

酸性环境下嗜酸氧化亚铁硫杆菌对花岗岩风化作用的研究

姜夏烨¹, 吴柏林², 何环^{2*}, 徐琛琛³, 程瑜¹, 孙强^{3*}

- 1 江苏省海洋地质调查院, 自然资源部滨海盐碱地生态改良与可持续利用工程技术创新中心, 江苏 南京
2 中国矿业大学 化工学院, 煤炭清洁加工与高效洁净利用教育部重点实验室, 江苏 徐州
3 西安科技大学 煤炭绿色开采地质研究院, 陕西 西安

姜夏烨, 吴柏林, 何环, 徐琛琛, 程瑜, 孙强. 酸性环境下嗜酸氧化亚铁硫杆菌对花岗岩风化作用的研究[J]. 微生物学报, 2025, 65(6): 2678-2687.

JIANG Xiaye, WU Bolin, HE Huan, XU Chenchen, CHENG Yu, SUN Qiang. Granite weathering caused by *Acidithiobacillus ferrooxidans* under acidic conditions[J]. Acta Microbiologica Sinica, 2025, 65(6): 2678-2687.

摘要: 【目的】以嗜酸氧化亚铁硫杆菌(*Acidithiobacillus ferrooxidans*)为对象, 探究其在酸性条件下(pH 2.0)对花岗岩的生物风化作用及机制。【方法】通过 36 d 浸泡实验, 对比微生物组、酸水组(pH 2.0, H₂SO₄)及纯培养基对照组, 检测溶液理化参数(pH、Eh、EC)、花岗岩表面色度(CIE-Lab)及矿物溶解特征。【结果】微生物组显著促进花岗岩风化, 9 d 后表面形成明显风化层; 初期(0-3 d)斜长石溶解导致 pH 值升高后趋于稳定, Fe³⁺积累主导氧化还原电位(Eh), 电导率(electrical conductivity, EC)受初始离子背景与风化产物共同调控。生物风化后, 花岗岩 L*值下降 11.6 (亮度降低), a*值和 b*值分别上升 6.8 (红褐色增强)和 9.6 (蓝色调增加), 表面红褐色区域与黄钾铁矾沉淀直接相关。【结论】酸性环境下 *A. ferrooxidans* 通过 Fe³⁺介导的氧化还原反应加速花岗岩风化, 色度参数(ΔL^* 、 Δa^* 、 Δb^*)及形貌特征可作为快速评估风化程度的指标, 为矿山酸性废水引发的围岩风化风险评估及生态修复提供了新依据。

关键词: 生物风化; 花岗岩; 嗜酸氧化亚铁硫杆菌; 色度分析

资助项目: 国家重点研发计划(2023YFF1306003); 2023年度江苏省矿地融合试点项目(苏财资环[2023]29号)

This work was supported by the National Key Research and Development Program of China (2023YFF1306003) and the Pilot Project of Mine-land Integration in Jiangsu Province in 2023 (Sucui Zihuan [2023] No.29).

*Corresponding authors. E-mail: HE Huan, hehuan6819@cumt.edu.cn; SUN Qiang, sunqiang04@126.com

Received: 2025-03-06; Accepted: 2025-03-28; Published online: 2025-05-07

Granite weathering caused by *Acidithiobacillus ferrooxidans* under acidic conditions

JIANG Xiaye¹, WU Bolin², HE Huan^{2*}, XU Chenchen³, CHENG Yu¹, SUN Qiang^{3*}

1 Coastal Saline-alkali Land Ecological Rehabilitation and Sustainable Utilization Technology Innovation Center, Ministry of Natural Resources, Marine Geological Survey of Jiangsu Province, Nanjing, Jiangsu, China

2 Key Laboratory of Coal Processing and Efficient Utilization of Ministry of Education, School of Chemical Engineering and Technology, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu, China

3 Geological Research Institute for Coal Green Mining, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an, Shaanxi, China

Abstract: [Objective] To investigate the bio-weathering effects and mechanisms of *Acidithiobacillus ferrooxidans* on granite under acidic conditions (pH 2.0). [Methods] A 36-day immersion experiment was conducted, comparing the microbial group, acid solution group (pH 2.0, H₂SO₄), and pure culture medium (control) group. Physicochemical parameters [pH, redox potential (Eh), and electrical conductivity (EC)] of the solution, surface chromaticity (CIE-Lab) of granite, and mineral dissolution characteristics were analyzed. [Results] The microbial group significantly accelerated granite weathering, forming a distinct weathered layer on the surface after 9 days. During the initial phase (0–3 days), plagioclase dissolution caused a pH increase followed by stabilization. Fe³⁺ accumulation-dominated Eh and EC were regulated by both the initial ion background and weathering products. After bio-weathering, the granite exhibited a decrease of 11.6 in L* (reduced brightness), an increase of 6.8 in a* value (enhanced reddish-brown tone), and an increase of 9.6 in b* value (increased bluish tone). Surface reddish-brown areas were directly correlated with jarosite deposition. [Conclusion] Under acidic conditions, *A. ferrooxidans* accelerate granite weathering via Fe³⁺-mediated redox reactions. The chromaticity parameters (ΔL^* , Δa^* , and Δb^*) and morphological characteristics serve as indicators for rapidly assessing weathering intensity. These findings provide a novel basis for evaluating weathering risks caused by acid mine wastewater in surrounding rocks and guiding ecological remediation.

Keywords: bio-weathering; granite; *Acidithiobacillus ferrooxidans*; chromaticity analysis

微生物与矿物相互作用是地球表层系统的关键生物地球化学过程，也是地质微生物学核心研究方向^[1-2]。在自然界中，绝大多数微生物与矿物的相互作用集中在矿物表面微域，其代谢活动通过氧化还原反应、胞外聚合物分泌以及代谢产物释放等机制，显著影响矿物表面形貌、晶格重构以及元素的溶解释放。目前，微生物与矿物相互作用的研究主要集中在生物冶

金^[3-4]、生物矿化^[5-6]、生物浮选^[7]和生物风化^[8-9]等领域，其中岩石的生物风化因其在驱动元素生物地球化学循环、地表物理重塑以及碳封存与气候变化调控中的重要作用已成为前沿热点^[10-12]。例如，在橄榄岩和玄武岩的生物风化过程中释放的 Ca²⁺、Mg²⁺可通过碳酸盐沉淀实现 CO₂ 固定，而 Fe、Ni 等微量金属元素的溶出则可显著调控产甲烷菌的代谢活性，进而影响

温室气体排放通量^[12]。

花岗岩是大陆地壳的主要组成单元,其抗化学风化特性源于石英-长石-云母矿物组合的高稳定性。然而,微生物介导的生物力学侵蚀(如菌丝穿透)与生物化学溶解(如有机酸和铁载体螯合)可突破其抗风化屏障^[11,13-14]。研究表明,真菌(如黑曲霉)因具备强有机酸分泌能力,对花岗岩中斜长石的 Al-O-Si 键的破坏效率远高于细菌^[15-17],而部分微生物通过产生有机酸和络合作用可选择性溶出花岗岩中的稀土元素^[13-14]。值得注意的是,现有研究多聚焦于中性环境下的生物风化行为,而对酸性环境(pH<4.0)中微生物-花岗岩相互作用机制的研究仍属空白。在我国推行去产能政策过程中,大规模矿山关闭引发的次生环境效应——特别是酸性矿山排水(acid mine drainage, AMD)对地下水-水生生态系统的复合污染风险不容忽视^[18-19]。研究表明,酸性化学溶液可通过质子攻击引发花岗岩矿物晶格解离,导致硅酸盐矿物(如斜长石、方解石等)发生化学蚀变及物理劣化(如孔隙率增加、抗压强度下降等)^[20]。然而,针对酸性环境下微生物介导的花岗岩风化的研究却鲜有涉及。需特别指出的是,AMD 环境中的嗜酸微生物群落通过硫代谢途径和铁的氧化循环持续释放质子和铁离子,其生物地球化学通量对围岩(以花岗岩为主)的风化作用将远高于化学腐蚀^[21-22]。因此,研究酸性环境下微生物对花岗岩的风化溶蚀对阐明酸性矿山废水的形成机理以及矿山的生态安全具有重要意义。

传统岩石风化程度的评估主要依赖于化学分析方法,即通过采集风化溶液并检测其中游离离子(如 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^{+} 等)的浓度变化,结合 X 射线衍射或质谱技术解析矿物相变规律^[15-17]。虽然该类方法能够精准反映岩石内部成分的化学蚀变过程,但存在采样破坏性强、实验周期长(通常需数周至数月)且难以实现原位动态监测的局限性。近年来,随着光学检测技术的发展,基于岩石表面颜色与形貌特征的快

速无损分析逐渐成为新兴研究方向。例如,采用色度计来量化岩石表面色度参数(如 CIE-Lab* 色空间值),通过色差 ΔE 值对比原始样本与风化样本,可建立颜色变化与质量损失、灰度变化和孔隙率等风化指标的定量关系^[23-24]。同时,表面形貌扫描仪可通过毫米/微米级精度捕捉表面粗糙度、孔隙率及裂隙扩展等物理特征,已在岩石风化^[24]和工程地质^[25]评估中取得实践应用,其高效性与非破坏性优势为生物风化过程研究提供了新的技术路径。

嗜酸氧化亚铁硫杆菌 (*Acidithiobacillus ferrooxidans*) 在 AMD 体系中广泛存在,可通过 Fe^{2+} 氧化与硫代谢途径显著改变体系的氧化还原状态^[21-22]。本研究以该化能自养菌为研究对象,针对花岗岩中常见的含铁矿物(如黄铁矿 FeS_2 、菱铁矿 FeCO_3)^[26],设计多组对照实验,通过追踪溶液 pH、氧化还原电位(Eh)与电导率(electrical conductivity, EC)的动态变化规律,同时结合色度计量技术和表面形貌扫描观察,初步分析嗜酸微生物对花岗岩表面的化学蚀变机制,以期对阐明矿山关闭后 AMD 体系下围岩的生物风化机制具有参考意义。

1 材料与方 法

1.1 岩石试样与微生物菌株

试验所用岩石样品采自山东省临沂市的“鲁灰”花岗岩。试验前用切割机将其切割成直径为 (50.00 ± 0.05) mm、高 (25.00 ± 0.05) mm 的圆柱体试样。该花岗岩的主要成分是石英、钾长石和伊利石,还含有部分方解石、菱铁矿和黄铁矿等矿物^[26]。岩石浸泡所用的微生物为中国矿业大学化工学院保存的嗜酸氧化亚铁硫杆菌 (*A. ferrooxidans*, GenBank 登录号为 KR856281)^[27],培养基为 9K 基本盐,其基本组成为(g/L): $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 3.0, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0.5, KCl 0.1, K_2HPO_4 0.5, $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 0.01, 硫酸亚铁 44.5, pH 为 2.0, 培养温度为 $30\text{ }^\circ\text{C}$ ^[27]。采用分光光度

计(Shimadzu Corporation 公司)测量溶液中亚铁离子含量, 并计算其氧化率; 采用 ICP-OES (ThermoFisher Scientific 公司)测定总铁含量。

1.2 微生物浸泡岩样试验

将 *A. ferrooxidans* 培养至对数生长期后, 用普通定性滤纸(杭州沃华滤纸有限公司)过滤得到微生物培养液, 将 1.5 L 培养液转移至 3.0 L 玻璃容器中。容器顶部用 8 层无菌纱布包裹(孔隙率 $\leq 10\ \mu\text{m}$)以实现气液交换并阻隔外界微生物污染。设置对照组为等体积的灭菌培养基(纯培养基)和 pH 为 2.0 的硫酸水溶液(酸+水)。将预处理后的花岗岩标准试样浸没于反应液中, 维持恒温 $30\ \text{°C}$ (精度 $\pm 0.5\ \text{°C}$)。采用无菌空气过滤系统($0.22\ \mu\text{m}$ PTFE 滤芯)以 $0.5\ \text{L/min}$ 的速率持续通入空气。每 3 d 监测反应器总质量, 定量补加无菌去离子水与对应溶液(菌液/对照液)以补偿蒸发损失, 维持溶液体积恒定(波动 $< \pm 2\%$)。

1.3 样品分析

在实验的第 0、3、6、9、18、27、36 天时间节点分别从 3 组试验(微生物组、纯培养基组和酸+水组)中吸取 30 mL 反应液。用 pH 计、氧化还原电位仪和电导率仪(上海仪电科学仪器股份有限公司)分别测定其 pH、氧化还原电位(Eh)和电导率(EC)。在试验的第 3、9、36 天取出浸泡液, $10\ 000\ \text{r/min}$ 离心 10 min 后取上清液, 采用分光光度法(Shimadzu Corporation 公司)测量溶液中亚铁离子含量, ICP-OES (ThermoFisher Scientific 公司)测定总铁含量, 总铁与亚铁离子含量的差值可计算得到三价铁离子含量。在第 3、6、9、21、36 天分别从各实验组取出标准花岗岩试样($n=3$), 经超纯水冲洗去除表面附着物后, 于 $105\ \text{°C}$ 烘箱(上海一恒科学仪器有限公司)中干燥 6 h 至恒重。采用高分辨率工业内窥镜(深圳超眼科技有限公司, 5 倍光学放大+5 倍数码增强, LED 冷光源)获取岩石表面形貌图像。使用分光光度计(深圳市三恩驰科技有限公司,

D65 标准光源, $10\ \text{°}$ 观测角)测定试样表面 Lab* 色坐标, 每个样品取 9 点测量(3×3 网格)后计算均值。

2 结果与讨论

2.1 岩石菌液浸泡的理化性质变化分析

A. ferrooxidans 在亚铁中培养的生长过程如图 1 所示, 可以看出经过 24 h 培养液开始出现浑浊, 36 h 培养液开始泛红, 然后逐渐变红变深, 到 72 h 培养液变成深红色, 细胞浓度达到 9.52×10^7 个/mL, Fe^{2+} 被完全氧化成 Fe^{3+} , 氧化率达到 100%, Fe^{3+} 浓度达 $(847.21\pm 2.05)\ \text{mg/L}$, 细胞浓度与亚铁氧化率呈正相关, 符合典型对数生长代谢特征。过滤沉淀后, 取滤液作为生物风化介质。

近年来, 水化学溶液对花岗岩宏-微观结构及力学性能的影响研究取得了显著进展。研究人员通过分析岩石表面形貌、渗透率、元素组成以及浸泡液中金属离子浓度等性质, 揭示了酸性溶液作用下花岗岩损伤时效特征与机理, 以及含裂隙花岗岩法向刚度的演变规律^[20,28]。研究发现, 酸性化学溶液浸泡花岗岩的腐蚀程度主要受其所处酸性溶液 pH 值的控制, pH 值越低, 腐蚀程度越明显^[22]。氧化还原电位(Eh)与 pH 的协同变化遵循 Nernst 方程, 直接调控金属离子的氧化态分布及浸出效率^[29]。溶液体系的电导率和离子浓度密切相关, 能够准确反映浸泡体系中的离子变化情况。三组实验浸泡液的理化参数(pH、EC 和 Eh)变化如图 2 所示, 可以看出在为期 36 d 的浸泡实验中, *A. ferrooxidans* 培养液、对照培养基和酸水对花岗岩的风化作用均经历了初期波动(0–9 d), 随后逐渐趋于平稳(9–36 d)。在浸泡初期, 酸性溶液和微生物细胞能够较好地与花岗岩表面接触, 发生一系列的化学变化, 释放出岩石中的离子, 因此早期波动较大。随着浸出过程的进行, 微生物和酸性溶液需要沿着孔隙才能进入岩石内部, 这

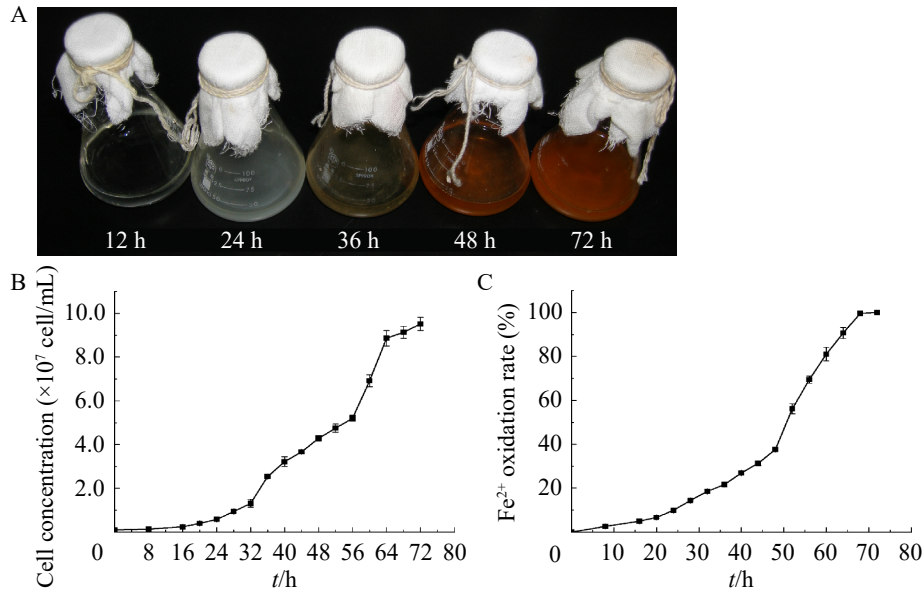


图1 *Acidithiobacillus ferrooxidans*在亚铁环境中生长特性变化。A: 菌液颜色; B: 细胞浓度; C: 亚铁氧化率。

Figure 1 The changes in growth characteristics of *Acidithiobacillus ferrooxidans* in a ferrous iron environment. A: Culture medium color; B: Cell concentration; C: Ferrous oxidation rate.

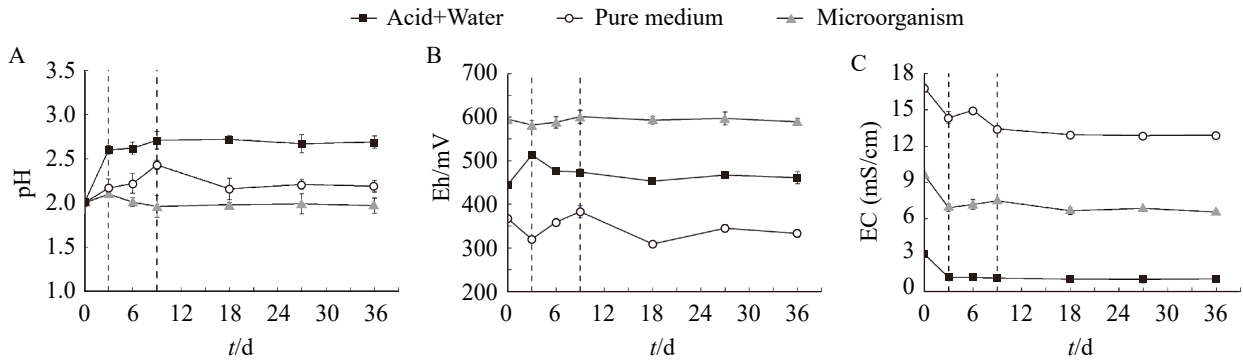


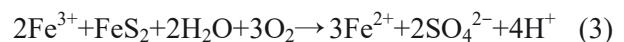
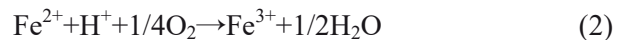
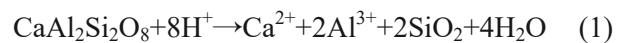
图2 花岗岩浸泡液的pH (A)、Eh (B)和EC (C)变化

Figure 2 The change curves of pH (A), Eh (B), and EC (C) of the soaking liquid.

极大地限制了岩石的进一步风化作用，因此趋于平稳。

如图 2A 所示，在浸泡初期(0-3 d)，3 组 pH 均有上升(2.0→2.3-2.6)，主要归因于花岗岩中斜长石($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$)的溶解[反应式(1)]; 其反应释放的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 及 OH^- 部分中和 H^+ [30]。微生物组在第 3 天后 pH 下降 1.98 ± 0.05 左右，显著低于酸水组 (2.42 ± 0.08)和培养基组 (2.35 ± 0.07)，

表明其 Fe^{2+} 氧化[反应式(2)]与黄铁矿(FeS_2)生物氧化[反应式(3)]协同产酸，而非生物组仅依赖 Fe^{2+} 的化学氧化[31-32]。从 pH 变化的差别可以看出，*A. ferrooxidans* 对花岗岩的风化起到了促进作用。



如图 2B、2C 所示，各浸泡液的 Eh 和 EC

有不同程度的变化,但总的变化趋势保持一致。微生物组 Eh 稳定在(595±15) mV 左右,显著高于酸水组和培养基组,符合 $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ 氧化还原对 ($E^0=+770$ mV)的 Nernst 方程,如公式(4)所示。

$$Eh = E^0 + \frac{RT}{nF} \ln \left(\frac{[\text{Fe}^{3+}]}{[\text{Fe}^{2+}]} \right) \quad (4)$$

式中, R 为气体常数, T 为温度, n 为反应中转移的电子数, F 为法拉第常数。

微生物组、纯培养基组及酸水组在第 3、9、36 天的亚铁(Fe^{2+})与铁离子(Fe^{3+})浓度如表 1 所示。在微生物组中, Fe^{3+} 浓度在第 3、9、36 天分别达到 612.34、753.21 和 742.52 mg/L, 其占比由 94.80% 升至 99.0% 以上, 对应 Eh 值稳定于(595±15) mV 的高位区间。这一现象与 *A. ferrooxidans* 的铁硫氧化代谢直接相关: 微生物通过氧化 Fe^{2+} 及黄铁矿[反应式(2)和反应式(3)]持续生成 Fe^{3+} , 从而推动体系 Eh 值显著升高。在纯培养基组中, 由于缺乏微生物活性, Fe^{3+} 浓度极低(第 3 天: 1.21 mg/L; 第 36 天: 7.42 mg/L), 其占比始终低于 1.40%, 导致 Eh 值仅维持在 320–330 mV; 酸水组虽然因化学氧化作用使 Fe^{3+} 初始占比较高(第 3 天: 86.50%), 但其 Fe^{3+} 绝对浓度(1.98–3.42 mg/L)不足微生物组的 1%, 且随着实验进程 Fe^{3+} 占比下降至 72.00% (第 36 天), Eh 值相应降低至(400±25) mV。上述差异表明, 仅当 Fe^{3+} 绝对浓度达到微生物组的量级(>500 mg/L)

时, 才能显著提升 Eh 值至近 600 mV, 而低浓度 Fe^{3+} (<10 mg/L)对 Eh 的贡献有限, Fe^{3+} 和 Eh 的相关性分析结果表明两者之间存在显著的正相关关系($P<0.05$), Pearson 相关系数为 0.835 7, 这进一步证实 Fe^{3+} 含量主导 Eh 变化。

电导率(图 2C)受溶液初始离子背景与风化产物的共同调控。在浸泡初期, 纯培养基组中的离子最为丰富, 而微生物组由于前期培养和过滤时消耗了部分离子, 酸水组只有酸参与, 因此其初期 EC 均低于纯培养基组, 初期中离子可能主要被岩石吸附^[33], 导致电导率逐渐减小。在后期, 花岗岩中的金属离子因氧化浸出使得总金属离子浓度在动态波动后趋于稳定^[27]。

2.2 花岗岩的色度变化分析

岩石的颜色本质上是由其所含矿物的颜色所决定的。花岗岩作为一种常见的岩石类型, 其矿物组成复杂多样, 因此呈现出丰富多样的颜色特征^[34]。在风化作用这一复杂的地质过程中, 岩石内部的矿物成分会发生改变, 相应地, 花岗岩的颜色也会随之发生变化。通过对花岗岩在风化作用过程中颜色变化的细致观察, 能够为推测其内部矿物在风化过程中所发生的特定变化提供重要依据, 进而为后续更为深入、系统的研究奠定坚实基础。

1976 年, 国际照明委员会公布了 CIE-Lab* 颜色系统, 这是一种被广泛应用于色彩分析领

表1 三组实验中 Fe^{2+} 、 Fe^{3+} 浓度及相应的Eh值

Table 1 Concentrations of Fe^{2+} , Fe^{3+} , and the corresponding Eh values in three groups of experiments

Group	t/d	$c(\text{Fe}^{2+})/(\text{mg/L})$	$c(\text{Fe}^{3+})/(\text{mg/L})$	Fe^{3+} percentage (%)	Eh/mV
Microorganism	3	33.32±2.34	612.34±8.62	94.80	582±15
	9	42.21±1.68	753.21±7.31	94.70	601±10
	36	81.76±3.14	742.52±5.86	>99.00	595±15
Pure medium	3	844.25±12.37	1.21±0.08	0.14	320±12
	9	709.34±9.49	9.86±0.84	1.37	383±13
	36	692.14±11.05	7.42±0.87	1.06	325±15
Acid+Water	3	0.31±0.01	1.98±0.39	86.50	513±12
	9	0.51±0.02	2.34±0.84	82.10	474±12
	36	1.33±0.01	3.42±0.29	72.00	400±25

域的科学模式。在该 Lab 模式下, 颜色信息通过 3 个通道进行表征: 第 1 个通道代表明度, 以“ L^* ”表示; “ a^* ”通道主要涉及颜色从红色到绿色的变化维度; “ b^* ”通道则侧重于体现从蓝色到黄色的色彩变化范围^[35]。从图 3 所展示的照片结果可以清晰看出, 在整个浸泡实验过程中, 无论是实验组还是对照组, 花岗岩的色度变化趋势大体上呈现出一致性。综合来看, 在浸泡实验期间对花岗岩表面进行观察时发现, 其在实验初期表现出较为显著的变化, 而随着时间的推移, 这种变化逐渐趋于稳定。这一现象与前文所阐述的浸泡液理化性质的变化过程相互吻合。具体而言, 经过微生物浸泡液风化处理后的花岗岩, 其表面亮度呈现出明显的变暗趋

势, 从宏观角度进行观察, 表面呈现出红褐色。进一步通过色度提取分析发现, 其表面颜色在 CIE-Lab* 颜色系统中表现为偏红偏蓝的特征(图 4)。

如图 4 所示, 不同处理组花岗岩的色度参数(L^* 、 a^* 、 b^*)在风化初期阶段(0-9 d)较为稳定, 9-21 d 发生显著变化, 后期(21-36 d)逐渐趋于平衡。具体而言, 微生物组的 L^* 值由初始 60.6 降至 49.0 ($\Delta L^* = -11.6$), a^* 值由 0.9 升至 7.7 ($\Delta a^* = +6.8$), b^* 值由 11.9 升至 21.5 ($\Delta b^* = +9.6$)。在 CIE-Lab* 色彩系统中, 此变化表明花岗岩表面颜色向红褐色(a^* 增加)与蓝紫色(b^* 增加)偏移, 与体视显微观察结果(图 5)一致。深色矿物区域(如黑云母)因次生矿物沉淀呈现蓝色调, 而浅色

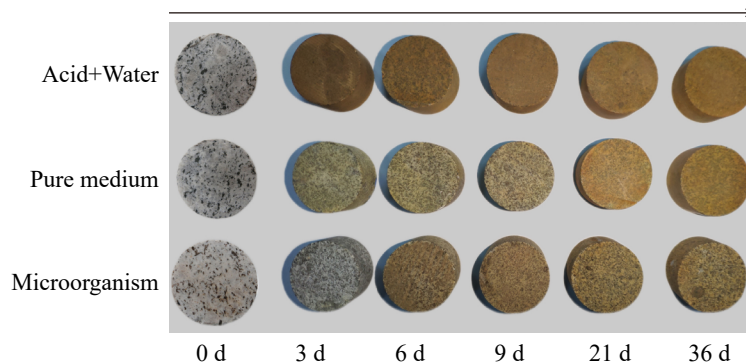


图3 花岗岩在不同浸泡条件下岩石表面随时间变化照片

Figure 3 Photos of granite surface changing with time under different soaking conditions.

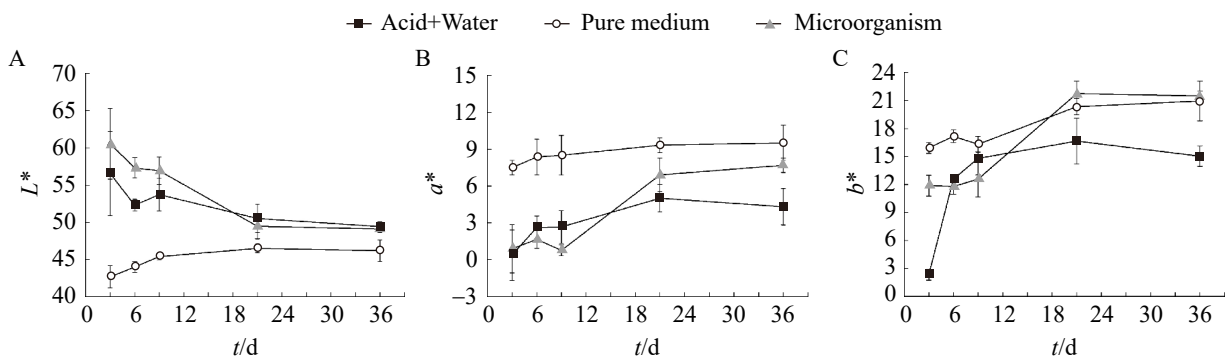


图4 花岗岩岩石样品表面的色度变化分析。A: L^* 颜色坐标系; B: a^* 颜色坐标系; C: b^* 颜色坐标系。

Figure 4 Analysis of chromaticity change of granite sample surface. A: L^* color axis; B: a^* color axis; C: b^* color axis.

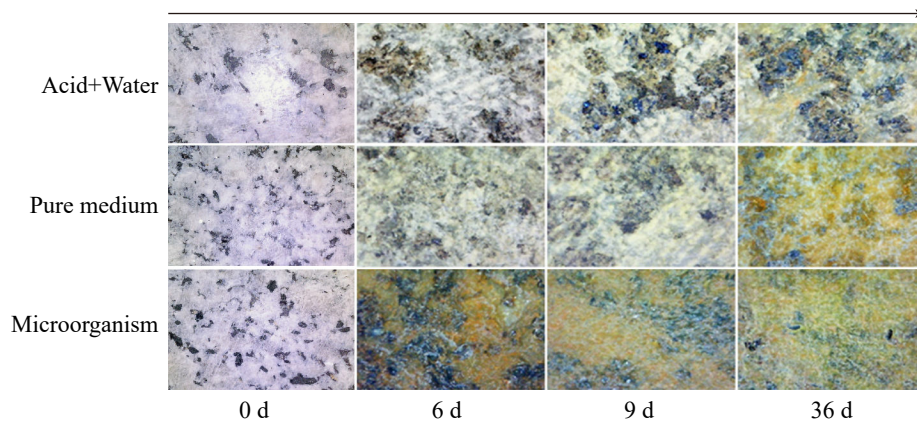
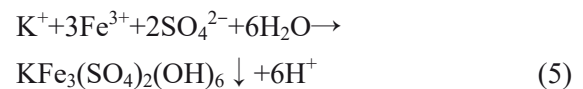


图5 花岗岩在不同浸泡条件下体视显微镜观察照片

Figure 5 Stereoscopic microscopy of granite under different soaking conditions.

区域(长石类矿物)因铁氧化物覆盖转为红褐色。微生物组实验体系的强酸性环境(pH 1.98–2.10)由微生物驱动的铁硫氧化代谢维持:一方面, *A. ferrooxidans* 通过氧化花岗岩中含铁矿物[反应式(2)和反应式(3)]持续释放 H^+ 并维持高浓度 Fe^{3+} ; 另一方面, Fe^{3+}/Fe^{2+} 氧化还原对通过 Nernst 效应保持体系高氧化还原电位[反应式(4)], 为硫酸盐稳定和黄钾铁矾结晶提供了热力学驱动力。微生物的铁硫代谢链^[31-32]进一步促进花岗岩中钾长石($KAlSi_3O_8$)的酸解释放 K^+ (纯培养基组和微生物组溶液中也含有 K^+), 并与溶液中的 Fe^{3+} 、 SO_4^{2-} 按反应式(5)结合, 最终形成鲜红色的纤维状黄钾铁矾沉淀(图 5)。体视显微观察显示, 该沉淀特异性覆盖于矿物表面及裂隙处, 与酸水组和纯培养基组形成鲜明对比, 这也充分说明所形成的红褐色沉淀为黄钾铁矾。进一步通过文献对比^[36-37]及元素迁移分析(如 Mg^{2+} 与伊利石蚀变的正相关性^[38]), 表明 *A. ferrooxidans* 通过以下途径驱动花岗岩风化: (1) 微生物优先侵蚀花岗岩中含铁矿物(如黄铁矿 FeS_2 、菱铁矿 $FeCO_3$), 通过胞外电子传递链将其氧化为 Fe^{3+} [反应式(2)], 显著提升溶液 Fe^{3+} 浓度 [$\Delta[Fe^{3+}] = (152 \pm 8) \text{ mmol/L}$], 促进黄钾铁矾 $[KFe_3(SO_4)_2(OH)_6]$ 沉淀 [反应式(5)] (图 5 红褐色区域)^[27]; (2) 斜长石与钾长石在酸性作用发生水解反应[反

应式(1)]形成高岭石等次生黏土矿而变灰(ΔL^* 下降)^[39]。此外, 微生物代谢产生的有机酸(如草酸)可络合 Al^{3+} , 加速硅酸盐骨架解体^[40-41]。



3 结论

本文以浸泡液的理化性质(pH、EC、Eh 和铁离子含量)和花岗岩表面色度变化为依据, 初步探究了酸性环境下 *A. ferrooxidans* 对花岗岩的生物风化过程, 得到以下主要结论。

(1) 酸性环境下 *A. ferrooxidans* 对花岗岩具有风化作用, 主要通过 Fe^{2+} 氧化提升溶液中 Fe^{3+} 浓度, 催化其中的黄铁矿(FeS_2)和菱铁矿($FeCO_3$)溶解, 并诱导黄钾铁矾沉淀。

(2) 色度计和形貌分析可用于表征微生物对花岗岩的风化, 色度参数(L^* 、 a^* 、 b^*)变化与矿物蚀变直接相关: L^* 值亮度下降反映表面矿物沉积, a^* 值增加指示铁氧化物富集, 而 b^* 值升高关联次生黏土矿物生成。

(3) 酸性环境下微生物-矿物界面反应主导花岗岩风化进程, 其动态过程(如溶液性质变化和矿物颜色变化)为 AMD 体系中围岩稳定性评估提供了参考。

作者贡献声明

姜夏焯：样品采集，实验安排、调查，初稿撰写；吴柏林：数据分析，图片绘制；何环：框架指导，撰写，修改，审阅；徐琛琛：数据管理、调查；程瑜：数据分析；孙强：提供资源。

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] 连宾. 矿物-微生物相互作用研究进展: 地质微生物专栏文章评述[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2014, 33(6): 759-763.
LIAN B. Research progress of mineral-microorganism interaction: a review of geological microorganism column[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2014, 33(6): 759-763 (in Chinese).
- [2] DONG HL, HUANG LQ, ZHAO LD, ZENG Q, LIU XL, SHENG YZ, SHI L, WU G, JIANG HC, LI FR, ZHANG L, GUO DY, LI GY, HOU WG, CHEN HY. A critical review of mineral-microbe interaction and co-evolution: mechanisms and applications[J]. National Science Review, 2022, 9(10): nwac128.
- [3] LIAO R, YU SC, WU BQ, ZHAO CX, LIN H, HONG MX, WU HY, YANG CR, ZHANG YS, XIE JP, QIN WQ, WANG J, QIU GZ. Sulfide mineral bioleaching: understanding of microbe-chemistry assisted hydrometallurgy technology and acid mine drainage environment protection[J]. Journal of Central South University, 2020, 27(5): 1367-1372.
- [4] 申丽, 赵红波, 邱冠周. 低碳生物冶金技术进展[J]. 中国矿业大学学报, 2022, 51(3): 419-433.
SHEN L, ZHAO HB, QIU GZ. Review of low-carbon bio-hydrometallurgical technology[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2022, 51(3): 419-433 (in Chinese).
- [5] CHENG YJ, ZHANG TT, ZHANG L, KE ZB, KOVARIK L, DONG HL. Resource recovery: adsorption and biomineralization of cerium by *Bacillus licheniformis*[J]. Journal of Hazardous Materials, 2022, 426: 127844.
- [6] LU A, LI Y, JIN S. Interactions between semiconducting minerals and bacteria under light[J]. Elements, 2012, 8(2): 125-130.
- [7] HE H, CAO MJ, ZHAN D, XIA WC, CHEN SJ, TAO XX, HUANG ZX. Preliminary study on the surface modification of lignite and bioflotation by white-rot fungi *Hypocrea lixii* AH[J]. Minerals, 2023, 13(12): 1492.
- [8] 赵向维, 陈进, 李方兵, 严令斌, 喻理飞. 不同风化年限碳酸岩风化壳真菌群落结构特征[J]. 微生物学报, 2023, 63(3): 1152-1167.
- [9] ZHAO XW, CHEN J, LI FB, YAN LB, YU LF. Community structure of fungi in crust of carbonatite weathered for different time[J]. Acta Microbiologica Sinica, 2023, 63(3): 1152-1167 (in Chinese).
- [9] XIA QY, ZHANG LM, DONG HL, LI ZY, ZHANG YY, HU JL, CHEN HY, CHEN Y. Bio-weathering of a uranium-bearing rhyolitic rock from Xiangshan uranium deposit, southeast China[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2020, 279: 88-106.
- [10] 马晓田, 常保璇, 黄柳琴, 蒋宏忱. *Shewanella putrefaciens* CN32对粘土附着态铵氮释放的影响[J]. 微生物学报, 2020, 60(6): 1192-1205.
MA XT, CHANG BX, HUANG LQ, JIANG HC. Effects of *Shewanella putrefaciens* CN32 on the release of clay-sorbed NH_4^+ [J]. Acta Microbiologica Sinica, 2020, 60(6): 1192-1205 (in Chinese).
- [11] CHIKKANNA A, GHOSH D, SAJEEV K. Bio-weathering of granites from Eastern Dharwar Craton (India): a tango of bacterial metabolism and mineral chemistry[J]. Biogeochemistry, 2021, 153(3): 303-322.
- [12] ZHANG DL, ZENG Q, CHEN HY, GUO DY, LI GY, DONG HL. Enhanced rock weathering as a source of metals to promote methanogenesis and counteract CO_2 sequestration[J]. Environmental Science & Technology, 2024, 58(44): 19679-19689.
- [13] 陈炳辉, 徐文烈, 黄丽玫, 毋福海, 刘琥琥. 微生物及有机酸对风化壳中REE的溶出实验[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2000, 39(4): 110-113.
CHEN BH, XU WL, HUANG LM, WU FH, LIU HH. An experimental study on the effects of microbes and organic acids on dissolution of REE in the weathering crust of a granite[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2000, 39(4): 110-113 (in Chinese).
- [14] HE YL, MA LY, LI XR, WANG H, LIANG XL, ZHU JX, HE HP. Mobilization and fractionation of rare earth elements during experimental bio-weathering of granites[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2023, 343: 384-395.
- [15] 吴秋芳, 胡海波, 张鑫. 黑曲霉及其代谢产物对花岗岩风化作用的影响[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2018, 42(1): 81-88.
WU QF, HU HB, ZHANG X. Effect of *Aspergillus niger* and its metabolites on weathering of granite[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2018, 42(1): 81-88 (in Chinese).
- [16] WU Q, HU H. The influence of environmental factors on *Aspergillus niger* granite weathering[J]. Applied Ecology and Environmental Research, 2019, 17(1): 395-408.
- [17] SONG W, OGAWA N, OGUCHI C, HATTA T, MATSUKURA Y. Laboratory experiments on bacterial weathering of granite and its constituent minerals[J]. Geomorphologies-relief Processes Environment, 2010, 16(4): 327-336.
- [18] 杨秋, 曹英杰, 张宇, 陈建耀, 王诗忠, 田帝. 闭坑铅锌矿地下水-矿坑水水化学特征及成因分析[J]. 生态环境学报, 2023, 32(2): 361-371.
YANG Q, CAO YJ, ZHANG Y, CHEN JY, WANG SZ, TIAN D. Hydrochemical characteristics and its cause analysis of groundwater and mine water in closed lead

- zinc mining area[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2023, 32(2): 361-371 (in Chinese).
- [19] 冯地宽, 田合利, 陈冲, 陈鸿申. 贵州省废弃闭坑煤矿酸性废水治理新方法探讨[J]. 中国矿业, 2024, 33(1): 98-104.
FENG DK, TIAN HL, CHEN C, CHEN HS. Discussion on new method of acidic wastewater treatment in abandoned closed coal mine in Guizhou Province[J]. China Mining Magazine, 2024, 33(1): 98-104 (in Chinese).
- [20] 苗胜军, 蔡美峰, 冀东, 郭奇峰, 白玉冰. 酸性化学溶液作用下花岗岩损伤时效特征与机理[J]. 煤炭学报, 2016, 41(5): 1137-1144.
MIAO SJ, CAI MF, JI D, GUO QF, BAI YB. Aging features and mechanism of Granite's damage under the action of acidic chemical solutions[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(5): 1137-1144 (in Chinese).
- [21] ROUCHALOVA D, ROUCHALOVA K, JANAKOVA I, CABLIK V, JANSTOVA S. Bioleaching of iron, copper, lead, and zinc from the sludge mining sediment at different particle sizes, pH, and pulp density using *Acidithiobacillus ferrooxidans*[J]. Minerals, 2020, 10(11): 1013.
- [22] LI WB, FENG QY, LI Z, JIN T, ZHANG Y, SOUTHAM G. Inhibition of iron oxidation in *Acidithiobacillus ferrooxidans* by low-molecular-weight organic acids: evaluation of performance and elucidation of mechanisms[J]. Science of The Total Environment, 2024, 927: 171919.
- [23] DONG ZH, SUN Q, YE J, ZHANG WQ. Changes in color and roughness of red sandstone at high temperatures[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2020, 79(4): 1959-1966.
- [24] CAO YP, SUN Q, YANG XY, DANG C, GENG JS. Sandstone weathering under dry-wet cycling in NaCl solution[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2022, 81(11): 490.
- [25] XU D, LIU JF, LIANG C, YANG JX, XU HN, WANG L, LIU J. Effects of cyclic fatigue loads on surface topography evolution and hydro-mechanical properties in natural and artificial fracture[J]. Engineering Failure Analysis, 2024, 156: 107801.
- [26] 张渊, 赵阳升, 吴刚. “鲁灰”花岗岩热破裂的细观结构及规律[J]. 兰州理工大学学报, 2010, 36(6): 115-118.
ZHANG Y, ZHAO YS, WU G. Meso-structure and pattern of thermal cracking of Luhui granite[J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2010, 36(6): 115-118 (in Chinese).
- [27] 何环, 韩亚涛, 石开仪, 洪芬芬, 朱红威, 冷云伟, 陶秀祥, 郑雷, 马陈燕, 赵屹东. 嗜酸铁/硫氧化菌浸出煤矸石中硫的形态变化[J]. 煤炭学报, 2017, 42(5): 1304-1310.
HE H, HAN YT, SHI KY, HONG FF, ZHU HW, LENG YW, TAO XX, ZHENG L, MA CY, ZHAO YD. Variation of sulfur speciation of coal gangue leaching by acidophilic ferrous/sulfur oxidizing microbes[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(5): 1304-1310 (in Chinese).
- [28] 刘尚. 高温及酸腐蚀作用下含裂隙花岗岩法向刚度演变规律[D]. 徐州: 中国矿业大学硕士学位论文, 2023.
LIU S. Evolution of normal stiffness of granite with cracks under high temperature and acid corrosion[D]. Xuzhou: Master's Thesis of China University of Mining and Technology, 2023 (in Chinese).
- [29] 李超, 周立祥, 王世梅. 复合硫杆菌生物浸出污泥中重金属的效果及与pH和ORP的关系[J]. 环境科学学报, 2008, 28(6): 1155-1160.
LI C, ZHOU LX, WANG SM. Bioleaching of heavy metals from municipal sludge by the co-inoculation of two acidophilic *Thiobacillus*[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2008, 28(6): 1155-1160 (in Chinese).
- [30] OXBURGH R, DREVER JI, SUN YT. Mechanism of plagioclase dissolution in acid solution at 25 °C [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1994, 58(2): 661-669.
- [31] 万龙, 孙强, 何环, 张玉洁. 黄铁矿岩石微生物风化作用的试验研究[J]. 路基工程, 2014(6): 58-62.
WAN L, SUN Q, HE H, ZHANG YJ. Analysis on weathering of rock under microbial condition and its destructive action for rock mass[J]. Subgrade Engineering, 2014(6): 58-62 (in Chinese).
- [32] KANG JX, WANG YY. The role of *Acidithiobacillus ferrooxidans* in Fe(II) oxidation of pyrite in bioleaching processes[J]. Journal of Chemical Technology & Biotechnology, 2022, 97(8): 2013-2023.
- [33] 张明亮. 粉煤灰对煤矸石酸性重金属淋滤液的修复作用[J]. 煤炭学报, 2011, 36(4): 654-658.
ZHANG ML. Utilization of fly ash for remediation of heavy metals from acid coal waste leachate[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(4): 654-658 (in Chinese).
- [34] 阎国进, 孙燕翔. 花岗岩的颜色与其矿物成分的关系[J]. 石材, 1999(6): 11-12.
YAN GJ, SUN YX. Relationship between the color of granite and its mineral composition[J]. Stone, 1999(6): 11-12 (in Chinese).
- [35] OZGUVEN A, OZCELIK Y. Investigation of some property changes of natural building stones exposed to fire and high heat[J]. Construction and Building Materials, 2013, 38: 813-821.
- [36] SCHEFFLER MJ, LESAK JD. Natural weathering of granite: a case study[J]. Astm Special Technical Publication, 2000, 1394: 79-93.
- [37] 张樵英, 洪掌珠. 花岗岩的风化变色机制及石材的质量评价[J]. 石材, 1997(3): 21-23.
ZHANG QY, HONG ZZ. Mechanism of weathering discoloration of granite and quality evaluation of stone[J]. Stone, 1997(3): 21-23 (in Chinese).
- [38] BREWER A, TENG FZ, DETHIER D. Magnesium isotope fractionation during granite weathering[J]. Chemical Geology, 2018, 501: 95-103.
- [39] TAUNTON AE, WELCH SA, BANFIELD JF. Microbial controls on phosphate and lanthanide distributions during granite weathering and soil formation[J]. Chemical Geology, 2000, 169(3/4): 371-382.
- [40] PALMER RJ Jr, HIRSCH P. Photosynthesis-based microbial communities on two churches in northern Germany: weathering of granite and glazed brick[J]. Geomicrobiology Journal, 1991, 9(2/3): 103-118.
- [41] GLEESON DB, CLIPSON N, MELVILLE K, GADD GM, McDERMOTT FP. Characterization of fungal community structure on a weathered pegmatitic granite[J]. Microbial Ecology, 2005, 50(3): 360-368.