/L)	浓
H2	60 mL 菌液+60 mL 胶结液 (2.00 mol/L)	度

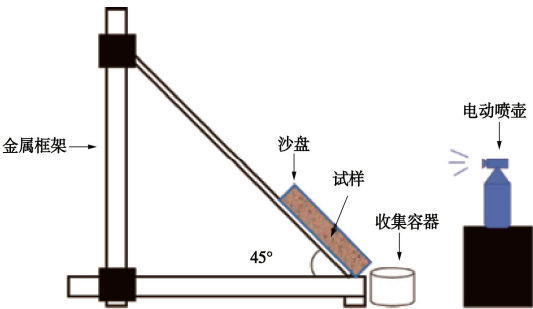


图 9 盐漠土表面降雨冲刷试验

Fig.9 Rainfall erosion test on salt desert soil surface

3 结果与分析

3.1 寒旱区盐漠土土著极优脲解型微生物种属特征

在盐漠土中分离得到 39 株原生脲解型微生物(编号分别为 Z1~Z28、CP1~8、AK1~3) 中, 编号为 Z7 的菌株的培养基红色最深, 初步判定其为原生脲解型微生物。通过形态学、革兰氏染色和菌株 16rDNA 序列测序等方法进行物种鉴定, 结果表明该微生物为贝莱斯芽胞杆菌 (*Bacillus velezensis*) [16], 属于益生菌[17-18]。

3.2 强盐渍环境下 Z7 的生长特征

紫外分光光度计(V-1500)、多功能酶标仪(thermo scientific™ varioskans LUX), 分析 Z7、巴杆、巴球在盐渍环境下的生长状况及脲酶活性测定结果表明 (图 10), Z7 生长可以分为 5 个阶段: 生长延滞期(0~4 h)、对数生长期 (4~12 h)、生长平台期 (12~24 h)、生长稳定期 (24~60 h)、衰亡期 (60 h~); 12 h 时 Z7 生长在达到一个峰值后会有短暂的下降, 这是由于菌株生长初期利用葡萄糖作为碳源, 在 12 h 后葡萄糖被消耗, 细菌开始利用其他碳源 (如胰蛋白胨) 所导致的。且 Z7 生长曲线和产脲酶曲线并不是完全保持一致, 菌株生长到达稳定期后脲酶的产量才开始呈对数增长, 表明 Z7 产脲酶能力具有延滞性[19]。

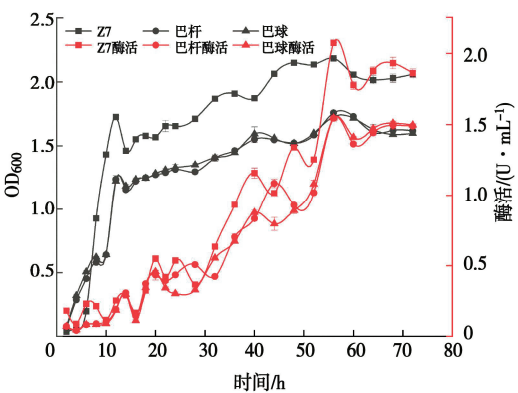


图 10 菌株生长曲线

Fig. 10 Strain growth curves

图 10, 11 均表明, 在不同的温度下, 上述 3 种微生物脲酶活性, 随着菌株生命周期变化均呈现先上升后缓慢下降的趋势, 亦随环境温度的降低呈降低趋势。

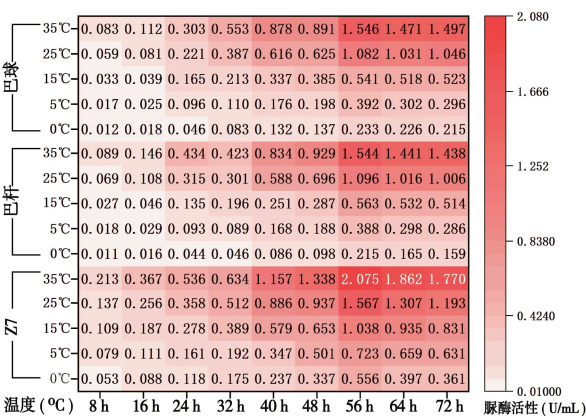


图 11 温度梯度下 3 种脲解型微生物脲酶活性

Fig. 11 Urease activities of three ureolytic microorganisms under temperature gradients

其中, Z7 的耐盐能力、产脲酶能力和低温耐受能力, 均高于实验室通用的巴氏芽胞杆菌和巴氏生孢八叠球菌。当环境温度为  $35^{\circ}\text{C}$  时, Z7 的酶活值为  $2.075\text{ U/mL}$ , 分别是巴杆和巴球的 1.344 倍和 1.342 倍。当环境温度为  $0^{\circ}\text{C}$  时, Z7 的酶活值为  $0.556\text{ U/mL}$ , 分别



为巴杆和巴球的 2.586 倍和 2.386 倍, 巴杆和巴球两种实验室通用微生物的脲酶活性受低温影响更为明显, 土著微生物 Z7 对寒旱气候及高盐土体环境拥有更好的耐受性。综上, 可以确定 Z7 为研究区极优脲解型微生物, 其种子培养基的最佳时间为 16 h, 发酵培养基的最佳时间为 24 h, 产脲酶培养基的最佳时间为 56 h。

3.3 Z7 菌株致钙能力

试管中 Z7 诱导白色沉淀物 XRD 图谱分析表明其主要成分为  $\text{CaCO}_3$  (图 12), 表明 Z7 能在短时间内诱导矿化生成大量的碳酸钙矿物沉淀。

进一步结合对前述白色沉淀矿物进行电镜扫描试验 (图 13), 结果表明沉淀晶体形态呈球形 (球霏石) 和棱柱形 (方解石) (图 13 (a)), 球霏石表面附着结晶核点 (图 13 (b), (c))。综上表明, Z7 具有良好的诱导产生两种碳酸钙晶体 (球霏石和方解石) 集合体的能力, 并对周围固体颗粒产生胶结作用。

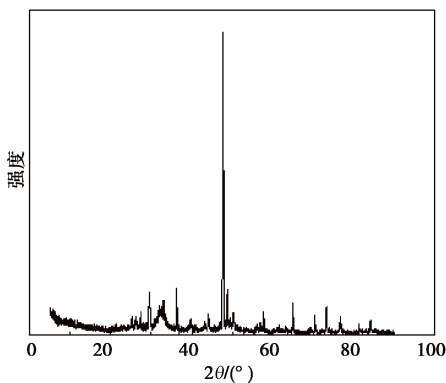


图 12 Z7 菌诱导碳酸钙沉淀 XRD 图谱

Fig. 12 XRD patterns of calcium carbonate precipitation induced by Z7 bacteria

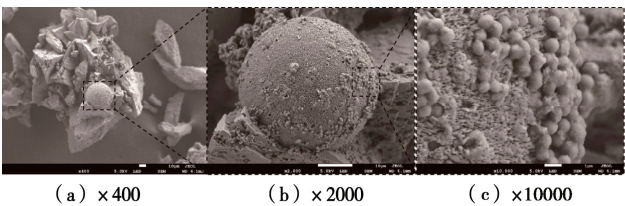


图 13 Z7 菌诱导碳酸钙沉淀的微观特征

Fig. 13 Microscopic characterization of calcium carbonate precipitation induced by bacteria

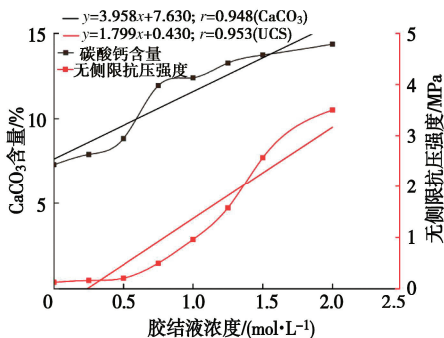
3.4 Z7 矿化增强盐漠土力学性能及其相关因素

(1) 盐漠土无侧限抗压强度及其相关因素

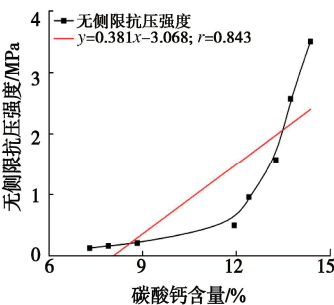
利用 Z7 固化盐漠土的无侧限抗压强度试验结果表明 (图 13), 固化盐漠土提高其无侧限抗压强度可以达到 3.50 MPa, 提高了 26.80 倍。该强度变化与试验胶结液浓度和诱导致钙数量密切相关。其中, 胶结液浓度与  $\text{CaCO}_3$  含量的相关性系数  $|r| > 0.8$ , 二者之间显著相关 (图 14 (a))。Z7 诱导致钙数量随胶结液浓

度提高而增多, 最高达到 14.37%, 较未固化试件提高了 7.07%。在胶结液浓度达到 0.75 mol/L 后,  $\text{CaCO}_3$  含量的增长速率放缓 (图 14 (a))。这是由于随着胶结液浓度的增加,  $\text{CaCO}_3$  沉淀量增加并堵塞土体孔隙, Z7 菌液和胶结液进入土体通道受阻, 导致后续  $\text{CaCO}_3$  生成速率放缓。

图 14 (a) 表明, 当胶结液浓度为低浓度范围时, 土柱具有较低的无侧限抗压强度, 这是 Z7 初期生成的碳酸钙较少, 对土颗粒胶结固化和充填土空隙的作用较小。当胶结液浓度为高浓度范围时, 土柱具有较高的无侧限抗压强度。这个浓度范围的胶结液促使 Z7 生成碳酸钙较多, 对土颗粒胶结固化和充填土空隙的作用较大, 无侧限抗压强度变化与  $\text{CaCO}_3$  含量之间呈显著正相关关系 (图 14 (b))。同时,  $\text{CaCO}_3$  充填土空隙作用使其干密度得到提高 (图 15 (a)), 干密度变化与胶结液浓度具有显著相关性 (图 15 (b))。



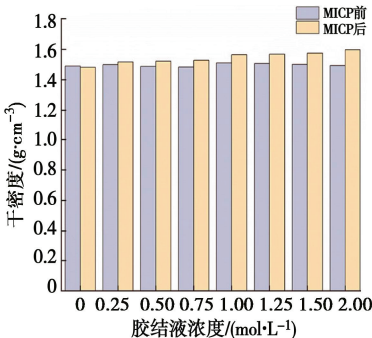
(a) UCS与 $\text{CaCO}_3$ 和胶结液浓度相关性分析



(b)  $\text{CaCO}_3$ 与UCS的相关性分析

图 14 碳酸钙含量和无侧限抗压强度随胶结液浓度的变化

Fig. 14 Variation of calcium carbonate content and unconfined compressive strength with the concentration of cementing solution



(a) 固化前后干密度对比



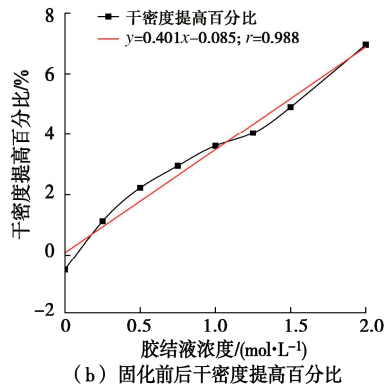


图 15 干密度随胶结液浓度的变化关系

Fig. 15 Relationship between dry density and cementing fluid concentration

### (2) 固化盐漠土抗压破坏特征

MICP 固化盐漠土抗压破坏形态(以 0, 1, 2 mol/L 为例)表明(图 16), 土柱破坏缝主要集中在土柱上部(图 16(b), (c)). 这是由于从下往上的注浆方法, 使得土柱下部矿化固化效果好于上部。相交于未固化土柱破坏裂缝贯穿土柱整体破坏特征(图 16(a)), 利用 Z7 对盐漠土进行 MICP 固化抗压碎效果良好。

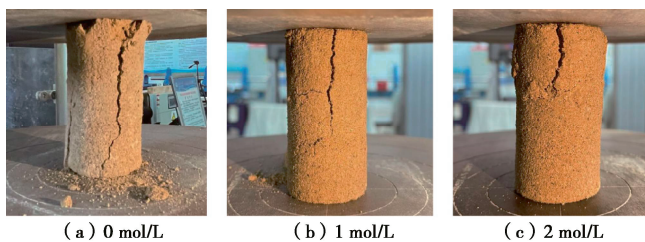


图 16 MICP 固化盐漠土土柱抗压破坏形态对比

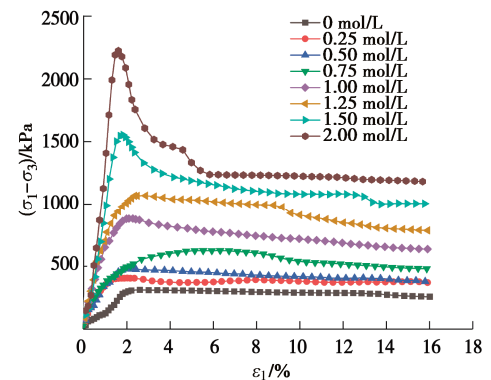
Fig. 16 Comparison of compressive damage patterns of MICP-consolidated salt-desert soil columns

### (3) 盐漠土应力应变特征

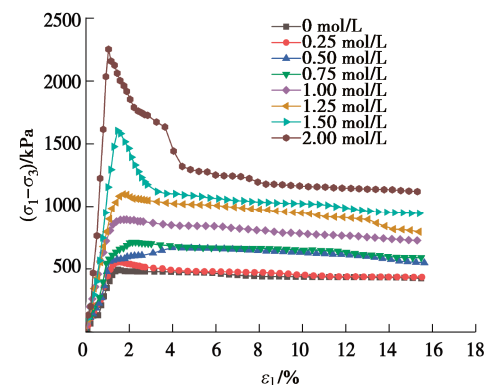
对比不同胶结液浓度下固化盐漠土的试验结果(图 17), 当轴向应变为 1%~4%时, 偏应力值就已趋近其极限值, 随着胶结液浓度增大, 试样残余偏应力值、峰值强度也随之增大。低浓度胶结液处理的试样残余偏应力值与峰值偏应力值变化范围不大, 屈服应变硬化平台明显; 高浓度胶结液处理的土柱极限偏应力峰值强度明显增加, 屈服应变软化特征明显, 强度值下降快速, 残余偏应力值最大只有峰值偏应力值的 64%, 呈显著的脆性破坏, 但具有较高的抗剪强度。在 100 kPa 围压下, 试样固化前后峰值偏应力提高 6.1 倍; 在 200 kPa 围压下, 试样固化前后峰值偏应力提高 3.6 倍, 在 300 kPa 围压下, 试样固化前后峰值偏应力提高 2.1 倍。

以上结果表明, 随着胶结液浓度的提高, MICP 固化试样的峰值抗压强度和残余强度也随之提高, 呈

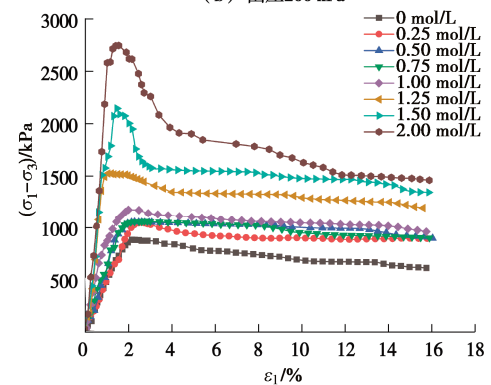
显著的脆性破坏。这是由于固化盐漠土中生成的  $\text{CaCO}_3$  包裹并填充于胶结土颗粒, 土体干密度的增大, 形成整体土骨架, 从而提高盐漠土的强度。高浓度胶结液浓度固化盐漠土的强度值达到峰值强度后突然骤降, 这可能是由于外力达到碳酸钙胶结极限抗剪强度及所含易溶盐颗粒极限抗剪强度的时, 碳酸钙及易溶盐突然断裂, 或 MICP 固化盐漠土强度分布不均匀性所致<sup>[20]</sup>。



(a) 围压100 kPa



(b) 围压200 kPa



(c) 围压300 kPa

图 17 不同胶结液浓度下盐漠土试件应力应变曲线

Fig. 17 Stress-strain curves of salt desert soil specimens under different cementing solution concentrations

综上所述, 土著微生物 Z7 诱导固化盐漠土的强度增强趋势与其诱导致钙量的增加趋势吻合, 盐漠土强度提高与胶结液浓度的相关性属于显著相关、与

CaCO<sub>3</sub> 含量的相关性属于显著正相关。

3.5 土著微生物固化盐漠土微观结构增强机制

Z7 固化盐漠土微观试验结果表明（图 18（a）～（f）），相较于未固化土（图 18（a）），固化后的土颗粒之间有明显 CaCO<sub>3</sub> 沉淀，有效的增加了土颗粒之间的接触位点（图 18（b）～（e）），未固化土颗粒表面光滑，有细小易溶盐盐颗粒，颗粒间空隙较大，土颗粒松散。

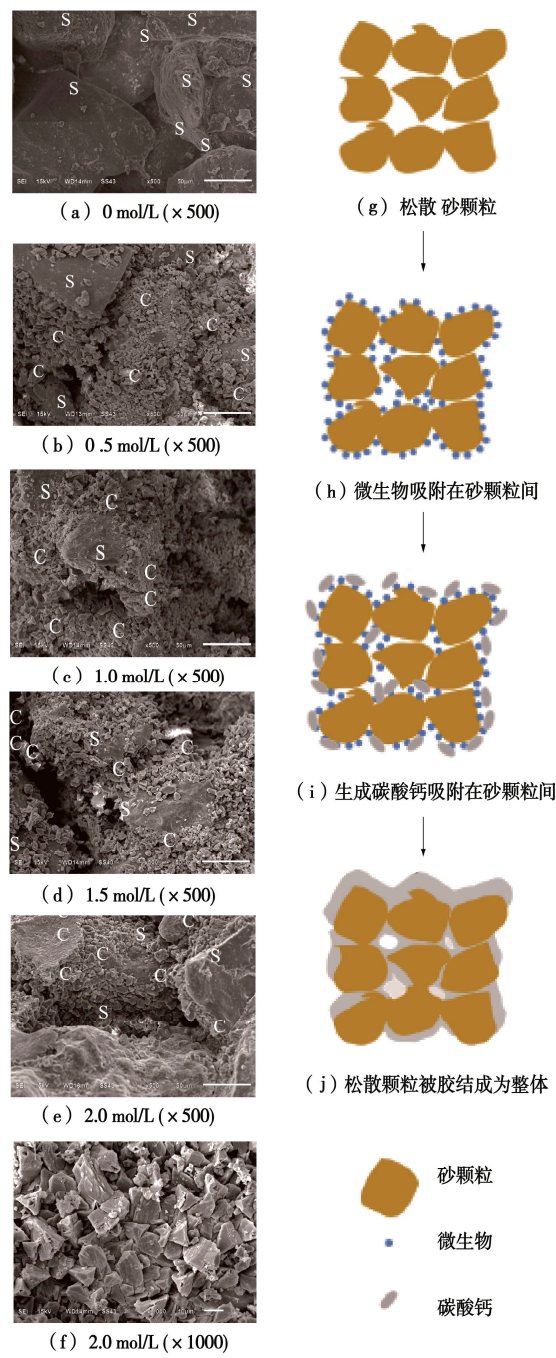


图 18 固化盐漠土微观结构及其增强机制（S 为土颗粒，C 为碳酸钙，CC 为胶结面）

Fig. 18 Microstructure and strengthening mechanism of solidified salt desert soil (S represents soil particles, C represents calcium carbonate, and CC represents cementing surface)

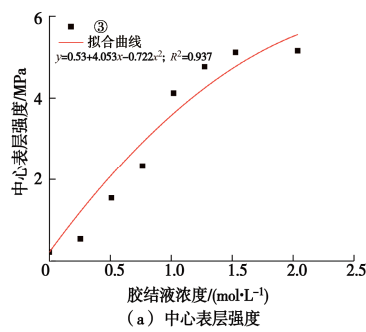
随着 MICP 固化的进行，土颗粒表面逐渐有碳酸钙沉淀生成（方解石矿物）（图 18（b）～（f））。随着胶结液浓度的增加碳酸钙晶体逐渐增大，从土颗粒表面碳酸钙颗粒无规律的排列方式，逐步变为相对有规律排列、碳酸钙晶体间结合紧密，均匀地包裹在土颗粒表面。当方解石晶体增大至 7~16 μm 时，碳酸钙晶体出现定向排列的特征（图 18（f）），将相邻的土颗粒胶结在一起，使得土颗粒间的空隙减小，增强了盐漠土的密实度。同时，被碳酸钙胶结的土颗粒间的界面作用力（界面黏聚力和摩擦力）随之增大，约束了土颗粒间的位移与变形，限制了土颗粒间的相对滑动，形成具备强度的整体土骨架，从而提高盐漠土体的整体强度和稳定性，其固化增强作用机制详见图 18（g）～（j）。在此过程中，微生物诱导产生的大量的碳酸钙在土的结构强度中起到了重要作用。这种作用不仅改善了土体的工程特性，而且在盐漠土固化固定过程中发挥了关键作用。

3.6 土著微生物 MICP 固化盐漠土抗侵蚀能力

（1）固化盐漠土表层强度变化特征

前述固化盐漠土表层厚度（0~20 mm）的①②④⑤处硬度测定结果表明（图 19），试样表面强度随着胶结液浓度的增加而增加，固化沙漠土的表面强度较未固化盐漠土（即胶结液浓度为 0 值）分别可提高 0.34 倍~9.11 倍，并与就胶结液浓度密切相关。

固化盐漠土表层不同位置的①②④⑤处的表面强度，随胶结液浓度增大而提高（图 19（a），（b））。其中，固化盐漠土表层中心点③处强度值较大（图 19（a），（c）），原因是人工喷洒菌液及胶结液不够均匀所致。当胶结液浓度超过 1 mol/L 时，固化盐漠土表层强度的增长速率总体减缓，这主要是因为充足的尿素及钙源快速生成碳酸钙，生成的碳酸钙主要积聚在试样表层，表层积聚的碳酸钙阻碍了菌液及胶结液的进一步下渗，表层强度增大开始减缓，表层强度变化与胶结液浓度之间呈显著相关（ $|r|>0.8$ ）（图 19（a），（b））。当胶结液浓度为 2 mol/L 时，固化盐漠土表层的强度较未固化试样提高 9.11 倍，此时碳酸钙含量达到 19.19%（图 19（d））。



（a）中心表层强度



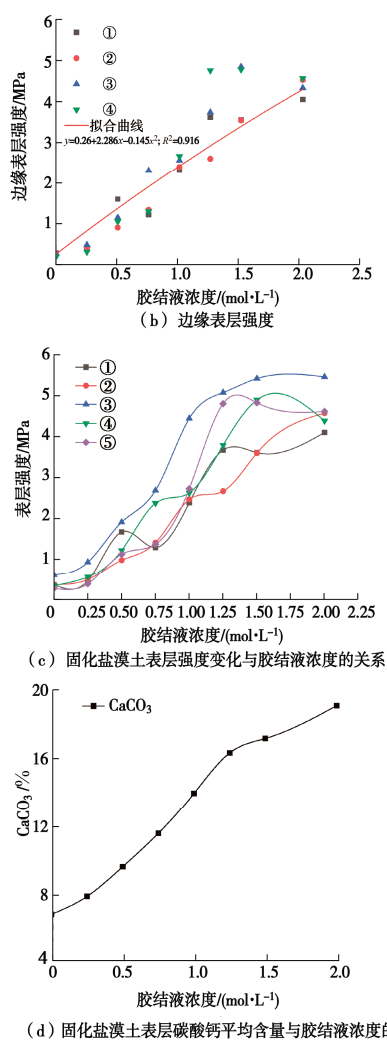


图 19 MICP 固化盐漠土表层硬度试验结果

Fig. 19 MICP cured salt desert soil surface hardness test results

(2) 固化盐漠土表层抗侵蚀特征

a) 固化盐漠土表层抗侵蚀特征

固化盐漠土表层抗侵蚀试验结果表明（图 20），比较图 20（a）～（h），未固化盐漠土崩解时间为水侵蚀后的 10 min 左右，低浓度胶结液固化的盐漠土崩解时间为水侵蚀后 20 min 左右，高浓度胶结液固化的盐漠土崩解时间为水侵蚀后 25 min 左右，说明在相同水侵蚀条件下，固化盐漠土抵抗水侵蚀崩解时间延长了 2.5 倍，抵抗水侵蚀的性质得到增强，提高了抵抗地表径流对盐漠土产生侵蚀作用的能力。

b) 固化盐漠土表层侵蚀失土量特征

固化盐漠土抗侵蚀失土量试验结果表明（图 21），未固化试样失土速度为 26.31 g/min，低浓度胶结液处理的盐漠土失土速度为 14.3～17.39 g/min，降低了 54%～66%。高浓度胶结液处理的盐漠土失土速度为在 3.5～6.35 g/min，降低了 76%～87%，失土速度明显降低，平均降低 70.5%。说明 MICP 固化盐漠土表层可以抵抗水的侵蚀运移作用。同时表明，固化盐漠土表层失土速度与胶结液浓度变化密切相关。

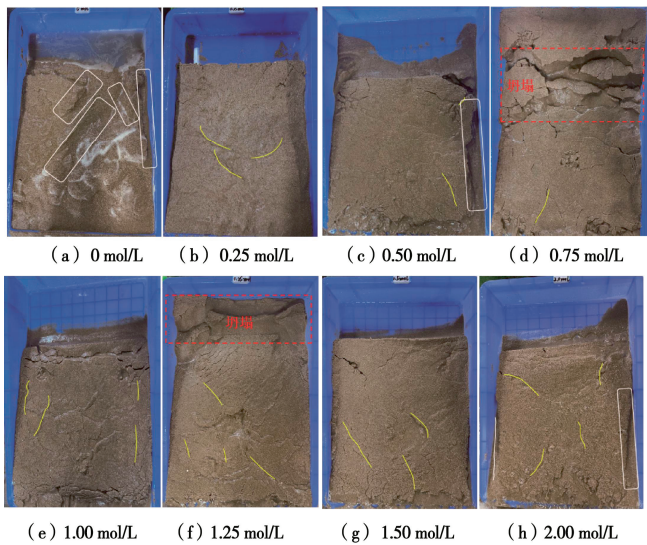


图 20 固化盐漠土抗侵蚀试验破坏形态（白框为大面积侵蚀裂纹；红框为局部坍塌，黄线为表面细裂纹）

Fig. 20 Damage pattern of solidified salt-desert soils in erosion resistance tests (white boxes are large erosion cracks; red boxes are localized collapses and yellow lines are fine surface cracks)

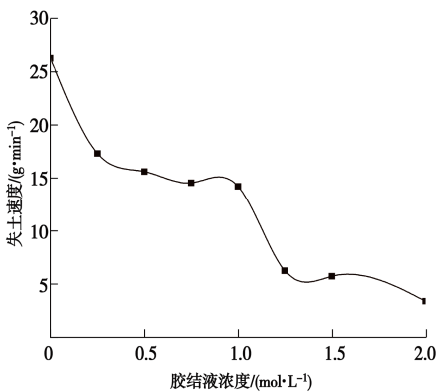


图 21 固化盐漠土失土速度变化特征

Fig. 21 Effect of cementing solution concentration on sediment loss

综上分析，与 MICP 研究通常是采用巴氏芽孢菌等相比<sup>[21-22]</sup>。本文在盐漠土环境中筛选出土著极优尿解型微生物 *Bacillus velezensis* 微生物（Z7）能够在高盐浓度（5%）下保持活性，酶活最高值达到 2.075 U/mL。通过 MICP 显著增强盐漠土表层力学性能，显示出土著微生物在盐漠土固化中的高效性和适应性潜力。

前述研究显示，经过土著微生物 MICP 固化盐漠土的无侧限抗压强度提高 26.8 倍，剪切强度最大提高了 6.1 倍，固化后盐漠土表层硬度强度的显著提升（9 倍左右）和失土速度的大幅降低（从 26.31 g/min 降至 3.5 g/min），表明土著尿解型微生物在固化盐漠土上的应用能够有效抑制水蚀风蚀。使用土著微生物更适应当地的环境条件，相比于引入外来微生物，可以减少潜在的生态风险，确保生态安全。本次研究成果展示

了高原寒旱盐漠环境土著微生物固化盐漠土、固沙抑尘的巨大研究潜力。

## 4 结 论

本文筛选土著尿解型微生物对高原盐漠土进行 MICP 固化抗侵蚀研究,开展了寒旱区盐漠土的微生物固沙抑尘方面基础性试验研究,得到 3 点结论。

(1)研究区高原盐漠沙化土中存在土著极优脲解型微生物贝莱斯芽孢杆菌(*Bacillus velezensis*) (文中为 Z7),属于益生菌。微生物增殖及酶活性试验结果表明,Z7 的种子培养基的最佳时间为 18 h,产脲酶培养基的最佳时间为 64 h,初始酶活达到为 2.075 U/mL。Z7 不同于实验室人工培养的通用微生物,能够在盐浓度为 5%、温度为 0℃环境条件下,依然可诱导矿化产生碳酸钙矿物沉淀。

(2)利用土著微生物(Z7)可以对盐漠土表层进行 MICP 固化固定,固化后的盐漠土中碳酸钙含量可提高 7.07%,干密度提高 6.96%。无侧限抗压强度较固化前提高了 26.8 倍,抗剪强度提高了 6.1 倍。Z7 诱导后能在盐漠土表面形成固化硬结层(0~20 mm),使其抗侵蚀能力提高了 6.5 倍左右。Z7 诱导初期产生的碳酸钙沉淀就以稳定的方解石为主,这不同于实验室人工培养的巴氏脲解型微生物诱导初期产生的碳酸钙沉淀以不稳定的球霏石和文石为主。

(3)Z7 固化增强盐漠土抗侵蚀效果与固化过程中的胶结浓度密切相关。相同采用 Z7 微生物浓度条件下,高难度梯度范围的胶结液固化盐漠土,增强盐漠土抗侵蚀能力优于低浓度胶结液。

此外,考虑低温冰冻结作用对盐漠土的抗侵蚀能力测定的干扰,笔者没有进行低温环境下的相关研究。总之,利用高原寒旱区盐漠土土著尿解型微生物进行固沙抑尘是一项多学科交叉的研究领域,进一步研究土著微生物对于土中盐分转化和及其固定的长效性,开发基于土著尿解型微生物的新型固沙抑尘剂及其最佳安全使用条件和应用技术。未来的研究应当注重从实验室到实地应用的转化,以实现西北高原寒旱区盐漠及荒漠土环境的生态修复。

**利益冲突声明/Conflict of Interests:** 所有作者声明不存在利益冲突。All authors disclose no relevant conflict of interest.

**作者贡献/Authors' Contributions:** 张文、白振宇、张玉蓉参与研究内容设计,张文、袁媛提供试验指导,白振宇、张玉蓉完成试验和分析,白振宇、王如泽、LASHARI Zuhair ul Hassan 参与论文写作和修改。所有作者均阅读并同意最终稿件的提交。This study was designed by ZHANG Wen, BAI Zhenyu and

ZHANG Yurong. The experiments were supervised by ZHANG Wen and YUAN Yuan. The experiments and analyses were conducted by BAI Zhenyu and ZHANG Yurong. The manuscript was drafted and revised by BAI Zhenyu, WANG Ruze and LASHARI Zuhair ul Hassan. All the authors have read the last version of manuscript and consented for submission.

## 参考文献:

- [1] 安 利. 中国的沙漠与沙地(下)[J]. 百科知识, 2021(19): 42-44. (AN Li. Desert and sandy land in China (part two)[J]. Encyclopedic Knowledge, 2021(19): 42-44. (in Chinese))
- [2] 马 明, 李小婷, 唐翠平. 荒漠化的现状、成因及防止对策[J]. 现代园艺, 2014(8): 154-155. (MA Ming, LI Xiaoting, TANG Cuiping. Present situation, causes and preventive countermeasures of desertification[J]. Xiandai Horticulture, 2014(8): 154-155. (in Chinese))
- [3] 李品芳, 杨永利, 兰 天, 等. 天津滨海盐渍土客土改良后的土壤理化性质与持水特性[J]. 农业工程学报, 2017, 33(7): 149-156. (LI Pinfang, YANG Yongli, LAN Tian, et al. Physicochemical properties and water holding characteristics of Tianjin coastal saline soil improved by foreign soil[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(7): 149-156. (in Chinese))
- [4] DEJONG J T, SOGA K, KAVAZANJIAN E, et al. Biogeochemical processes and geotechnical applications: progress, opportunities and challenges[J]. Géotechnique, 2013, 63(4): 287-301.
- [5] DENG W N, WANG Y. Investigating the factors affecting the properties of coral sand treated with microbially induced calcite precipitation[J]. Advances in Civil Engineering, 2018, 2018(1): 9590653.
- [6] GUI R, PAN Y X, DING D X, et al. Experimental study on the fine-grained uranium tailings reinforced by MICP[J]. Advances in Civil Engineering, 2018, 2018(1): 2928985.
- [7] 许万强, 林文彬, 罗承浩, 等. MICP 技术研究进展及在海洋岩土工程的应用展望[J]. 福建工程学院学报, 2022, 20(6): 511-519. (XU Wanqiang, LIN Wenbin, LUO Chenghao, et al. Research progress on microbially induced carbonate precipitation technology and prospects of its application in marine geotechnical engineering[J]. Journal of Fujian University of Technology, 2022, 20(6): 511-519. (in Chinese))
- [8] 袁 媛, 赵 媛, 张秉来, 等. 柴达木盆地盐漠环境 MICP 土著微生物筛选[J]. 环境科学与技术, 2022, 45(1): 67-73. (YUAN Yuan, ZHAO Yuan, ZHANG Binglai, et al.



- Screening of MICP indigenous microorganisms in salt desert environment in Qaidam basin[J]. *Environmental Science & Technology*, 2022, **45**(1): 67-73. (in Chinese))
- [9] KONSTANTINOUC, BISCONTIN G, JIANG N J, et al. Application of microbially induced carbonate precipitation to form bio-cemented artificial sandstone[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2021, **13**(3): 579-592.
- [10] LIU X J, FAN J Y, YU J, et al. Solidification of loess using microbial induced carbonate precipitation[J]. *Journal of Mountain Science*, 2021, **18**(1): 265-274.
- [11] JIANG N J. Discussion of “About calcium carbonate precipitation on sand biocementation” by Rafaela Cardoso, Rita Pedreira, Sofia O.D. Duarte, and Gabriel A. Monteiro[J]. *Engineering Geology*, 2021, **282**: 105726.
- [12] 韩进军. 气候变化背景下柴达木盆地荒漠化时空演变及驱动力研究[D]. 西宁: 中国科学院大学(中国科学院青海盐湖研究所), 2023. (HAN Jinjun. Temporal and Spatial Evolution and Driving Forces of Desertification in Qaidam Basin under the Background of Climate Change[D]. Xining: Qinghai Institute of Salt Lakes, Chinese Academy of Sciences, 2023. (in Chinese))
- [13] 朱高峰. 柴达木盆地矢量边界数据集(2021 年)[R]. 兰州: 国家冰川冻土沙漠科学数据中心, 2022. (ZHU Gaofeng. Qaidam Basin Vector Boundary Dataset (2021)[R]. Lanzhou: The dataset is provided by National Cryosphere Desert Data Center. 2022. (in Chinese))
- [14] 胡坪仲, 张 文, 赵 媛, 等. 青海强盐渍粉砂土 MICP 的有效性探索[J]. *土木工程学报*, 2022, **55**(3): 65-73. (HU Pingshen, ZHANG Wen, ZHAO Yuan, et al. Study on the effectiveness of MICP for highly saline silty soil in Qinghai[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2022, **55**(3): 65-73. (in Chinese))
- [15] 张建伟, 赵聪聪, 尹 悦, 等. 紫外诱变产脲酶菌株加固粉土的试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2023, **45**(12): 2500-2509. (ZAHNG Jianwei, ZHAO Congcong, YIN Yue, et al. Experimental study on solidification of silt through urease-producing strains induced by ultraviolet mutagenesis [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2023, **45**(12): 2500-2509. (in Chinese))
- [16] 布坎南 R E, 吉本斯 N E. 伯杰氏细菌鉴定手册[M]. 8 版. 北京: 科学出版社, 1984. (BUCHANAN R E, GIBBONS N E. *Bergey's Manual of Determinative Bacteriology*[M]. 8th ed. Beijing: Science Press, 1984. (in Chinese))
- [17] SHAO J H, LIU Y, XIE J Y, et al. Annulment of bacterial antagonism improves plant beneficial activity of a *Bacillus velezensis* consortium[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2022, **88**(8): e0024022.
- [18] RABBEE M F, HWANG B S, BAEK K H. *Bacillus velezensis*: a beneficial biocontrol agent or facultative phytopathogen for sustainable agriculture[J]. *Agronomy*, 2023, **13**(3): 840.
- [19] 侯福星, 赵 媛, 胡坪仲, 等. 寒旱区新型耐盐脲酶微生物筛选及鉴定[J]. *干旱区资源与环境*, 2021, **35**(11): 178-183. (HOU Fuxing, ZHAO Yuan, HU Pingshen, et al. Screening and identification of new salt-tolerant urease microorganisms in cold and arid regions[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2021, **35**(11): 178-183. (in Chinese))
- [20] 单 毅, 平阳泽, 袁 杰, 等. 基于颗粒尺寸与级配的微生物固化钙质砂最大动剪切模量试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2024, **43**(10): 2455-2465. (SHAN Yi, PING Yangze, YUAN Jie, et al. Experimental study on maximum dynamic shear modulus of MICP-treated calcareous sand based on particle size and gradation[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2024, **43**(10): 2455-2465. (in Chinese))
- [21] 王殿龙, 唐朝生, 泮晓华, 等. 纤维加筋 MICP 固化钙质砂的抗拉强度特性研究[J]. *高校地质学报*, 2021, **27**(6): 670-678. (WANG Dianlong, TANG Chaosheng, PAN Xiaohua, et al. Tensile strength of fiber-reinforced micp-treated calcareous sand[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2021, **27**(6): 670-678. (in Chinese))
- [22] 吴建彬, 谢永雄, 李亚杰. MICP 改性水泥土在地基加固中的应用研究[J]. *广东土木与建筑*, 2024, **31**(1): 5-8. (WU Jianbin, XIE Yongxiong, LI Yajie. Application of MICP modified soil-cement in foundation reinforcement[J]. *Guangdong Architecture Civil Engineering*, 2024, **31**(1): 5-8. (in Chinese))