

生物矿化的研究进展及其应用

黄美玉^{1,2}, 王纪晗¹, 徐毓东¹, 耿合定¹, 赵辉^{1,3*}, 闫华晓^{1,3*}, 韩作振^{4*}

¹山东科技大学化学与生物工程学院生物工程系, 山东 青岛

²山东科技大学安全与环境工程学院环境工程系, 山东 青岛

³山东省非粮乙醇生物炼制技术创新中心(筹), 山东 青岛

⁴山东科技大学地球科学与工程学院地质学系, 山东 青岛

收稿日期: 2021年11月6日; 录用日期: 2021年11月25日; 发布日期: 2021年12月8日

摘要

生物矿化是指在生物大分子、生物体代谢、细胞、有机基质的参与下, 由生物体通过上述物质在特定的部位和一定的物理化学条件下经过调控生成无机矿物的过程, 其过程受到温度、pH、周围环境中的金属离子和营养物质等多方面的影响。近年来, 生物矿化已经广泛应用在环境、材料、建筑、生物医学等多个领域, 并取得了良好的效果。

关键词

生物矿化, 矿化机制, 影响因素, 应用潜力

Research Progress and Application of Biomineralization

Meiyu Huang^{1,2}, Jihan Wang¹, Yudong Xu¹, Heding Geng¹, Hui Zhao^{1,3*}, Huaxiao Yan^{1,3*}, Zuozhen Han^{4*}

¹Department of Bioengineering, College of Chemical and Biological Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao Shandong

²Department of Environmental Engineering, College of Safety and Environmental Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao Shandong

³Shandong Technology Innovation Center of Non-Grain Ethanol Biorefinery, Qingdao Shandong

⁴Department of Geology, School of Earth Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao Shandong

Received: Nov. 6th, 2021; accepted: Nov. 25th, 2021; published: Dec. 8th, 2021

*通讯作者。

文章引用: 黄美玉, 王纪晗, 徐毓东, 耿合定, 赵辉, 闫华晓, 韩作振. 生物矿化的研究进展及其应用[J]. 微生物前沿, 2021, 10(4): 175-181. DOI: 10.12677/amb.2021.104022

Abstract

Biom mineralization refers to the process of producing inorganic minerals through regulation and control of biological macromolecules under certain physical and chemical conditions with the participation of biological macromolecule and organisms, metabolism, cells, and organic substrates. Temperature, pH, metal ions and nutrients in the surrounding environment are affected by many aspects. In recent years, biom mineralization has been widely used in environment, materials, construction, biomedicine and other fields, and has achieved good results.

Keywords

Biom mineralization, Mineralization Mechanism, Influencing Factors, Application Potential

Copyright © 2021 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. 引言

近年来, 由于生物矿化具有清洁环保、成本较低、操作简单方便、其应用范围广等优点, 已经成为各个学科的研究热点。生物矿化是指在生物大分子、生物体代谢、细胞、有机基质的参与下, 由生物体通过生物大分子在特定的部位和一定的物理化学条件下经过调控生成无机矿物的过程[1]。由于生物矿化领域具有比较明显的生物、物理、化学、医学、材料和环境相互交叉的学科特点, 为环境治理、合成新型材料、修复建筑以及改进医疗事业提供了一种新的思路。本文主要综述了生物矿化的机制和影响因素, 以及在环境、材料、建筑和生物医药方面的研究进展及应用, 其中主要包括: 去除环境中的金属离子、大气中二氧化碳的封存、基于生物矿化的合成材料的制备、修复建筑物以及合成复合生物医学材料和药物传递系统的载体。

2. 生物矿化

2.1. 生物控制和生物诱导矿化

生物矿化分为生物控制和生物诱导两种形式, 生物控制矿化是在生物的生理活动等控制下, 在细胞内或细胞上的特定位置直接合成的, 与周围的理化环境无关。生物诱导矿化则是生物通过自身的生理及代谢活动改变周围溶液环境的物理化学条件而诱发的生物矿化过程, 矿物是由于生物体的代谢活性在细胞外形成的[2] [3] [4] [5], 如微生物诱导碳酸钙沉积[6]。有研究表明细菌可以释放氨、碳酸酐酶(CA)以及脲酶等来改变培养系统中的理化参数, 使细菌细胞周围的微环境达到过饱和, 促使环境中产生碳酸盐矿物沉淀[7] [8]。微生物释放的碱性磷酸酶(ALP)可以水解含有磷酸酯键的大分子, 同时释放磷酸盐阴离子(PO_4^{3-}), 细菌释放的氨可以转化为铵(NH_4^+), 使环境中磷酸盐矿物的过饱和度得到提高, 从而形成磷酸盐矿物沉淀[9]。这些酶加速生物矿化过程中的化学反应, 导致环境的化学变化, 从而促进生物矿物的形成。

微生物通过代谢对 pH 升高有贡献, 本课题组已经发表的论文中关于微生物导致理化条件的变化总结见表 1。

Table 1. The influence of different microorganisms on the physical and chemical conditions in the surrounding environment
表 1. 不同微生物对周围环境中理化条件的影响

微生物名称	pH	铵根离子浓度(*10 ⁻⁵ mol/L)	碳酸酐酶浓度(U/L)	碱性磷酸酶浓度(U/L)	参考文献
<i>Bacillus cereus</i>	7.20~8.90	0~0.20	0~12	-	[5]
<i>Bacillus subtilis</i>	7.00~9.22	0.02~0.18	0~17	-	[10]
<i>Bacillus cereus</i>	7.20~9.07	0.02~0.18	-	0~90	[11]
<i>Halomonas smyrnensis</i>	6.80~8.80	0~0.22	0~6	-	[12]
<i>Klebsiellapneumoniae</i>	7.00~9.20	0.04~0.14	0~37	-	[13]
<i>Staphylococcus epidermis</i>	7.00~8.70	-	0~41	-	[14]
<i>Lysinibacillus fusiformis</i>	7.00~9.20	0~0.25	4~25	0~180	[15]

2.2. 胞外与胞内矿化的协同作用

目前对于生物矿化的研究中, 微生物矿化位点主要分为胞外矿化和胞内矿化: 当周围的微环境达到过饱和后, 生物可以在细胞表面或细胞分泌胞外聚合物(EPS)上吸附金属离子, 致使矿物在细胞表面或EPS上成核, 形成矿物沉淀[16], 称之为胞外矿化; 目前对于胞外矿化的研究比较普遍, 韩作振等通过对蜡样芽孢杆菌 *Bacillus cereus* MRR2 超薄切片采用扫描透射电子显微镜(STEM)分析, 表明细胞表面周围的EPS上有纳米级矿物[11]。对于细胞内部发生的矿化作用则称之为胞内矿化。近年来, 对细胞内生物矿化的研究越来越成熟, 并取得了一定的结果。Benzerara 等人通过对不同种类蓝藻诱导的细胞内生物矿化进行研究, 发现一些蓝藻细胞内部可以形成无定形碳酸钙, 细胞内无定形碳酸钙的稳定是一种活跃的机制[17]。Li 等人从受重金属污染的土壤中分离出来一株新型原核细菌, 经过研究发现细胞内部存在不溶性碳酸锰(MnCO₃) [18], 这表明细胞内矿物的产生实际上是相当常见的。闫华晓等人采用枯草芽孢杆菌 *Bacillus subtilis* Daniel-1 研究了细胞外、细胞表面和细胞内生物矿化, 发现胞内和胞外矿化可以同时发生, 同时产生矿物, 具有协同作用[19]。

3. 生物矿化的影响因素

3.1. 温度的影响

与酶相关的生物矿化机制高度依赖于其环境的温度, 由于细菌对温度也很敏感, 因此温度对于微生物诱导的矿化在生态系统中的应用是至关重要的。多项研究表明, 从细菌活性的角度来看, 在 30℃ 和 35℃ 之间的温度范围会使细菌的活性更高, 从而加快生物矿化的速度[20] [21] [22] [23]。在较低的或较高的温度下, 由于活性位点结构的损失, 酶对底物的亲和力显著降低, 会导致催化作用的速率降低[24]。因此, 低温或高温不利于微生物矿化过程。

3.2. pH 的影响

大多数细菌对于 pH 的范围有一定的要求, pH 过高或者过低会对细菌的生长造成一定的影响。同时张浩男等发现不同 pH 值下产生矿物的数量、大小和外观形貌也有所不同[25]。因为每种酶在其最适 pH 值下产生的酶活性值也会最高, pH 值过高或者过低会导致酶活性会下降, 甚至可能会出现酶活性变性或失活。研究表明, 方解石沉淀需要在碱性环境下产生, 因此当环境中 pH 大于 7, 有利于微生物诱导矿物沉淀的进行。但是, 当达到金属离子的在环境中发生微沉淀的最高 pH 值时, 环境中的金属离子将以不溶解的氢氧化物和氧化物的形式存在于环境中, 从而导致微生物无法将金属离子吸附在细胞表面或者

EPS 上, 生物矿化也就无法进行[26]。

3.3. 环境中金属离子浓度的影响

金属离子的浓度过低会降低微生物诱导矿物沉淀的速度以及矿物的产量, 浓度过高会抑制酶的活性、阻碍金属离子与细胞表面及 EPS 上的吸附结合[27], 甚至会直接导致微生物不能在环境中存活, 对生物矿化效率产生负面影响。环境中会存在较多种类金属离子, 因此会涉及到哪种金属离子会优先发生矿化反应, 这与离子的种类以及浓度有很大的关系[26]。例如钙镁离子共存的情况下, 一般会优先矿化钙离子, 随着镁离子的浓度升高, 镁离子会逐渐进入到矿物中去, 形成富镁方解石, 并且镁离子会导致碳酸钙矿物的结晶度降低, 钙离子的矿化速度降低以及生成碳酸钙沉淀量减少。

3.4. 环境中营养物质的影响

由于 EPS 为金属离子的生物矿化提供成核位点, 而 EPS 中的多糖、蛋白质浓度的高低受营养物质的供应水平的影响, 因此营养物质的供应水平的高低会直接影响生物矿物的结晶速率[28]。研究表明, 相同的细菌在不同的培养基中产生的矿物沉淀量不同, 因此环境中的营养物质会影响微生物的生物矿化过程。

4. 生物矿化的应用

4.1. 在环境方面的应用

4.1.1. 金属离子的去除

近年来, 生物矿化被引入到去除金属离子的环境治理领域, 在污染区域加入微生物使污染区域中的金属离子从可溶形式转化为不溶形式[29], 经过沉淀后去除环境中的金属离子。Warren 等人经过研究发现应用巴氏杀菌链球菌的微生物诱导方解石沉淀, 联合固相捕获镉离子是非常有效的, 在 24 小时内可以捕获 95% 的镉离子[30]。钙是生产碳酸钠的工业中释放的矿物质之一, 并且在废水处理中高浓度钙在管道沉积会造成管道堵塞。Hammes 等人研究了微生物诱导碳酸钙沉淀从工业废水中去除钙离子的潜力, 检测结果表明成功去除废水中高达 90% 的钙离子[31]。闫华晓等人采用活性炭对 *Lysinibacillus fusiformis* DB1-3 菌进行固定后, 用于废水中钙、镁离子的生物矿化, 结果表明, 钙、镁离子的去除率可达到 90% 和 70% 以上[15]。

4.1.2. 封存大气中二氧化碳

当前气候变化的主要原因之一是大气中二氧化碳的浓度增加, 研究人员正致力于以一种安全的方式捕获和处理产生的二氧化碳, 即二氧化碳封存。该方法包括将二氧化碳以方解石、镁方解石、白云石等碳酸盐矿物的形式固定, 由于碳酸盐矿物环境友好并且比较稳定, 属于一种安全永久的处置方法[32]。庄定祥等人认为细菌可以产生碳酸酐酶, 在该酶存在的情况下, 可以催化二氧化碳的水合作用进而产生大量的 CO_3^{2-} 和 HCO_3^- , 使溶液的 pH 值和碳酸盐矿物的过饱和度得到提高, 使碳酸盐矿物发生矿化形成沉淀, 实现二氧化碳的封存[6]。

4.2. 在材料方面的应用

经过生物矿化作用合成的纳米材料具有粒径较小、稳定性较强、成本较低、生物相容性好、清洁环保等特点, 因此利用生物矿化过程来进行生物合成无机纳米材料成为近年来科学家们的研究热点, 其在材料合成领域中具有广泛的应用潜力。刘闯利用醋酸杆菌经过生物矿化合成了细菌纤维素-Ag/AgCl 纳米复合材料, 经过研究发现其具有良好的抗菌效果, 为采用生物矿化合成抗菌材料奠定了一定的基础[33]。除此之外, 研究人员以细菌为模板根据需求合成具有疏松孔隙的材料, 具体步骤为细菌表面胞外大分子有机质与无机离子发生相互作用, 使得细菌表面发生矿化作用, 产生沉淀, 细菌菌丝之间通过凝胶作用

形成疏松的多孔结构,然后将多孔结构进行多次复制,最后将细菌有机体进行高温分解,即可得到无定形或含规则孔道的多孔材料[34]。

4.3. 在建筑方面的应用

现代建筑的墙体多采用砖石材料与灰泥粘合在一起,随着时间的变化和外界条件的腐蚀和风化,砂浆的强度明显下降,对整个建筑影响很大。采用生物矿化修复建筑物,可最大限度地保持其原貌,修复效果较好,修复区域较均匀,而且具有清洁环保等特性[35]。何建宏等采用微生物矿化技术对汉白玉石梁裂缝进行粘结修复,通过技术手段来评价修复后的效果,结果表明,汉白玉石梁的裂缝经过矿化修复后呈现出比较光滑的表面,整体较为和谐美观,达到了良好的修复效果[36]。目前基于矿化形成的微生物水泥已成功应用于建筑等多个方面,对于砂土等建筑材料具有很好的加固效果[37]。微生物水泥具有粒径较小,粘度较低等特点,能更好地渗透到多孔疏松的建筑材料中,对建筑材料中的裂缝和孔隙进行封闭以及对混凝土中的裂纹进行修复等[38]。

4.4. 在生物医药方面的应用

基于生物矿化的骨或牙齿等相关临床生物医学材料的开发在生物医学方面的得到很好的应用。骨是一种具有分层结构的复合性生物医学材料,其组成成分为生物矿物(如羟基磷灰石)和蛋白质,具有良好的力学性能和结构性能,在生物医学材料方面的应用中,骨材料的合成一直被用于治疗各种骨缺损的研究[39]。钙基矿物作为药物、蛋白质和其他生物活性化合物的载体也被广泛研究。由于羟基磷灰石和碳酸盐矿物具有疏松多孔、生物相容性好以及可生物降解等多种优点[40],医学上经常通过其传递抗炎药物或合成骨生物活性化合物来治愈骨缺陷等疾病。Yang 等人研究了一种 L-赖氨酸(Lys)介导的生物矿化方法,采用 CO₂ 鼓泡法进行绿色、简单和快速地制备基于碳酸钙矿物的药物传输系统(DDS),该系统具有良好的载药能力,细胞毒性低,生物相容性好等优点[41]。

5. 总结与展望

近年来,关于生物矿化的研究主要分为野外实地考察和实验室模拟研究两个方面,野地实地考察主要是观测自然界中经过生物矿化作用和自然风化后形成的岩石形貌和采集一些具有代表性的样品;实验室模拟主要是对采集回来的样品进行研究分析,并且模拟生物经过生物矿化形成矿物的过程,探索生物矿化的机理及影响因素。目前,研究学者已经初步探索出一部分生物矿化机制及部分生物的最适矿化条件,并逐渐运用到多个方面,主要包括:① 将环境中的游离的金属离子与阴离子相结合,将金属离子以固态矿物的形式沉淀出来,达到治理和修复环境的目的。② 将大气中的二氧化碳经过生物的调控及化学反应以矿物的形式封存,减少温室效应。③ 清洁环保的合成性能优良的生物结构材料。④ 修复建筑和历史古迹,增强建筑材料的强度和硬度。⑤ 在生物医学材料及药物研发方面具有较高的应用潜力。

当然,对于生物矿化的研究还有很多问题需要进一步解决:① 进一步研究不同生物矿化的机制。虽然现在已经解释了一部分矿化的机制,但是还不够深入,尤其是对胞内矿化和胞外矿化的协同作用研究,而且对于同一个生物矿化的过程可能存在多种机理共同作用。② 生物矿化的研究涉及到多个学科,属于多个领域的交叉学科,因此其应用潜力是巨大的,目前还需要探索出更多领域的应用,使生物矿化可以发挥出更大的作用。

基金项目

国家自然科学基金项目(41772095, 42072136, 41972108),山东省自然科学基金面上项目(ZR2019MD027),山东省重大科技创新工程项目(2019JZZY020808),海藻活性物质国家重点实验室开放基金项目(SKL-

BASS1722)。

参考文献

- [1] 黄磊, 杨永强, 李金洪. 生物矿化研究现状和展望[J]. 地质与资源, 2009, 18(4): 317-320+297.
- [2] Murtala, U., Khairul, A.K. and Kenny, T.P.C. (2016) Biological Process of Soil Improvement in Civil Engineering: A Review. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, **8**, 767-774. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2016.02.004>
- [3] 季斌, 陈威, 樊杰, 宋宏娇, 魏桃员. 产脲酶微生物诱导钙沉淀及其工程应用研究进展[J]. 南京大学学报(自然科学), 2017, 53(1): 191-198.
- [4] Willem, D.M., Nele, D.B. and Willy, V. (2009) Microbial Carbonate Precipitation in Construction Materials: A Review. *Ecological Engineering*, **36**, 118-136. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2009.02.006>
- [5] Zhuang, D., Yan, H., Tucker, M.E., et al. (2018) Calcite Precipitation Induced by *Bacillus cereus* MRR2 Cultured at Different Ca^{2+} Concentrations: Further Insights into Biotic and Abiotic Calcite. *Chemical Geology*, **500**, 64-87. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2018.09.018>
- [6] 李为, 刘丽萍, 曹龙, 余龙江. 碳酸盐生物沉积作用的研究现状与展望[J]. 地球科学进展, 2009, 24(6): 597-605.
- [7] Dhama, N.K., Reddy, M.S. and Mukherjee, A. (2013) Biomineralization of Calcium Carbonate Polymorphs by the Bacterial Strains Isolated from Calcareous Sites. *Journal of Microbiology and Biotechnology*, **23**, 707-714. <https://doi.org/10.4014/jmb.1212.11087>
- [8] Armstrong, I.O., Ghazaleh, K., Nurnajwani, S., et al. (2017) Experimental Optimisation of Various Cultural Conditions on Urease Activity for Isolated *Sporosarcina pasteurii* Strains and Evaluation of Their Biocement Potentials. *Ecological Engineering*, **109**, 65-75. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.09.012>
- [9] Hannah, S. and Samuel, I.S. (2015) Cellular Response to Zinc-Containing Organoapatite: An *in Vitro* Study of Proliferation, Alkaline Phosphatase Activity and Biomineralization. *Biomaterials*, **26**, 5492-5499. <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2005.01.043>
- [10] Han, Z., Wang, J., Zhao, H., et al. (2019) Mechanism of Biomineralization Induced by *Bacillus subtilis* J2 and Characteristics of the Biominerals. *Minerals*, **9**, 218. <https://doi.org/10.3390/min9040218>
- [11] Han, Z., Guo, N., Yan, H., et al. (2021) Recovery of Phosphate, Magnesium and Ammonium from Eutrophic Water by Struvite Biomineralization through Free and Immobilized *Bacillus cereus* MRR2. *Journal of Cleaner Production*, **320**, Article ID: 128796. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128796>
- [12] Pan, J., Zhao, H., Tucker, M.E., et al. (2019) Biomineralization of Monohydrocalcite Induced by the Halophile *Halomonas smyrnensis* WMS-3. *Minerals*, **9**, 632. <https://doi.org/10.3390/min9100632>
- [13] Zhao, Y., Han, Z., Yan, H., et al. (2019) Intracellular and Extracellular Biomineralization Induced by *Klebsiella pneumoniae* LH1 Isolated from Dolomites. *Geomicrobiology Journal*, **37**, 262-278. <https://doi.org/10.1080/01490451.2019.1695023>
- [14] Han, Z., Yu, W., Zhao, H., et al. (2018) The Significant Roles of Mg/Ca Ratio, Cl^- and SO_4^{2-} in Carbonate Mineral Precipitation by the Halophile *Staphylococcus epidermidis* Y2. *Minerals*, **8**, 594. <https://doi.org/10.3390/min8120594>
- [15] Yan, H., Han, Z., Zhao, H., et al. (2020) The Bio-Precipitation of Calcium and Magnesium Ions by Free and Immobilized *Lysinibacillus fusiformis* DB1-3 in the Wastewater. *Journal of Cleaner Production*, **252**, Article ID: 119826. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119826>
- [16] Yuya, O., Ryota, A. and Hiroaki, I. (2012) Self-Organization of Hollow-Cone Carbonate Crystals through Molecular Control with an Acid Organic Polymer. *Polymer Journal*, **44**, 612-619. <https://doi.org/10.1038/pj.2012.29>
- [17] Benzerara, K., Skouri-Panet, F., Li, J., et al. (2014) Intracellular Ca-Carbonate Biomineralization Is Widespread in Cyanobacteria. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **111**, 10933-10938. <https://doi.org/10.1073/pnas.1403510111>
- [18] Li, D., Li, R., Ding, Z., Ruan, X., Luo, J., Chen, J., Zheng, J. and Tang, J. (2020) Discovery of a Novel Native Bacterium of *Providencia* sp. with High Biosorption and Oxidation Ability of Manganese for Bioleaching of Heavy Metal Contaminated Soils. *Chemosphere*, **241**, Article ID: 125039. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.125039>
- [19] Yan, H., Owusu, D.C., Han, Z., Zhao, H., et al. (2021) Extracellular, Surface, and Intracellular Biomineralization of *Bacillus subtilis* Daniel-1 Bacteria. *Geomicrobiology Journal*, **38**, 698-708. <https://doi.org/10.1080/01490451.2021.1937406>
- [20] Krajewska, B. (2018) Urease-Aided Calcium Carbonate Mineralization for Engineering Applications: A Review. *Journal of Advanced Research*, **13**, 59-67. <https://doi.org/10.1016/j.jare.2017.10.009>

- [21] Castro, A.M.J., Montañez, H.L.E., Sanchez, M.M.A., *et al.* (2019) Microbially Induced Calcium Carbonate Precipitation (MICP) and Its Potential in Bioconcrete: Microbiological and Molecular Concepts. *Frontiers in Materials*, **6**, 126.
- [22] Anbu, P., Kang, C.-H., Shin, Y.-J. and So, J.-S. (2016) Formations of Calcium Carbonate Minerals by Bacteria and Its Multiple Applications. *SpringerPlus*, **5**, 250. <https://doi.org/10.1186/s40064-016-1869-2>
- [23] Pahala, G.N.N., Anjula, B.N.D., Kazunori, N. and Satoru, K. (2019) Microbial Induced Carbonate Precipitation Using a Native Inland Bacterium for Beach Sand Stabilization in Nearshore Areas. *Applied Sciences*, **9**, 3201. <https://doi.org/10.3390/app9153201>
- [24] Rajasekar, A., Wilkinson, S. and Moy, C.K.S. (2021) MICP as a Potential Sustainable Technique to Treat or Entrap Contaminants in the Natural Environment: A Review. *Environmental Science and Ecotechnology*, **6**, Article ID: 100096. <https://doi.org/10.1016/j.ese.2021.100096>
- [25] 张浩男. 微生物诱导碳酸钙沉淀技术的砂土固化实验研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国地质大学, 2019.
- [26] 方义, 刘继伟, 谷庆宝, 彭昌盛. 生物矿化在环境保护方面的应用[J]. 硅酸盐通报, 2017, 36(4): 1209-1215+1233. <https://doi.org/10.16552/j.cnki.issn1001-1625.2017.04.019>
- [27] 李成杰. 产脲酶菌诱导碳酸钙沉积及对重金属 Cd^{2+}/Pb^{2+} 的去除研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 武汉科技大学, 2018.
- [28] 刘健. 微生物分泌多糖/蛋白质在针铁矿生物矿化中的调制作用探究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 武汉理工大学, 2006.
- [29] Kumari, D., Qian, X.-Y., Pan, X., Achal, V., Li, Q. and Gadd, G.M. (2016) Microbially-Induced Carbonate Precipitation for Immobilization of Toxic Metals. *Advances in Applied Microbiology*, **94**, 79-108. <https://doi.org/10.1016/bs.aams.2015.12.002>
- [30] Warren, L.A., Maurice, P.A., Parmar, N. and Ferris, F.G. (2001) Microbially Mediated Calcium Carbonate Precipitation: Implications for Interpreting Calcite Precipitation and for Solid-Phase Capture of Inorganic Contaminants. *Geomicrobiology Journal*, **18**, 93-115. <https://doi.org/10.1080/01490450151079833>
- [31] Hammes, F., Boon, N., de, V.J., Verstraete, W. and Siciliano, S.D. (2003) Strain-Specific Ureolytic Microbial Calcium Carbonate Precipitation. *Applied and Environmental Microbiology*, **69**, 4901-4909. <https://doi.org/10.1128/AEM.69.8.4901-4909.2003>
- [32] Dhami, N.K., Reddy, M.S. and Mukherjee, A. (2013) Biomineralization of Calcium Carbonates and Their Engineered Applications: A Review. *Frontiers in Microbiology*, **4**, 314. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2013.00314>
- [33] 刘闯. 基于生物矿化原理的纳米复合材料制备及其应用研究[D]: [硕士学位论文]. 天津: 天津大学, 2013.
- [34] 王旭萍, 宋佳, 崔静洁. 多孔材料的生物合成研究进展[J]. 生物加工过程, 2019, 17(6): 597-603.
- [35] 王巍智. 生物矿化修复近现代建筑灰浆试验研究[D]: [硕士学位论文]. 开封: 河南大学, 2020. <https://doi.org/10.27114/d.cnki.ghnau.2020.000905>
- [36] 何建宏, 郭红仙, 谭谦, 程晓辉. 微生物诱导碳酸钙修复汉白玉石梁裂缝试验研究[J]. 文物保护与考古科学, 2019, 31(6): 46-53. <https://doi.org/10.16334/j.cnki.cn31-1652/k.2019.06.006>
- [37] Leong, S.W. (2015) Microbial Cementation of Ureolytic Bacteria from the Genus *Bacillus*: A Review of the Bacterial Application on Cement-Based Materials for Cleaner Production. *Journal of Cleaner Production*, **93**, 5-17. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.01.019>
- [38] Carla, R.M.P., Carolyn, F., Carlos, C.M., *et al.* (2020) Microbiologically Induced Calcite Precipitation Biocementation, Green Alternative for Roads—Is This the Breakthrough? A Critical Review. *Journal of Cleaner Production*, **262**, Article ID: 121372. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121372>
- [39] Sungjin, K. and Chan, B. (2013) Bio-Inspired Synthesis of Minerals for Energy, Environment, and Medicinal Applications. *Advanced Functional Materials*, **23**, 10-25. <https://doi.org/10.1002/adfm.201201994>
- [40] Keishiro, T., Hidehiko, A., Takatomo, N. and Kimiko, M. (2010) Hydroxyapatite Particles as Drug Carriers for Proteins. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, **76**, 226-235. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2009.10.039>
- [41] Yang, T., Ao, Y., Feng, J., Wang, C. and Zhang, J. (2021) Biomineralization Inspired Synthesis of $CaCO_3$ -Based DDS for pH-Responsive Release of Anticancer Drug. *Materials Today Communications*, **27**, Article ID: 102256. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2021.102256>