

微生物诱导碳酸钙沉积(MICP)固化土体研究进展

张一佳, 严德强*, 曲 晶, 王鑫雨, 雷雨嫣, 杜彬宇, 薛凯鑫, 李 刚

西京学院, 陕西省混凝土结构安全与耐久性重点实验室, 陕西 西安

收稿日期: 2024年4月16日; 录用日期: 2024年5月6日; 发布日期: 2024年5月14日

摘 要

土地荒漠化严重危害人类的生存和可持续发展。微生物诱导碳酸钙沉积技术(MICP)是近年来兴起的经济、环保和耐久的防风治沙方法。为了研究MICP固化土体的工程特性, 本文对MICP进行了系统的归纳总结, 从MICP的国内外发展与现状、MICP固化土体的力学特性、MICP固化土体的作用机理分析了MICP对固化土体的效果。为MICP的发展提供了参考。

关键词

土地荒漠化, MICP, 力学特性, 作用机理, 固化土体

Research Progress in Soil Solidified by Microbially Induced Carbonate Precipitation (MICP)

Yijia Zhang, Deqiang Yan*, Jing Qu, Xinyu Wang, Yuyan Lei, Binyu Du, Kaixin Xue, Gang Li

Shaanxi Key Laboratory of Safety and Durability of Concrete Structures, Xijing University, Xi'an Shaanxi

Received: Apr. 16th, 2024; accepted: May 6th, 2024; published: May 14th, 2024

Abstract

Land desertification seriously endangers human existence and sustainable development. Microbially induced calcium carbonate deposition (MICP) is an economical, environmentally friendly and durable method for wind and sand control. In order to study the engineering characteristics of MICP

*通讯作者。

文章引用: 张一佳, 严德强, 曲晶, 王鑫雨, 雷雨嫣, 杜彬宇, 薛凯鑫, 李刚. 微生物诱导碳酸钙沉积(MICP)固化土体研究进展[J]. 土木工程, 2024, 13(5): 603-612. DOI: 10.12677/hjce.2024.135065

solidified soil, this paper systematically summarized MICP, and analyzed the effect of MICP on solidified soil from the development and current situation of MICP at home and abroad, the mechanical properties of MICP solidified soil and the action mechanism of MICP solidified soil. It provides a reference for the development of MICP.

Keywords

Land Desertification, MICP, Mechanical Properties, Mechanism of Action, Solidified Soil

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 研究背景

我国的土地沙漠化约占了总国土面积的 27.46%，有将近 4 亿人面临着沙漠化的威胁，如果沙漠土得不到有效治理，散沙将在风力的作用下扬起，并逐渐形成流动沙漠[1]，而风积沙流动又是土地沙漠化的主要成因[2]。风积沙具有黏聚力低[3]、颗粒均匀[4]、含水率低[5]、湿陷性大[6]、松铺系数小[7]等特点。传统的沙漠防治方法主要包括植物固沙、工程治沙及化学固沙等。这些传统的防风固沙方式存在难度大[8]、施工繁琐、维护成本高[9]、污染环境[10]及耐久性低等缺点。因此，寻找一种新型治理沙漠风积沙的措施尤为重要。

微生物诱导碳酸钙沉积技术(MICP)是近年来兴起的经济、环保和耐久的防风治沙方法[11] [12]。这项技术的核心原理是利用产生脲酶的微生物，水解尿素得到碳酸根离子，然后碳酸根离子和钙离子发生反应产生 CaCO_3 沉淀。这个沉淀物能够快速将土颗粒胶结在一起，实现土壤的加固和降低渗透性的目标[13] [14]。与传统的风积沙治理方法相比，MICP 技术有许多优点，包括操作简单[15]、扰动小[16]、环保经济[17]以及施工时间较短[18] [19]等。MICP 技术可以有效地将风积沙颗粒胶结在一起[20]，从而改善其力学性能。这项技术在工程领域和荒漠化治理中具有巨大的潜力，目前主要应用于裂缝修补、边坡稳定、渗漏阻塞和环境修复[21] [22] [23] [24] [25]等方面。

目前国内外针对 MICP 最新研究进展的全面总结还较为不足，针对于此，本文在大量检索国内外文献的基础上，对 MICP 的国内外发展与现状、MICP 固化土体的力学特性研究、MICP 固化土体的作用机理研究进行系统的梳理、总结和分析。

2. 国内外发展与现状

2.1. 国内研究现状

自 MICP 技术问世以来，便迅速发展为我国众多学者的研究对象[26]。赵茜[27]利用 MICP 方法加固土壤，研究表明，增加尿素浓度可以提高微生物的活力，并加速 MICP 处理过程。此外，增加菌液浓度尿素可快速水解，从而生成碳酸钙[28]。研究人员[29] [30] [31]还发，现适宜的 pH 值和温度有助于优化 MICP 技术的操作条件，以实现更有效的土壤加固和改良。常道琴等[32]在干旱地区应用 MICP 修复重金属污染土，达到显著的修复效果。张永杰等[33]选用巴氏芽孢杆菌菌液和不同浓度的氯化钙与尿素的混合胶结液开展了 MICP 试验，经不同灌注次数表明，达到了试样最好的固化效果。赵志峰等[34]对不同掺比的粉土进行 MICP 加固，研究掺砂比例、密实水平等对 MICP 固化粉土效果的影响。结果表明，经 MICP

固化后的粉土实现了整体加固，并且水稳定性也有一定的提高。王子文等[35]利用 MICP 实现粉煤灰的有效利用和粉尘控制污染，结果表明，微生物固化粉煤灰可以减少内部水分损失，保水效果明显。魏然等[36]基于 MICP 抑制了膨胀土遇水膨胀的能力，降低了膨胀土遇水膨胀变形程度。

目前对于 MICP 加固过程中影响因素的研究已相对成熟，其中胶结液浓度、菌液浓度、pH、胶结次数等因素对 MICP 固化效果影响显著。而 MICP 加固土体的应用对于室外现场试验以及耐久性的研究仍处于热门阶段。

2.2. 国外研究现状

2004 年, Whiffin [37]首次提出了 MICP 这一概念,并将其用于土壤固化,随后便迅速发展起来。Mujah 等[38]总结了 MICP 在土壤改良中的应用,讨论了 MICP 的处理工艺,对 MICP 在土壤改良中的应用前景、潜在优势和局限性进行了介绍和讨论。Qabany 等[39]研究了 MICP 处理过程中化学浓度对碳酸钙沉淀模式的影响及其对 MICP 胶结土工程性能的影响,研究发现,经过 MICP 处理后,测试样品的强度都有所增加。Hataf 等[40]采用落头渗透性试验,测定生物处理前后土样的渗透性,探讨了利用 MICP 降低设拉子垃圾填埋场基土的渗透性或导电性。试验结果表明, MICP 可以作为一种新的环保方法,用于降低垃圾填埋场底部和墙壁的土壤渗透性,形成废物与地下水和基质之间的屏障。Iamchaturapatr 等[41]采用微生物诱导方解石沉淀法监测生物胶结对沙土性质的改善,证实了 CaCO_3 将砂土颗粒结合在一起的存在,而且证实了基于 MICP 的脲酶加速法提高了砂土样品的物理强度。Li 等[42]利用 MICP 对沙漠风积沙进行了固化试验,研究结果表明,随着固化液浓度的增加,所生成的 CaCO_3 含量增加,风积沙密度增加,渗透率降低,无侧限抗压强度增加。Tian 等[43]研究了反应物注入速率对 MICP 固化风积沙的影响,试验结果表明,胶结液注入速率对其均匀性影响显著。

综上, MICP 应用广泛且收到良好的效果。不仅成熟于加固土体方面,目前还向着多孔介质修复、处理污染元素、减少海滩侵蚀等方面发展。表 1 列举了众多学者关于 MICP 技术加固土体的不同研究方向。

Table 1. Different research directions on MICP by domestic and foreign scholars

表 1. 国内外学者对 MICP 不同的研究方向

研究者	研究方法	研究方向	研究结论	参考文献
胡其志等	MICP 联合玄武岩纤维加筋	改良黄土力学特性	改善黄土的力学性能,内部碳酸钙生成量为黄土质量的 1%。	[44]
彭丽云等	MICP	粉土加固	粉土强度有了大幅提升。	[45]
Li 等	MICP 联合玄武岩纤维加筋	加固风积沙	固化风积沙的黏聚力增大、内摩擦角变小,纤维的加入降低了风积沙的脆性指数。	[46]
Liu 等	MICP 联合玄武岩纤维加筋	加固风积沙	固化风积沙的无侧限抗压强度增大,纤维减小了风积沙的脆性破坏。	[47]
Tiwari 等	MICP	控制膨胀土胀缩特性、提高抗剪强度	经过生物刺激的 MICP 处理后,方解石含量增加了 205%,并进一步提高了无侧限抗压强度和劈裂抗拉强度。	[48]
Behzadipour 等	MICP	提高金矿尾矿抗剪强度	处理后尾矿试样的黏聚力截距和摩擦角分别提高了约 19 kPa 和 5°。	[49]
Prongmanee 等	MICP	稳定黏性土	处理后的黏性土具有更高的抗压强度。	[50]

3. MICP 固化土体的力学特性研究

MICP 技术固化砂土力学特性是反映固化效果的重要指标。研究各种影响因素对砂土力学特性(渗透特性与强度特性)的影响,是为了更好地针对固化后的风积沙试样展开研究以及建立起渗透特性和强度特性与 CaCO_3 生成量间的定量关系。Li 等[51]研究发现了生物处理的土工材料的强度随矿化时间的增加而增加,这有助于加固土壤,提高土壤的力学性质。Zeitouny 等[52]利用微生物诱导方解石沉淀对比了渗流法和组合法对波特兰胶结砂和 MICP 胶结砂强度的影响,联合法得到的强度比渗流法高 3.7 倍左右。Cheshomi 等[53]利用 MICP 技术进行土壤改良,研究了粒度、渗透方法、渗透细菌悬浮液(BS)体积和渗透固定液(FS)和水泥溶液(CS)对石英砂剪切强度的影响。试验结果表明, MICP 可以提高样品的抗剪强度,在四种不同渗透方法的沙质土壤中, BS 和 CS 的连续渗透对剪切强度的影响最大。具有较大有效尺寸和较高渗透率的砂是未处理的砂抗剪强度的 6.2 倍。Zhang [54]研究了粉煤灰与风积沙混合后利用 MICP 技术的固沙效果。研究结果表明, 30%粉煤灰经 3 次微生物诱导矿化处置后, 渗透系数下降 79.4%, 表面强度增加 19.9%, 风蚀率下降 21.2%。Gao 等[55]提出了基于 MICP 的土壤改良方法减少孔隙体积来降低土壤的渗透性。结果表明, 通过四种处理方案处理的样品的生物处理样品的渗流速率降低了 70 倍。通过表面喷涂和整体稳定处理的样品具有最厚的硬壳和最高的方解石含量, 这符合其在防渗方面的最佳性能。

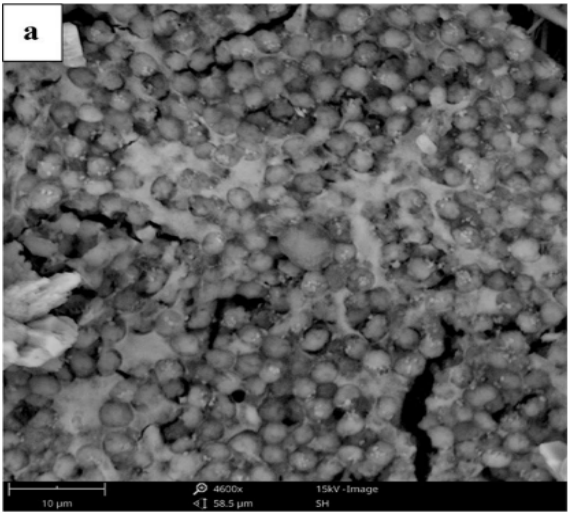
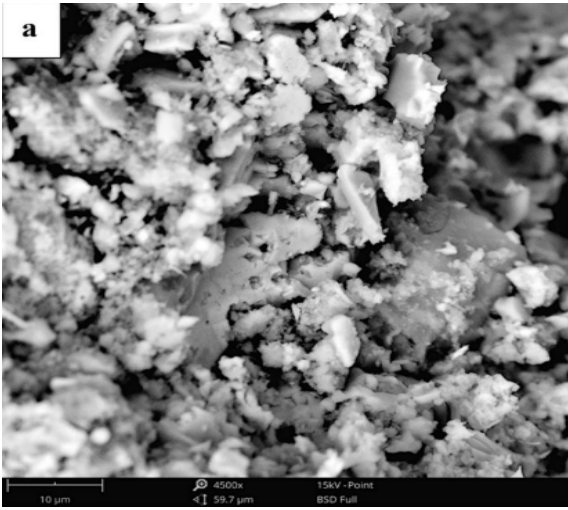
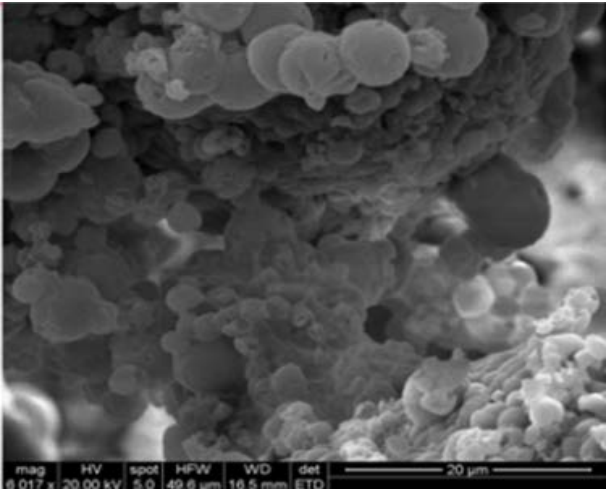
综合以上学者研究, MICP 在土壤固化方面表现出良好的效果。经 MICP 处理后能够降低砂土的渗透特性、提高力学特性, 生成的 CaCO_3 沉淀会在土颗粒孔隙中填充, 以达到提升力学性能的效果。但是对于不同种类的土处理效果有一定差异, MICP 究竟更适合于哪种土体的固化还有待进一步研究。

4. MICP 固化土体的作用机理研究

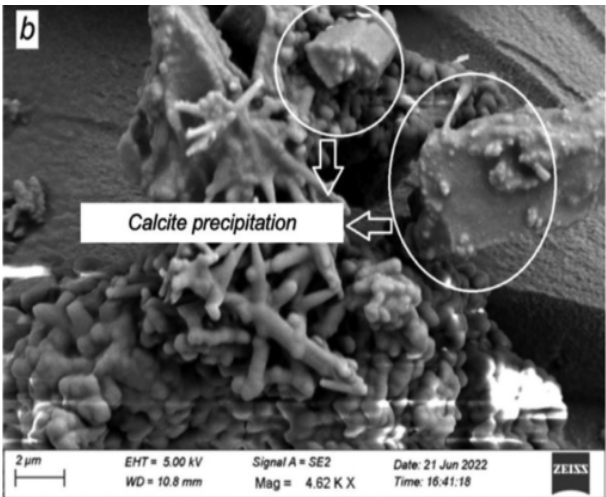
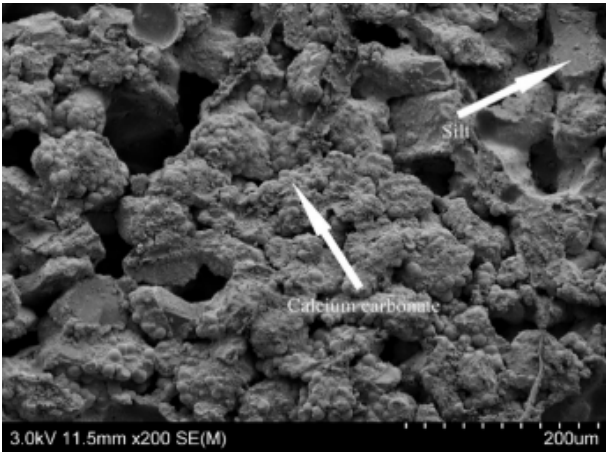
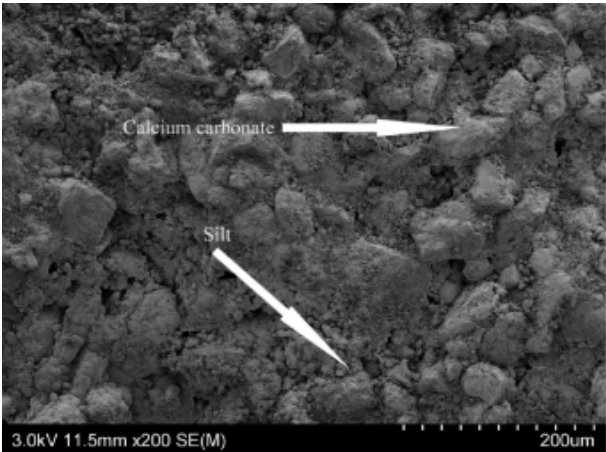
在 MICP 过程中, 产生的 CaCO_3 数量的增加通常会导致固化土体的强度提高。这是因为 CaCO_3 沉淀物充当了土壤颗粒之间的粘结剂, 将它们有效地粘合在一起, 从而增强了土壤的整体强度。通过 XRD、SEM、FTIR 等试验观察固化风积沙的微观结构, 揭示了 MICP 固化风积沙的作用机理。Gowthaman [56]经过表面渗滤处理的土壤的微观结构, 发现在颗粒接触处形成了有效的晶体, 它通过与沙粒结合来增加颗粒接触的数量, 并参与处理过的基质的力链。Meng 等[57]研究了微生物诱导的碳酸盐沉淀(MICP)在减少沙漠土壤风蚀中的潜力。用 X 射线进行的扫描电子显微镜(SEM)测试证实了 CaCO_3 晶体的桥效应, CaCO_3 沉淀物的生成有效反映了 MICP 技术对砂土的胶结机理。Cheshomi 等[58]研究了使用 MICP 技术处理不同密度的松散石英砂。通过使用 XRD 分析, 与其他两种多晶型物相比, 方解石被确定为最稳定的碳酸钙多晶型物。碳酸钙沉淀的重量测量表明, 在样品和样品中的沉积物产量显著增加。Lai 等[59]运用低 pH MICP 生物胶结方法改良土壤。研究表明, pH 值越低, 延迟时间越长。另一方面, 只要延迟时间足以使处理溶液在土壤中的分布, pH 对碳酸钙的产生量及其在土壤中的分布影响不大。Imran 等[60]研究了 MICP 处理过的砂中添加植物性天然黄麻纤维的影响以及相应的微观结构, 分析了对 MICP 处理过的生物砂的影响。SEM 结果表明, 添加的黄麻纤维与 CaCO_3 耦合良好, 在土壤基质中形成可靠的桥梁, 并提高了生物砂的胶结性能。Zhao 等[61]利用活性炭纤维毡(ACFF)废料粉末与 MICP 一起提高土壤强度, 通过 SEM 试验可以看出, 某些 ACFF 涂有碳酸钙, 从而促进了更多的碳酸钙在孔中沉淀。证实了添加 ACFF 的细菌保留程度增加, 有利于碳酸钙晶体的产量。由 ACFF 提供的具有纤维增强的更多填充的碳酸钙晶体增强了砂粒之间的键, 结果表明, ACFF 增强了 MICP 处理的砂, 具有良好的胶结效果。

从以上学者的研究可以发现, MICP 技术的有效性和固化土体的强度增强与 CaCO_3 的生成量、分布以及晶体作用方式都有关。MICP 矿化生成的 CaCO_3 晶体主要分布于颗粒表面、颗粒孔隙及颗粒之间, 从而起到覆盖、填充及胶结的作用。因此, 这些固化砂土的影响因素需要在 MICP 处理过程中进行控制和优化, 以实现最佳的土壤改良效果。表 2 总结了部分碳酸钙沉淀的晶体形态。

Table 2. Some MICP microscopic observation and crystal formation
表 2. 部分 MICP 微观观测及生成晶体形态

研究者	生成晶型	示例图	晶体形态	参考文献
Srinivas 等	球霏石		球形/椭圆形	[62]
	方解石		菱面形	
Meng 等	球霏石		无序且呈不规则球形	[63]

续表

Soda 等	方解石		杆状	[64]
Zhao 等	球霏石		球形	[65]
	文石		针簇状	

5. 结语与展望

本文对 MICP 进行了系统的归纳总结，从 MICP 的国内外发展与现状、MICP 固化土体的力学特性、MICP 固化土体的作用机理等方面，从宏观与微观角度分析了 MICP 对固化土体的效果。可以得到以下

结论:

1) 相比其他传统土体的固化效果, MICP 具有更好的实际应用能力。MICP 在中性弱碱性环境条件下, 脲酶更稳定。升高温度会促进微生物的反应活性, 不宜过高, 胶结液浓度在 1.0~1.6 M 时的土壤固化效果较好。

2) MICP 技术固化砂土力学特性是反映固化效果的重要指标。MICP 技术可以降低土的渗透性和增加它的抗剪强度, 生成的 CaCO_3 沉淀会连接松散的砂粒, 有助于提高土壤的力学性能。

3) 经 XRD、SEM、FTIR 技术进行微观分析, MICP 技术生成的 CaCO_3 晶体形态不一, 其中方解石为最稳定的晶型。碳酸钙晶体产量增加, 能提升 MICP 的胶结效果。

4) 目前对于 MICP 加固过程中影响因素的研究已相对成熟, 而 MICP 加固土体的应用对于室外现场试验以及耐久性的研究是目前的研究热门。MICP 不仅成熟于加固土体方面, 目前还向着多孔介质修复、处理污染元素、减少海滩侵蚀等方面发展。

基金项目

本研究由省级大学生创新创业训练计划资助项目(S202312715038)资助。

参考文献

- [1] 王万明. 土地沙漠化原因及林业防沙治沙措施[J]. 农业灾害研究, 2023, 13(4): 144-146.
- [2] 韩风雷, 张学富, 喻文兵, 等. 风积沙环境下高等级公路冻土块石路基降温性能分析[J]. 冰川冻土, 2018, 40(3): 528-538.
- [3] 唐忠亮, 严少发. 风积沙路基边坡防护及防沙害关键施工技术[J]. 施工技术, 2020, 49(S1): 1375-1377.
- [4] 延西利, 马润前, 张玉福, 等. 榆林地区风积沙的工程分类[J]. 公路, 2021, 66(3): 54-60.
- [5] 聂如松, 谭永长, 郭一鹏, 等. 风积沙-土工格栅界面摩擦特性拉拔试验研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2022, 19(11): 3235-3245.
- [6] 金旻昊, 崔强, 周楠, 等. 水泥固化作用对风积沙试样抗剪强度影响机制的试验研究[J]. 工业建筑, 2019, 49(7): 108-112+168.
- [7] 姚佳禹. 高速公路风积沙路基填筑质量控制技术研究[J]. 建筑技术开发, 2017, 44(20): 111-112.
- [8] 程锋梅. 三类株型草本植物固沙作用的风洞实验对比研究[D]: [硕士学位论文]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2022.
- [9] 安艳玲. 利用废弃含盐尾矿砂制备机械沙障的技术研究[D]: [硕士学位论文]. 张家口: 河北建筑工程学院, 2022.
- [10] 乔敬伟. 穿沙公路沙柳防护带平茬恢复期辅助沙障设置模式研究[D]: [硕士学位论文]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2019.
- [11] Deng, W. and Wang, Y. (2018) Investigating the Factors Affecting the Properties of Coral Sand Treated with Microbially Induced Calcite Precipitation. *Advances in Civil Engineering*, **2018**, Article ID: 9590653. <https://doi.org/10.1155/2018/9590653>
- [12] Gui, R., Pan, Y.X., Ding, D.X., et al. (2018) Experimental Study on the Fine-Grained Uranium Tailings Reinforced by MICP. *Advances in Civil Engineering*, **2018**, Article ID: 2928985. <https://doi.org/10.1155/2018/2928985>
- [13] Stocks-Fischer, S., Galinat, J.K. and Bang, S.S. (1999) Microbiological Precipitation of CaCO_3 . *Soil Biology and Biochemistry*, **31**, 1563-1571. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(99\)00082-6](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(99)00082-6)
- [14] Muynck, W.D., Belie, N.D. and Verstraete, W. (2010) Microbial Carbonate Precipitation in Construction Materials: A Review. *Ecological Engineering*, **36**, 118-136. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2009.02.006>
- [15] 王鑫, 靳正忠, 施建飞, 等. 植物纤维毯覆盖对干旱区尾矿砂水热分布的影响[J]. 干旱区地理, 2023, 46(9): 1467-1480.
- [16] 肖志阳. 基于改进的微生物诱导碳酸钙沉积技术加固土体试验研究[D]: [硕士学位论文]. 郑州: 华北水利水电大学, 2021.
- [17] 刘家明. 盐溶液环境下微生物固化砂的物理力学特性及微观结构试验研究[D]: [硕士学位论文]. 广州: 广州大学, 2021.

- [18] Sel, I., Zhan, H.B., Cibik, R., *et al.* (2015) Bacteria-Induced Cementation Process in Loose Sand Medium. *Marine Geo Resources & Geotechnology*, **33**, 403-407. <https://doi.org/10.1080/1064119X.2014.909912>
- [19] Brossi, D.L. and Julia, M. (2016) Soil-Derived Microbial Consortia Enriched with Different Plant Biomass Reveal Distinct Players Acting in Lignocellulose Degradation. *Microbial Ecology*, **71**, 616-627. <https://doi.org/10.1007/s00248-015-0683-7>
- [20] 梁隽灵, 赵寄橦, 袁杰, 等. 碳纤维微生物固化砂力学性能及颗粒形状分析[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(30): 13434-13440.
- [21] Li, M., Li, L., Ogbonnaya, U., *et al.* (2016) Influence of Fiber Addition on Mechanical Properties of MICP-Treated Sand. *Journal of Materials in Civil Engineering*, **28**, Article ID: 04015166. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001442](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001442)
- [22] Choi, S.G., Wang, K., Wen, Z., *et al.* (2017) Mortar Crack Repair Using Microbial Induced Calcite Precipitation Method. *Cement and Concrete Composites*, **83**, 209-221. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.07.013>
- [23] Cheng, L. and Shahin, M. (2016) Urease Active Bio-Slurry: A Novel Soil Improvement Approach Based on Microbially Induced Calcite Precipitation. *Canadian Geotechnical Journal*, **53**, 1376-1385. <https://doi.org/10.1139/cgj-2015-0635>
- [24] Li, M., Cheng, X.H. and Guo, H.X. (2013) Heavy Metal Removal by Biomineralization of Urease Producing Bacteria Isolated from Soil. *International Biodeterioration & Biodegradation*, **76**, 81-85. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2012.06.016>
- [25] Liu, B., Zhu, C., Tang, C.S., *et al.* (2020) Bio-Remediation of Desiccation Cracking in Clayey Soils through Microbially Induced Calcite Precipitation (MICP). *Engineering Geology*, **264**, Article ID: 105389. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2019.105389>
- [26] 何延龙, 赵靛, 黄海, 等. MICP 技术及其在油气田开发过程中的应用进展[J]. 油气地质与采收率, 2023, 30(4): 106-115.
- [27] 赵茜. 微生物诱导碳酸钙沉淀(MICP)固化土壤实验研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国地质大学(北京), 2014.
- [28] Tang, C.S., Yin, L., Jiang, N., *et al.* (2020) Factors Affecting the Performance of Microbial-Induced Carbonate Precipitation (MICP) Treated Soil: A Review. *Environmental Earth Sciences*, **79**, Article No. 94. <https://doi.org/10.1007/s12665-020-8840-9>
- [29] Wen, K., Li, Y., Liu, S., *et al.* (2019) Evaluation of MICP Treatment through EC and pH Tests in Urea Hydrolysis Process. *Environmental Geotechnics*, **8**, 274-281. <https://doi.org/10.1680/jenge.17.00108>
- [30] Cui, M.J., Lai, H.J., Hoang, T., *et al.* (2021) One-Phase-Low-pH Enzyme Induced Carbonate Precipitation (EICP) Method for Soil Improvement. *Acta Geotechnica*, **16**, 481-489. <https://doi.org/10.1007/s11440-020-01043-2>
- [31] Liu, S., Wen, K., Armwood, C., *et al.* (2019) Enhancement of MICP-Treated Sandy Soils against Environmental Deterioration. *Journal of Materials in Civil Engineering*, **31**, Article ID: 04019294. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002959](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002959)
- [32] 常道琴, 宋乃平, 岳健敏, 等. 干旱区重金属污染尾矿土 MICP 注浆修复效果[J]. 生态学杂志, 2023, 42(12): 2864-2873.
- [33] 张永杰, 欧阳健, 黄万东, 等. 胶结液浓度对微生物固化花岗岩残积土强度特性的影响规律[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2024, 51(3): 121-129.
- [34] 赵志峰, 刘德民. 采用 MICP 加固不同掺砂比例粉土的试验研究[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2023, 53(2): 270-277.
- [35] 王子文, 魏然, 吴帅峰, 等. MICP 固化粉煤灰的强度效应与机制分析[J]. 岩土工程学报, 2023, 45(S1): 88-91.
- [36] 魏然, 张丽雅, 肖智睿, 等. 基于 MICP 技术的膨胀土变形控制机理研究[J]. 岩土工程学报, 2023, 45(S1): 92-96.
- [37] Whiffin, V.S. (2004) Microbial CaCO_3 Precipitation for the Production of Biocement. Ph.D. Thesis, Murdoch University, Perth.
- [38] Mujah, D., Shahin, M.A. and Cheng, L. (2017) State-of-the-Art Review of Biocementation by Microbially Induced Calcite Precipitation (MICP) for Soil Stabilization. *Geomicrobiology Journal*, **34**, 524-537. <https://doi.org/10.1080/01490451.2016.1225866>
- [39] Qabany, A.A. and Soga, K. (2014) Effect of Chemical Treatment Used in MICP on Engineering Properties of Cemented Soils. In: Al Qabany, A., Soga, K. and Laloui, L., Eds., *Bio- and Chemo-Mechanical Processes in Geotechnical Engineering: Géotechnique Symposium in Print 2013*, ICE Publishing, Miami Lakes, 107-115. <https://doi.org/10.1680/bcmpge.60531.010>
- [40] Hataf, N. and Baharifard, A. (2020) Reducing Soil Permeability Using Microbial Induced Carbonate Precipitation (MICP) Method: A Case Study of Shiraz Landfill Soil. *Geomicrobiology Journal*, **37**, 147-158.

- <https://doi.org/10.1080/01490451.2019.1678703>
- [41] Iamchaturapatr, J., Piriyakul, K., Ketklin, T., *et al.* (2021) Sandy Soil Improvement Using MICP-Based Urease Enzymatic Acceleration Method Monitored by Real-Time System. *Advances in Materials Science and Engineering*, **2021**, Article ID: 6905802. <https://doi.org/10.1155/2021/6905802>
 - [42] Li, D., *et al.* (2018) Experimental Investigation of Solidifying Desert Aeolian Sand Using Microbially Induced Calcite Precipitation. *Construction and Building Materials*, **172**, 251-262. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.255>
 - [43] Tian, K., Wang, X., Zhang, S., *et al.* (2020) Effect of Reactant Injection Rate on Solidifying Aeolian Sand via Microbially Induced Calcite Precipitation. *Journal of Materials in Civil Engineering*, **32**, Article ID: 04020291. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0003391](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003391)
 - [44] 胡其志, 霍伟严, 马强, 等. MICP 联合纤维加筋黄土的力学性能及水稳性研究[J]. 人民长江, 2023, 54(8): 227-232+248.
 - [45] 彭丽云, 陈星, 齐吉琳, 等. 微生物加固粉土的强度特性及加固机理研究[J]. 材料导报, 2023, 2(23): 1-12.
 - [46] Li, G., Liu, J., Zhang, J., *et al.* (2023) Shear Strength Behaviors of Aeolian Sand Solidified by Microbially Induced Calcite Precipitation and Basalt Fiber Reinforcement. *Materials*, **16**, Article 5857. <https://doi.org/10.3390/ma16175857>
 - [47] Liu, J., Li, X., Li, G., *et al.* (2023) Experimental Study on the Mechanical Behaviors of Aeolian Sand Treated by Microbially Induced Calcite Precipitation (MICP) and Basalt Fiber Reinforcement (BFR). *Materials*, **16**, Article 1949. <https://doi.org/10.3390/ma16051949>
 - [48] Tiwari, N., Satyam, N. and Sharma, M. (2021) Micro-Mechanical Performance Evaluation of Expansive Soil Biotreated with Indigenous Bacteria Using MICP Method. *Scientific Reports*, **11**, Article No. 10324. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-89687-2>
 - [49] Behzadipour, H. and Sadrekarimi, A. (2023) Effect of Microbial-Induced Calcite Precipitation on Shear Strength of Gold Mine Tailings. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, **82**, Article No. 331. <https://doi.org/10.1007/s10064-023-03357-3>
 - [50] Prongmanee, N., Horpibulsuk, S., Dulyasucharit, R., *et al.* (2023) Novel and Simplified Method of Producing Microbial Calcite Powder for Clayey Soil Stabilization. *Geomechanics for Energy and the Environment*, **35**, Article ID: 100480. <https://doi.org/10.1016/j.gete.2023.100480>
 - [51] Li, C., Bai, S., Zhou, T., *et al.* (2020) Strength-Increase Mechanism and Microstructural Characteristics of a Biotreated Geomaterial. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, **14**, 599-608. <https://doi.org/10.1007/s11709-020-0606-7>
 - [52] Zeitouny, J., Lieske, W., Alimardani Lavasan, A., *et al.* (2023) Impact of New Combined Treatment Method on the Mechanical Properties and Microstructure of MICP-Improved Sand. *Geotechnics*, **3**, 661-685. <https://doi.org/10.3390/geotechnics3030036>
 - [53] Cheshomi, A. and Mansouri, S. (2019) Study the Grain Size and Infiltration Method Effects for Sand Soil Improvement Using the Microbial Method. *Geomicrobiology Journal*, **37**, 355-365. <https://doi.org/10.1080/01490451.2019.1705437>
 - [54] Zhang, B.Z. (2020) Effects of Fly Ash on Sand Fixation with Microbial-Induced Carbonate. *Journal of Highway and Transportation Research and Development (English Edition)*, **14**, 51-56. <https://doi.org/10.1061/JHTRCQ.0000729>
 - [55] Gao, Y.F. and Tang, X.Y. (2018) Microbially Induced Calcite Precipitation for Seepage Control in Sandy Soil. *Geomicrobiology Journal*, **36**, 366-375. <https://doi.org/10.1080/01490451.2018.1556750>
 - [56] Gowthaman, S. (2019) Feasibility Study for Slope Soil Stabilization by Microbial Induced Carbonate Precipitation (MICP) Using Indigenous Bacteria Isolated from Cold Subarctic Region. *SN Applied Sciences*, **1**, 1480-1508. <https://doi.org/10.1007/s42452-019-1508-y>
 - [57] Meng, H., Gao, Y.F., He, J., *et al.* (2021) Microbially Induced Carbonate Precipitation for Wind Erosion Control of Desert Soil: Field-Scale Tests. *Geoderma*, **383**, Article ID: 114723. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114723>
 - [58] Cheshomi, A. and Mansouri, S. (2018) Improving the Shear Strength of Quartz Sand Using the Microbial Method. *Geomicrobiology Journal*, **13**, 2521-2532.
 - [59] Lai, H.J., Cui, M.J. and Chu, J. (2023) Effect of pH on Soil Improvement Using One-Phase-Low-pH MICP or EICP Bio-cementation Method. *Acta Geotechnica*, **18**, 3259-3272. <https://doi.org/10.1007/s11440-022-01759-3>
 - [60] Imran, M. and Gowthaman, S. (2020) The Influence of the Addition of Plant-Based Natural Fibers (Jute) on Bio Cemented Sand Using MICP Method. *Materials*, **182**, 765-775. <https://doi.org/10.3390/ma13184198>
 - [61] Zhao, Y. (2020) Enhancing Strength of MICP-Treated Sand with Scrap of Activated Carbon-Fiber Felt. *Journal of Materials in Civil Engineering*, **32**, 1943-5533. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0003136](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003136)
 - [62] Srinivas, M.K., Alengaram, U.J., Ibrahim, S., *et al.* (2024) Feasibility Study on the Use of Microalgae as an External Crack Healing Agent for Cement Mortar Rehabilitation. *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, **13**, 17-32. <https://doi.org/10.1080/21650373.2023.2249889>

- [63] Meng, H., Shu, S., Gao, Y., *et al.* (2021) Kitchen Waste for *Sporosarcina pasteurii* Cultivation and Its Application in Wind Erosion Control of Desert Soil via Microbially Induced Carbonate Precipitation. *Acta Geotechnica*, **16**, 4045-4059. <https://doi.org/10.1007/s11440-021-01334-2>
- [64] Soda, P.R.K., Mogal, A., Chakravarthy, K., *et al.* (2024) Performance Assessment of Sustainable Biocement Mortar Incorporated with Bacteria-Encapsulated Cement-Coated Alginate Beads. *Construction and Building Materials*, **411**, Article ID: 134198. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134198>
- [65] Zhao, Y., Wang, Q., Yuan, M., *et al.* (2021) The Effect of MICP on Physical and Mechanical Properties of Silt with Different Fine Particle Content and Pore Ratio. *Applied Sciences*, **12**, Article 139. <https://doi.org/10.3390/app12010139>