

# 基于 MICP 的巴氏生孢八叠球菌固定 $Cd^{2+}$ 、 $Pb^{2+}$ 和 $Cr^{3+}$ 的研究

伍婧妍, 梁艳\*, 陶虹秀, 罗秋雨

(广西大学资源环境与材料学院, 广西南宁 530004)

**摘要:** 本文探究了初始 pH、温度、尿素浓度等因素对巴氏生孢八叠球菌固定重金属  $Cd^{2+}$ 、 $Pb^{2+}$  和  $Cr^{3+}$  的影响, 并解析了巴氏生孢八叠球菌固定重金属的方式。结果表明, 在培养时间为 48 h、培养温度为 30°C、初始培养基 pH 为 8.0、尿素浓度为 1 mol/L 的条件下, 巴氏生孢八叠球菌对  $Cd^{2+}$ 、 $Pb^{2+}$  和  $Cr^{3+}$  三种重金属的固定效果均最佳。尿素和巴氏生孢八叠球菌的生长代谢均会使环境 pH 升高, 分别导致了 0.08%~8.95% 和 1.03%~10.42% 的重金属离子发生碱性沉淀。微生物诱导的碳酸钙沉淀 (MICP) 为最主要固定方式, 其固定率最高达到 60.79% ( $Cd^{2+}$ )、61.92% ( $Pb^{2+}$ ) 和 23.07% ( $Cr^{3+}$ )。

**关键词:** 重金属; 微生物诱导的碳酸钙沉淀; 巴氏生孢八叠球菌; 固化

中图分类号: X53

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2025)04-0160-07

DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2025.04.028

## Study on fixation of $Cd^{2+}$ , $Pb^{2+}$ and $Cr^{3+}$ by MICP-based *Sporosarcina pasteurii*

WU Jing-yan, LIANG Yan\*, TAO Hong-xiu, LUO Qiu-yu

(School of Resources, Environment and Materials, Guangxi University, Nanning 530004, China)

**Abstract:** This study examines the influences of initial pH, temperature, and urea concentration on the fixation of heavy metals ( $Cd^{2+}$ ,  $Pb^{2+}$ , and  $Cr^{3+}$ ) by *Paenibacillus pasteurii*, along with an analysis of the underlying fixation mechanism. Results indicate that the immobilization effects of  $Cd^{2+}$ ,  $Pb^{2+}$ , and  $Cr^{3+}$  by *Paenibacillus pasteurii* are all achieved under the conditions including 48 hours of incubation, 30°C, an initial medium pH of 8.0 and a urea concentration of 1 mol·L<sup>-1</sup>. The environmental pH is elevated by both the presence of urea and the metabolic activities of *Paenibacillus pasteurii*, leading to that 0.08%–8.95% and 1.03%–10.42% of the heavy metal ions, respectively form alkaline precipitation. Microbially induced calcium carbonate precipitation (MICP) emerges as the dominant fixation pathway, with the maximum fixation rate of 60.79% for  $Cd^{2+}$ , 61.92% for  $Pb^{2+}$ , and 23.07% for  $Cr^{3+}$ .

**Key words:** heavy metal; microbially induced calcium carbonate precipitation; *sporosarcina pasteurii*; fixation

随着全球工业化和城市化的加速推进, 我国土壤污染问题日益严重, 其中重金属污染尤为突出<sup>[1]</sup>, 已成为当前我国面临的重要环境问题之一, 对生态环境和人类健康构成严重威胁<sup>[2]</sup>。因此, 寻求绿色环保、经济高效的重金属治理技术具有重要的理论和实际意义。

微生物诱导的碳酸钙沉淀法 (Microbially Induced Calcium Carbonate Precipitation, MICP) 作为一种碳酸盐的生物诱导矿化作用<sup>[3]</sup>, 在海水和沉积物、淡水和土壤的各种环境中十分常见<sup>[4]</sup>, 也是地球化学循环的基本组成部分。MICP 技术因其简便的操作流程、低廉的成本以及对环境的温和影响等优势<sup>[5]</sup>, 正逐步应用于混凝土裂缝修补与强度优化<sup>[6-7]</sup>、土壤修复<sup>[8]</sup>等领域。MICP 技术通过将重金

属离子转化为稳定的碳酸盐沉淀, 减少其在环境中的生物可用性, 以降低重金属的生物利用度和环境污染<sup>[9]</sup>。利用巴氏芽孢八叠球菌诱导碳酸钙沉积分别修复被 Cu、Pb<sup>[10]</sup>、Cd、As<sup>[11]</sup>、Mn 和 Cr<sup>[12]</sup> 污染的土壤, 不仅证明了 MICP 技术用于吸附和固定重金属离子的实用性和效率, 还提供了一种绿色、可持续的土壤污染治理新思路。然而目前将 MICP 技术应用到污染物处理主要为将 MICP 与生物炭等有机材料或氧化镁等无机材料结合后对各种重金属进行固化的研究<sup>[13-14]</sup>, 以及利用从污染场地筛选出的可以进行 MICP 的菌种对特定的污染物进行去除。然而, 对于已知的高产脲酶菌株在固定多种重金属方面的综合性能比较研究尚显不足, 这些菌株虽然各自拥有独特的产脲酶能力和固定重金属潜力, 但对

收稿日期: 2024-11-26; 修回日期: 2025-02-08

基金项目: 广西重点研发计划项目 (桂科 AB23075157); 广西自然科学基金 (2023GXNSFAA026386)

作者简介: 伍婧妍 (1999-), 女, 硕士生, 研究方向为土壤污染治理, 463729520@qq.com; 梁艳 (1983-), 女, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为污染物环境行为及环境修复, 通讯联系人, liangyan@gxu.edu.cn。

其在面对复杂多变的污染环境时的实际表现以及能够发挥最佳效果的最优条件的探索均有待深入。同时,关于这些菌株在实验条件下固定重金属的具体机制和作用方式目前缺乏系统性的探索。

巴氏生孢八叠球菌(*Sporosarcina pasteurii*)原名巴氏芽孢杆菌<sup>[15]</sup>,是一种高产脲酶的嗜碱性微生物<sup>[16]</sup>。其优异的耐高温性能尤为突出,能够在相对极端的温度条件下保持生命活力与代谢功能,这对于工业应用及环境修复领域是一大优势。此外,巴氏生孢八叠球菌还具备对抗多种环境干扰因素的强抵抗力<sup>[17]</sup>,包括化学污染、物理胁迫等,这使其能够在复杂多变的环境中稳定生存并发挥功能。其良好的环境适应能力则进一步拓宽了其潜在的应用范围,无论是在极端自然环境下的生态修复,还是在人为污染区域的治理中,都展现出了广阔的应用前景。笔者通过系统地改变巴氏生孢八叠球菌在固定Cd<sup>2+</sup>/Pb<sup>2+</sup>/Cr<sup>3+</sup>三种不同的重金属时的物理化学因素,探究不同因素对该菌固定重金属效果的影响及其固定重金属的方式。通过研究巴氏生孢八叠球菌在MICP过程中的作用方式,深入了解MICP在固定重金属过程中的贡献。

## 1 材料与方法

### 1.1 菌种的来源、活化与保存

巴氏生孢八叠球菌购自中国典型培养物保藏中心(CCTCC),其保存编号为AB 2018381。该菌为杆状细胞,长度约2~3 μm,如图1所示,这一微小的尺寸使得其能够轻松穿透土壤颗粒间的微小空隙,与水溶液中的重金属离子进行充分接触。而高效的接触机会,加之其高产脲酶的代谢特性,使得巴氏生孢八叠球菌能够在重金属污染的土壤和水体中迅速发挥作用。

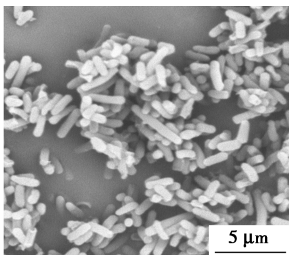


图1 巴氏生孢八叠球菌的扫描电子显微镜图

从CCTCC购得的巴氏生孢八叠球菌为微生物冻干粉,在无菌环境中对安瓿进行开封,再用巴斯吸管吸取适量已经配好的液体培养基,充分溶解冻干菌粉。将混合液吸出,分别接种于液体培养基与斜

面培养基中。冷却放置5~10 min后,于30℃恒温培养箱中培养,培养基成分及培养条件如表1所示。经72 h培养后成功在斜面培养基上长出菌斑,再将其接种至液体培养基中,经48 h恒温震荡后成功培养出OD<sub>600</sub>高于0.4的菌液。

表1 培养基成分

名称	液体培养基	固体培养基
蛋白胨	5.0 g	5.0 g
牛肉浸膏	3.0 g	3.0 g
尿素	30.0 g	30.0 g
琼脂	—	15.0 g
去离子水	1.0 L	1.0 L

为防止在研究过程中巴氏生孢八叠球菌出现意外死亡或发生非预期的遗传变异,长期维持其遗传稳定性和生理活性,需对菌株进行保存。通过平板划线法在固体培养基上进行接种,再将培养基置于适宜的温度和湿度条件下进行培养,直至培养基表面长出清晰可见、形态一致的菌落,当培养基上的菌落达到理想的数量和形态时,应立即使用封口膜对培养基进行密封,于5℃冰箱中进行冷藏保存。在冷藏保存期间,应定期检查培养基的状态,确保封口膜完好无损,且菌落形态与活性保持稳定。若发现培养基表面有污染迹象或菌落形态发生变化,应立即采取措施进行处理,以避免对后续研究造成不良影响。

### 1.2 重金属的固定

取0.5 mL菌液接种于液体培养基中,在30℃、180 r/min的条件下利用恒温气浴振荡器对菌液进行48 h的培养。

选用硝酸钙与已加入适量牛肉膏与蛋白胨的液体培养基混合,再用NaOH与H<sub>2</sub>NO<sub>3</sub>将培养基调整至设定的pH(分别为5、6、7、8、9、10)。将尿素、氯化铬、氯化镉和硝酸铅分别与去离子水混合,形成铬、镉、铅离子溶液以及尿素溶液。再将液体培养基、重金属离子溶液和尿素溶液混合。混合液中,尿素浓度设置为0、0.5、1、1.5、2 mol/L,重金属离子质量浓度为50、100、200、400、800 mg/L,钙离子浓度为0、0.5 mol/L。对液体培养基用高温蒸汽灭菌锅在121℃下灭菌20 min,为了防止高温导致尿素的分解和对重金属离子的不利影响,采用孔径为0.22 μm的无菌微孔滤器对尿素溶液和含有重金属离子的溶液进行过滤,以达到灭菌效果。在无菌环境中向混合好的培养基中接种经48 h培养后的菌

液 0.5 mL, 接种后在恒温气浴振荡器中以指定的培养温度(20、25、30、35、40℃)和 180 r/min 的震荡条件下进行培养。

### 1.3 样品的表征与分析方法

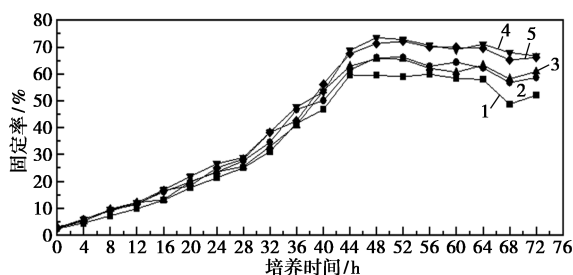
利用可见光分光光度计对菌液的  $OD_{600}$  进行检测; 利用电子扫描显微镜(SEM)对细菌形态结构进行表征; 培养周期结束后, 取混合液于离心管中, 置于高速离心机以 8 000 r/min 的转速离心 5 min, 结束后取 1 mL 上清液于离心管内, 用 5% 的硝酸稀释至一定倍数后, 利用原子吸收分光光度计对重金属浓度进行精确测定。

## 2 结果与分析

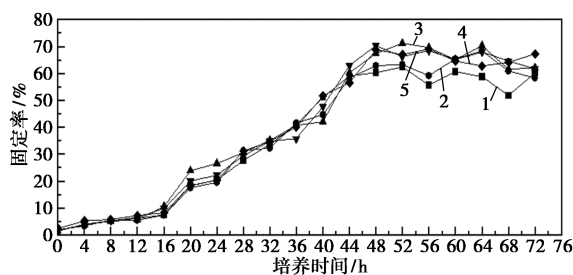
### 2.1 不同因素对重金属固定效果的影响

#### 2.1.1 培养时间

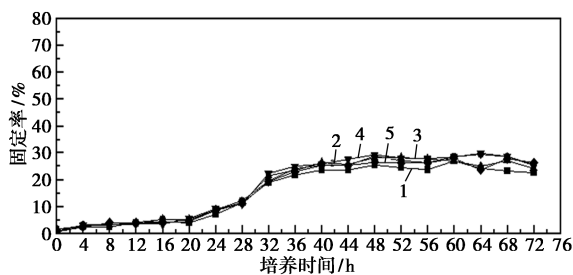
培养时间对重金属固定率的影响如图 2 所示。由图 2 可知, 巴氏生孢八叠球菌在 0~20 h 内对 3 种



(a) 培养时间对  $Pb^{2+}$  固定率的影响



(b) 培养时间对  $Cd^{2+}$  固定率的影响



(c) 培养时间对  $Cr^{3+}$  固定率的影响

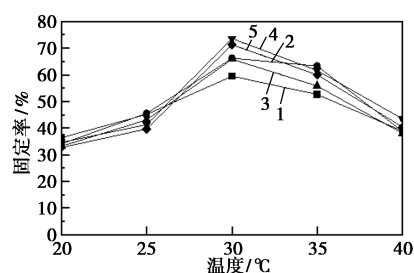
1—50 mg/L; 2—100 mg/L; 3—200 mg/L;  
4—400 mg/L; 5—800 mg/L

图 2 培养时间对重金属固定率的影响

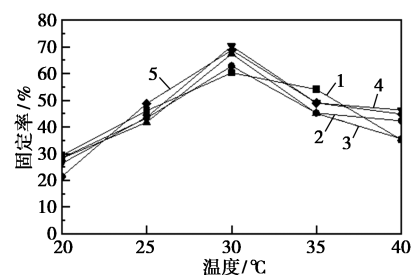
重金属的固定效率缓慢上升; 在 20~48 h 的时间内, 该菌对重金属的去除效率显著提升, 固定率在该时段内增加了 21.49%~52.87%。其中, 该菌对  $Cd^{2+}$  和  $Pb^{2+}$  的固定率最高可达 70%, 但对  $Cr^{3+}$  的固定率仅为 25%。这一差异与巴氏生孢八叠球菌对  $Cr^{3+}$  的耐受性较差有关; 超过 48 h 后, 对 3 种重金属的固定率几乎停止增长, 甚至略有下降, 这是由于培养时间延长导致培养基环境逐渐不利于微生物生存, 微生物死亡率超过其繁殖速度, 从而影响了其固定重金属的能力。因此, 可以推断巴氏生孢八叠球菌在固定重金属的最适宜培养时长为 48 h。

#### 2.1.2 培养温度

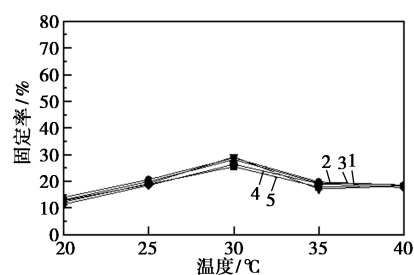
培养温度对重金属固定率的影响如图 3 所示。由图 3 可知, 在其他培养条件(即培养基 pH 为 8.0、尿素浓度为 0.5 mol/L、培养时间为 48 h)保持不变的情况下, 温度对巴氏生孢八叠球菌的培养及其固定重金属的效果影响整体较小。然而, 当温度低于



(a) 温度对  $Pb^{2+}$  固定率的影响



(b) 温度对  $Cd^{2+}$  固定率的影响



(c) 温度对  $Cr^{3+}$  固定率的影响

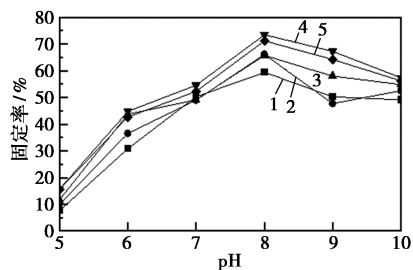
1—50 mg/L; 2—100 mg/L; 3—200 mg/L;  
4—400 mg/L; 5—800 mg/L

图 3 温度对重金属固定率的影响

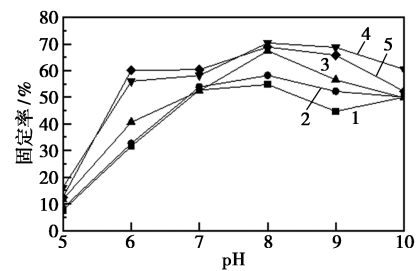
30℃时,随着温度的升高,固定重金属的效果显著提高。这是因为在较低温度下,分子运动较慢,酶与底物的相互作用减少,导致微生物体内的酶催化效率受到抑制<sup>[17]</sup>。在30℃时,巴氏生孢八叠球菌对Cd<sup>2+</sup>、Pb<sup>2+</sup>和Cr<sup>3+</sup>的固定率分别达到59.49%~73.56%、60.29%~70.36%和25.48%~29.23%。这一温度范围为微生物的适宜生长条件,能够保持酶的最佳活性,进而促进代谢活动,如能量生成、细胞合成和繁殖过程<sup>[18]</sup>。在此温度下,微生物能够高效吸收营养物质,加速细胞分裂与生长,从而提高重金属固定效率。当温度超过30℃时,固定效率呈现下降趋势。这是由于超出最佳生长温度后,微生物体内的酶、运输蛋白和其他关键蛋白质发生热变性,结构改变导致活性降低,进而抑制微生物的代谢过程。因此,温度过高对微生物的生长繁殖以及重金属固定效果产生不利影响。因此,巴氏生孢八叠球菌固定重金属的最佳培养温度为30℃左右,这一结论与已有研究结果一致<sup>[19]</sup>,为优化微生物诱导重金属固定的条件提供了科学依据。

### 2.1.3 初始 pH

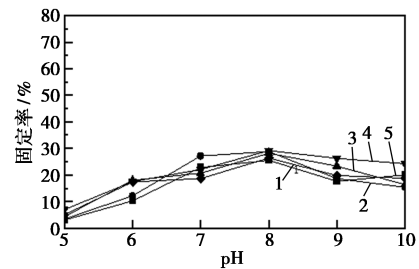
pH对重金属固定率的影响如图4所示。由图4可知,当培养基初始pH为5且接种巴氏生孢八叠球菌后,经过48h的培养,3种重金属的固定率最高仅为20.16%,表明该菌在酸性条件(pH<7)下不适宜进行正常的生命活动;当初始pH为8时,巴氏生孢八叠球菌对重金属的去除能力显著提升。在重金属离子质量浓度为400 mg/L的条件下,其对Pb<sup>2+</sup>、Cd<sup>2+</sup>和Cr<sup>3+</sup>的去除率分别达到了73.56%、70.36%和29.23%;进一步提高培养基的pH至8以上时,重金属的固定效率开始随pH的增加而略有下降,但下降幅度不显著。表明巴氏生孢八叠球菌在偏碱性环境中具有较强的生理活性和代谢能力。pH是影响微生物生长和代谢的重要因素,不同微生物适应的pH范围各不相同。当环境pH处于微生物可耐受范围内时,微生物可以通过消耗ATP来抵消pH波动的负面影响。然而,当pH超出其调节能



(a) pH对Pb<sup>2+</sup>固定率的影响



(b) pH对Cd<sup>2+</sup>固定率的影响



(c) pH对Cr<sup>3+</sup>固定率的影响

1—50 mg/L; 2—100 mg/L; 3—200 mg/L;  
4—400 mg/L; 5—800 mg/L

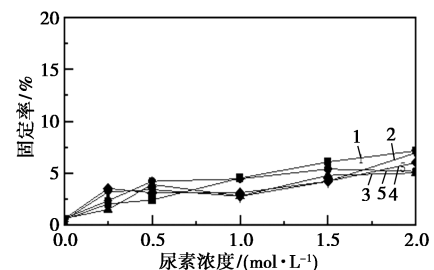
图4 pH对重金属固定率的影响

力时,微生物的细胞结构会受到损害,甚至导致细胞死亡<sup>[16]</sup>。因此,在后续研究中,为了优化巴氏生孢八叠球菌的重金属吸附能力,应将培养基的初始pH设置为8。这一设置不仅能够为其生长提供理想环境,还能显著提高其固定重金属的效率,从而为开发更高效的生物修复技术提供支持。

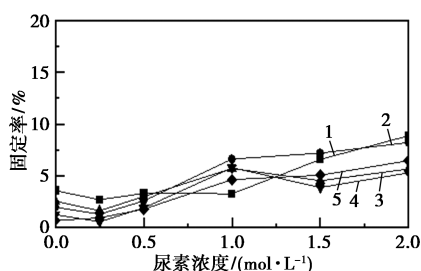
## 2.2 重金属的固定方式

### 2.2.1 巴氏生孢八叠球菌的生长代谢对重金属固定的影响

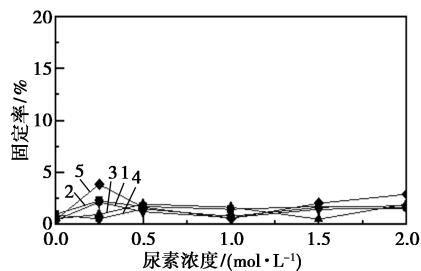
有无Ca<sup>2+</sup>对重金属碱性沉淀的影响如图5所示。由图5(a)~(c)可知,在培养基中含有0.5 mol/L Ca<sup>2+</sup>但未接种巴氏生孢八叠球菌的条件下,少量重金属(最低为0.37%)通过直接沉淀被过滤。随着尿素浓度的增加,3种重金属的沉淀率呈现出略微上升的趋势,但最高值未超过8.95%。这是因为在细菌固定重金属的过程中,尿素分解产生碱性环境,金属盐溶液在此条件下会自发形成沉淀



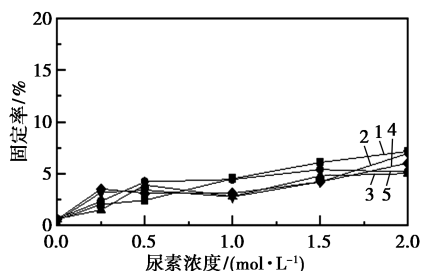
(a) Ca<sup>2+</sup>浓度为0.5 mol/L对Pb<sup>2+</sup>碱性沉淀的影响



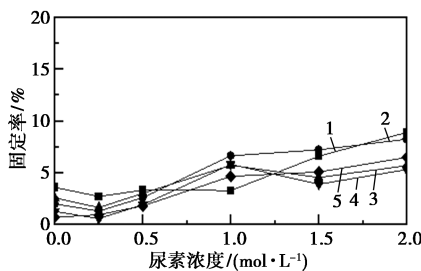
(b)  $\text{Ca}^{2+}$  浓度为 0.5 mol/L 对  $\text{Cd}^{2+}$  碱性沉淀的影响



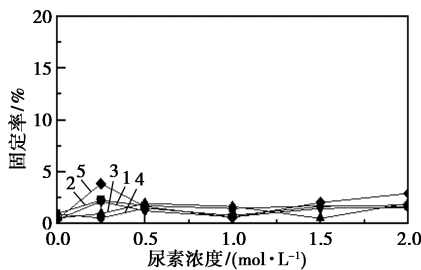
(c)  $\text{Ca}^{2+}$  浓度为 0.5 mol/L 对  $\text{Cr}^{3+}$  碱性沉淀的影响



(d)  $\text{Ca}^{2+}$  浓度为 0 mol/L 对  $\text{Pb}^{2+}$  碱性沉淀的影响



(e)  $\text{Ca}^{2+}$  浓度为 0 mol/L 对  $\text{Cd}^{2+}$  碱性沉淀的影响



(f)  $\text{Ca}^{2+}$  浓度为 0 mol/L 对  $\text{Cr}^{3+}$  碱性沉淀的影响

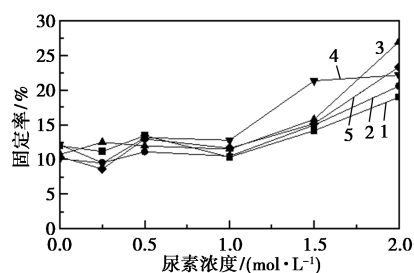
1—50 mg/L; 2—100 mg/L; 3—200 mg/L;  
4—400 mg/L; 5—800 mg/L

图 5 有无  $\text{Ca}^{2+}$  对重金属碱性沉淀的影响

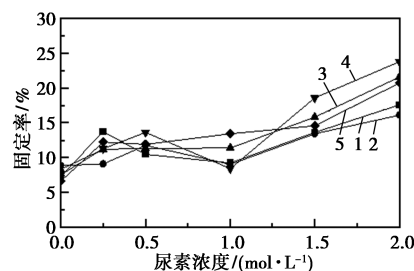
所致。由图 5(d)~(f) 可知, 当培养基中不含  $\text{Ca}^{2+}$  时, 与含  $\text{Ca}^{2+}$  条件相比, 3 种重金属沉淀量的变化均

在  $\pm 0.06\%$  范围内, 完全被误差棒覆盖。表明在未接种巴氏生孢八叠球菌的情况下,  $\text{Ca}^{2+}$  的添加对重金属的沉淀量几乎没有显著影响。

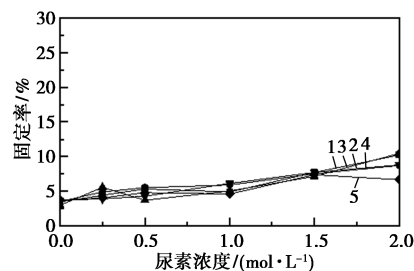
在未提供钙源的情况下, 对含有重金属的培养基进行 48 h 培养后, 巴氏生孢八叠球菌生长代谢过程中对重金属沉淀的影响如图 6 所示。从图 6 中可以看出, 随着尿素浓度的增加, 重金属的沉淀率有所上升, 但总体保持在 1.03%~10.42% 之间。这部分沉淀的增加与巴氏生孢八叠球菌的代谢活动导致溶液 pH 升高有关。巴氏生孢八叠球菌通过其脲酶催化尿素分解, 从而显著提高溶液的 pH。随着尿素浓度的增加, 溶液中的 pH 升高更为明显, 这一变化促进了培养基中的  $\text{CO}_2$  与水反应生成  $\text{CO}_3^{2-}$ , 并进一步与重金属离子反应生成不溶性沉淀, 从而实现重金属的固定。然而, 当尿素浓度过高时, 可能抑制巴氏生孢八叠球菌的正常生长, 导致微生物数量减少, 从而降低脲酶的总量, 最终表现为重金属固定率随尿



(a) 微生物生长代谢对  $\text{Pb}^{2+}$  固定率的影响



(b) 微生物生长代谢对  $\text{Cd}^{2+}$  固定率的影响



(c) 微生物生长代谢对  $\text{Cr}^{3+}$  固定率的影响

1—50 mg/L; 2—100 mg/L; 3—200 mg/L;  
4—400 mg/L; 5—800 mg/L

图 6 微生物生长代谢对重金属固定率的影响

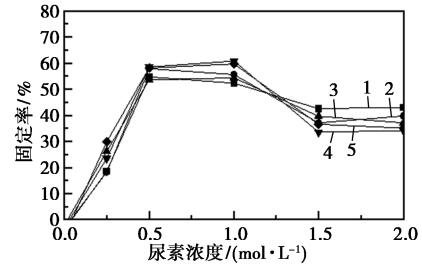
素浓度的增加而略微上升。因此,尿素的适量添加对于通过巴氏生孢八叠球菌实现重金属的高效固定具有重要意义,但过量尿素对菌株的生长产生不利影响,从而限制固定效果的提升。

### 2.2.2 MICP 对重金属固定的贡献率

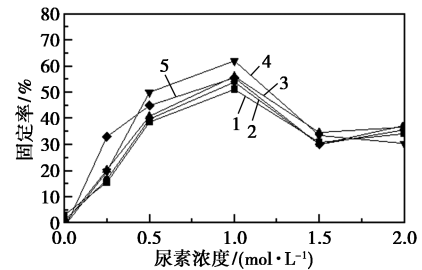
巴氏生孢八叠球菌通过 MICP 固定重金属的核心机制在于脲酶的活性。脲酶通过水解尿素,在短时间内生成大量  $\text{CO}_3^{2-}$ 。与此同时,细菌表面带有负电荷,可吸附  $\text{Ca}^{2+}$  和重金属离子,使碳酸钙沉淀在细菌表面,从而进一步固定重金属。在这一过程中,钙离子的存在至关重要。当培养基中缺乏钙离子时, MICP 无法有效进行,导致重金属固定效率显著下降。

在含有  $0.5 \text{ mol/L Ca}^{2+}$  和不含  $\text{Ca}^{2+}$  培养基中,培养 48 h 后重金属固定率的差值,反映了 MICP 对重金属固定的贡献率,结果如图 7 所示。从图 7 中可以看出,当培养基中不含尿素时, MICP 贡献率为负值,说明此时巴氏生孢八叠球菌对重金属的总固定率低于不含  $\text{Ca}^{2+}$  培养基的固定率。这是由于  $\text{Ca}^{2+}$  的加入占据了培养基中有限的  $\text{CO}_3^{2-}$  结合位点,生成的少量  $\text{CaCO}_3$  对重金属的矿化能力较弱,反而降低了重金属固定效率。当尿素浓度在  $0.5 \sim 1 \text{ mol/L}$  时,随着尿素浓度的增加,重金属固定率显著提高,最大固定率分别达到  $60.79\%$ 、 $61.92\%$  和  $23.07\%$ ,表明尿素浓度低于  $1 \text{ mol/L}$  不会对巴氏生孢八叠球菌的生长产生负面影响,且能有效促进重金属的固定;然而,当尿素浓度超过  $1 \text{ mol/L}$  时,重金属固定率开始下降,固定率分别降低了  $9.81\% \sim 27.21\%$ 、 $20.33\% \sim 28.52\%$  和  $7.76\% \sim 14.56\%$ ;当尿素浓度进一步提高至  $2 \text{ mol/L}$  时,相较于  $1.5 \text{ mol/L}$ ,固定率有所回升。这一现象归因于尿素浓度增加进一步提高了培养基的 pH,增强了重金属的碱性沉淀能力,而这种沉淀效应的增强超过了高尿素浓度对 MICP 效率的负面影响,最终表现为固定率的回升。结合图 5 和图 6 的结果可见,在巴氏生孢八叠球菌固定重金属的过程中, MICP 作用在固定率较高的培养条件下对总沉淀量的贡献达到  $70\% \sim 90\%$ 。 MICP 之所以能在重金属固定方面表现出如此高的效率,很大程度上得益于其在适宜的尿素和  $\text{Ca}^{2+}$  浓度环境下的运作机制。在这种优化条件下,细菌能够充分利用脲酶催化尿素分解产生的氨和二氧化碳,进而促进碳酸钙晶体的形成与沉积。这一过程不仅为重金属离子提供稳定的化学结合位点<sup>[20]</sup>,还通过物理包裹和晶格掺入等方式提升了重金属在环境中的固定效率。

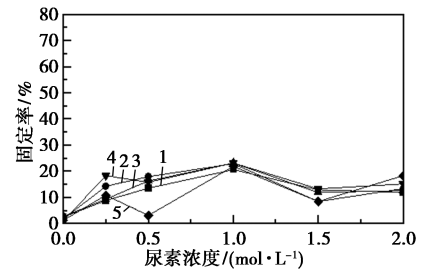
因此,通过调控微生物的生长条件及环境条件,如精确控制尿素和  $\text{Ca}^{2+}$  浓度,可以更有效地利用 MICP 机制来处理受重金属污染的土壤、水体等环境问题,这不仅是对传统污染治理方法的有益补充,更是向绿色、可持续的环境治理策略迈进的重要一步。



(a) MICP 对  $\text{Pb}^{2+}$  的固定率



(b) MICP 对  $\text{Cd}^{2+}$  的固定率



(c) MICP 对  $\text{Cr}^{3+}$  的固定率

1—50 mg/L; 2—100 mg/L; 3—200 mg/L;  
4—400 mg/L; 5—800 mg/L

图 7 MICP 对重金属的固定率

## 3 结论

(1) 巴氏生孢八叠球菌属于偏好碱性环境的细菌,其在碱性条件下生长更为旺盛。在培养时间、温度和初始 pH 方面,最佳培养时间为 48 h,此时固定效率最高,而超过 48 h 后由于培养基环境逐渐不利,固定率有所下降。最佳培养温度为  $30^\circ\text{C}$ ,此时酶活性和代谢效率达到峰值,显著促进了重金属的固定。初始 pH 为 8 是巴氏生孢八叠球菌的最适生长条件,在此条件下菌株表现出最强的固定重金属能力,特别是在偏碱性环境中其代谢活性更为显著。

(2) 重金属的固定机制主要依赖于 MICP 过程中生成的碳酸钙沉淀。研究表明,巴氏生孢八叠球菌通过脲酶分解尿素生成的碳酸根离子,与培养基中的钙离子和重金属离子反应,形成不溶性的碳酸盐沉淀,从而固定重金属。钙离子的存在对于 MICP 过程至关重要,缺乏钙离子会显著降低重金属的固定效率。此外, MICP 过程在最佳培养条件下对重金属沉淀的贡献可达 70%~90%,是实现高效固定的重要机制。

(3) 尿素浓度对固定效率有重要影响。当尿素浓度在 0.5~1 mol/L 时, MICP 效率达到峰值,其中  $\text{Cd}^{2+}$  和  $\text{Pb}^{2+}$  的固定率分别达到 60.79% 和 61.92%,  $\text{Cr}^{3+}$  的固定率为 23.07%。然而,当尿素浓度超过 1 mol/L 时,过高的尿素浓度会抑制微生物生长,导致固定率下降。但尿素浓度增加至 2 mol/L 时,由于培养基 pH 的提升促进了重金属的碱性沉淀,固定率出现回升。

### 参考文献

- [1] 朱雅琪,巫静,余震,等.我国农田土壤重金属污染现状及治理研究进展[J].现代农业科技,2024,(5):115-118,125.
- [2] Wang L, Zhang Q, Liao X, et al. Phytoexclusion of heavy metals using low heavy metal accumulating cultivars: A green technology [J]. Journal of Hazardous Materials, 2021, 413: 125427.
- [3] Ji G, Huan C, Zeng Y, et al. Microbiologically induced calcite precipitation (MICP) in situ remediated heavy metal contamination in sludge nutrient soil [J]. Journal of Hazardous Materials, 2024, 473: 134600.
- [4] 朱纪康,周杨,王殿龙,等.基于微生物诱导矿化的钙质砂加固影响因素[J].地质科技情报,2019,38(6):206-211.
- [5] Xue Z F, Cheng W C, Wang L, et al. Immobilizing lead in aqueous solution and loess soil using microbially induced carbonate/phosphate precipitation (MICP/MIPP) under harsh pH environments [J]. Journal of Hazardous Materials, 2024, 480: 135884.
- [6] Ma L, Pang A P, Luo Y, et al. Beneficial factors for biomineralization by ureolytic bacterium *Sporosarcina pasteurii* [J]. Microbial Cell Factories, 2020, 19(1): 1-12.
- [7] Wiltorf V, Jonkers O H M. Quantification of crack-healing in novel bacteria-based self-healing concrete [J]. Cement and Concrete Composites, 2011, 33(7): 763-770.
- [8] 陈敏洁,李亚飞,李博文,等.微生物诱导碳酸钙沉淀对土壤中 Pb 污染稳定化的效果研究[J].有色金属工程,2020,10(12): 128-134.
- [9] Kumar D, Qianl X Y, Pan X, et al. Chapter two-microbially-induced carbonate precipitation for immobilization of toxic metals [M]. SAR-IASLANI S, GADD G M. Advances in Applied Microbiology, Academic Press, 2016: 79-108.
- [10] 许朝阳,杨贺,黄建璋,等.生物修复  $\text{Cu}^{2+}$ 、 $\text{Pb}^{2+}$  污染土的稳定性 [J].工业建筑,2018,48(7):33-37.
- [11] 蔡倩,李欣武,杨雨婷,等.两种产脲酶细菌固定 Cd-As 复合污染水稻土的研究 [J].农业环境科学学报,2023,42(3):520-528.
- [12] 许朝阳,张贺,杨贺,等. MICP 技术对  $\text{Mn}(\text{II})$ 、 $\text{Cr}(\text{VI})$  污染土壤的修复效果 [J].扬州大学学报(自然科学版),2020,23(2): 73-78.
- [13] Su Y, Qu F, Meng Y, et al. Microbial-induced carbonate precipitation (MICP) modified biochar for low-carbon cementitious materials [J]. Construction and Building Materials, 2024, 451: 138644.
- [14] 宋宇,成继春,陈玉玲,等. MICP 协同氧化镁固化  $\text{Zn}^{2+}$  污染红黏土的效果试验研究 [J/OL]. 土木与环境工程学报(中英文) [2024-10-25]. <https://link.cnki.net/urlid/50.1218.TU.20241024.1443.002>.
- [15] Yoon J H, Lee K C, Weiss N, et al. *Sporosarcina aquimarina* sp. nov., a bacterium isolated from seawater in Korea, and transfer of *Bacillus globisporus* (Larkin and Stokes 1967), *Bacillus psychrophilus* (Nakamura 1984) and *Bacillus pasteurii* (Chester 1898) to the genus *Sporosarcina* as *Sporosarcina globispora* comb. nov., *Sporosarcina psychrophila* comb. nov. and *Sporosarcina pasteurii* comb. nov., and emended description of th [J]. International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology, 2001, 51(3): 1079-1086.
- [16] Morales-Pontet N G, Fernández C, Botté S E. Chromium removal by microbial mats: Understanding the effect of salinity and pH [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2024, 196(8): 686.
- [17] 赵茜.微生物诱导碳酸钙沉淀(MICP)固化土壤实验研究[D].北京:中国地质大学(北京),2014.
- [18] 王乙舒,李圆,侯连刚,等.低温对异养硝化菌 *Acinetobacter* sp. 生长代谢及群体感应影响研究 [J].中国环境科学,2024,44(7): 4063-4070.
- [19] 李焕弟,缴锡云,李江,等.基于 MICP 及 EICP 技术的土壤固化试验研究 [J].灌溉排水学报,2021,40(7):59-65.
- [20] 张海丽,徐品品,冷立健,等.微生物诱导碳酸钙沉积研究与应用 [J].生物学杂志,2020,37(1):86-91. ■

《现代化工》欢迎广大作者踊跃投稿,投稿系统:<http://www.xdhg.com.cn>