



典型硅酸盐细菌和真菌对钾长石动态溶蚀效果对比研究

梁艳华，包麒钰，孙德四，陈浩

(九江学院 化学与环境工程学院，九江 332005)

摘要：以典型硅酸盐细菌 *Paenibacillus polymyxa* 和 *Agrobacterium tumefaciens* 及真菌 *Aspergillus niger* 为试验菌株，采用摇瓶培养试验，通过测定发酵培养液中细菌浓度、pH值、浸矿上清液中K、Si、Al的质量浓度以及钾长石被菌株作用前后的SEM和XRD分析，比较了这三种典型种类微生物对钾矿物的动态溶蚀效果。结果表明：真菌的生长周期较硅酸盐细菌的短，且具有更高的产酸能力，但硅酸盐细菌的对数生长期相对较长，其在培养液中具有更高的细菌浓度，产生胞外多聚物的能力更强；三株菌种对钾长石均有一定的风化分解能力，*Paenibacillus polymyxa* 的溶蚀效果最好，浸出液中的K₂O、SiO₂、Al₂O₃的质量浓度最高可达2.30 g/L、6.55 g/L、5.20 g/L，其次为*Aspergillus niger* 和 *Agrobacterium tumefaciens*；但真菌释放钾长石中的K、Al、Si的速率最快，浸矿周期最短，综合效率最高。分析认为，真菌对矿物的溶蚀效果主要受有机酸酸解和络解作用机制的影响，而硅酸盐细菌对矿物的风化分解能力则主要受胞外多聚物络解作用机制的控制。

关键词：真菌；硅酸盐细菌；钾长石；溶蚀

文章编号：1004-0609(2022)-05-1469-10

中图分类号：TD925.5；Q939.97

文献标志码：A

引文格式：梁艳华,包麒钰,孙德四,等.典型硅酸盐细菌和真菌对钾长石动态溶蚀效果对比研究[J].中国有色金属学报,2022,32(5):1469-1478. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2022-40031

LIANG Yan-hua, BAO Qi-yu, SUN De-si, et al. Comparative study on dynamic dissolution of potassium feldspar by typical silicate bacteria and fungi[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2022, 32(5): 1469-1478.
DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2022-40031

钾是植物生长不可或缺的重要矿质元素，尽管我国不溶性含钾矿物资源储量丰富，但水溶性(能被植物吸收)钾矿资源极为缺乏，如何提高不溶性含钾矿物的转化利用效率倍受国内学者的关注。在农业上，根据现有的研究报告，除了利用“硅酸盐细菌”(可以分解硅酸盐矿物的微生物的总称)制备成生物菌剂以激活钾硅酸盐矿物中的K(Si)外，也有一些学者使用该类细菌浸出钾硅酸盐矿物以获得

可供植物利用的活性K(Si)，并获得了一定的研究成果^[1-6]。但目前国内仍主要采用湿法冶金、热法冶金等高污染、高成本的技术从含钾矿物中提取活性K(Si)供植物利用。因此，开发环境友好型生物浸出提K(Si)技术在理论上是可行的，且更具有环境友好性的重要意义^[3]。

自苏联学者亚历山大罗夫从土壤中分离出一种能分解硅酸盐类矿物如正长石和磷灰石释放出钾、

基金项目：国家自然科学基金资助项目(51264014)

收稿日期：2020-08-25；**修订日期：**2022-03-03

通信作者：孙德四，教授，博士；电话：15170295286；E-mail：ssddss15@163.com

陈浩，博士，副教授；电话：15870857672；E-mail：sundesi1215@126.com

磷的硅酸盐细菌以来，“硅酸盐细菌”受到国内外学者的广泛关注^[5-9]。人们从各种土壤、水体、植物根际、矿区等选育出具有较高溶K/Si活性的 *Paenibacillus polymyxa*、*Bacillus circulans*、*Paenibacillus mucilaginosus* 等具有代表性的硅酸盐细菌(也称钾细菌)，并进行了有关溶钾效应、溶钾机理及其应用效果等方面的研究，已取得丰硕成果^[7-10]。但通过对比现有研究报道发现，钾细菌在浸钾过程中仍然存在明显的缺陷，如菌株优良浸矿性能不稳定、浸矿周期较长、解钾效率低等问题。地球上微生物对矿物的风化过程是多种微生物以多种方式共同作用的结果，除细菌外，还有真菌等微生物也可以风化分解矿物，并且微生物浸矿实验表明，真菌比细菌具有更好的浸矿效果。目前，人们已经从不同矿物表层、土壤、植物根际中选育出部分对含钾矿物具有风化分解作用的真菌菌株，如 *Ectomycorrhizal fungi*^[11]、*Cenococcumgeophilum*^[12]、*Penicillium spinulosum*^[13]、*Talaromycesradicus*^[14]、*Aspergillus fumigatus*^[15]、*Aspergillus niger*^[16] 等菌株。由于真菌的生长特性(如生长繁殖周期、产代谢产物的能力)与细菌相比存在显著的差异，这可能是导致它们在风化分解岩石矿物及释放其中元素的效率方面存在一定差异的关键因素^[17-23]。已有硅酸盐矿物微生物风化分解机制研究表明，微生物对矿物的风化效率与其产代谢产物能力密切相关^[3, 7]。该类菌种主要通过小分子有机酸的酸解与络解作用、胞外聚合物的络解作用以及氧化还原作用等方式风化分解硅酸盐矿物；浸矿过程中菌种产酸、胞外聚合物及氧化还原酶(蛋白质)的能力大小是影响其对矿物分解效果的主要因素，特别是氧化还原酶(蛋白质)，它是菌体主动运输 K、Si、Fe 离子所必需的载体，对微生物吸收利用矿物中的营养物质元素具有至关重要的影响^[24-28]。

目前，有关对比分析细菌与真菌动态风化分解岩石矿物(特别是钾硅酸盐矿物)的研究报道极少。为此，本文采用摇瓶浸出形式，选用两株具有典型特性的硅酸盐细菌(多粘芽孢杆菌与根瘤农杆菌)及

一株真菌(黑曲霉)浸出试验矿物钾长石，对比分析它们动态风化分解钾长石并释放其中 K(Si、Al)的效率差异，并分析导致这种差异的可能生物化学机制。

1 实验

1.1 试验矿样

供试矿样采自于河南某钾矿场的钾长石。物相分析(XRD)及化学成分组成(原子吸收分光光度法)分析表明，钾长石的主要矿物组成为钾长石 81.50%、白云母 7.45%、石英 4.20%、赤铁矿 2.10%、碳酸钙 3.15% 等，主要化学成分见表1。

1.2 供试菌种及活化培养

试验中使用的多粘芽孢杆菌(*Paenibacillus polymyxa*)、根瘤农杆菌(*Agrobacterium tumefaciens*)及黑曲霉(*Aspergillus niger*)三株菌种均在 2013 年购买于中国微生物菌种保藏管理委员会普通微生物中心(CGMCC)，其菌种编号分别为 1.097、1.1603、3.0316。多粘芽孢杆菌和根瘤农杆菌均采用 Asby's 基质(含钾长石矿粉)培养基^[3]进行活化与发酵培养，黑曲霉采用 Czapek's 培养基进行活化与发酵培养，目的是测定实验菌种的生长曲线、最佳繁殖生长的环境条件及代谢产酸等代谢产物的能力。同时，按照文献[29]的方法制备用于浸矿的种子液。

1.3 细菌浸出实验

1.3.1 硅酸盐细菌浸矿试验

采用摇瓶浸出形式考察试验菌株对钾矿物的动态溶蚀效果，在 250 mL 的锥形瓶中分别入 100 mL 灭活的 Asby's 基质培养基(或者)及 5 g 矿样粒度为-75 μm 的钾长石矿粉，然后接入 10 mL 处于对数生长期的菌株种子液，使浸矿培养液中的细胞初始浓度为 1.7×10^7 个/mL。*Paenibacillus polymyxa* 和 *Agrobacterium tumefaciens* 菌株的浸矿初始条件均

表1 钾长石的主要化学成分

Table 1 Main chemical components of potassium feldspar (mass fraction, %)

SiO ₂	Al ₂ O ₃	K ₂ O	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	MnO	P ₂ O ₅	Total
63.15	18.32	10.29	0.06	1.23	2.45	0.57	3.21	0.03	0.11	99.42

为: 温度 30 °C, pH 值 7.0, 摆床转速 240 r/min。

1.3.2 真菌 *Aspergillus niger* 浸矿试验

同样采用摇瓶浸出形式, 在 250 mL 的锥形瓶中分别加入 100 mL 灭活的 Czapek's 培养基及 5 g 矿样粒度为 -75 μm 的钾长石矿粉, 然后接入菌种种子液, 使浸矿培养液中孢子初始浓度为 1.7×10^7 个/mL。浸矿初始条件为: 温度 28 °C, pH 值 7.2, 摆床转速 150 r/min。

以上每组试验均设三个平行试验组, 同时以无菌浸矿培养作为对照实验。试验中, 每隔 12 h 取样一次, 测定样液中的 K_2O 、 SiO_2 和 Al_2O_3 浓度。用新鲜培养基补足因取样后损失的培养液。

1.4 物理化学分析

参照文献[3, 7]中的方法测定各浸出液及发酵培养液样品中有机酸总量、蛋白质及多糖的含量; 采用原子吸收分光光度法对各样品溶液中的 Si^{4+} 、 Al^{3+} 、 K^+ 进行测定(仪器型号及厂家: 370MC, 上海分析仪器厂), 并以 SiO_2 、 Al_2O_3 、 K_2O 的质量分数进行计量; 采用酸度计(仪器型号及厂家: PHS-3C, 上海雷磁仪器厂)测定各浸矿上清液和发酵培养液中的 pH 值; 采用平板计数法方式确定细菌浓度; 采用电子扫描显微镜观察钾长石矿粉被细菌溶蚀前后的颗粒表面微观形态差异(仪器型号及厂家: VEGIILSU, TESCAN 公司); 采用 XRD 技术考察钾长石矿粉被试验细菌或真菌分解前后的组成差异(仪器型号及厂家: D/Max-2500, Rigaku 日本公司)。

2 结果与分析

2.1 试验菌株的生长代谢特性

2.1.1 菌株生长曲线及发酵培养液中 pH 变化规律

环境条件培养试验表明, *Paenibacillus polymyxa* 和 *Agrobacterium tumefaciens* 菌株在温度 25~35 °C、pH 值 4.2~9.1 的范围内均可繁殖生长, 最佳生长条件为温度 30 °C、pH 值 7.0、摇床转速 240 r/min; 而 *Aspergillus niger* 菌株可生长繁殖的温度和 pH 值范围要比上述两株试验菌种更广, 分别为 15~50 °C、pH 值 1.8~9.5, 最佳条件为温度 28 °C、pH 值 7.2、摇床转速 150 r/min。

通过对三株菌种的活化及传代培养, 确定了它

们的生长曲线及产酸能力, 结果见图 1。如图 1(a) 和(b) 所示, 两株硅酸盐细菌的生长曲线及产酸能力有一定的差别。*Paenibacillus polymyxa* 的生长繁殖及产酸能力相对较强, 其生长延迟期、对数生长期和停滞期分别为 0~18 h、18~108 h 和 108~156 h, 发酵培养液中的细菌浓度最高可达 2.8×10^8 个/mL,

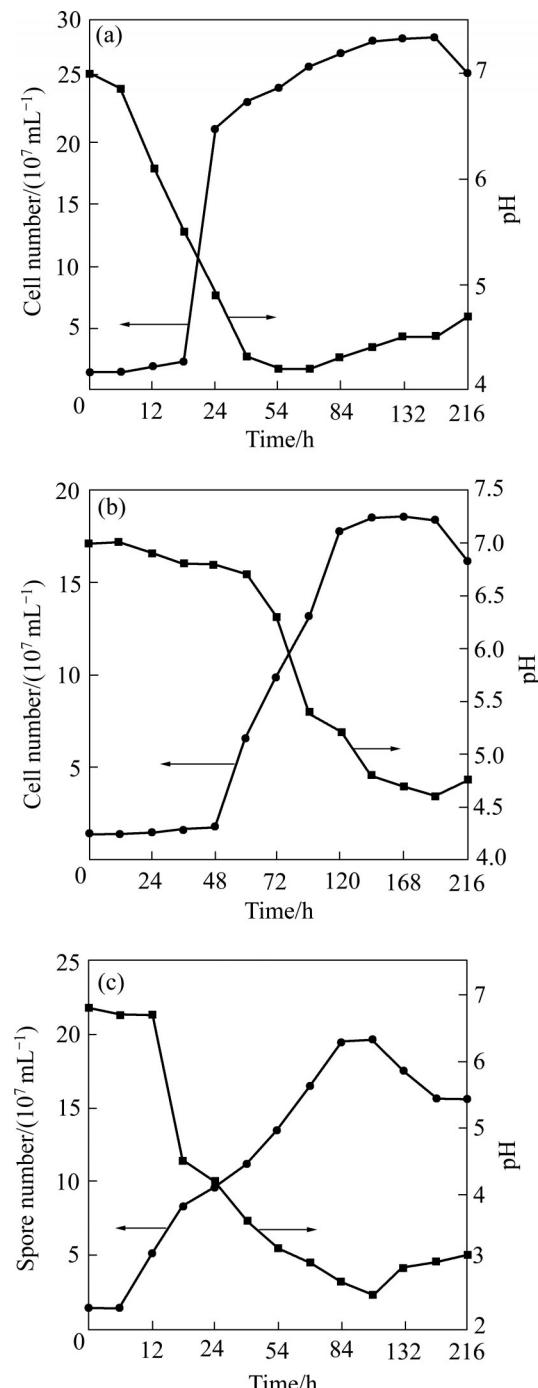


图 1 菌株生长曲线及发酵液中 pH 值变化规律

Fig. 1 Growth curves of strain and change rule of pH value in fermentation broth: (a) *Paenibacillus polymyxa*; (b) *Agrobacterium tumefaciens*; (c) *Aspergillus niger*

pH值最低为4.2。而*Agrobacterium tumefaciens*具有较长的生长延迟期(0~48 h)和较短的对数生长期(48~120 h), 发酵液中的细菌浓度最高为 1.84×10^8 个/mL, pH值最低为4.6。

如图1(c)所示, *Aspergillus niger*具有较强的产酸能力, 发酵培养液中的pH值最低可达2.5, 其生长延迟期较短(0~6 h), 并具有相对较长的对数生长期(6~84 h)。

从各菌株生长曲线可以看出(见图1), 菌株在到达生长停滞期后期, 发酵液中的细胞(孢子)浓度均有不同程度的减少, 这表明此阶段培养基中的营养物质已经不足以供给细菌或真菌继续繁殖生长。因此, 在浸矿培养过程中, 为了维持菌株的生长繁殖能力, 提高浸矿效能, 可以补充新鲜培养液使菌株具有继续繁殖生长能力, 使浸矿培养液中具有较高的细菌浓度。

2.1.2 试验菌株产代谢产物能力差异分析

为初步了解试验菌株对钾长石风化分解的可能生物化学机制, 特别是菌种产代谢产物能力与其浸矿效率之间的关系, 为此, 分析了三株试验菌株在浸矿培养过程中产酸、蛋白质和多糖能力的差异, 结果见图2。

从图2可以看出, 三株菌种产代谢产物的速度与产量存在显著差异。如图2(a)所示, 真菌*Aspergillus niger*代谢产酸的速度最快, 且产量最高, 当浸矿培养到100 h, 浸出上清液中有机酸的质量浓度可达最大值3.92 mg/L; 细菌*Paenibacillus polymyxa*和*Agrobacterium tumefaciens*代谢产酸的速度相对较慢且能力较弱, 在浸矿培养到150 h代谢产生的最大有机酸含量分别为1.98 mg/L和1.41 mg/L。而如图2(b)和(c)所示, 细菌*Paenibacillus polymyxa*代谢产蛋白质和多糖能力最强, 当浸矿培养到200 h, 浸矿上清液中蛋白质和多糖的质量浓度分别达到最大值7.22 mg/L和7.59 g/L; 其次为*Agrobacterium tumefaciens*, 其浸矿上清液中的蛋白质和多糖的最大含量分别为4.12 mg/L和3.28 g/L; 真菌*Aspergillus niger*代谢能力最弱, 但代谢速度相对较快, 当浸矿培养到100 h, 上清液中蛋白质和多糖的质量浓度达到最大值, 分别为2.12 mg/L和1.20 g/L。

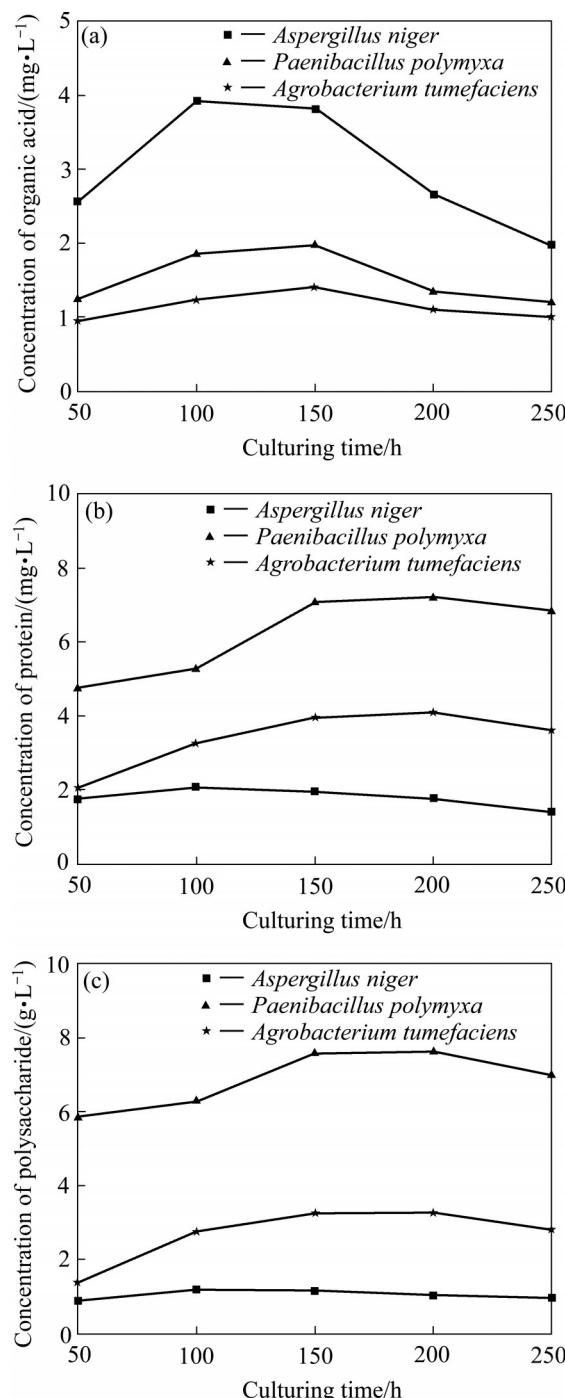


图2 试验菌株浸矿上清液中有机酸、蛋白质和多糖的质量浓度变化规律

Fig. 2 Mass concentration change rules of organic acids (a), proteins (b) and polysaccharides (c) in leaching supernatants of bacterial strains

2.2 浸矿培养液中 K^+ 、 Si^{4+} 、 Al^{3+} 的质量浓度变化规律

三株试验菌种浸矿体系上清液中, K^+ 、 Si^{4+} 、 Al^{3+} 的质量浓度(以各元素的氧化物计量)随浸出时

间的变化规律见图3。从图3可以看出, *Paenibacillus polymyxa* 浸矿体系对钾长石风化分解效果最好, 浸矿上清液中释放出的K⁺、Si⁴⁺和Al³⁺的量最大, 对应的K₂O、SiO₂和Al₂O₃的质量浓度分别可达2.30 g/L、6.55 g/L和5.20 g/L; 其次为*Aspergillus niger* 浸矿体系, 对应的K₂O、SiO₂和

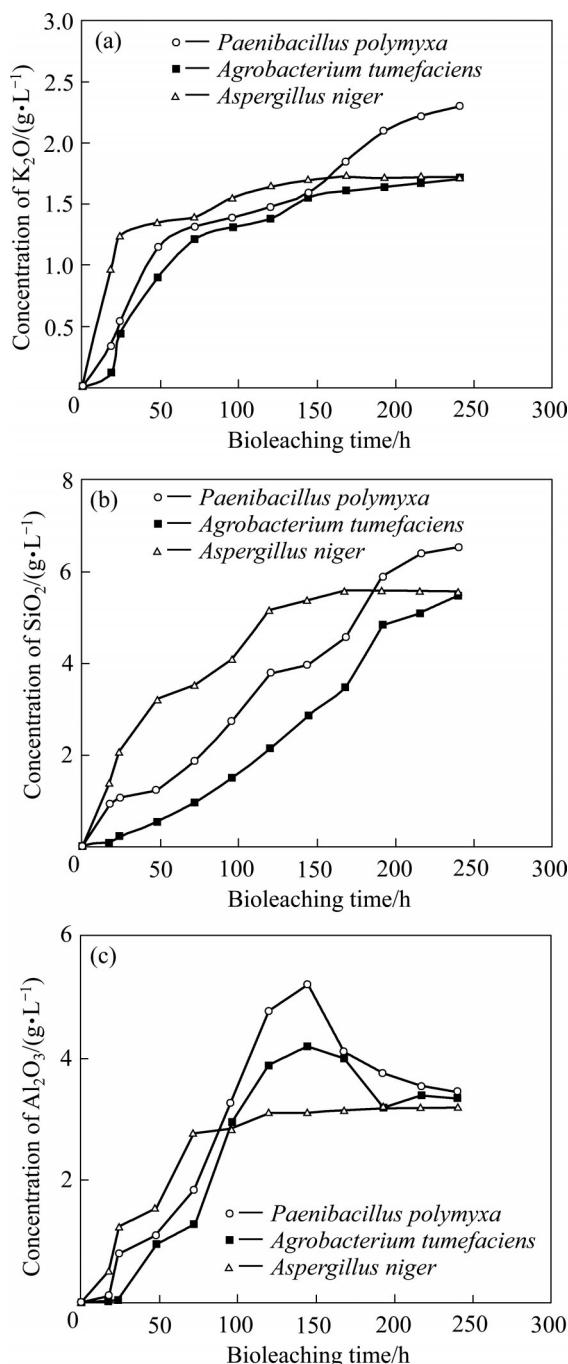


图3 各菌株浸矿液中K⁺、Si⁴⁺和Al³⁺的质量浓度(以各元素的氧化物计量)变化规律

Fig. 3 Mass concentration change rules of K⁺, Si⁴⁺ and Al³⁺ (measured by oxide of each element) in leaching solution of each strain: (a) K₂O; (b) SiO₂; (c) Al₂O₃

Al₂O₃的最大质量浓度分别为1.72 g/L、5.61 g/L和3.20 g/L; 而*Agrobacterium tumefaciens*释放钾长石矿物中的K⁺和Si⁴⁺的量最少, 对应的K₂O和SiO₂的质量浓度分别为1.65 g/L和5.58 g/L, 但释放的Al³⁺的量(Al₂O₃的质量浓度为4.19 g/L)却要高于真菌。

同时, 由图2可知, 真菌*Aspergillus niger*对钾长石中Si、Al和K的溶出速率与细菌*Paenibacillus polymyxa*、*Agrobacterium tumefaciens*相比存在显著差异。在浸矿前期(0~150 h), 真菌试验体系对钾长石中各元素的溶出速率和溶出量要明显快于和大于细菌试验体系。但浸矿中后期(150 h后), 细菌试验体系对钾长石中K、Si的溶出速率明显加快, 溶出量大幅增加, 而此时, 真菌对矿物各元素的溶出处于缓慢增加或停滞期, 基本达到了浸矿终点。这一结果表明, 试验用的真菌浸矿周期较短, 浸出率相对较低, 但从综合浸矿效率来看, 真菌的效率要比细菌的高; 而硅酸盐细菌的浸矿周期较长, 浸出率相对较高。结合前面三株试验菌株的生长代谢特征试验结果, 分析认为导致这一结果的可能原因是: 1) 试验用真菌的生长繁殖期较短, 且在浸矿的0~150 h内, 产有机酸能力远高于细菌, 但在浸矿的150 h后, 真菌生长代谢趋于停滞, 产酸能力变得很弱, 浸出液中的有机酸含量大幅减少, 这可能是真菌浸矿周期较短的关键原因。而已有研究表明, 在浸矿前期, 硅酸盐矿物的风化分解及主要元素的释放效率主要受小分子有机酸的影响^[28]。2) 试验用细菌, 特别是*Paenibacillus polymyxa*菌种的对数生长期较长, 在浸矿的150 h后, 菌种仍具有较强代谢产胞外多糖和蛋白质的能力, 这应该是细菌浸矿周期较长的主要原因。同时, 其产胞外多糖与蛋白质能力远高于试验用真菌。据研究报道, 胞外多糖具有很强的络合作用, 可与矿物颗粒结合形成细菌-矿物聚合体, 从而提高硅酸盐矿物的风化分解速率并释放其中的元素, 而蛋白质是细菌主动吸收硅酸盐矿物中营养元素(K、Si、Fe等)所必须的载体, 对细菌溶蚀分解矿物具有关键影响^[29~30]。这应该是*Paenibacillus polymyxa*菌种对钾长石中Si、Al、K浸出率最高的主要原因。

对比图2中各元素的动力学溶出规律可以看出, K₂O、SiO₂的质量浓度在各浸出体系中基本呈现缓慢增加、快速增加、停滞增加三个阶段, 但Al₂O₃的浓度在细菌和真菌试验体系中表现出明显不同的

动态变化规律。在细菌试验体系中, Al_2O_3 的质量浓度在快速增加至最大值后, 会突然急剧下降, 然后又出现缓慢增加, 直至达到停滞增加阶段, 即浸矿终点。这是溶出的 Al^{3+} 及其化合物与细菌代谢产生的大分子化合物(蛋白质、多糖等)产生絮凝沉淀所致的结果^[20-22]。而在真菌浸矿体系中, 由于真菌代谢产生了大量的菌丝球, 且代谢产生的胞外多糖等大分子产物较少(浸出液中最高值为 1.20 g/L), 几乎所有的矿粉颗粒均被菌丝球所包裹(见图 4(a)),

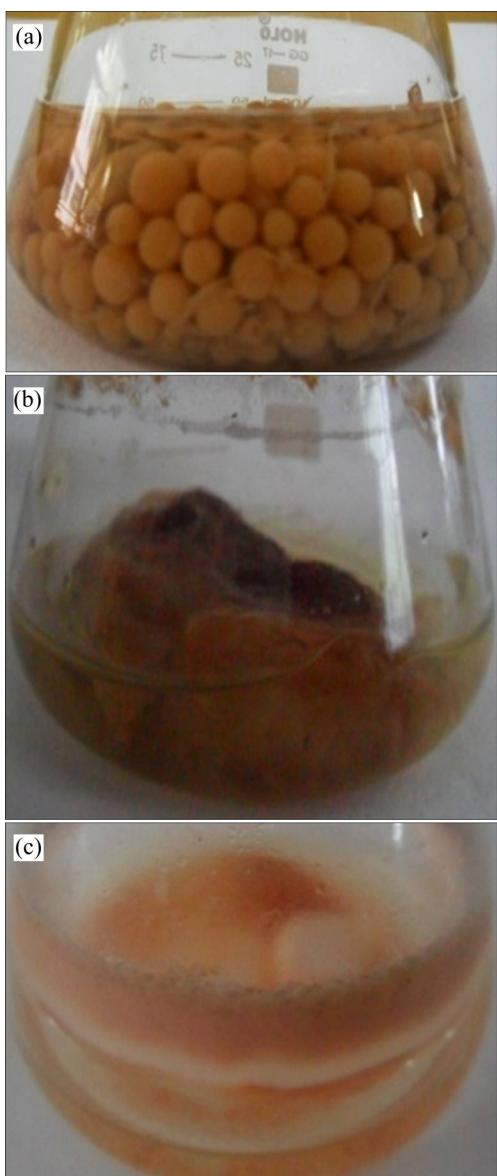


图 4 *Aspergillus niger*、*Paenibacillus polymyxa*、*Agrobacterium tumefaciens* 与钾矿物作用 150 h 后的菌株生长特征

Fig. 4 Strain growth characteristics of *Aspergillus niger* (a), *Paenibacillus polymyxa*(b), *Agrobacterium tumefaciens* (c) after culturing in potassium feldspar medium

真菌对矿物的溶蚀分解几乎在微环境中进行。而细菌在生长繁殖中后期产生的胞外多糖等大分子代谢产物(最高值 7.22 g/L)分散在整个浸矿体系中, 浸出液黏稠度大幅度增加(见图 4(b)和(c))。这可能是导致两者对 Al 的溶出表现出显著不同的动态规律的根本原因。

2.3 菌株溶蚀前后钾长石表面形貌变化

图 5 所示为钾长石矿物颗粒经三株试验菌种溶蚀 216 h 前后的表面 SEM 像。从图 5 可以看出, 钾长石矿粉颗粒经三株试验菌种作用后表面形貌都发生了明显的变化, 且不同菌种造成的矿物颗粒表面溶蚀程度有很大的差别。未经试验菌株作用的原矿样表面较为光滑平整, 边角分明, 晶体结构特征显著(见图 5(a)); 经硅酸盐细菌 *Paenibacillus polymyxa* 作用后矿物颗粒表面溶蚀量最大, 表面形貌变化最大, 晶体结构基本被破坏, 矿物表面粗糙不平状, 并出现了大量的细小颗粒; 经真菌 *Aspergillus niger* 溶蚀后的矿物颗粒表面的溶蚀量比 *Paenibacillus polymyxa* 略少, 但表面形貌变化也十分明显, 凹透不平状显著, 晶体结构也基本被破坏; 与前面两株菌种相比, *Agrobacterium tumefaciens* 对钾长石矿的溶蚀量最小, 被其作用的矿物颗粒表面出现的细小颗粒量很少, 晶体结构变化不是十分显著。

2.4 菌株溶蚀前后钾长石物相变化

图 6 所示为钾长石矿物颗粒经三株试验菌种溶蚀 216 h 前后的 XRD 谱。由图 6(a)可见, 钾长石原矿样中的主要晶体矿物为钾长石(正长石), 其次还有石英、白云母、赤铁矿和碳酸钙, 反映这些晶体矿物的特征峰均较为明显。由经三株试验菌种作用后的钾长石矿粉的 XRD 谱中可以看出, 反映各晶体矿物的特征峰均发生了明显的变化。在经硅酸盐细菌 *Paenibacillus polymyxa* 作用后, 钾长石矿粉的 XRD 谱(见图 6(b))中反映钾长石和石英的特征峰强度明显增加, 而其他各矿物的特征峰明显下降, 其中反映赤铁矿的特征峰基本消失; 与经 *Paenibacillus polymyxa* 作用后的钾长石矿粉相比, 经 *Agrobacterium tumefaciens* 作用后的钾长石矿粉的 XRD 谱(见图 5(c))中, 反映钾长石矿物的特征峰强度增加更为显著, 反映其他各晶体矿物的特征峰

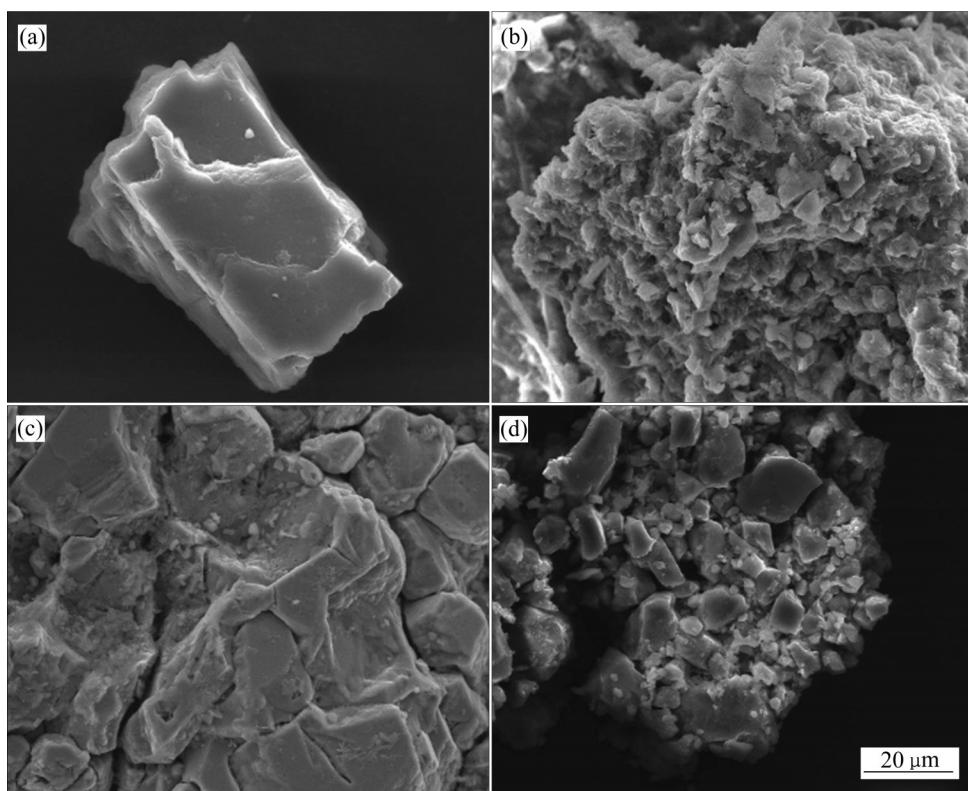


图5 钾长石矿物颗粒经三株试验菌种溶蚀216 h 前后的表面SEM像

Fig. 5 SEM images of feldspar surfaces before and after being bio-leached for 216 h: (a) Raw ore; (b) By *Paenibacillus polymyxa*; (c) By *Agrobacterium tumefaciens*; (d) By *Aspergillus niger*

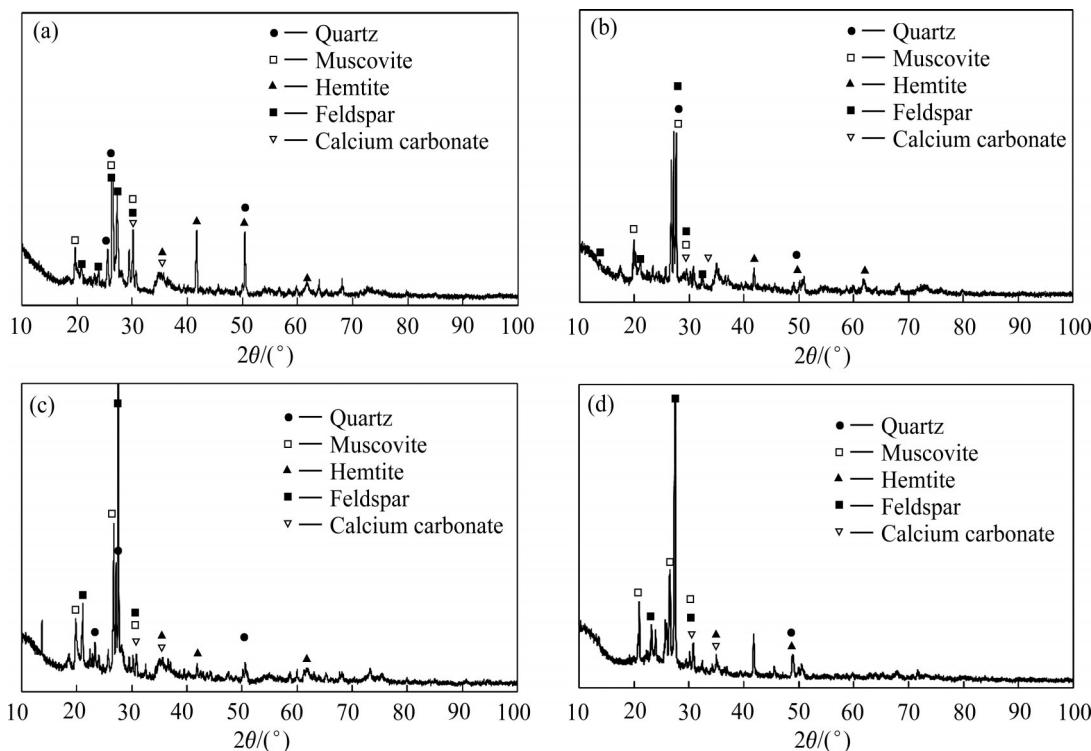


图6 钾长石矿物颗粒经三株试验菌种溶蚀216 h 前后的XRD谱

Fig. 6 XRD patterns of feldspar particles before and after being corroded for 216 h by three test stains: (a) Raw ore; (b) By *Paenibacillus polymyxa*; (c) By *Agrobacterium tumefaciens*; (d) By *Aspergillus niger*

的强度下降幅度较小，这也进一步表明其对矿物的溶蚀效果较其他两株菌种要弱；而经真菌作用的钾长石矿粉的XRD谱(见图6(d))表明，除反映钾长石和石英的特征峰显著增强而反映赤铁矿的特征峰下降减弱外，其他各矿物的特征峰均有显著的下降或消失，说明真菌对钾长石的溶蚀效果也较为明显。从各晶体矿物的特征峰变化强度(见图6)中可以推测认为，硅酸盐矿物的晶体结构对菌株的浸矿效果具有一定的影响，当多种矿物共生时，浸矿菌种会优先选择分解结构不稳定的硅酸盐矿物(如白云母、碳酸钙)，或含生命必须元素的矿物(如赤铁矿)^[13-15]。

3 结论

1) 三株菌种的生长曲线及产酸能力试验结果表明，真菌 *Aspergillus niger* 具有更短的生长延迟期(0~6 h)和对数生长期(6~84 h)，对环境的适应能力更强，且具有较高的产酸能力，发酵培养液中的 pH 值最低可达 2.5；而硅酸盐细菌 *Paenibacillus polymyxa*、*Agrobacterium tumefaciens* 的产酸能力相对较弱，两者在溶液中的最低 pH 值分别为 4.2 和 4.6，但对数生长期相对较真菌的长(分别为 18~108 h 和 48~144 h)，菌株具有更强的持续生长繁殖能力，培养液中的细菌浓度可分别达 2.8×10^8 个/mL 和 1.84×10^8 个/mL。

2) *Paenibacillus polymyxa* 菌株对钾长石风化分解效果最好，其浸矿上清液中 K_2O 、 SiO_2 、 Al_2O_3 的最大质量浓度分别可达 2.30、6.55、5.20 g/L；其次为 *Aspergillus niger*，对应的最大质量浓度为 1.72、5.61、3.20 g/L；而 *Agrobacterium tumefaciens* 对钾长石中 K、Si 的释放效率最低，其浸矿上清液中对应氧化物的最大质量浓度只有 1.65、5.58 g/L，但其释放的 Al_2O_3 的量(4.19 g/L)却要高于 *Aspergillus niger*。

3) 真菌 *Aspergillus niger* 的浸矿周期最短，释放钾矿物中的 K、Al、Si 的速率最快，而硅酸盐细菌 *Paenibacillus polymyxa*、*Agrobacterium tumefaciens* 的浸矿周期相对较长，释放钾矿物中的 K、Al、Si 的速率相对较慢，但持续释放的时间相对较长。

4) 在浸矿前期(0~150 h)，钾长石的风化分解效

果主要受微生物代谢产小分子有机酸能力的影响，由于真菌生长代谢周期短，且具有较强的产酸能力，故此阶段真菌的浸矿效率明显高于其他两株硅酸盐细菌。而在浸矿中后期(150~240 h)，钾长石的溶蚀效果主要受胞外多糖的络解作用机制的影响，此阶段硅酸盐细菌浸矿液中胞外多糖含量明显要高于真菌，因此它们对矿物具有更高的溶蚀效果，这也是它们浸矿周期较长的原因之一。

REFERENCES

- [1] 于文清, 刘文志, 胡广民, 等. 土地类芽孢杆菌(*Paenibacillus terrae*)新菌株 NK3-4 及其功能[J]. 微生物学通报, 2014, 41(4): 621~628.
YU Wen-qing, LIU Wen-zhi, HU Guang-min, et al. *Paenibacillus terrae* new strain NK₃-4 and its functions[J]. Microbiology China, 2014, 41(4): 621~628.
- [2] SAKHAROV B A, DRITS V A. Determination of minor contents of smectite layers in the dispersed dioctahedral K-bearing micaceous minerals of the illite, aluminoceladonite, and glauconite composition[J]. Lithology and Mineral Resources, 2018, 53(2): 91~109.
- [3] 孙德四, 尹健美, 陈晔, 等. 钾矿物晶体结构对黑曲霉生长代谢及钾与硅的溶出影响[J]. 中国农业科学, 2014, 47(3): 503~513.
SUN De-si, YIN Jian-mei, CHEN Ye, et al. Effect of crystal structures of potassium-bearing minerals on *aspergillus Niger* growth metabolism and potassium and silicon release[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2014, 47(3): 503~513.
- [4] 余润兰, 石丽娟, 周丹, 等. 生物浸出过程中微生物协同作用机制的研究进展[J]. 中国有色金属学报, 2013, 23(10): 3006~3014.
YU Run-lan, SHI Li-juan, ZHOU Dan, et al. Research development of microorganism synergy mechanisms during bioleaching[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2013, 23(10): 3006~3014.
- [5] RAJAWAT M V S, SINGH R, SINGH D, et al. Psychrotrophs of the genus *Janthinobacterium* with potential to weather potassium aluminosilicate mineral[J]. 3 Biotech, 2019, 9(4): 142.
- [6] MATIAS P C, MATTIELLO E M, SANTOS W O, et al. Solubilization of a K-silicate rock by *acidithiobacillus thiooxidans*[J]. Minerals Engineering, 2019, 132: 69~75.
- [7] WANG Q, SHENG X F, HE L Y, et al. Improving biodesilication of a high silica bauxite by two highly effective silica-solubilizing bacteria[J]. Minerals Engineering, 2018,

- 128: 179–186.
- [8] TENG Q, FENG Y L, LI H R. Effects of silicate-bacteria pretreatment on desilication of magnesite by reverse flotation[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2018, 544: 60–67.
- [9] NATH D, MAURYA B R, MEENA V S. Documentation of five potassium- and phosphorus-solubilizing bacteria for their K and P-solubilization ability from various minerals[J]. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 2017, 10: 174–181.
- [10] MEENA V S, MAURYA B R, VERMA J P, et al. Potassium solubilizing rhizobacteria (KSR): Isolation, identification, and K-release dynamics from waste mica[J]. *Ecological Engineering*, 2015, 81: 340–347.
- [11] 侯卫国, 连宾. 外生菌根真菌解钾作用研究进展[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2008, 27(1): 452–454.
- HOU Wei-guo, LIAN Bin. Research progress on potassium release by Ectomycorrhizal Fungi[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2008, 27(1): 452–454.
- [12] 彭云湘, 宋淼, PEDRUZZI Israel, 等. 土生空团菌对白云母的风化作用及解钾特性[J]. 微生物学报, 2015, 55(3): 282–291.
- PENG Yun-xiang, SONG Miao, PEDRUZZI I, et al. Release and weathering of muscovite by *cenococcum geophilum*[J]. *Acta Microbiologica Sinica*, 2015, 55(3): 282–291.
- [13] 张红芳, 何刚, 吴绿英, 等. 一株高效解钾脱硅真菌的筛选、鉴定及培养条件优化[J]. 土壤, 2018, 50(5): 934–941.
- ZHANG Hong-fang, HE Gang, WU Lv-ying, et al. Screening, identification and cultivated condition optimization of high efficiency potassium solubilization and desilication fungus strain[J]. *Soils*, 2018, 50(5): 934–941.
- [14] SONG M, PEDRUZZI I, PENG Y X, et al. K-extraction from muscovite by the isolated fungi[J]. *Geomicrobiology Journal*, 2015, 32(9): 771–779.
- [15] LIAN B, WANG B, PAN M, et al. Microbial release of potassium from K-bearing minerals by thermophilic fungus *Aspergillus fumigatus*[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2008, 72(1): 87–98.
- [16] TRIVEDI M, KALKAR S, SHANWARE A. Isolation, characterization & development of liquid formulations of potassium solubilizing fungi[J]. *International Journal of Advanced Research*, 2016, 4(9): 999–1003.
- [17] 陈路遥, 包麒钰, 孙德四. 细菌BM与真菌APN对钾长石浸出效果对比研究[J]. 非金属矿, 2021, 44(267): 72–75, 79.
- CHEN Lu-yao, BAO Qi-yu, SUN De-si. Bioleaching effect of bacteria BM and fungi APN on potassium feldspar[J]. *Non-Metallic Mines*, 2021, 44(267): 72–75, 79.
- [18] WANG Q, GAN S, MAO X X, et al. Distinct mineral weathering effectiveness and metabolic activity between mineral-weathering bacteria[J]. *Chemical Geology*, 2018, 489(20): 38–45.
- [19] LAMÉRAND C, SHIROKOVA L S, BÉNÉZETH P, et al. Olivine dissolution and hydrous Mg carbonate and silicate precipitation in the presence of microbial consortium of photo-autotrophic and heterotrophic bacteria[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2020, 268: 123–141.
- [20] XUE X P, ZHANG L, PENG Y X, et al. Effects of mineral structure and microenvironment on K release from potassium aluminosilicate minerals by *cenococcum geophilum* fr[J]. *Geomicrobiology Journal*, 2019, 36(1): 11–18.
- [21] ZHAO J M, WU W J, ZHANG X, et al. Characteristics of bio-desilication and bio-flotation of *paenibacillus mucilaginosus* BM-4 on aluminosilicate minerals[J]. *International Journal of Mineral Processing*, 2017, 168: 40–47.
- [22] WHITMAN T, NEURATH R, PERERA A, et al. Microbial community assembly differs across minerals in a rhizosphere microcosm[J]. *Environmental Microbiology*, 2018, 20(12): 4444–4460.
- [23] ETESAMI H, EMAMI S, ALIKHANI H A. Potassium solubilizing bacteria (KSB): Mechanisms, promotion of plant growth, and future prospects—A review[J]. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2017, 17(4): 897–911.
- [24] SATTAR A, NAVeed M, ALI M, et al. Perspectives of potassium solubilizing microbes in sustainable food production system: A review[J]. *Applied Soil Ecology*, 2019, 133: 146–159.
- [25] DAS S, NAIK DESHAVATH N, GOUD V V, et al. Bioleaching of Al from spent fluid catalytic cracking catalyst using *Aspergillus species*[J]. *Biotechnology Reports*, 2019, 23: e00349.
- [26] SOLKOLOVA M G, BELOGOLOVA G A, AKIMOVA G P. The role of silicate Rhizobacteria in silicon biosorption under polyelement soil contamination in the system soil-plant[J]. *Agrokhimiya*, 2019(1): 71–77.
- [27] NATH D, MAURYA B R, MEENA V S. Documentation of five potassium- and phosphorus-solubilizing bacteria for their K and P-solubilization ability from various minerals[J]. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 2017, 10: 174–181.
- [28] 孙德四, 陈晔, 曹飞. 细菌-矿物接触方式对铝土矿降解的影响[J]. 中国矿业大学学报, 2013, 42(1): 122–128.
- SUN De-si, CHEN Ye, CAO Fei. Influence of microbe-mineral contact model on decomposition of bauxite[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2013,

- 42(1): 122–128.
- [29] 满李阳, 曹晓燕, 孙德四. 钾细菌-矿物接触模式对富钾页岩分解行为的影响[J]. 中国有色金属学报, 2014, 24(4): 1099–1109.
MAN Li-yang, CAO Xiao-yan, SUN De-si. Effect of potassium-solubilizing bacteria-mineral contact mode on decomposition behavior of potassium-rich shale[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2014, 24(4): 1099–1109.
- WU Tao, CHEN Jun, LIAN Bin. Advance in studies on the function of microbes to the weathering of silicate minerals[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2007, 26(3): 263–268, 275.

Comparative study on dynamic dissolution of potassium feldspar by typical silicate bacteria and fungi

LIANG Yan-hua, BAO Qi-yu, SUN De-si, CHEN Hao

(School of Chemistry and Environmental Engineering, Jiujiang University, Jiujiang 332005, China)

Abstract: The dynamic corrosion effects of typical silicate bacteria *Paenibacillus polymyxa* and *Agrobacterium tumefaciens* and fungus *Aspergillus niger* on potassium feldspar were comparative analysed by measuring the concentration of bacteria in fermentation medium, pH value, mass concentrations of K, Si and Al in leaching supernatant, and SEM and XRD analysis of potash feldspar before and after being subjected to bacterial strains. The results show that the growth period of fungus is shorter than that of silicate bacteria, and the fungus has higher acid production capacity, but silicate bacteria have longer logarithmic growth periods, higher bacterial concentrations in their culture media, and stronger abilities to produce extracellular polymers. *Paenibacillus polymyxa* has the best corrosion effect on feldspar, the mass concentrations of K₂O, SiO₂ and Al₂O₃ in the leaching solution are up to 2.30 g/L, 6.55 g/L and 5.20 g/L, followed by *Aspergillus niger* and *Agrobacterium tumefaciens*. However, the rates of K, Al and Si in potassium feldspar released by fungus is the fastest, its leaching period is the shortest, so the fungus has higher comprehensive leaching efficiency than the other two strains. It is concluded that the corrosion effect of fungus on minerals is mainly influenced by the mechanism of organic acidolysis and complexation, while the ability of silicate bacteria to decompose minerals is controlled by the complexation mechanism of extracellular polymers.

Key words: fungus; silicate bacterium; potassium feldspar; corrosion

Foundation item: Project(51264014) supported by the National Natural Science Foundation of China

Received date: 2020-08-25; **Accepted date:** 2022-03-03

Corresponding author: SUN De-si; Tel: +86-15170295286; E-mail: ssddss15@163.com

CHEN Hao; Tel: +86-15870857672; E-mail: sundesi1215@126.com

(编辑 何学锋)