

细菌与真菌对黑云母的风化作用比较： 以胶质芽孢杆菌和黑曲霉为例

董翠玲, 连宾*

江苏省功能微生物与功能基因组学重点实验室, 江苏省微生物工程技术研究中心,
南京师范大学 生命科学学院, 南京 210023

摘要:以胶质芽孢杆菌(*Bacillus mucilaginosus*)与黑曲霉(*Aspergillus niger*)为例,比较了细菌与真菌对黑云母风化作用的异同点,为研究微生物风化矿物的作用机制提供了实验依据。分别采用有氮培养基和察氏培养基作为胶质芽孢杆菌和黑曲霉的实验培养基,并以黑云母矿粉为钾源,培养5天后利用 ICP-OES、SEM 及酶活测定等方法,对发酵液中各种离子浓度、矿物表面形貌以及发酵液中碳酸酐酶(CA)活性进行检测。胶质芽孢杆菌与矿物通过多糖等黏性物质紧紧黏附在一起形成细菌-矿物复合体,而黑曲霉与矿物相互作用则形成了真菌-矿物聚集体。黑曲霉培养液中离子溶出量总体高于胶质芽孢杆菌培养液,其中 Al^{3+} 、 Fe^{3+} 和 K^{+} 含量分别高出约 17、30 和 3 mg/L;分泌的酸性物质的量和 CA 活性都明显高于胶质芽孢杆菌,表明黑曲霉拥有对矿物更强的风化能力。

关键词:胶质芽孢杆菌;黑曲霉;黑云母;风化作用;机理

中图分类号:P578.959 **文献标志码:**A **文章编号:**1007-2802(2014)06-0772-06 **doi:**10.3969/j.issn.1007-2802.2014.06.003

Comparing the Bio-Weathering Effects for Biotite by *Bacillus Mucilaginosus* and *Aspergillus Niger*

DONG Cui-ling, LIAN Bin*

Jiangsu Key Laboratory for Microbes and Functional Genomics, Jiangsu Engineering and Technology Research
Center for Microbiology, College of Life Sciences, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China

Abstract: This study compared the similarities and differences of biotite bio-weathering by bacteria and fungi using *Bacillus mucilaginosus* and *Aspergillus niger* as examples and provided experimental evidence for the weathering mechanism of different microorganism species. Surface morphology of biotite, ions concentrations in cultures and CA activities were detected by ICP-OES, SEM and a specific method for CA activity determination after been cultured in nitrogen-containing or czapek's media for 5 days. It was observed that *B. mucilginus* and biotite adhered tightly to form bacterial-mineral complexes on some sticky substances, such as polysaccharides, while the fungal hyphae wrapped biotite to form fungus-mineral aggregates. The overall concentrations of released ions in the fungal culture were higher than those in the bacterial culture, especially, concentrations of Al^{3+} , Fe^{3+} and K^{+} were 17, 30 and 3 mg/L higher, respectively. Both of acidic substance amount and CA activity in the fungal culture were significantly higher than those in the bacterial culture. Therefore, we confirmed that the mineral weathering capacity of *A. niger* is relatively higher than that of *B. mucilginus*.

Key words: *Bacillus mucilaginosus*; *Aspergillus niger*; biotite; weathering; mechanism

中国低品位含钾岩石分布广泛、储量丰富,黑云母即是其中常见的矿物,含钾量在 7% 左右(马鸿文等,2010;连宾,2011)。这类硅酸盐矿物中的营养元素一般不易被植物直接利用,采用高温烧结或化学

收稿日期:2014-08-03 收到,09-06 改回

基金项目:国家自然科学基金项目(41173091)

第一作者简介:董翠玲(1990—),女,硕士研究生,研究方向:资源与环境微生物。E-mail:cuilingdong1990@126.com.

* 通讯作者简介:连宾(1964—),男,研究员,研究方向:地质微生物、资源与环境微生物。E-mail:bin2368@vip.163.com.

法浸提虽可活化其中的钾素,但因易于污染环境且生产成本较高而难以付诸实施。近年来,生物法因其污染小、成本低的优点受到广泛关注(Cameselle *et al.*, 2003; 连宾, 2011)。若能通过生物技术手段将其开发利用,将会在一定程度上缓解中国钾肥的短缺状况,同时还能减轻因化学浸矿或高温烧结所带来的环境压力。

胶质芽孢杆菌(*Bacillus mucilaginosus*)和黑曲霉(*Aspergillus niger*)是土壤中普遍存在的细菌和真菌,它们能分解利用土壤中的难溶性矿物供自身生长繁殖利用,同时还能促进土壤矿物元素的生物地球化学循环。胶质芽孢杆菌又称硅酸盐细菌,具有分解转化硅酸盐矿物的能力。近年来,已有很多研究分别采用这两种菌作为研究微生物-矿物相互作用的模式菌株,来研究微生物风化矿物的作用效果和作用机理(Xiao *et al.*, 2012b; 孙蕾蕾等, 2013; Yao *et al.*, 2013),但在同一研究中比较这两种菌对同一种矿物的风化作用效果和机理的论文尚未见报道。有关细菌风化矿物的作用机制,现多认同综合效应理论(连宾, 1998b; 连宾等, 2002),而黑曲霉对矿物的风化显然也是多种因素共同作用的综合效应,但由于黑曲霉具有菌丝体结构,它除了通过分泌胞外物质等生物化学作用促进矿物风化外,其菌丝在延伸过程中还能穿插至矿物的微裂缝,或包裹矿物,形成真菌-矿物聚集体(Lian *et al.*, 2008; 胡婕等, 2011),因而与单细胞的细菌相比,真菌对矿物有显著不同的风化特征。本研究以胶质芽孢杆菌和黑曲霉为实验菌株,探究二者对黑云母的风化作用机制的异同,为对比研究微生物风化矿物的作用机制提供实验依据,为浸矿菌株的选择提供基础资料。

1 材料与方法

1.1 材料

1.1.1 菌种 胶质芽孢杆菌 K02(GeneBank 数据库检索号: HM579819)取自实验室保藏菌种,最适生长温度 30℃,所用培养基为有氮培养基,菌落透明,黏稠,能拉出细丝;黑曲霉购自中国菌种保藏中心(CMCC3.3928),最适生长温度 28℃,所用培养基为察氏培养基,菌落成黑褐色,表面绒丝状。

1.1.2 岩石样品 黑云母由青海银达矿业有限公司提供,其主要化学组成包括(%): K₂O 6.88, SiO₂ 40.12, Al₂O₃ 10.43, CaO 4.14, MgO 16.95, Fe₂O₃ 12.04, FeO 7.32。实验用矿粉为过 100 目筛的黑云母矿粉。

1.2 菌种活化

有氮培养基:蔗糖 10 g, (NH₄)₂SO₄ 1.0 g, CaCO₃ 1.0 g, MgSO₄ 0.5122 g, KCl 0.1 g, Na₂HPO₄ · 12H₂O 2.507 g, MgSO₄ · 7H₂O 1.0 g, ddH₂O 1.0 L。

察氏培养基:蔗糖 30 g, NaNO₃ 3.0 g, MgSO₄ · 7H₂O 0.5 g, KCl 0.5 g, FeSO₄ · 4H₂O 0.01 g, K₂HPO₄ 1.0 g, ddH₂O 1.0 L。

胶质芽孢杆菌和黑曲霉分别在各自固体斜面培养基上培养 3~5 天,活化菌种。

1.3 微生物风化黑云母

A 组:取干净的 250 mL 锥形瓶,分别加入 100 mL 去钾有氮液体培养基,并添加 1 g 黑云母作为钾源,121℃,30 min 灭菌后,实验组接入 2 mL 胶质芽孢杆菌种子液,对照组则接入 2 mL 灭活种子液,每组 3 个重复,30℃,180 rpm 培养 5 d。

B 组:取干净的 250 mL 锥形瓶,分别加入 100 mL 去钾察氏液体培养基,并添加 1 g 黑云母作为钾源,121℃,30 min 灭菌后,实验组接入 1 mL (10⁸ 个/mL)黑曲霉孢子悬液,对照组则接入 1 mL 灭活孢子悬液,每组 3 个重复,28℃,120 rpm 培养 5 d。

1.4 发酵液处理及多种离子的含量和 pH 值测定

A 组:胶质芽孢杆菌培养结束后,用超纯水将其培养液稀释 1 倍,置于磁力搅拌器上边搅拌(500 rpm)边加热(80~90℃)30 min(连宾, 1998a),室温冷却,静置 6 h,收集上清液;

B 组:黑曲霉培养结束后,其培养液于 8000 rpm 离心 5 min,取上清液;收集菌丝球,将其置于 100 mL 1 mol/L 的醋酸铵溶液中,超声波震荡 30 min 后,过滤收集滤液。

用 ICP-OES 法检测 A 组和 B 组中实验及对照组上清液中 Ca²⁺、Mg²⁺、Al³⁺、Fe³⁺ 和 K⁺ 含量,并测定它们的 pH 值(Mettler Toledo S20 Seven Easy pH 计,瑞士)。

1.5 黑云母的电镜观察

收集实验处理后的黑云母残渣(冷冻干燥处理),用扫描电镜(Hitachi-S3400N, 日本)观察其表面形貌。

1.6 发酵液中碳酸酐酶(CA)活性测定

细菌和真菌培养 5 天后,立即吸取 1 mL 发酵液,8000 rpm 离心 5 min,取上清液做 CA 活性测定,酶活性测定是在 4℃ 冷冻反应室中进行。方法如下:取 5 mL 缓冲液(20 mmol/L 巴比妥-KOH, pH 为 8.3)和 0.5 mL 待测实验组上清液混合,充分摇匀后用注射器加入 4.5 mL 预冷的(0~2℃)饱和 CO₂ 溶液,用 pH 计监测 pH 值下降一个单位所

需时间(以 s 为单位),记为 T;同上,加待测对照组上清液,监测 pH 值下降一个单位所需时间,记为 T_0 ;酶活性单位用 WAU(Wilbur-Anderson unit)表示, $WAU=10(T_0/T-1)$,取 3 次测定的平均值(余龙江等,2004;夏建荣和余锦兰,2009)。

2 结果及分析

2.1 发酵液中离子含量的测定

为了明确不同微生物对黑云母的风化作用强度,笔者比较了细菌和真菌发酵液中矿物元素 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Al^{3+} 、 Fe^{3+} 和 K^+ 的释放量,结果分别见图 1 和图 2。

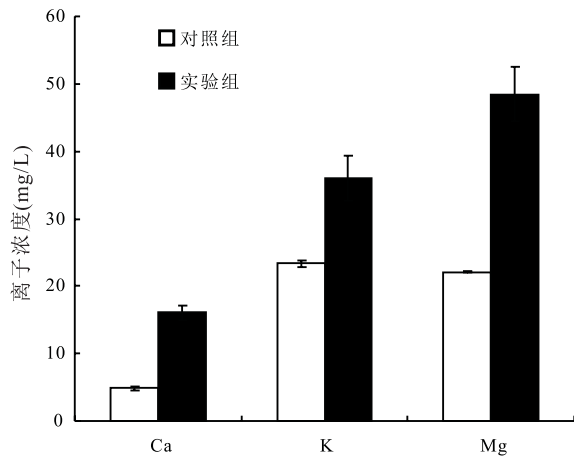


图 1 细菌发酵液中离子浓度

Fig. 1 Concentration of various ions in the liquid culture of *B. mucilaginosus*

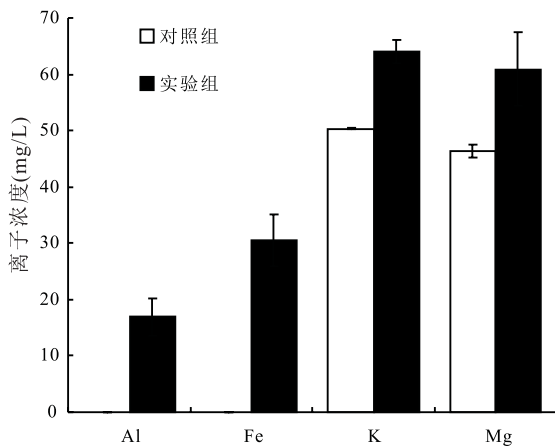


图 2 真菌发酵液中离子浓度

Fig. 2 Concentration of various ions in the liquid culture of *A. niger*

由图 1 可见,实验组发酵液中的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 K^+ 含量分别高出对照组约 11、25 和 13 mg/L。这说明胶质芽孢杆菌能够风化黑云母,并释放其中的矿物元素。在含伊利石的培养液中,接种胶质芽孢

杆菌的实验组比不接种的对照组水溶性钾含量更高,指出胶质芽孢杆菌能够风化伊利石黏土岩释放 K^+ (连宾,1998a);胶质芽孢杆菌还能促进云母和钾长石风化释钾(连宾等,2005;Liu *et al.*, 2006);此外,胶质芽孢杆菌还能风化释放矿物中 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 等(Chen *et al.*, 2008; Yao *et al.*, 2013)。显然,胶质芽孢杆菌是风化黑云母的有效菌种。

图 2 结果显示,黑曲霉在添加黑云母的培养液中显示出很好的生长效果,用 ICP-OES 检测黑曲霉生长 5 天的培养液,与未接种对照组相比,实验组中溶出了更多的 Al^{3+} 、 Fe^{3+} 、 Mg^{2+} 和 K^+ ,分别比对照增加了约 17、30、15 和 13 mg/L;此外,在菌丝球破碎液中还检测出大约 3.3 mg/L 的 K^+ ,即黑云母风化释放的 K^+ 至少有 16.3 mg/L。此外,黑曲霉能风化钾长石释放其中的 K^+ (胡婕等,2011);以及磷矿石(谌书和郑厚义,2007)。

比较细菌和真菌对黑云母的风化作用效果,发现真菌组中溶出的元素总量相对更多。真菌组中 Al^{3+} 、 Fe^{3+} 和 K^+ 的溶出量均高于细菌组,分别高出约 17、30 和 3 mg/L;其中 Al^{3+} 是构成黑云母骨架结构铝氧八面体的主要元素,大量的 Al^{3+} 溶出说明有更多的黑云母晶体结构已被黑曲霉所破坏。但是真菌组发酵液中 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 含量低于细菌组,其原因可能是真菌比细菌生物量大,需要吸收更多的 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} ,且真菌分泌的大量酸性物质可能与 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 结合形成有机酸盐,如草酸钙、草酸镁等,这无疑降低了发酵液中的 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 。此外,细菌发酵液中 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 含量较高也可能与细菌的生长代谢调控有关,较高浓度的 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 有利于维持细菌增殖的 pH 值范围(王雪等,2010)。另研究指出,微生物对溶出元素种类的选择可能主要依据其对缺乏营养的特定需求有关(Bennett *et al.*, 2001)。总之来说,黑曲霉对黑云母有更强的风化能力。

2.2 微生物风化黑云母的作用机理

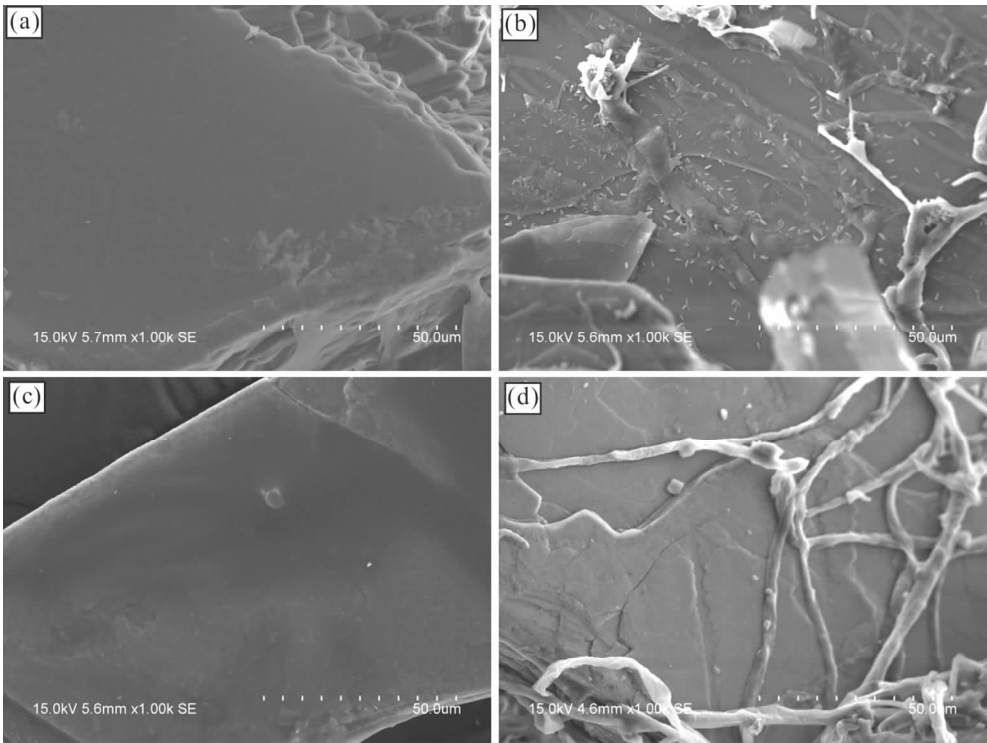
2.2.1 微生物风化黑云母的的表观特征 胶质芽孢杆菌培养液:培养结束后肉眼可见培养液非常黏稠,短暂静置后,黑云母矿粉会缓慢下沉并黏附至瓶底,此现象与胶质芽孢杆菌在生长过程中分泌大量多糖等黏性物质有关,这些黏性物质能促使细菌与矿物相互接触形成细菌-矿物复合体,并紧紧附着在瓶底(连宾等,2002;胡星等,2011)。这些多糖的形成可能与培养液中只含黑云母而不含可溶性钾有关。含钾矿粉会影响胶质芽孢杆菌分泌多糖的量(胡星等,2011)。说明在逆境(缺乏可溶性钾源)条

件下,胶质芽孢杆菌会分泌大量多糖,这些多糖能帮助细菌溶解矿物,以获取营养元素。

黑曲霉培养液:培养液中形成许多直径 3 mm 左右的菌丝球,剖开后可见有矿粉被包裹在内。黑曲霉是一种丝状真菌,菌丝在延伸的过程中能缠绕、包裹矿粉,最终形成包裹矿粉的菌丝球这一特殊的真菌-矿物聚集体。菌丝球能为矿物的风化提供良

好的微环境,一方面,菌丝在延伸过程中能插入矿物裂缝等脆弱部位,对矿物产生机械破坏力,另一方面,菌丝在生长过程中产生有机酸、多糖等胞外分泌物,这些物质可被阻留在菌丝球中,集中作用于矿物,更有利于对矿物的风化(胡婕等,2011)。

黑云母经胶质芽孢杆菌和黑曲霉风化前后的扫描电镜观察结果如图 3 所示。



(a) 细菌风化对照;(b)细菌风化实验;(c)黑曲霉风化对照;(d)黑曲霉风化实验

图 3 胶质芽孢杆菌和黑曲霉风化黑云母的电镜照片

Fig. 3 SEM pictures of biotite after four different experimental treatments

未与胶质芽孢杆菌和黑曲霉接触的黑云母结构较完整(图 3a,3c),而分别与它们相互作用 5 天后,电镜下观察到黑云母表面有许多菌体(图 3b 示矿物表面的细菌,图 3d 示矿物表面的真菌菌丝)存在,并且矿物表面有明显的溶蚀痕迹,说明它们都对黑云母产生了风化作用。

2.2.2 发酵液 pH 及碳酸酐酶活性测定 分析细菌和真菌发酵液 pH 值的检测结果(图 4),作者发现细菌实验组 pH 值相较于对照组下降了大约 1 个单位,说明细菌在风化黑云母过程中可能产生了某些酸性物质,但是酸性物质的量并不多。类似现象,在风化伊利石黏土岩的过程中 pH 值变化不大(连宾,1998a);而真菌实验组 pH 值相较于对照组下降了大约 3.5 个单位,远远超过细菌组,由此推测真菌在风化矿物的过程中分泌了更多的酸性物质。

Liu 等(2006)研究发现,胶质芽孢杆菌风化含

钾矿物 5 天后,培养液上清中草酸、柠檬酸、乳酸的含量仅为 76.7、188 和 124mg/L。黑曲霉是一种高

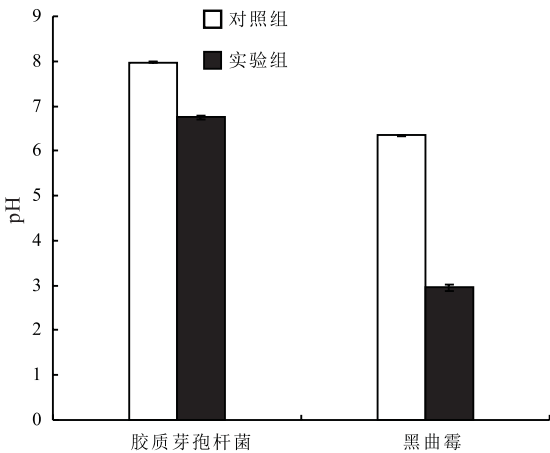


图 4 细菌与真菌发酵液 pH

Fig. 4 pH of the liquid culture of *B. mucilaginosus* and *A. niger*

产酸的菌株,1923 年美国 Pfizer 公司开始使用黑曲霉发酵生产柠檬酸,长久以来,黑曲霉被作为工业发酵有机酸的菌株使用(郭艳梅等,2010)。有机酸能够发挥酸解作用攻击矿物,使某些矿物元素溶出(Welch and Ullman,1993)。因此,可以说有机酸的分泌量影响了对矿物的风化以及矿物元素的溶出量,有机酸分泌量越多,溶出矿物元素越多。

经计算,细菌和真菌发酵液中 CA 活性(WAU)分别为 2.78 和 3.71,真菌培养液的 CA 活性更高。在缺乏可溶性钾但含有钾长石的培养条件下,微生物的 CA 基因表达明显上调,并认为微生物在缺钾的逆境下会调节自身的代谢途径而更多地表达包括 CA 在内的一系列有利于风化矿物的物质,以促使矿物钾的释放(Xiao *et al.*, 2012a, 2012b; 孙蕾蕾等,2013)。显然,在本实验条件下 CA 也参与到对黑云母的风化过程中。

碳酸酐酶是一种催化 CO_2 可逆水合作用的酶,该过程产生的 H^+ 能促进矿物的溶解,并为丙二酰-CoA 的生物合成提供重碳酸根离子,参与脂质代谢。根据已有报道(孙蕾蕾等,2013; Xiao *et al.*, 2014)和上述分析,有关胶质芽孢杆菌和黑曲霉 CA 参与对黑云母的风化过程可由图 5 表示。

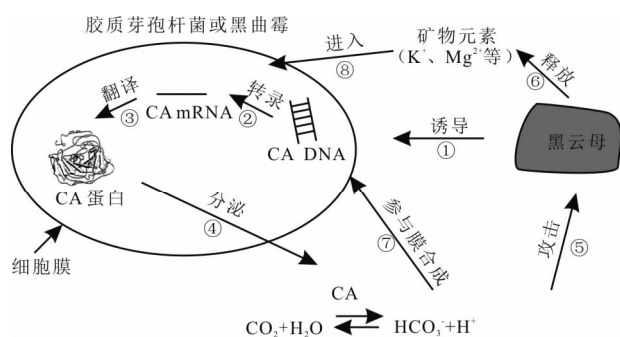


图 5 碳酸酐酶基因的表达和作用过程模拟
(Xiao *et al.*, 2014)

Fig. 5 Simulated diagram of the expression of CA genes and the mechanism of CA proteins(modified after Xiao *et al.*, 2014)

在缺乏可溶性钾而含有黑云母的逆境条件下,胶质芽孢杆菌或黑曲霉的 CA 基因被诱导表达(图 5 ①—③),随后 CA 被分泌至胞外(图 5 ④),催化 CO_2 和 H_2O 反应生成 H^+ 和 HCO_3^- , H^+ 能够攻击黑云母矿物(图 5 ⑤),促进矿物溶解,释放出 K^+ 、 Mg^{2+} 等(图 5 ⑥);而 HCO_3^- 能够参与胶质芽孢杆菌或黑曲霉细胞膜的合成(图 5 ⑦),通过影响细胞膜流动性为细胞吸收矿物离子提供合适的条件(图 5

⑧)。尽管以上模拟过程还缺乏足够的实验证据,但对解释微生物 CA 参与对矿物的风化过程和机理是有益的,期待会有进一步的研究进行实验验证。

3 小 结

在胶质芽孢杆菌和黑曲霉风化黑云母矿物的过程中,前者形成细菌-矿物复合体,菌体与矿物通过多糖等胞外黏性物质紧紧黏附在一起;而后者则形成真菌-矿物聚集体,菌丝将矿物包裹在菌丝球内,为矿物风化提供更有利的微环境。胶质芽孢杆菌分泌的多糖、黑曲霉分泌的酸性物质可能在各自对黑云母的风化过程中分别起主导作用。从发酵液中的元素溶出量、pH 值、碳酸酐酶活性等角度看,黑曲霉的风化能力更强。黑曲霉除了通过分泌胞外物质发挥风化作用外,其菌丝还能够通过延伸、穿插至矿物微裂隙或缝隙中产生机械破坏力,这样一方面能直接破坏矿物,另一方面能增加胞外分泌物与矿物的反应面积,因此能更有效地风化矿物。

目前,中国面临钾肥资源不足、严重依赖于进口的境况,而微生物风化矿物释钾作用近年来得到广泛关注。但是微生物转化矿物的过程复杂,影响因素多(盛下放和黄为一,2002;李福春等,2006;杜叶等,2008;孙德四等,2008),因此研究不同微生物风化矿物机制对浸矿菌株的选择、确定生物转化工艺和提高转化效率意义重大。

致谢:青海银达矿业有限公司提供了部分研究经费,总工程师常荣芳提供了数据分析的帮助,在此一并致谢。

参考文献 (References):

- Bennett P C, Rogers J R, Choi W J. 2001. Silicates, silicate weathering, and microbial ecology[J]. *Geomicrobiology Journal*, 18 (1): 3—19.
- Cameselle C, Ricart M T, Nunez M J, Lema JM. 2003. Iron removal from kaolin: Comparison between “in situ” and “two-stage” bioleaching processes[J]. *Hydrometallurgy*, 68(1): 97—105.
- Chen S, Lian B, Liu C Q. 2008. Effect of *Bacillus mucilaginosus* on weathering of phosphorite and a preliminary analysis of bacterial proteins[J]. *Chinese Journal of Geochemistry*, 27: 208—216.
- Lian B, Wang B, Pan M, Liu C Q, and Teng H H. 2008. Microbial Release of Potassium from K-Bearing Minerals By Thermophilic Fungus *Aspergillus fumigatus*[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 72(1): 87—98.
- Liu W X, Xu X S, Wang X H, Yang Q Y, Luo Y M, Christie P.

2006. Decomposition of silicate mineral by *Bacillus mucilaginosus* in liquid culture [J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 28: 133—140.
- Welch S A, Ullman W J. 1993. The effect of organic acids on plagioclase dissolution rates and stoichiometry [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 57: 2725—2736.
- Xiao B, Lian B, Shao W L. 2012a. Do bacterial secreted proteins play a role in the weathering of potassium-bearing rock powder? [J]. *Geomicrobiology Journal*, 29: 497—505.
- Xiao B, Lian B, Sun L L, Shao W L. 2012b. Gene transcription response to weathering of K-bearing minerals by *Aspergillus fumigatus* [J]. *Chemical Geology*, 1—9.
- Xiao L L, Hao J C, Wang W Y, Lian B, Shang G D, Yang Y W, Liu C Q, Wang S J. 2014. The up-regulation of carbonic anhydrase genes of *Bacillus mucilaginosus* under soluble Ca^{2+} deficiency and the heterologously expressed enzyme promotes calcite dissolution [J]. *Geomicrobiology Journal*, 31(7): 632—641.
- Yao M J, Lian B, Teng H H, Tian Y C, Yang X Q. 2013. Serpentine dissolution in the presence of bacteria *Bacillus mucilaginosus* [J]. *Geomicrobiology Journal*, 30(1): 72—80.
- 湛书, 郑厚义. 2007. 磷矿石的微生物风化作用: 以一株黑曲霉(*Aspergillus niger*)为例 [J]. *生态环境*, 16(3): 1007—1013.
- 杜叶, 周雪莹, 连宾. 2008. 胶质芽孢杆菌的胞外分泌物与细菌的解钾作用 [J]. *地学前缘*, 15(6): 107—111.
- 郭艳梅, 郑平, 孙际宾. 2010. 黑曲霉作为细胞工厂: 知识准备与技术基础 [J]. *生物工程学报*, 26(10): 1410—1418.
- 胡婕, 郁建平, 连宾. 2011. 黑曲霉对含钾矿物的解钾作用与机理分析 [J]. *矿物岩石地球化学通报*, 30(3): 277—285.
- 胡星, 连宾, 胡婕, 郁建平. 2011. 含钾矿粉对胶质芽孢杆菌分泌胞外多糖的影响 [J]. *高校地质学报*, 17(1): 107—111.
- 李福春, 李莎, 杨用钊, 程良娟. 2006. 原生硅酸盐矿物风化产物的研究进展: 以云母和长石为例 [J]. *岩石矿物学杂志*, 25(5): 440—448.
- 连宾. 1998a. 硅酸盐细菌 GY92 对伊利石的释钾作用 [J]. *矿物学报*, 18(2): 234—238.
- 连宾. 1998b. 硅酸盐细菌的解钾作用研究 [M]. 贵阳: 贵州科技出版社.
- 连宾, 傅平秋, 莫德明, 刘丛强. 2002. 硅酸盐细菌解钾作用机理的综合效应 [J]. *矿物学报*, 22(2): 179—183.
- 连宾, 陈骏, 傅平秋, 刘丛强, 陈烨. 2005. 微生物影响硅酸盐矿物风化作用的模拟实验 [J]. *高校地质学报*, 11(2): 181—186.
- 连宾. 2011. 微生物对低品位含钾岩石的转化与利用研究 [M]. 北京: 科学出版社, 168—175.
- 马鸿文, 苏双青, 刘浩, 杨雪, 彭辉, 俞子俭. 2010. 中国钾资源与钾盐工业可持续发展 [J]. *地质前缘*, 17(1): 294—310.
- 盛下放, 黄为一. 2002. 硅酸盐细菌 NBT 菌株解钾机理初探 [J]. *土壤学报*, 39(6): 865—871.
- 孙德四, 万谦, 赵薪萍, 张强. 2008. 胶质芽孢杆菌 JXF 菌株代谢产物与脱硅作用研究 [J]. *矿冶工程*, 28(3): 52—56.
- 孙蕾蕾, 肖雷雷, 肖波, 王伟英, 潘辰, 王世杰, 连宾. 2013. 黑曲霉风化含钾岩石过程中碳酸酐酶和半胱氨酸合成酶基因表达量的差异 [J]. *中国科学(D辑)*, 43(11): 1829—1833.
- 王雪, 袁小凡, 赵兵, 王晓东, 王玉春. 2010. 胶质芽孢杆菌培养条件及发酵工艺的研究进展 [J]. *过程工程学报*, 10(2): 409—416.
- 夏建荣, 余锦兰. 2009. 高浓度 CO_2 对小新月菱形藻胞外碳酸酐酶活性和光合作用的影响 [J]. *广州大学学报(自然科学版)*, 8(3): 49—53.
- 余龙江, 吴云, 李为, 曾宪东, 付春华. 2004. 微生物碳酸酐酶对石灰岩的溶蚀驱动作用研究 [J]. *中国岩溶*, 23(3): 225—228.