

基于文献计量学的微生物诱导碳酸钙沉淀研究现状分析与展望

马国辉¹, 周玉国¹, 李小亮¹, 宋毅飞¹, 袁明亮², 王雪², 柳苗³, 李为^{2,4*}, 余龙江^{2,4*}

1 三峡金沙江云川水电开发有限公司, 云南 昆明

2 华中科技大学 生命科学与技术学院 生物技术系, 资源生物学与生物技术研究所, 湖北 武汉

3 华中科技大学 土木与水利工程学院, 湖北 武汉

4 分子生物物理教育部重点实验室, 湖北 武汉

马国辉, 周玉国, 李小亮, 宋毅飞, 袁明亮, 王雪, 柳苗, 李为, 余龙江. 基于文献计量学的微生物诱导碳酸钙沉淀研究现状分析与展望[J]. 微生物学报, 2025, 65(6): 2756-2769.

MA Guohui, ZHOU Yuguo, LI Xiaoliang, SONG Yifei, YUAN Mingliang, WANG Xue, LIU Miao, LI Wei, YU Longjiang. Current status and prospects of research on MICP: a bibliometric analysis[J]. *Acta Microbiologica Sinica*, 2025, 65(6): 2756-2769.

摘要: 【目的】系统梳理微生物诱导碳酸钙沉淀(microbially induced calcium carbonate precipitation, MICP)领域近 25 年的研究动态, 通过文献计量学方法揭示其发展趋势、研究热点及学术影响力分布, 为相关研究人员提供数据参考, 并对未来 MICP 的重点研究方向提出建议。【方法】基于 Web of Science 核心数据库筛选出 1999–2024 年的 1 947 篇文献, 综合运用文献计量学与 CiteSpace 可视化分析工具, 对发文量、作者、国家、机构及关键词等进行量化统计, 结合时间序列与网络图谱解析该领域发展脉络。【结果】MICP 领域年度发文量持续增长, 中国以显著贡献成为主导出版国, 发文量占全球总量的 47.71%; 南洋理工大学、中国科学院、东南大学和重庆大学在发文量及引用频次等方面展现较强的学术影响力; 研究热点集中于土体改良、自愈混凝土及生物修复等方面, 关键词聚类表明环境岩土工程与生物材料应用为交叉前沿。【结论】MICP 研究已形成多学科融合的快速发展态势, 中国在该领域处于全球领先地位。未来需强化生物-矿物相互作用机理的基础研究, 推动 MICP 技术在环境修复与智能材料等新兴场景的应用突破, 同时关注绿色可持续工艺的研发, 以拓展其在碳中和与生态工程中的实践价值。

关键词: 微生物诱导碳酸钙沉淀; 裂缝修复; 生物水泥; 文献计量分析

资助项目: 中国长江电力股份有限公司项目(Z532302055)

This work was supported by the China Yangtze Power Co., Ltd. Project (Z532302055).

*Corresponding authors. E-mail: LI Wei, hulwei_009@163.com; YU Longjiang, yulongjiang@hust.edu.cn

Received: 2024-12-20; Accepted: 2025-01-30; Published online: 2025-05-09

Current status and prospects of research on MICP: a bibliometric analysis

MA Guohui¹, ZHOU Yuguo¹, LI Xiaoliang¹, SONG Yifei¹, YUAN Mingliang², WANG Xue², LIU Miao³, LI Wei^{2,4*}, YU Longjiang^{2,4*}

1 Three Gorges Jinsha River Yunchuan Hydropower Development Co., Ltd., Kunming, Yunnan, China

2 Institute of Resource Biology and Biotechnology, Department of Biotechnology, College of Life Science and Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei, China

3 School of Civil and Hydraulic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei, China

4 Key Laboratory of Molecular Biophysics, Ministry of Education, Wuhan, Hubei, China

Abstract: [Objective] This study systematically reviews the research trends in microbially induced calcium carbonate precipitation (MICP) over the past 25 years. Through bibliometric analysis, we aim to elucidate the developmental trajectory, research hotspots, and academic impact distribution of MICP, offering data-driven insights for researchers and proposing strategic priorities for future studies. **[Methods]** A comprehensive dataset of 1 947 publications was extracted from the Web of Science Core Collection (1999–2024). Bibliometric analysis and CiteSpace visualization tools were employed to quantify publication volume, authorship patterns, country/institutional contributions, and keywords dynamics. Time-series analysis and network mapping were integrated to decode the evolutionary pathways and interdisciplinary frontiers of the field. **[Results]** Annual MICP publications exhibit sustained growth, with China emerging as the dominant contributor, accounting for 47.71% of global output. Leading institutions such as Nanyang Technological University, Chinese Academy of Sciences, Southeast University, and Chongqing University demonstrate strong academic influence through high publication output and citation frequency. The research hotspots are primarily concentrated in soil improvement, self-healing concrete, and bioremediation. Keywords clustering analysis reveals emerging interdisciplinary frontiers at the intersection of environmental geotechnics and biomaterials applications. **[Conclusion]** MICP research has entered a phase of rapid multidisciplinary integration, with China leading global advancements. Future efforts should prioritize fundamental studies on bio-mineral interaction mechanisms, accelerate MICP applications in environmental remediation and smart materials, and develop green, sustainable processes to enhance its role in carbon neutrality and ecological engineering.

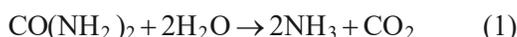
Keywords: microbially induced calcium carbonate precipitation (MICP); crack repair; biocement; bibliometric analysis

微生物诱导碳酸钙沉淀(microbially induced calcium carbonate precipitation, MICP)是自然界中普遍存在的一种生物矿化现象,指的是自然界中的矿化菌诱导产生具有粘结作用的矿物组分,

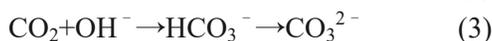
例如碳酸钙等,该自然现象被创造性地迁移应用于工程领域中,如填充和修补石材和混凝土材料的裂缝,以及防止建筑渗漏等^[1]。目前, MICP 有多种反应机制,包括尿素水解、硫酸盐

还原、反硝化作用和三价铁还原^[2-6]。MICP 的核心机制是通过微生物的代谢活动，改变局部环境的化学条件，促进碳酸钙的沉淀。具体过程包括以下几个关键步骤(以尿素水解为例)。

(1) 尿素水解如公式(1)所示：微生物[如巴氏芽孢八叠球菌(*Sporosarcina pasteurii*)]分泌脲酶，催化尿素水解生成氨(NH₃)和二氧化碳(CO₂)，同时提高局部环境的 pH 值。



(2) 碳酸根离子生成：氨水解生成铵离子(NH₄⁺)和氢氧根离子(OH⁻)，进一步促进 CO₂ 转化为碳酸根离子(CO₃²⁻)，如公式(2)和公式(3)所示。



(3) 碳酸钙沉淀：在钙离子(Ca²⁺)存在的情况下，碳酸根离子与钙离子结合，形成碳酸钙沉淀，如公式(4)所示。



脲酶广泛存在于土壤细菌中，是 MICP 法中最常用的酶之一。通过脲酶催化尿素水解反应，能够促进方解石的沉淀，这一过程在微生物胶结材料的研究和应用中起着重要作用^[1]，该技术广泛应用于改善砂土地基性能、修复水泥基材料、利用矿化膜涂覆保护文物、治理沙漠以及稳定环境重金属等。因此，有必要了解 MICP 领域的研究热点，准确把握其发展趋势和关键科学技术问题。目前，虽然有一些研究团队对 MICP 的研究进展进行了综述，但这些综述大多未量化相关文献数据，对未来发展趋势也缺乏数据支撑，亟待进一步总结完善。

文献计量学通常采用数学和统计学方法对研究对象进行可视化分析，包括聚类和时间指标分析，可广泛应用于研究热点及前沿的深入分析与评估^[7]。尽管文献计量学已涉足多个领域，但目前基于文献计量学方法分析 MICP 的研究进展却鲜有报道。因此，本研究利用 CiteSpace、VOSviewer 等软件对 1999–2024 年

有关 MICP 的文献基本信息进行了可视化分析，并通过对研究作者、研究机构、关键词等的关联分析，以期为该领域学者深入了解 MICP 的研究现状、前沿动态、研究热点及发展趋势提供重要参考。

1 材料与方法

1.1 数据来源

在 Web of Science 的核心数据库 (<https://webofscience.clarivate.cn/wos/woscc/basic-search>) 中，使用高级检索功能，输入检索条件：TS=(Microbial* NEAR/4 Carbonate Precipitation OR Microbial* NEAR/4 Calcite Precipitation OR Bio-Cement) AND TS=(bacteria OR CaCO₃ OR sand OR soil OR clay OR concrete OR materials OR CO₂ OR self-healing OR cement)，文献类型包括：文章(article)和综述文章(review article)，时间跨度为 1999 年 1 月 1 日至 2024 年 11 月 30 日，检索时间为 2024 年 11 月 30 日，共计检索到国外文献 1 926 篇，国内文献 21 篇。

1.2 分析方法

利用 Web of Science 自带的分析功能对检索结果进行处理，将筛选后的检索结果保存为纯文本格式，然后将获取的文献信息导入 CiteSpace v.6.3.R1 和 VOSviewer v.1.6.20 软件进行可视化分析，主要分析 MICP 领域国内外发文量变化趋势、主要研究机构、研究作者以及关键词密度聚类突现分析。通过 CiteSpace 和 VOSviewer 的关键词共现网络分析，可揭示 MICP 领域的研究热点与趋势。

2 结果与讨论

2.1 年度文献发表情况分析

基于 Web of Science 的核心数据库，检索到 1999 年 1 月 1 日至 2024 年 11 月 30 日之间有关 MICP 的相关文献共 1 947 篇。从图 1 可以看出，MICP 领域的年发文数量自 1999 年以来经历了

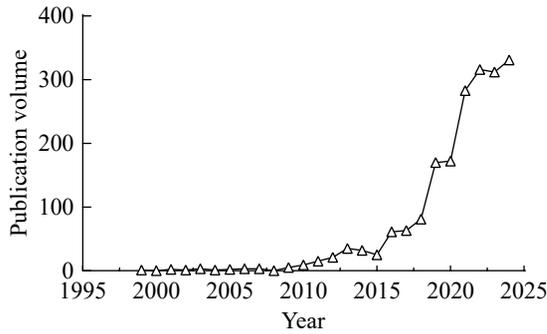


图1 1999–2024年MICP领域世界发文量

Figure 1 Global publication volume in the field of MICP from 1999 to 2024.

显著增长。结合发文量趋势，可以将 MICP 研究分为 3 个阶段：1999–2010 年为起步阶段，年度平均发文量为 2.50 篇，占总发文量的 1.54%；2011–2018 年发文量逐渐增加，年度平均发文量为 41.63 篇，占总发文量的 17.10%；2019–2024 年的发文量急剧增多，年度平均发表量达 264.00 篇，占总发文量的 81.36%。从总体发展趋势来看，近年来 MICP 技术得到了广泛关注，尤其是在 2018–2022 年这 5 年内得到了快速发展，并保持着持续上升的趋势，表明该领域内的研究尚未达到饱和，预计在未来几年将会持续快速发展。

2.2 MICP 研究国家和地区分布

根据 Web of Science 数据库中检索出的 MICP 领域发文量前 15 位国家和地区(图 2)，中国的发文量最多，为 929 篇，占总发文量的 47.71%；美国发文量位居第二，为 362 篇，占总发文量的 18.59%；印度以 180 篇位列第三，占总发文量的 9.24%；排名随后的是澳大利亚和伊朗，发文量均为 100 篇左右。中美两国的合计发文量占全部国家的 66.30%，在该领域的研究相较其他国家优势明显。如图 3 所示，全球范围内在 MICP 领域只有中国的发文量保持持续上升的趋势，尤其在 2018–2024 年间的发文量迅速增长，自 2019 年起超越美国，明显领先于其他国家，表明中国在 MICP 领域的研究力度不

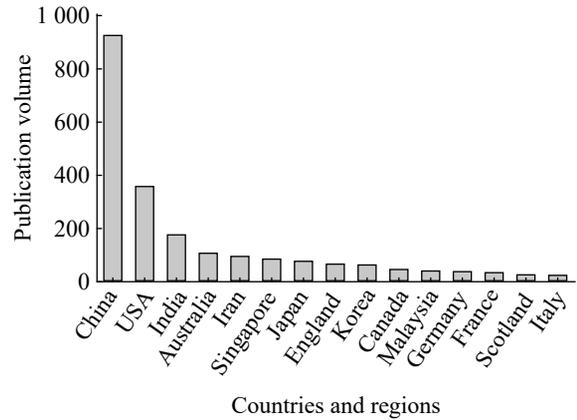


图2 1999–2024年MICP领域发文量前15位的国家和地区统计

Figure 2 Statistics of the top 15 countries and regions by publication volume in the field of MICP from 1999 to 2024.

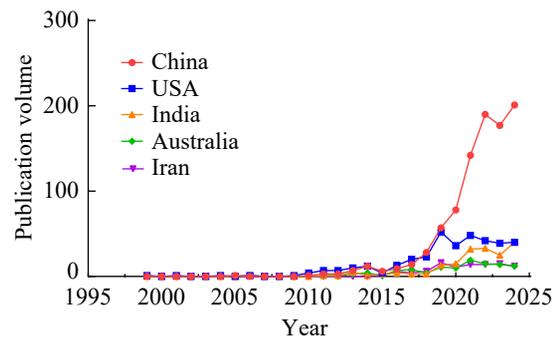


图3 1999–2024年MICP领域发文量前5位国家年度发文量

Figure 3 Annual publication volume of the top 5 countries in the field of MICP from 1999 to 2024.

断加大，相关成果也显著增加。

2.3 研究机构分析

表 1 显示，MICP 领域发文量前 10 的机构共发文 585 篇，占全部检索结果的 30.05%。南洋理工大学以 88 篇位居榜首，占前 10 名机构发文总量的 15.04%。前 10 名机构来自 6 个国家，其中中国占 5 个，占比 50%，凸显中国在该领域的显著优势。表 2 进一步显示，中国发文量前 10 的机构共发文 453 篇，占中国总发文

表1 1999–2024年MICP领域在全世界发文量排名前10位的研究机构**Table 1 Top 10 research institutions by publication volume in the field of MICP worldwide from 1999 to 2024**

排名 Rank	研究机构 Research institution	国家 Country	发文量 Number of publications	所占百分比 Percentage (%)
1	南洋理工大学 Nanyang Technological University	新加坡 Singapore	88	4.52
2	中国科学院 Chinese Academy of Sciences	中国 China	74	3.80
3	东南大学 Southeast University	中国 China	68	3.49
4	印度理工学院 Indian Institutes of Technology	印度 India	60	3.08
5	重庆大学 Chongqing University	中国 China	58	2.98
6	北海道大学 Hokkaido University	日本 Japan	54	2.77
7	加利福尼亚大学 University of California	美国 USA	53	2.72
8	科廷大学 Curtin University	澳大利亚 Australia	44	2.26
9	南京大学 Nanjing University	中国 China	44	2.26
10	河海大学 Hohai University	中国 China	42	2.16

表2 1999–2024年MICP领域在中国发文量排名前10位的研究机构**Table 2 Top 10 research institutions by publication volume in the field of MICP in China from 1999 to 2024**

排名 Rank	研究机构 Research institution	发文量 Number of publications	所占百分比 Percentage (%)
1	中国科学院 Chinese Academy of Sciences	74	3.80
2	东南大学 Southeast University	68	3.49
3	重庆大学 Chongqing University	58	2.98
4	南京大学 Nanjing University	44	2.26
5	河海大学 Hohai University	42	2.16
6	浙江大学 Zhejiang University	39	2.00
7	中国地质大学 China University of Geosciences	38	1.95
8	江苏大学 Jiangsu University	36	1.85
9	山东科技大学 Shandong University of Science and Technology	30	1.54
10	同济大学 Tongji University	24	1.23

量的 48.76%，其中，中国科学院、东南大学和重庆大学位列前三，体现了这些机构的领先地位。

在 Web of Science (WOS) 数据库中，机构合作图谱共有节点 243 个，连线 543 条(图 4)。在所有机构中，南洋理工大学(Nanyang Technological University)、中国科学院 (Chinese Academy of Sciences) 和东南大学(Southeast University)是本领

域最主要的发文机构，其中，南洋理工大学发文 88 篇，中国科学院发文 74 篇，东南大学发文 68 篇；大部分研究机构的中介中心性都小于 0.1，表明大多数机构之间的合作较少，研究方向各异，从而导致研究力量分散；南洋理工大学的中介中心性为 0.36，中国科学院为 0.20，东南大学为 0.11，表明南洋理工大学、中国科学院和东南大学在与国际科研机构的合作交流中更为密

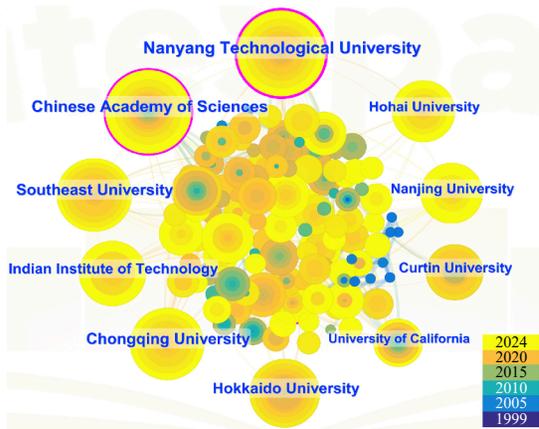


图4 Web of Science机构合作图谱
Figure 4 Institution collaboration map in Web of Science.

切, 研究成果在国际上有较大影响力。

2.4 研究作者分析

WOS 数据库的数据显示(表 3、图 5), 发文量最多的作者是南洋理工大学的楚剑, 其主要

研究方向包括土体改良、填海造地、海岸保护和废物利用等领域^[8-9]。其最高被引文献^[10]介绍了微生物诱导碳酸钙在土体表面或土体中的沉积, 研究表明土体中微生物诱导的碳酸钙沉淀取决于砂土中钙盐和尿素溶液的水平面, 当钙盐和尿素溶液的水平面高于砂土表面时, 碳酸钙沉淀主要发生在砂土表面; 反之, 若钙盐和尿素溶液的水平面低于砂土表面, 则碳酸钙在砂土中分布更为均匀。Choi 等^[11]采用 MICP 技术对砂浆中已有裂缝进行了修补试验研究, 结果表明样品的抗拉强度随着裂纹表面上 CaCO_3 沉淀量的增加而增加。扫描电镜显示, 沉淀的碳酸钙可能以球霏石和方解石 2 种形式存在。发文量排名第二的是北海道大学的 Satoru Kawasaki, 其研究方向包括社会基础设施(土木工程、建筑、防灾)、岩土工程、地质工程和地质科学等^[12-13]。其最高被引文献介绍了 MICP 技术联合副红杆菌(*Pararhodobacter* sp.)对铅污染

表3 1999–2024年MICP领域发文量在全球排名前10位的作者

Table 3 Top 10 authors by publication volume in the field of MICP worldwide from 1999 to 2024

排名 Rank	作者 Author	机构 Research institution	占比 Percentage (%)	发文量 Publication volume	被引频次 Citations	篇均被引频次 Average citations per paper
1	Chu Jian	南洋理工大学 Nanyang Technological University	3.08	60	3 813	63.55
2	Satoru Kawasaki	北海道大学 Hokkaido University	2.47	48	1 381	28.77
3	Cheng Liang	江苏大学 Jiangsu University	2.36	46	3 189	69.33
4	Varenyam Achal	广东以色列理工学院 Guangdong Technion-Israel Institute of Technology	1.85	36	3 076	85.44
5	Kazunori Nakashima	北海道大学 Hokkaido University	1.80	35	961	27.46
6	Jason T. DeJong	加州大学戴维斯分校 University of California, Davis	1.69	33	5 336	161.70
7	Liu Hanlong	重庆大学 Chongqing University	1.69	33	1 582	47.94
8	Abhijit Mukherjee	科廷大学 Curtin University	1.59	31	2 242	72.32
9	M. Sudhakara Reddy	塔帕尔大学 Thapar Institute of Engineering and Technology	1.59	31	1 895	61.13
10	Brina Montoya	北卡罗莱纳州立大学 North Carolina State University	1.54	30	2 176	72.53

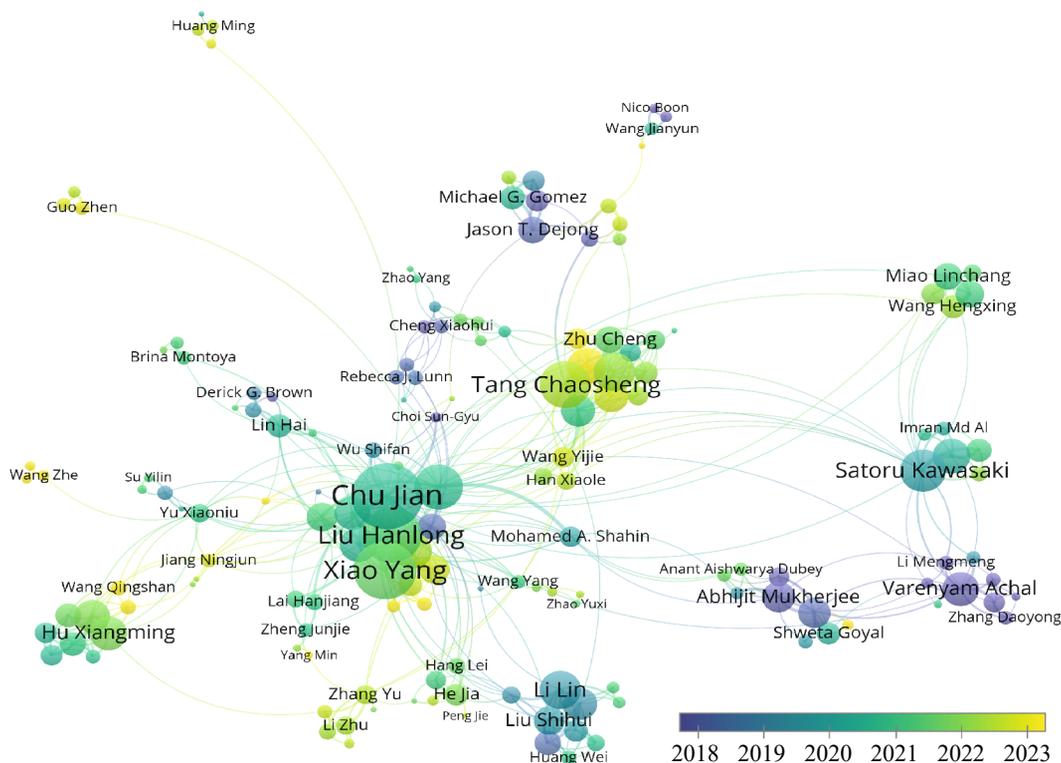


图5 Web of Science 作者合作图谱

Figure 5 Author collaboration map in Web of Science.

废弃物的生物修复研究^[14], 发掘了 MICP 技术作为一种低成本、环保的重金属修复方法在铅的生物稳定化方面的应用潜力。他的研究还发现黄麻纤维能增强 MICP 改善海岸侵蚀防护用生物胶结砂的耐久性^[15]。发文量排名第三的是江苏大学的成亮, 其研究方向主要集中在微生物岩土工程、环境岩土工程、微生物环境工程和微生物材料等方面, 已从事微生物胶结土体及土壤重金属修复研究近 10 年, 其最高被引文献^[16]介绍了微生物诱导方解石沉淀对不同饱和度和砂土的固结作用差异, 结果表明, 在处理低饱和度的砂土时, 相近的 CaCO_3 含量下可以获得更高的土体强度, 并证实了 MICP 可作为多种岩土工程应用中替代传统土体改良方法的技术, 包括砂土抗液化、边坡稳定化和路基加固。他还探究了关键环境条件(如脲酶浓度、温度、雨水冲刷、石油污染和冻融循环等)对微生物诱导

固化土壤的影响^[17]。

目前, 对于影响 MICP 效率和质量的因素也有不少研究^[16,18-22], 主要包括以下几个方面。

(1) 微生物种类与活性。微生物种类[如巴氏芽孢八叠球菌、枯草芽孢杆菌(*Bacillus subtilis*)等]及其代谢活性是 MICP 的核心驱动力。脲酶活性高的微生物能够产生足量的脲酶, 更高效地催化尿素水解; 碳酸酐酶活性高的微生物可以更高效地促进可溶性碳的利用, 促进碳酸钙沉淀。微生物的环境适应性(如耐盐性、耐高温性)也会直接影响细菌的代谢速率, 进而影响 MICP 的效率。

(2) 环境条件。环境条件(如 pH、温度等)对 MICP 过程具有显著影响。较高的 pH 有利于碳酸钙的生成, 但过高的 pH 可能抑制微生物活性; 适宜的温度范围(通常为 20–40 °C)能够提高微生物的代谢速率以及脲酶等矿化酶的催化

能力。

(3) 反应底物。反应底物(如可溶性碳源和钙源)是 MICP 过程中碳酸钙形成的基本原料。碳源(一般为尿素)浓度影响可溶性无机碳(如二氧化碳、碳酸根离子)的产率, 而钙离子的浓度也直接影响成矿结晶速率。然而, 过高的尿素或钙离子浓度一方面会影响细菌膜对尿素等原料的运输能力, 也可能改变细菌的渗透压, 还可能因氨的积累对细菌产生毒性; 另一方面, 过高的反应物浓度或反应速率可能导致碳酸钙晶体在生长过程中难以形成密实的微结构。

(4) 有效的成核位点或成核模板。微生物细胞表面及其分泌的胞外聚合物(extracellular polymeric substances, EPS)为碳酸钙晶体的形成提供了成核位点, 影响晶体的成核和生长过程。碳酸钙的晶型(如方解石、球霏石等)和介晶形态受到 pH、离子浓度和微生物种类的影响, 不同晶型和晶体形态具有不同的力学性能和稳定性。

综上所述, 在 MICP 过程中, 微生物的脲酶活性和反应物浓度往往是 2 个最关键的主控因素。脲酶是 MICP 过程中催化尿素水解的关键酶, 其活性直接决定了碳酸钙的生成速率。高脲酶活性的微生物能够显著提高 MICP 的效率。钙离子是碳酸钙沉淀的必要成分, 其浓度直接影响碳酸钙的生成量和晶体形态。适当的钙离子浓度能够促进均匀的碳酸钙沉淀, 而过高的浓度可能导致晶体形态不均匀以及细菌活力降低。

目前, 各国 MICP 领域的研究人员大多专注于内部研究, 缺乏机构间的合作。同时, 同一领域的作者群体之间的合作不够紧密, 研究团队成员构成单一, 通常由同一机构的成员组成, 缺乏跨机构的合作。各团队的研究方向不同且交叉点不多, 导致团队之间的横向交流较少, 使研究力量更为分散。这一分散的研究格局亟待通过跨机构协作打破壁垒, 为未来整合多学科优势、构建协同创新的系统化研究提供关键突破口。团队间的紧密学术合作对促进 MICP 的

研究具有积极影响, 未来有必要加强不同机构和学者之间的合作交流。

论文的篇均被引量是衡量研究者文章质量的重要指标之一, 结合发文量的综合分析能够客观反映出学者学术论文的贡献及其被认可度。根据 MICP 发文量分析, 近 25 年来楚剑和 Jason T. DeJong 在 MICP 研究领域上的学术影响力较大, 其发文量与文章质量均达到较高水平。

2.5 关键词共现分析

通过整理 1999–2024 年文献的相关关键词(图 6), 列出了排名前 20 的关键词(表 4), 其中出现频次前 10 的关键词分别是微生物诱导碳酸盐沉淀(MICP)、碳酸盐沉淀(carbonate precipitation)、细菌(bacteria)、胶结(cementation)、土(soil)、改良(improvement)等, 这些关键词的总出现频次占前 20 关键词的 66.31%。分析发现, 近年来 MICP 领域的研究热点集中在土体改良和砂土/边坡加固, 其中备受关注的的问题包括微生物自愈合水泥基材料、土壤重金属污染的生物修复、砂土边坡加固和脲酶, 例如巴氏芽孢八叠球菌等(图 6)。MICP 技术不仅可以改善岩土的工程特性, 还在许多其他领域也展现出良好的发展前景, 包括提升岩土和砂质地基的性能、修复水泥基材料、利用矿化膜保护文物、提高尾矿性能、治理沙漠以及修复重金属污染环境等方面。

2.6 关键词突现分析

关键词突现分析可以统计出某一时间段内特定关键词出现频次的变化, 从而帮助判断其发展趋势和研究热点。WOS 中的关键词突现信息如图 7 所示。关键词“Nucleation”持续时间较长, 从 1999–2018 年共持续了 19 年。突显分析的结果表明, 在此阶段围绕 MICP 过程的研究主要集中于传统的细菌成核观点, 即细菌胞外聚合物(EPS)作为成核位点, 碳酸钙围绕细菌生长, 后来被证明是错误的。当前的新观点认为, 细菌吸附在碳酸钙表面, 首先生成无定形碳酸钙,

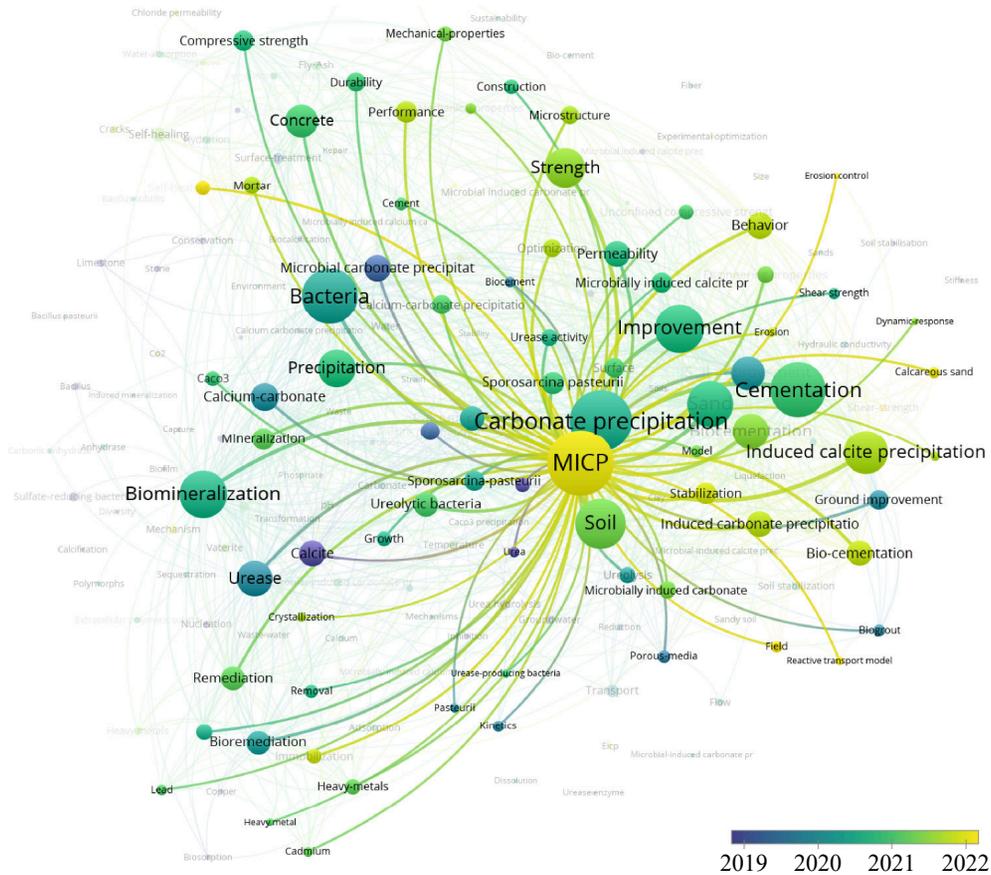


图6 MICP领域关键词共现分析图

Figure 6 Co-occurrence analysis of keywords in the field of MICP.

随后在溶液中自发结晶^[22]。自 2011 年起，关键词“Microbial carbonate precipitation”成为新的研究热点，突现强度达到 14.64，随后出现的关键词包括“Groundwater”“Urea hydrolysis”和“Soil improvement”，表明该领域对土体改良研究的关注度逐渐提升。MICP 从自然现象和理论研究，逐渐向工程应用研究过渡，特别是利用具有尿素水解特性的脲酶来改良土壤，MICP 已成为一种高效且环保的方法用于修复受污染环境中的重金属等污染物^[23]。自 2016 年以来，“Microorganisms”（微生物）成为 MICP 领域的新研究热点。关键词如“Tests”（测试）和“Microstructure”（微观结构）的出现标志着该领域从土木工程向生命科学、材料学和化学等多学科扩展。研究人员的关注点不再局限于脲酶，

而是扩展到应用于 MICP 的微生物种类及其产物，如碳酸酐酶等，分析这些微生物如何在特定的环境条件下促进碳酸钙的沉淀。研究人员开始采用创新的测试与分析手段来分析生物水泥的微观结构、力学性能和耐久性。此外，研究人员还关注 MICP 过程中涉及的生物化学反应和成矿反应动力学，探讨不同反应条件对沉淀物特性的影响。这些研究为如何调控 MICP 过程并使其更高效且晶体结构可控提供了见解，从而推动了 MICP 技术在实际应用中的有效性和可持续性。目前，MICP 技术的跨学科发展已成功应用于环境岩土工程和生物岩土工程领域，包括混凝土的强化、土体加固、文物与古建筑修复和智能建造^[24]。

表4 1999–2024年MICP领域相关文献高频关键词
Table 4 High-frequency keywords in MICP-related literature from 1999 to 2024

排名 Rank	关键词 Keywords	出现频次 Occurrence frequency
1	微生物诱导碳酸盐沉淀 MICP	475
2	碳酸盐沉淀 Carbonate precipitation	434
3	细菌 Bacteria	375
4	胶结 Cementation	374
5	土 Soil	327
6	改良 Improvement	320
7	生物矿化 Biomineralization	305
8	砂 Sand	296
9	诱导方解石沉淀 Induced calcite precipitation	279
10	强度 Strength	243
11	沉淀 Precipitation	225
12	生物水泥 Biocementation	217
13	脲酶 Urease	207
14	土体改良 Soil improvement	192
15	混凝土 Concrete	187
16	碳酸钙 Calcium-carbonate	150
17	方解石 Calcite	143
18	性能 Behavior	142
19	微生物碳酸盐沉淀 Microbial carbonate precipitation	142
20	渗透性 Permeability	137

2.7 关键词聚类分析

本研究应用对数似然比算法(log-likelihood ratio, LLR)对关键词进行聚类分析。在聚类图谱中, 聚类模块(modularity, Q)值大于 0.3 表示聚类结构显著, 而平均轮廓(silhouette, S)值大于 0.7 表征聚类效果的合理性。聚类编号数字越小代表该聚类下的文献研究越多, 规模越大^[25]。本研究通过对检索的文献关键词进行聚类运算, 得到 9 个类别, 可视化结果(图 8)显示, $Q=0.468\ 2 (>0.3)$, $S=0.811\ 2 (>0.7)$, 表明聚类显著且结果有效。图 8 显示了 9 个明显的聚类模块,

主要包括“#0 碳酸钙(calcium carbonate)”“#1 土体改良 (soil improvement)”“#2 自修复 (self-healing)”“#3 生物修复 (bioremediation)”“#4 生物矿化 (biomineralization)”“#5 方解石 (calcite)”“#6 钙离子去除 (Ca^{2+} removal)”“#7 微生物岩 (microbialites)”“#8 脲酶 (ureases)”等 9 个主题。

结合关键词聚类图谱(图 8)和时间线图谱(图 9)分析, 在该领域的研究初期(1999–2010 年), 研究人员开始关注土体改良、微生物自愈混凝土和生物修复等主题。其中, 关键词“土(soil)”“细菌(bacteria)”和“生物矿化(biomineralization)”从早期到 2023 年保持高频出现, 影响力较大, 说明此阶段处于探索阶段, 研究人员发现自然环境中的一些矿化细菌能够诱导产生具有粘结作用的矿物组分, 从而发展了 MICP 技术。在该领域的研究中期(2011–2018 年), 土体改良、微生物自愈混凝土和生物修复仍然是研究的重点。其中, “强度(strength)”“渗透性(permeability)”和“性能(behavior)”成为这一时期的高频关键词, 表明研究人员开始更加关注 MICP 技术的加固或修复效果, 特别是生物加固或修复后的强度和渗透性等。进入持续发展期(2019 年至今), 高频关键词包括固定化(immobilization)、产脲酶菌(urease producing bacteria)及大肠杆菌(*Escherichia coli*), 反映出研究人员开始研究不同来源的产脲酶微生物, 尝试使用生物学手段或者微生物固定化技术来提高脲酶活性。

除了“#8 脲酶(ureases)”被广泛应用于 MICP 外, Li 等^[26]发现, 在无碳酸酐酶(carbonic anhydrase, CA)抑制剂的情况下, Ca^{2+} 的沉淀速率比存在 CA 抑制剂时更快, 表明细菌产生的 CA 可能作为一种促进方解石沉淀的助剂。进一步研究了初始钙离子浓度、不同 CA 浓度及初始 pH 对细菌 CA 诱导碳酸钙沉淀和晶体形态的影响, 结果表明在一定范围内, 低浓度的 Ca^{2+} /CA 酶有利于球霏石的形成, 而高浓度的 Ca^{2+} /CA 酶则有利于方解石的形成; 初始 pH 值越高越有利于细菌 CA 诱导碳酸钙的生成^[27–29]。Baidya

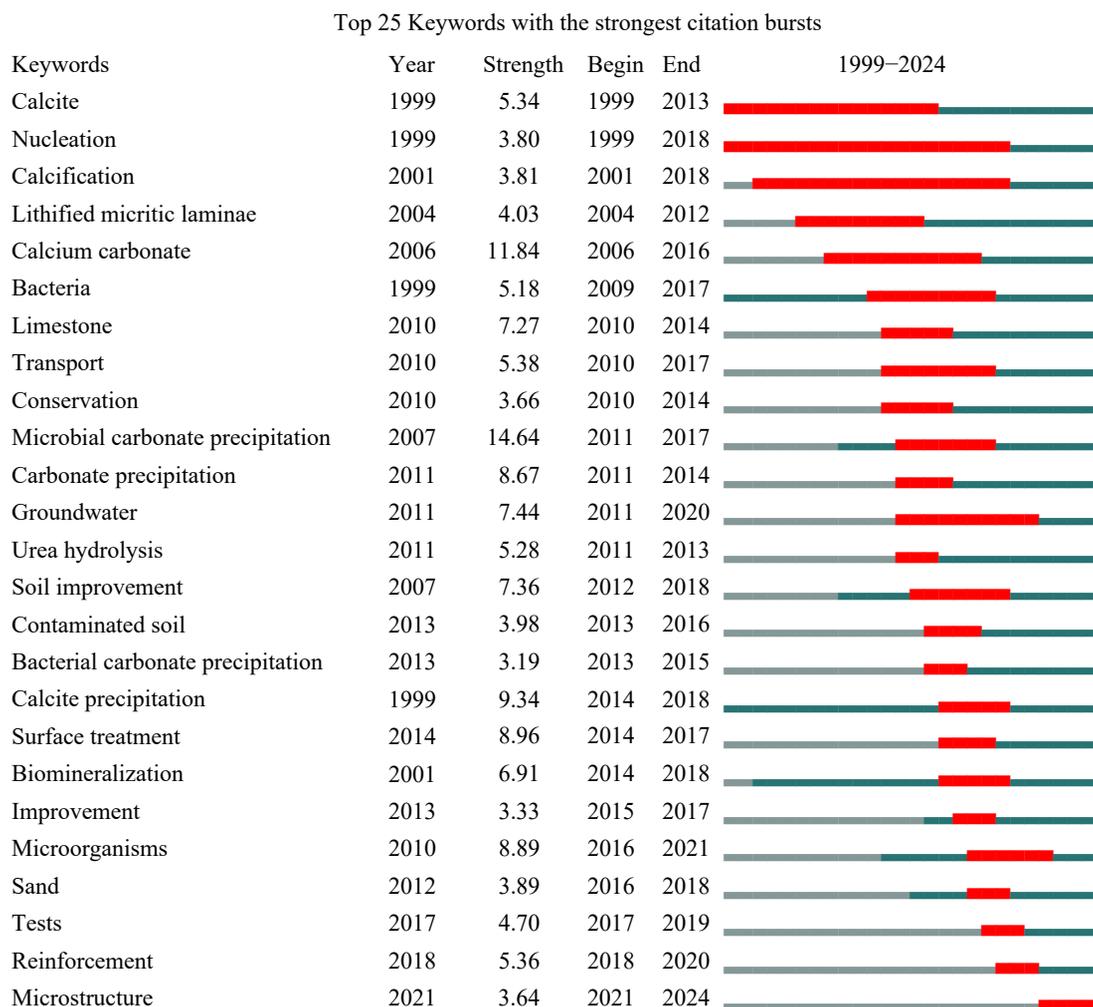


图7 关键词突现图

Figure 7 Keywords burst detection map.

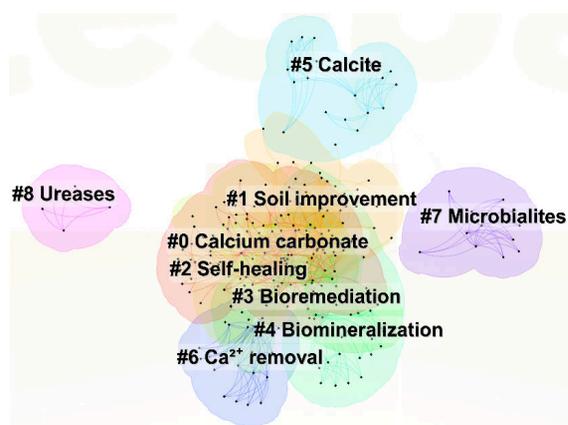


图8 关键词聚类图谱

Figure 8 Keywords cluster map.

等^[30]通过基因工程技术将来源于蜡样芽孢杆菌 (*Bacillus cereus*) GLRT202 的 CA 展示在大肠杆菌细胞表面, 获得一种 CA 全细胞催化剂, 能提高其捕获 CO₂ 的效率, 并且这种 CA 全细胞催化剂能有效地用于诱导方解石沉淀。

总体上看, 从 1999 年至 2024 年, “土体改良 (soil improvement)” “自修复 (self-healing)” 及 “生物修复 (bioremediation)” 等依然是受到持续关注的经典主题。可见, 基于 MICP 的土体改良、生物修复等是在该领域引起长期关注的研究方向, 这些主题在该领域未来的研究中仍具有重要的代表性和研究价值。

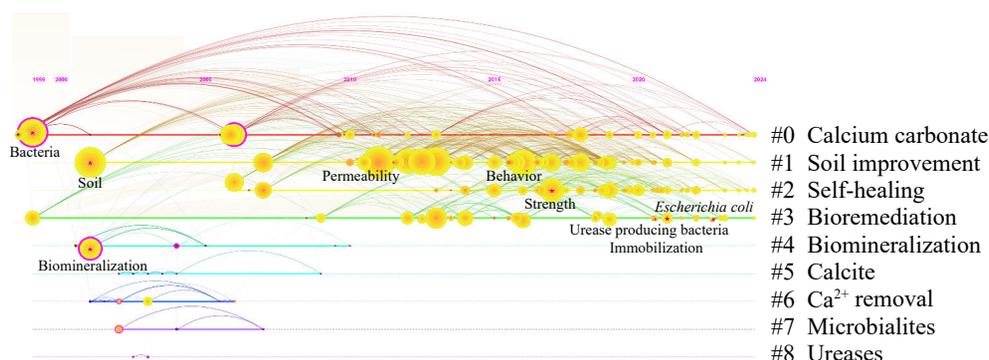


图9 关键词时间线图

Figure 9 Keywords timeline map.

3 总结与展望

本研究采用可视化软件 CiteSpace 和 VOSviewer 对 WOS 数据库中检索出的 1 947 篇有关 MICP 领域的文献进行了分析, 全面探讨了 MICP 的研究趋势、研究作者、关键词共现聚类和研究热点。

结果表明, 自 2011 年以来, 国内外文献发表数量逐年增加, 并且在 2019 年后增速显著加快, 英文文献的发文量多于中文文献。在 MICP 领域的相关研究中, 中国处于优势地位, 发文数量位列第一, 这得益于中国近年来在原创性技术攻关和基础设施工程上的大力投入。发文量最多的机构是南洋理工大学, 该校与其他国家机构的合作最为紧密。从全球发文量、被引频次来看, 楚剑和 Jason T. DeJong 在本领域影响力较大。从研究热点来看, 早期研究人员发现了细菌参与碳酸盐沉淀, 沉积产物多数为方解石; 从 2011 年后, 研究人员着重于应用产脲酶微生物进行土体改良和边坡加固; 从 2016 年起, 研究人员开始探究能促进碳酸盐沉淀的微生物, 从而拓展了可应用于 MICP 的微生物来源。

目前, 在生物水泥的应用中, 使用最为广泛的脲酶菌是巴氏芽孢八叠球菌, 但因其矿化能力仅为自身代谢活动所需而非服务于工程, 其矿化速率仍无法在较短时间内达到满足大规

模工程应用的预期强度。未来的研究方向将聚焦微生物矿化过程中的关键科学问题, 例如研究生物合成、代谢调控及发酵过程的精细控制; 通过系统生物学、多组学技术以及计算模拟与生物信息学分析, 揭示微生物细胞内合成过程的限速机制和调控网络; 结合基因编辑、定向进化与合成生物学等前沿技术, 优化矿化过程中关键限速环节, 实现酶生物合成的精准调控, 构建高效细胞工厂, 为功能性矿化酶的高效合成提供理论支撑和技术方案, 推动原创性成果的突破与应用。

基于文献计量学分析中的关键词共现、突现和聚类分析, 未来 MICP 研究应推进以下 5 个重点方向。(1) 微生物优化与机制研究, 未来研究应首先聚焦于微生物的筛选与改造, 通过基因工程和合成生物学手段, 提升微生物(如巴氏芽孢八叠球菌、枯草芽孢杆菌等)的矿化效率, 特别是优化脲酶和碳酸酐酶的活性。同时, 深入研究 MICP 的机制, 特别是碳酸盐的成矿结晶动力学过程, 探索不同环境条件(如 pH、温度、离子浓度等)对矿化过程的影响, 为后续应用奠定理论基础。(2) 材料开发与工程应用, 在机制研究的基础上, 开发基于 MICP 的新型胶结材料和自修复混凝土, 应用于土体改良、边坡加固、混凝土裂缝修复等各类工程领域。通过优化微生物矿化过程, 提升材料的强度、耐久性和自

修复能力, 推动 MICP 技术在土木与环境工程中的规模化应用。此外, 研究 MICP 技术在智能建造中的应用, 如智能边坡加固系统和自修复建筑材料, 进一步提升工程材料的性能。(3) 环境修复与生态工程, MICP 技术在环境修复领域具有广阔的应用前景, 特别是在重金属污染土壤和水体的修复中。未来研究应探索 MICP 与其他修复技术(如植物修复、化学修复)的联合应用, 提高修复效率并减少环境副产物的产生。同时, 研究 MICP 在沙漠化治理和土壤改良中的应用, 提升土壤的持水性和肥力, 促进生态恢复。(4) 跨学科融合与技术创新, 推动 MICP 技术与材料科学、化学、环境科学、生命科学等学科的交叉融合, 开发新型测试与分析手段(如微流控芯片、原位成像技术等), 深入研究 MICP 过程中的微观机制。基于仿生矿化与晶体自组装的原理, 设计可调控微生物矿化的有机基质, 形成“有机基质-无机矿物复合物”, 提升生物水泥的强度与韧性, 为绿色建造材料的开发提供技术支持。(5) 可持续性与规模化推广, 未来研究应关注 MICP 技术的可持续性, 评估其在资源消耗、环境影响和经济效益方面的表现。通过优化施工工艺和降低工程成本, 推动 MICP 技术在大规模工程中的应用, 特别是在绿色智能建造领域的推广, 为实现可持续发展目标提供技术支撑。

总之, MICP 技术预期将成为未来自然、绿色建筑材料制备的重要技术, 引导传统土木工程与现代生物技术的有机结合, 也将是传统土木工程材料绿色制备新途径中不可或缺的技术之一。未来有望在微生物优化、材料开发、环境修复、可持续生产和学科融合发展等方面取得突破, 推动其在土木工程、环境修复和生态工程等领域的广泛应用。

作者贡献声明

马国辉: 实施研究过程、设计论文框架、起草论文、修订论文、完成呈现; 周玉国: 调

研文献、数据处理; 李小亮: 数据收集与分析; 宋毅飞: 软件数据处理; 袁明亮: 数据验证; 王雪: 修改论文; 柳苗: 方法设计; 李为: 提出概念、监督管理、修改并审阅论文; 余龙江: 提供资源、审阅论文。

作者利益冲突公开声明

作者声明不存在任何可能会影响本文所报告工作的已知经济利益或个人关系。

参考文献

- [1] ZHANG JH, SHI XZ, CHEN X, HUO XF, YU Z. Microbial-induced carbonate precipitation: a review on influencing factors and applications[J]. *Advances in Civil Engineering*, 2021, 2021(1): 9974027.
- [2] O'DONNELL ST, HALL CA, KAVAZANJIAN E JR, RITTMANN BE. Biogeochemical model for soil improvement by denitrification[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2019, 145(11): 04019091.
- [3] JIANG NJ, WANG YJ, CHU J, KAWASAKI S, TANG CS, CHENG L, DU YJ, SHASHANK BS, SINGH DN, HAN XL, WANG YZ. Bio-mediated soil improvement: an introspection into processes, materials, characterization and applications[J]. *Soil Use and Management*, 2022, 38(1): 68-93.
- [4] ZENG C, van PAASSEN LA, ZHENG JJ, STALLINGS YOUNG EG, HALL CA, VEENIS Y, van der STAR WRL, KONSTANTINOU M, KAVAZANJIAN E. Soil stabilization with microbially induced desaturation and precipitation (MIDP) by denitrification: a field study[J]. *Acta Geotechnica*, 2022, 17(12): 5359-5374.
- [5] SHAN B, HAO RX, XU H, LI JN, LI YH, XU XY, ZHANG JM. A review on mechanism of biomineralization using microbial-induced precipitation for immobilizing lead ions[J]. *Environmental Science and Pollution Research (International)*, 2021, 28(24): 30486-30498.
- [6] MONDAL S, APARNA G. Review on microbial induced calcite precipitation mechanisms leading to bacterial selection for microbial concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 225: 67-75.
- [7] LV H, WANG YF, GAO ZA, LIU PQ, QIN DX, HUA QQ, XU Y. Knowledge mapping of the links between the microbiota and allergic diseases: a bibliometric analysis (2002–2021)[J]. *Frontiers in Immunology*, 2022, 13: 1045795.
- [8] WU SF, LI B, CHU J. Stress-dilatancy behavior of MICP-treated sand[J]. *International Journal of Geomechanics*, 2021, 21(3): 04020264.
- [9] CHU J, IVANOV V, NAEIMI M, STABNIKOV V, LIU HL. Optimization of calcium-based bioclogging and biocementation of sand[J]. *Acta Geotechnica*, 2014, 9:

- 277-285.
- [10] CHU J, STABNIKOV V, IVANOV V. Microbially induced calcium carbonate precipitation on surface or in the bulk of soil[J]. *Geomicrobiology Journal*, 2012, 29(6): 544-549.
- [11] CHOI SG, WANG KJ, WEN ZY, CHU J. Mortar crack repair using microbial induced calcite precipitation method[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2017, 83: 209-221.
- [12] DILRUKSHI RAN, NAKASHIMA K, KAWASAKI S. Soil improvement using plant-derived urease-induced calcium carbonate precipitation[J]. *Soils and Foundations*, 2018, 58(4): 894-910.
- [13] GOWTHAMAN S, NAKASHIMA K, KAWASAKI S. Freeze-thaw durability and shear responses of cemented slope soil treated by microbial induced carbonate precipitation[J]. *Soils and Foundations*, 2020, 60(4): 840-855.
- [14] MWANDIRA W, NAKASHIMA K, KAWASAKI S. Bioremediation of lead-contaminated mine waste by *Pararhodobacter* sp. based on the microbially induced calcium carbonate precipitation technique and its effects on strength of coarse and fine grained sand[J]. *Ecological Engineering*, 2017, 109: 57-64.
- [15] IMRAN MA, NAKASHIMA K, EVELPIDOU N, KAWASAKI S. Durability improvement of biocemented sand by fiber-reinforced MICP for coastal erosion protection[J]. *Materials*, 2022, 15(7): 2389.
- [16] CHENG L, CORD-RUWISCH R, SHAHIN MA. Cementation of sand soil by microbially induced calcite precipitation at various degrees of saturation[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2013, 50(1): 81-90.
- [17] CHENG L, SHAHIN MA, MUJAH D. Influence of key environmental conditions on microbially induced cementation for soil stabilization[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2017, 143(1): 04016083.
- [18] DEJONG JT, MORTENSEN BM, MARTINEZ BC, NELSON DC. Bio-mediated soil improvement[J]. *Ecological Engineering*, 2010, 36(2): 197-210.
- [19] KAUR P, SINGH V, ARORA A. Microbial concrete-a sustainable solution for concrete construction[J]. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 2022, 194(3): 1401-1416.
- [20] WHIFFIN VS, van PAASSEN LA, HARKES MP. Microbial carbonate precipitation as a soil improvement technique[J]. *Geomicrobiology Journal*, 2007, 24(5): 417-423.
- [21] AL QABANY A, SOGA K, SANTAMARINA C. Factors affecting efficiency of microbially induced calcite precipitation[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2012, 138(8): 992-1001.
- [22] XIAO Y, HE X, STUEDLEIN AW, CHU J, MATTHEW EVANS T, van PAASSEN LA. Crystal growth of MICP through microfluidic chip tests[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2022, 148(5): 06022002.
- [23] RAJASEKAR A, WILKINSON S, MOY CKS. MICP as a potential sustainable technique to treat or entrap contaminants in the natural environment: a review[J]. *Environmental Science and Ecotechnology*, 2021, 6: 100096.
- [24] ALI MF, MUKHTAR H, DUFOSSÉ L. Microbial calcite induction: a magic that fortifies and heals concrete[J]. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2023, 20(1): 1113-1134.
- [25] CHEN Y, CHEN C, LIU Z, HU Z, WANG X. The methodology function of CiteSpace mapping knowledge domains[J]. *Studies in Science of Science*, 2015, 33(2): 242-253.
- [26] LI W, LIU LP, ZHOU P, CAO L, YU LJ, JIANG SY. Calcite precipitation induced by bacteria and bacterially produced carbonic anhydrase[J]. *Current Science*, 2011: 502-508.
- [27] LI W, CHEN WS, ZHOU PP, ZHU SL, YU LJ. Influence of initial calcium ion concentration on the precipitation and crystal morphology of calcium carbonate induced by bacterial carbonic anhydrase[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2013, 218: 65-72.
- [28] LI W, CHEN WS, ZHOU PP, YU LJ. Influence of enzyme concentration on bio-sequestration of CO₂ in carbonate form using bacterial carbonic anhydrase[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2013, 232: 149-156.
- [29] LI W, CHEN WS, ZHOU PP, CAO L, YU LJ. Influence of initial pH on the precipitation and crystal morphology of calcium carbonate induced by microbial carbonic anhydrase[J]. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 2013, 102: 281-287.
- [30] BAIDYA P, ZHANG M, XIAO YT, ZHANG H, YU LJ, LI W. Genetically engineered whole-cell biocatalyst for efficient CO₂ capture by cell surface display of carbonic anhydrase from *Bacillus cereus* GLRT202 on *Escherichia coli*[J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2024, 211: 109446.