

引用格式: 杨盼, 罗玉博, 杨姣, 等. 不同菌株对玄武岩风化过程中元素释放的影响[J]. 浙江农林大学学报, 2025, 42(3): 468–476. YANG Pan, LUO Yubo, YANG Jiao, *et al.* Effects of different microbial strains on element release during weathering of basalt[J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2025, 42(3): 468–476.

不同菌株对玄武岩风化过程中元素释放的影响

杨 盼, 罗玉博, 杨 姣, 袁 思, 李建武

(浙江农林大学 环境与资源学院, 浙江 杭州 311300)

摘要: 【目的】对比分析 2 种微生物对玄武岩的风化和元素释放的影响, 探究微生物在玄武岩风化过程中的作用, 为微生物促进玄武岩风化提供理论依据。【方法】选用不同微生物菌株胶质芽孢杆菌 *Bacillus mucilaginosus* 和棘孢木霉 *Trichoderma asperellum*, 开展玄武岩的生物风化模拟试验; 通过元素地球化学方法 (元素溶解量和速率等) 和矿物分析方法 (物质组成等), 研究微生物对玄武岩中硅 (Si)、钙 (Ca)、铝 (Al)、铁 (Fe) 和镁 (Mg) 释放量、释放速率以及释放能力的影响, 并探讨释放机制。【结果】胶质芽孢杆菌和棘孢木霉对玄武岩的风化和元素溶解产生了促进作用, 与对照相比, 真菌和细菌体系溶液 pH 分别降低 1.46 和 0.88 个单位; 与对照相比, 真菌作用下玄武岩中 Si、Ca、Al、Fe 和 Mg 元素释放量增加 10.2、2.6、8.2、92.9 和 9.9 倍, 细菌作用下增加 2.7、1.2、1.7、19.7 和 3.2 倍; 真菌和细菌作用下, 玄武岩中元素的释放能力顺序基本相同, 从大到小依次为 Ca、Mg、Fe、Si、Al; 微生物主要通过分泌有机酸创造酸性环境或通过络合作用促进玄武岩的风化和提高元素溶解速率。【结论】微生物能够有效提高玄武岩风化过程中元素的释放量和速率, 而不同菌株之间存在差异, 其中棘孢木霉处理下玄武岩风化过程中元素的释放量和速率高于胶质芽孢杆菌处理, 说明真菌对于加速玄武岩风化具有更有效的作用。图 6 参 41

关键词: 玄武岩; 棘孢木霉; 胶质芽孢杆菌; 风化作用; 释放速率; 机制

中图分类号: S153 文献标志码: A 文章编号: 2095-0756(2025)03-0468-09

Effects of different microbial strains on element release during weathering of basalt

YANG Pan, LUO Yubo, YANG Jiao, YUAN Si, LI Jianwu

(College of Environment and Resources, Zhejiang A&F University, Hangzhou 311300, Zhejiang, China)

Abstract: [Objective] Analyze the effects of different microorganisms on the weathering and elemental release of basalt, to explore the role of microorganisms in the weathering process of basalt, and to provide a theoretical basis for microorganisms promoting basalt weathering. [Method] Different microbial strains (*Bacillus mucilaginosus* and *Trichoderma asperellum*) were selected to carry out simulation experiments on biological weathering of basalt. By means of elemental geochemical methods (elemental dissolution amount and rate) and mineral analytical methods (material composition), the effects of microorganisms on the release amount, release rate, and release capacity of Si, Ca, Al, Fe, and Mg elements from basalt were investigated, and preliminarily explored the release mechanisms. [Result] Microorganisms contributed to the weathering of basalt and the dissolution of elements, compared to the control group, the pH of the fungal and bacterial system solutions decreased by 1.46 and 0.88 units, respectively. Compared to the control group, the release amounts of Si, Ca, Al, Fe and Mg elements in basalt was significantly increased by 10.2, 2.6, 8.2, 92.9 and 9.9 times under

收稿日期: 2024-06-04; 修回日期: 2024-07-12

基金项目: 浙江省自然科学基金资助项目 (LY21D010002)

作者简介: 杨盼 (ORCID: 0000-0002-6902-5703), 从事土壤学研究。E-mail: yp18058819448@163.com。通信作者: 李建武 (ORCID: 0000-0001-8541-3952), 副教授, 博士, 从事土壤地球化学研究。E-mail: jameslee@zafu.edu.cn

the action of fungi, and it was significantly increased by 2.7, 1.2, 1.7, 19.7 and 3.2 times under bacterial action. The order of element release from basalt under the action of fungi and bacteria was same ($\text{Ca} > \text{Mg} > \text{Fe} > \text{Si} > \text{Al}$). Microorganisms create an acidic environment mainly by secreting organic acids or by complexing to promote the weathering of basalt and increase the rate of elemental dissolution. [Conclusion] Microorganisms can effectively increase the release and rate of elements during the weathering process of basalt, there are also differences among different strains. The release and rate of elements during the weathering process of basalt under the treatment of *T. asperellum* are higher than those under the treatment of *B. mucilaginosus*, indicating that fungi have a more significant role in accelerating the weathering process of basalt. [Ch, 6 fig. 41 ref.]

Key words: basalt; *Trichoderma asperellum*; *Bacillus mucilaginosus*; weathering; release rate; mechanism

玄武岩作为地球表面分布最广的岩石类型之一，其风化作用对于土壤形成和发育具有重要作用^[1-2]。玄武岩中的矿物成分，如长石、辉石和橄榄石等^[3]，在风化过程中分解和转化，为土壤提供丰富的矿质营养元素^[3-4]，这些元素对于支持植物生长和生态系统功能至关重要^[5-7]。许多研究表明：玄武岩风化在调节土壤地球化学以及地球气候变化等长期演化方面具有重要的作用^[8-13]。如施用到土壤中的玄武岩粉未经风化作用后显著提高了土壤养分，促进了土壤有机碳的固定^[14-15]。因此，研究玄武岩风化作用的影响因素对阐明土壤发生过程、矿质养分元素循环等具有重要作用。

土壤微生物通过代谢活动、化学作用、氧化还原作用以及与植物的共生关系等多种方式，加速土壤矿物的风化过程。其中，硅酸盐细菌不仅可以从矿物中提取经济价值较高的元素如钙 (Ca)、镁 (Mg)、锰 (Mn)，还可以作为生物肥料，从矿物中提取钾 (K)、铁 (Fe)、磷 (P) 等植物必需的营养元素^[13-17]。与细菌相比，真菌在地质活动中的作用更加显著。有研究表明：真菌通过有机酸分泌、呼吸作用和络合物的生成等途径对玄武岩进行风化，参与风化的真菌主要包括地衣共生真菌、菌根真菌和腐生真菌^[16-17]。

棘孢木霉 *Trichoderma asperellum* 和胶质芽孢杆菌 *Bacillus mucilaginosus* 是土壤中普遍存在的真菌与细菌，它们不仅能分解土壤中的难溶性矿物供自身的生长繁殖，还能促进土壤中矿质元素的地球化学循环^[18-20]。棘孢木霉通过分泌有机酸和酶类，可以有效地促进矿物质溶解和元素释放，已有研究表明：它能加速硅酸盐矿物的风化，释放植物生长所需的硅元素 (Si)^[21-23]。而胶质芽孢杆菌则通过分泌多种有机酸和其他代谢产物，对钾长石等矿物的溶解效果显著，能够释放出 K，提高土壤肥力。但是棘孢木霉和胶质芽孢杆菌的形态、大小和功能等具有各自的特点，因此它们在促进矿物风化的途径、机制等方面存在一定的差异^[22-24]。

本研究选用了 1 株产酸量较大且能生成铁载体的棘孢木霉和 1 株硅酸盐细菌胶质芽孢杆菌，在恒温震荡培养条件下，探究它们对玄武岩风化过程中元素释放速率的影响，探讨其对玄武岩风化作用机制的异同，以期对不同菌种促进玄武岩风化提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

1.1.1 微生物材料 选用的 1 株产酸量较大且能生成铁载体的棘孢木霉和 1 株硅酸盐细菌胶质芽孢杆菌，均由浙江农林大学省部共建亚热带森林培育国家重点实验室微生物研究室保存。棘孢木霉菌株生长迅速，在马铃薯葡萄糖琼脂培养基 (potato dextrose agar, PDA) 上生长时，营养体初体为白色的菌丝体，之后表面的颜色逐渐转变为青绿色，长势呈不定型棉絮状或致密丛束状。胶质芽孢杆菌菌株在 Luria-Bertani (LB) 培养基上形成隆起菌落，边缘整齐并凸起，中心有明显褶皱，革兰氏反应呈阴性。

1.1.2 培养基 PDA 培养基用于活化培养棘孢木霉。LB 培养基用于活化培养胶质芽孢杆菌。马铃薯葡萄糖培养基 (PD) 提供了统一且丰富的营养环境，确保细菌和真菌都能生长，将营养因素的影响降至最低。

1.1.3 岩石样品 玄武岩样品由嵊州皓达矿业有限公司提供。利用 X-射线荧光光谱仪 (X-ray Fluorescence Spectrometer, XRF) 测定玄武岩的化学成分, 其主要化学成分包括 (质量分数): SiO_2 47.27%, Al_2O_3 15.89%, Fe_2O_3 9.72%, MnO 0.57%, MgO 5.63%, CaO 1.28%, Na_2O 5.03%, K_2O 5.55%, TiO_2 4.41%, P_2O_5 3.14%。

1.2 方法

1.2.1 菌液制备 ①棘孢木霉菌液的制备: 挑起单菌落放入 25 mL 的 PD 培养基中, 摇床上培养 24 h。②胶质芽孢杆菌菌液的制备: 挑起单菌落放入 25 mL 的 PD 培养基中, 摇床上培养 24 h, $5\,000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 离心 6 min, 去除上层清液, 底层沉淀物用无菌水打散, 即为细菌菌液。

1.2.2 模拟风化试验 分别称取 5.0 g 的玄武岩岩粉放置于 250 mL 的锥形瓶, 每瓶加入 120 mL 的 PD 培养基, 在 $115\text{ }^\circ\text{C}$ 高压灭菌锅灭菌 30 min。然后分别加入 3 mL 的棘孢木霉菌液、胶质芽孢杆菌菌液和无菌水 (对照), 处理的编号分别为 MM、YB、ck, 并用厚度为 $0.2\text{ }\mu\text{m}$ 的半透膜封口, 以保证瓶内处于有氧环境, 每个处理 3 次重复。将所有的锥形瓶放置于 $28\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $150\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 的恒温振荡培养箱内。根据细胞的生长曲线, 在第 1、3、7、15、20、30 天共 6 次取样, 每次从锥形瓶中取 2 mL 的浸提液用于测定。

1.2.3 分析方法 浸提液 pH 值和离子浓度^[25]: 浸提液 pH 用台式 pH 计在室温下测定, 精度 ± 0.01 。Si、Ca、Mg、Fe 和铝 (Al) 的浓度用电感耦合等离子体发射光谱法 (ICP-OES) 测定, 在测定前将浸提液过 $0.22\text{ }\mu\text{m}$ 的醋纤滤头, 按照时间序列, 以不同的倍数用体积分数为 3% 的 $0.05\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{HNO}_3$ 稀释至 3 mL, 3 次重复, 取平均值, 其标准偏差 (SD) $< 5\%$ 。为减小实验误差, 用公式 (1) 对所测数据矫正。

$$C_{ji}^* = \frac{C_{ji}[v_0 - (j-1)v_s] + \sum_{h=1}^{j-1} C_{ji}v_s}{v_0} \quad (1)$$

式 (1) 中, C_{ji}^* 是离子 i 在第 j 次取样后的矫正浓度 ($\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$), v_0 是反应体系溶液的初始体积 (120 mL), C_{ji} 是测定浓度, v_s 是每次取样的体积 (2 mL), $\sum_{h=1}^{j-1} C_{ji}v_s$ 是取样过程中提取离子 i 的质量。

用线性溶解速率来表征元素释放快慢, 具体参照公式 (2) 计算。

$$R_i^l = \frac{dC_i^*}{dt} \frac{v_0}{Am} \quad (2)$$

式 (2) 中, R_i^l 是离子 i 的线性释放速率 ($\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$), dC_i^*/dt 是离子 i 矫正后浓度对于时间 t 的微分, v_0 是反应体系溶液的初始体积 (120 mL), A 为玄武岩粉末的比表面积 ($0.243\,7\pm 0.002\,7\text{ m}^2\cdot\text{g}^{-1}$), m 为玄武岩样品的质量 (5.0 g)。

采用冷场发射扫描电子显微镜 (CFESEM) 对反应后的玄武岩颗粒表面形态进行分析, 并根据能谱仪 (EDS) 形成的能谱图的能量值确定元素种类。

1.2.4 数据处理 采用 Excel 2019 和 Origin 2020 进行数据整理和作图分析。

2 结果与分析

2.1 浸提液 pH 的动态变化

如图 1 所示: 与 ck 相比, MM 和 YB 处理对浸提液的 pH 产生了影响, 其中 MM 组浸提液的 pH 呈“降低—上升”的趋势, YB 组浸提液的 pH 呈“降低—上升—降低”的趋势。在第 7 天, MM 组的 pH 达到最低点, 低于 ck (1.46), 在第 15~30 天呈现明显的升高趋势, 高于 YB 组 0.96。YB 组在第 7 天时浸提液的 pH 达到最低点, 低于 ck (0.88)。随着时间的推移, YB 组的 pH 呈现微小

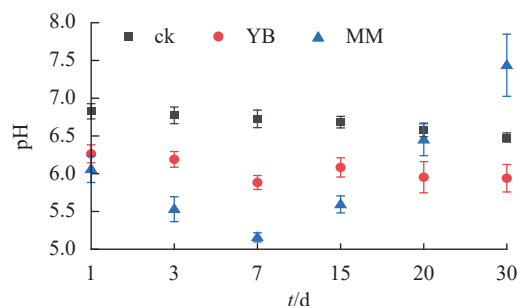


图 1 浸提液 pH 的变化

Figure 1 Variations of pH in the leaching solutions

的变化趋势，并且整个过程 pH 均低于 ck。

2.2 浸提液中元素浓度的动态变化

如图 2 所示：MM 组浸提液中各元素的最高浓度高于 ck，Si、Ca、Al、Fe、Mg 的最高浓度分别是 ck 的 10.2、2.6、8.2、92.9 和 9.9 倍；YB 组中 Si、Ca、Al、Fe、Mg 的最高浓度分别是 ck 的 2.7、1.2、1.7、19.7 和 3.2 倍。MM 组 Si、Ca、Al、Fe 和 Mg 的最大释放量分别是 YB 的 3.3、1.9、6.0、5.0 和 3.2 倍。

在 MM 组中，Si、Ca、Al、Fe 和 Mg 的浓度表现出波动，总体趋势升高，其中，Si 的浓度在第 7 天达到最大值，而 Ca、Al、Fe 和 Mg 则在第 15 天达到最高浓度，这表明在第 7~15 天风化效果最佳。在 YB 组中，元素浓度波动幅度小于 MM 组。综上所述，胶质芽孢杆菌和棘孢木霉都能够风化玄武岩，并释放其中的矿质元素，且棘孢木霉的风化效果更好。

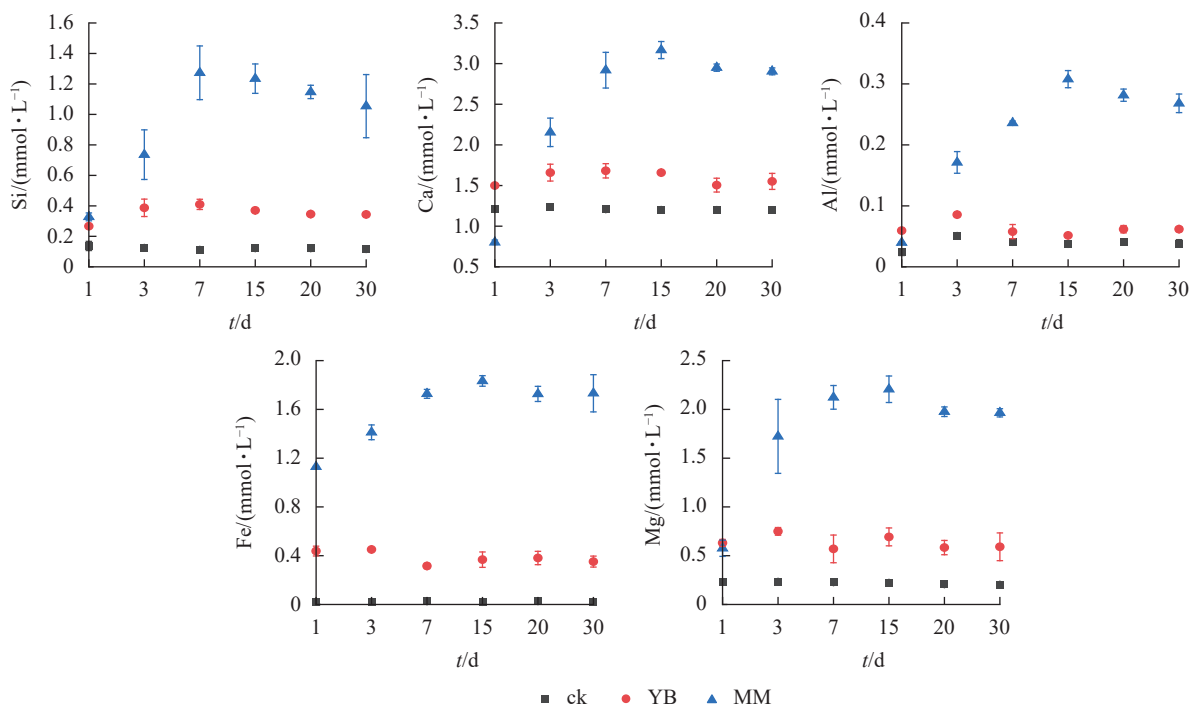


图 2 浸提液中 Si、Ca、Al、Fe、Mg 浓度的动态变化

Figure 2 Dynamic variations in the concentrations of Si, Ca, Al, Fe, and Mg in the leaching solution

2.3 玄武岩形貌及成分

电子显微镜扫描 (图 3) 结果表明：棘孢木霉和胶质芽孢杆菌所在体系中，玄武岩颗粒表面均呈明显的不规则碎片，相反，在 ck 中，玄武岩表面保持光滑，没有明显的风化现象。

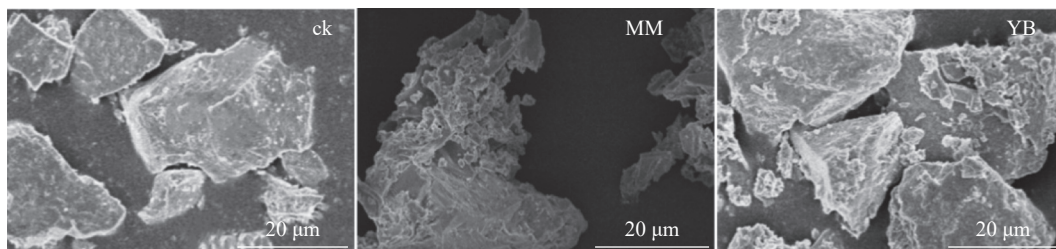


图 3 所有处理反应 30 d 后玄武岩的电子显微镜扫描图

Figure 3 SEM spectra of basalt after 30 days for all experimental treatments

能谱分析结果 (图 4) 表明：经过 30 d 反应的玄武岩残渣表面主要元素为碳 (C)、O、Si、Al 等，其中 C 可能来源于培养基和微生物残体。同时，玄武岩表面还附着了其他元素，包括 Mn、钠 (Na)、Mg、Al、P、K、Ca 和 Fe 等，其中 MM 组的元素浓度高于 YB 组。说明微生物参与了促进玄武岩风化并释放矿质养分的过程，且棘孢木霉在这个过程中发挥了明显的作用。

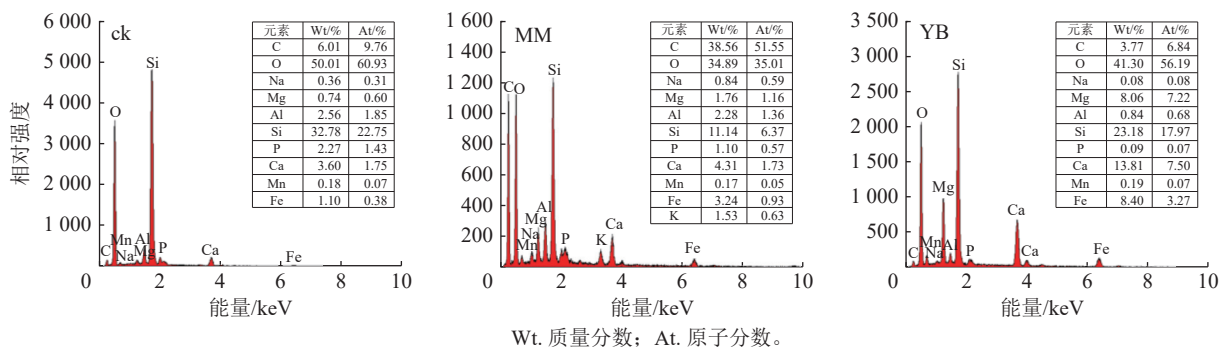


图4 所有处理反应30 d后玄武岩的能谱图

Figure 4 EDS spectra of basalt after 30 days for all experimental treatments

2.4 玄武岩风化过程中的元素释放速率

如图5所示：随着时间的推移，这3个体系的元素线性溶解速率表现为先下降后上升，且在第20天达到最低值。MM组中的Ca、Mg和Al的线性溶解速率在第3天有个突然升高点，Fe的变化趋势相对其他元素较稳定。另一方面，YB组中Ca和Al溶解速率在第1天高于MM组，但随着时间的延长，逐渐降低，低于MM组。在MM组中，Si、Ca、Al、Fe和Mg的释放速率高于胶质芽孢杆菌0.49、0.28、0.78、0.70和0.50 mol·m⁻²·s⁻¹，除Ca外，其他元素的线性溶解速率从高到低依次为MM、YB、ck，表明微生物加速了矿物元素的释放，刺孢木霉的参与对元素释放速率的效果更好。

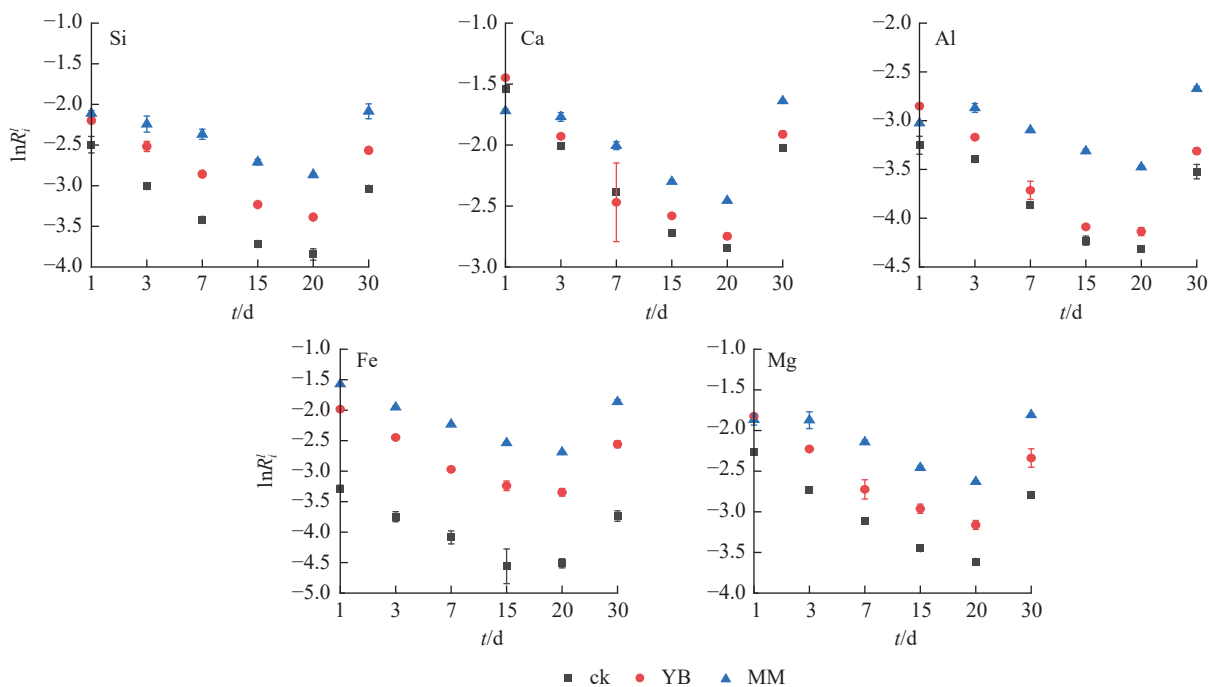


图5 浸提液中Si、Ca、Al、Fe、Mg的元素溶解速率随反应时间的变化

Figure 5 Elemental dissolution rates of Si, Ca, Al, Fe, and Mg in the leaching solution with the reaction time

2.5 玄武岩风化过程中的元素释放能力顺序

为了明确元素的释放能力顺序，对MM和YM组中的Al/Si、Fe/Si、Mg/Si、Ca/Si摩尔比进行对比分析，结果如图6所示。在不同体系中，各元素与Si的摩尔比值从大到小依次为Ca/Si、Mg/Si、Fe/Si、Al/Si。然而，MM组中Fe/Si的摩尔比在1~3 d内呈下降趋势，这主要是因为Si的释放量较低。玄武岩样品的Al/Si、Fe/Si、Mg/Si、Ca/Si摩尔比分别为0.336、0.206、0.119、0.027。通过比较浸提液中元素的硅浓度最大值所对应的摩尔比值与玄武岩样品中的相应比的倍数，发现元素释放能力的排序：在MM组中，从大到小排序为Ca(84.9)、Mg(14.0)、Fe(6.6)、Si(1.0)、Al(0.6)；在YM组中，从大到小排序为Ca(105.2)、Mg(11.7)、Fe(3.7)、Si(1.0)、Al(0.4)。

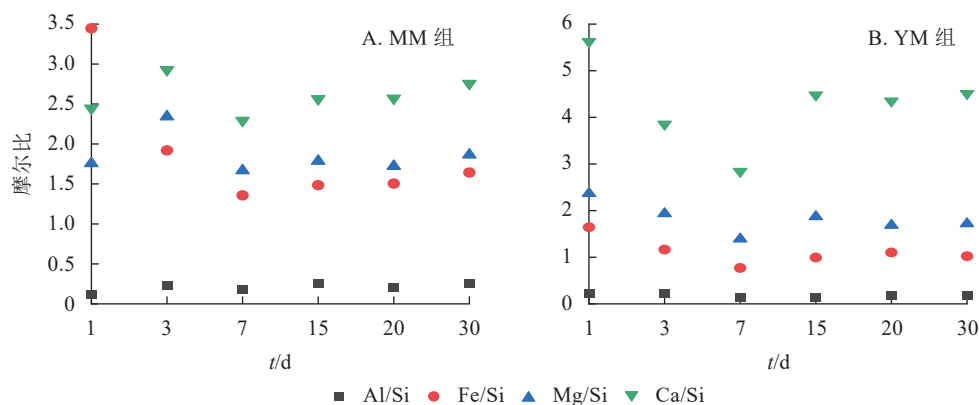


图 6 微生物体系下浸提液元素的摩尔比

Figure 6 Molar ratios of elements in the leaching solution under microbial systems

3 讨论

3.1 不同菌株对玄武岩风化过程中元素释放的影响

微生物能够栖居于岩石表面已经得到大量研究证实^[26]。相关研究发现：细菌和真菌展现了出色的适应能力和显著的地质活动，通常形成地衣共生，并广泛分布于陆地岩石圈表面^[27-28]。为了明确不同菌株对玄武岩风化作用强度的影响，本研究对真菌和细菌浸提液中矿物元素释放量和释放速率进行比较，发现棘孢木霉组的风化速率高于胶质芽孢杆菌组。本研究棘孢木霉组中，pH 为 5.16~7.44，而在胶质芽孢杆菌组中 pH 为 5.88~6.26，真菌的 pH 波动幅度大且在长时间内低于细菌组，表明棘孢木霉能够分泌更多的酸，从而促进元素的溶出速率，这与王浩贤等^[25]的研究结果一致。棘孢木霉组 pH 在后期显著上升可能原因有：①随着玄武岩的风化，释放出大量的碱性盐基离子 (Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^{+} 、 Na^{+})，从而中和酸性；②后期真菌细胞自溶，氨基氮含量增加，造成 pH 上升；③随着时间的推移，有机酸可能被分解或进一步代谢，减少了溶液中的酸性成分，从而导致 pH 上升^[27]。真菌的产酸量被证明是细菌的 200 多倍^[29]，突显了真菌在促进元素溶出方面的高效性。这对于理解岩石风化机制以及土壤养分释放过程具有重要的启示。

在棘孢木霉组和胶质芽孢杆菌组中，元素释放量从高到低依次是 Ca、Mg、Fe、Si、Al。其中，Ca 的释放量最高，为 $3.17 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ ，说明 Ca 相对于其他元素更容易溶出，周跃飞等^[30]的研究中也证明了这点。其原因是真菌和细菌在代谢活动中引发了生物地球化学反应，加速了含有 Ca 的矿物分解并释放到溶液中。本研究还发现：棘孢木霉组中变化最大的是 Fe，其原因可能是在真菌的参与下，Fe 发生了较为明显的络合作用。LI 等^[31]研究表明：真菌能通过 Fe 载体显著提高矿物中 Fe 释放。SANTHIYA 等^[32]研究表明：微生物在生长繁殖过程中产生多聚糖类物质，不仅促进质子交换，还能通过配体络合作用促进矿物的溶解，在这些矿物中，Fe、Mg 等元素也容易形成络合物^[33-34]。

3.2 不同菌株对玄武岩风化过程中元素释放能力的影响

不同菌株对玄武岩风化过程中元素释放能力的影响因素较多，在试验过程中可能会存在一些影响因素^[35]，如释放出的矿质元素可能被微生物吸收成为细胞内酶的组成部分，或被真菌菌丝所吸附；释放出的 Mg 可能以水合离子的形式存在于溶液中；根据 RAMOS 等^[36]的研究，当 $\text{pH} > 6.5$ 时，浸提液中的部分 Al 可能以 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 的形式存在，然而，在本研究真菌（棘孢木霉）组的 pH 在 6.06~7.44 内变化，可能导致 Al 低于实际释放量，Fe 也可能出现类似情况；从生物量的角度看，真菌的生物量远远大于细菌，在生长发育过程中可能吸收了更多的矿质元素，因此元素释放能力真菌实际远远高于细菌。这些情形说明浸提液中的元素实际上只是元素释放量的一部分。但是 Ca/Si 的摩尔比值仍远远高于 Mg/Si，因此真菌和细菌的作用下，元素的实际溶出能力从大到小仍然是 Ca、Mg、Fe、Si、Al。

3.3 元素释放机制

微生物栖居于岩石表面进行活动会代谢产生一部分质子 (H^{+})，通过 H^{+} 与岩石矿物表面的金属阳离子发生交换，会促使矿物溶解^[37]。本研究发现：棘孢木霉和胶质芽孢杆菌体系中浸提液的 pH 变化呈不同

趋势, 其原因是棘孢木霉的介入初期能够分泌较多酸, 从而降低其 pH, 而随时间推移, 真菌促进玄武岩风化并释放盐基离子 (Ca 和 Mg) 导致 pH 提高; 胶质芽孢杆菌在风化玄武岩的过程中释放了酸性物质, 这些酸性物质逐渐电离出 H^+ , 进而导致浸提液 pH 降低^[28], 这一现象与李永等^[29]在使用细菌风化岩石时观察到 pH 降低的情况相符。此外, 无论是棘孢木霉还是胶质芽孢杆菌, 浸提液 pH 在刚开始时均低于对照, 这说明真菌和细菌均有可能释放出了酸, 营造酸性环境。本研究元素浓度动态变化结果表明: 棘孢木霉组的 Si、Ca、Al、Fe、Mg 等 5 种元素的浓度均高于胶质芽孢杆菌组和对照, 且线性释放区间更长。与 pH 变化结合, 发现在这个时间段棘孢木霉组的 pH 呈直线下降, 第 7 天 pH 最低, 同时 Mg 和 Fe 元素的浓度变化呈现相似趋势, 但 Fe 较为平稳的上升, 这表明微生物能通过代谢一些酸性物质营造酸性环境而促进元素的溶出, 这与 STONE^[38]的研究结果一致。

胶质芽孢杆菌组矿物元素的浓度总体低于棘孢木霉组, 但高于对照。其中, Si、Ca、Al、Fe 和 Mg 等 5 种元素的浓度在一定范围内呈相对平稳的变化趋势。结合 pH 图对比分析, 胶质芽孢杆菌组的溶液 pH 低于对照, 说明矿物元素的释放受酸性环境的控制, 其原因是真菌和细菌在与岩石相互作用的过程中会分泌不同种类的有机酸, 导致周围环境酸化, 并提供质子以加速矿物的溶解。这些有机酸还通过络合作用加速矿物表面元素的释放^[39]。相关研究表明: Si、Al、Fe、Mg 等元素易与有机酸形成络合物, 促进矿物中元素的溶解^[40-41]。棘孢木霉相较于胶质芽孢杆菌能分泌更多的有机酸, 能更有效地促进玄武岩矿物元素的释放。

4 结论

棘孢木霉和胶质芽孢杆菌能明显加速玄武岩的风化进程, 且棘孢木霉处理下的玄武岩风化速率明显高于胶质芽孢杆菌处理下的风化速率, 这表明真菌在矿物风化过程中的能力优于细菌。棘孢木霉和胶质芽孢杆菌均提高了 Si、Ca、Al、Fe 和 Mg 元素的释放, 且以棘孢木霉的提高效果最好。棘孢木霉和胶质芽孢杆菌作用下, 玄武岩中元素的释放能力从大到小均依次为 Ca、Mg、Fe、Si、Al。这表明微生物种类可能对元素的溶出能力影响不大, 真菌和细菌对促进玄武岩风化的机制可能相似。

5 参考文献

- [1] STRAATEN V P. Farming with rocks and minerals: challenges and opportunities [J]. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 2006, **78**(4): 731–747.
- [2] FEININGER T. An introduction to the rock-forming minerals (third edition) [J]. *The Canadian Mineralogist*, 2013, **51**(4): 663–664.
- [3] CHADWICK O A, DERRY L A, VITOUSEK P M, *et al.* Changing sources of nutrients during four million years of ecosystem development [J]. *Nature*, 1999, **397**: 491–497.
- [4] 金文豪, 邵帅, 陈俊辉, 等. 不同类型菌根对土壤碳循环的影响差异研究进展 [J]. 浙江农林大学学报, 2021, **38**(5): 953–962.
JIN Wenhao, SHAO Shuai, CHEN Junhui, *et al.* Progress of research on the effects of different types of mycorrhizae on soil carbon cycle [J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2021, **38**(5): 953–962.
- [5] WOLFF BOENISCH D, GISLASON S R, OELKERS E H. The effect of crystallinity on dissolution rates and CO_2 consumption capacity of silicates [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2006, **70**(4): 858–870.
- [6] POKEOVSKY O S, SCHOTT J, KUDRYAVTZEVA D I, *et al.* Basalt weathering in Central Siberia under permafrost conditions [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2005, **69**(24): 5659–5680.
- [7] FYFE S W, LEONARDOS H O, THEODORO H S. Sustainable farming with native rocks: the transition without revolution [J]. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 2006, **78**(4): 715–720.
- [8] DESSERT C, BERNARD D, GAILLARDET J, *et al.* Basalt weathering laws and the impact of basalt weathering on the global carbon cycle [J]. *Chemical Geology*, 2005, **202**(3/4): 257–273.
- [9] OELKERS E H, SCHOTT J. An experimental study of enstatite dissolution rates as a function of pH, temperature, and aqueous Mg and Si concentration, and the mechanism of pyroxene/pyroxenoid dissolution [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2001, **65**: 1219–1231.

- [10] BAYON G, BIROT D, RUFFINE L, *et al.* Evidence for intense REE scavenging at cold seeps from the Niger Delta margin [J]. *Earth & Planetary Science Letters*, 2011, **312**(3/4): 443–452.
- [11] DAS A, KRISJNASWAMI S, KUMAR A. Sr and $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ in rivers draining the Deccan Traps (India): implications to weathering, Sr fluxes, and the marine $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ record around K/T [J/OL]. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 2013, **7**(6): Q06014[2024-05-30]. DOI: 10.1029/2005GC001081.
- [12] STEWART W B, CAPO C R, CHADWICK A O. Effects of rainfall on weathering rate, base cation provenance, and Sr isotope composition of Hawaiian soils [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2001, **65**(7): 1087–1099.
- [13] HARTMANN J, WEST A J, RENFORTH P, *et al.* Enhanced chemical weathering as a geoengineering strategy to reduce atmospheric carbon dioxide, supply nutrients, and mitigate ocean acidification [J]. *Reviews of Geophysics*, 2013, **51**(2): 113–149.
- [14] KANTOLA I B, MASTERS M D, BEERIING D J, *et al.* Potential of global croplands and bioenergy crops for climate change mitigation through deployment for enhanced weathering [J/OL]. *Biology Letters*, 2017, **13**(4): 20160714[2024-05-30]. DOI: 10.1098/rsbl.2016.0714.
- [15] WALLANDER H, HAGERBERG D. Do ectomycorrhizal fungi have a significant role in weathering of minerals in forest soil? [J]. *Symbiosis*, 2004, **37**(1/3): 249–257.
- [16] KIM J, DONG H, SEABAUGH J, *et al.* Role of microbes in the smectite-to-illite reaction [J]. *Science*, 2004, **303**(5659): 830–832.
- [17] BHATTI T M, BIGHAM J M, VUORINEN A, *et al.* Weathering of biotite in *Acidithiobacillus ferrooxidans* cultures [J]. *Geomicrobiology Journal*, 2011, **28**(2): 130–134.
- [18] SOOD M, KAPOOR D, KUMAR V, *et al.* *Trichoderma*: the “secrets” of a multitasking biocontrol agent [J/OL]. *Plants*, 2020, **9**(6): 762[2024-05-30]. DOI: 10.3390/plants9060762.
- [19] 高宁, 邢意警, 熊瑞, 等. 丛枝菌根真菌和溶磷细菌协调植物获取磷素的机制[J]. 浙江农林大学学报, 2023, **40**(6): 1167–1180.
GAO Ning, XING Yijing, XIONG Rui, *et al.* Mechanisms of coordination of phosphorus acquisition by plants by tufted mycorrhizal fungi and phosphorus-solubilizing bacteria [J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2023, **40**(6): 1167–1180.
- [20] YAO Minjie, LIAN Bin, TENG H H, *et al.* Serpentine dissolution in the presence of bacteria *Bacillus mucilaginosus* [J]. *Geomicrobiology Journal*, 2013, **30**(1): 72–80.
- [21] 王飞. 棘孢木霉对植物铁营养的影响及其机制的研究[D]. 济南: 山东师范大学, 2014.
WANG Fei. *Study on the Effect of Trichoderma aspergillus on Plant Iron Nutrition and Its Mechanism* [D]. Jinan: Shandong Normal University, 2014.
- [22] MICHAEL G G, JOON Y R, KAREN S, *et al.* Geomycology: metals, actinides and biominerals [J]. *Environmental Microbiology Reports*, 2012, **4**(3): 270–296.
- [23] BALOGH-BRUNSTAD Z, KELLER C K, DICKINSON J T, *et al.* Biotite weathering and nutrient uptake by ectomycorrhizal fungus, *Suillus tomentosus*, in liquid-culture experiments [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2008, **72**(11): 2601–2618.
- [24] 常征, 许林书, 高梅香, 等. 镜泊湖全新世玄武岩台地土壤养分特征分析[J]. 东北林业大学学报, 2009, **37**(10): 57–59.
CHANG Zheng, XU Linshu, GAO Meixiang, *et al.* Analysis of soil nutrient characteristics of the Holocene basalt platform in Jingpo Lake [J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2009, **37**(10): 57–59.
- [25] 王浩贤, 李子波, 陈旻, 等. 真菌-玄武岩相互作用过程中真菌属种差异对元素释放行为的影响[J]. 第四纪研究, 2019, **39**(2): 458–468.
WANG Haoxian, LI Zibo, CHEN Yang, *et al.* The influence of fungal species differences on element release behavior during fungal-basalt interactions [J]. *Quaternary Sciences*, 2019, **39**(2): 458–468.
- [26] GUBDRANDSSON S, WOLFF-BOENISCH D, GISIASON S R, *et al.* An experimental study of crystalline basalt dissolution from $2 \leq \text{pH} \leq 11$ and temperatures from 5 to 75 °C [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2011, **75**(19): 5496–5509.
- [27] CRISPIM C A, GAYLARD C C. Cyanobacteria and biodeterioration of cultural heritage: a review [J]. *Microbial Ecology*, 2005, **49**(1): 1–9.

- [28] PENNISI E. A lichen ménage a trois [J/OL]. *Science*, 2016, **353**(6297): 337[2024-05-30]. DOI: [10.1126/science.353.6297.337](https://doi.org/10.1126/science.353.6297.337).
- [29] 李永, 李福春, 杨刚, 等. 真菌与细菌作用下黑云母中主要元素溶出状况的对比分析[J]. 土壤通报, 2017, **48**(1): 86–93.
LI Yong, LI Fuchun, YANG Gang, *et al.* Comparative analysis of major element leaching from biotite under the action of fungi and bacteria [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2017, **48**(1): 86–93.
- [30] 周跃飞, 王汝成, 陆现彩. 玄武岩微生物分解过程中的矿物表面效应[J]. 岩石矿物学杂志, 2008, **27**(1): 59–66.
ZHOU Yuefei, WANG Rucheng, LU Xiancai. Mineral surface effects during microbial decomposition of basalt [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2008, **27**(1): 59–66.
- [31] LI Zibo, LIU Lianwen, CHEN Jun, *et al.* Cellular dissolution at hypha and spore-mineral interfaces revealing unrecognized mechanisms and scales of fungal weathering [J]. *Geology*, 2016, **44**(4): 319–322.
- [32] SANTHIYA D, SUBRAMANIAN S, NATARAJAN K. Surface chemical studies on sphalerite and galena using extracellular polysaccharides isolated from *Bacillus polymyxa* [J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2002, **256**(2): 237–248.
- [33] BRANTLEY L S, LIERMANN J L, GUYNN L R, *et al.* Fe isotopic fractionation during mineral dissolution with and without bacteria [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2004, **68**(15): 3189–3204.
- [34] LIERMANN L J, KALINOWSKI B E, BRANTLEY S L, *et al.* Role of bacterial siderophores in dissolution of hornblende [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2000, **64**(4): 587–602.
- [35] 宋振宇, 蔡柏岩. 丛枝菌根真菌介导的矿质元素运输研究进展[J]. 黑龙江大学自然科学学报, 2024, **41**(2): 127–133.
SONG Zhenyu, CAI Boyan. Progress in the study of mineral element transport mediated by the mycorrhizal fungi [J]. *Journal of Natural Science of Heilongjiang University*, 2024, **41**(2): 127–133.
- [36] RAMOS M E, GARCIA-PALM S, ROZALEN M. Kinetics of montmorillonite dissolution: an experimental study of the effect of oxalate [J]. *Chemical Geology*, 2014, **63**: 283–292.
- [37] 屈明华, 俞元春, 李生, 等. 丛枝菌根真菌对矿质养分活化作用研究进展[J]. 浙江农林大学学报, 2019, **36**(2): 394–405.
QU Minghua, YU Yuanchun, LI Sheng, *et al.* Progress in the study of the activation of mineral nutrients by tufted mycorrhizal fungi [J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2019, **36**(2): 394–405.
- [38] STONE A T. Reactions of extracellular organic ligands with dissolved metal ions and mineral surfaces [J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 1997, **35**(1): 309–344.
- [39] DREVER J I, STILLINGS L L. The role of organic acids in mineral weathering [J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 1997, **120**(1/3): 167–181.
- [40] STUMM W, FURRER G, WIELAND E, *et al.* The effects of complex-forming ligands on the dissolution of oxides and aluminosilicates [M]. DREVER J I. *The Chemistry of Weathering*. Dordrecht: Springer, 1985: 55–74.
- [41] FRIEDRICH S, PLATONOVA N P, KARAVAIKO G, *et al.* Chemical and microbiological solubilization of silicates [J]. *Acta Biotechnologica*, 1990, **11**(3): 187–196.