

·环境矿物学·

胶质芽孢杆菌-蒙脱石相互作用实验研究

朱云¹, 曹维政², 鲁安怀¹, 王清华², 李艳¹, 张虓雷², 王长秋¹

(1. 北京大学造山带与地壳演化教育部重点实验室, 地球与空间科学学院, 北京 100871;
2. 大庆油田有限责任公司勘探开发研究院 黑龙江大庆 163712)

摘要: 利用硅酸盐细菌研究了微生物对硅酸盐矿物的分解作用。选取层状硅酸盐矿物蒙脱石在 30℃ 与一株编号为 3025 的硅酸盐细菌 *B. mucilaginosus* 进行交互作用, 并利用电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-AES)分析溶液中 Si、Al、Mg 离子的出溶量, 利用 X 射线衍射(XRD)和显微红外光谱(Micro-FTIR)分析微生物作用后矿物物相和微结构变化。发现经硅酸盐细菌作用后, 蒙脱石化学成分及晶体结构发生了细微变化, 为微生物活动促进粘土矿物分解作用研究提供了实验和理论依据。

关键词: 微生物-矿物交互作用, 硅酸盐细菌, 胶质芽孢杆菌, 蒙脱石

中图分类号: P579; P578.967

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2011)01-0121-06

A study of the interaction between montmorillonite and a strain of *Bacillus mucilaginosus*

ZHU Yun¹, CAO Wei-zheng², LU An-huai¹, WANG Qing-hua², LI Yan¹, ZHANG Xiao-lei²
and WANG Chang-qiu¹

(1. Key Laboratory of Orogenic Belts and Crustal Evolution, School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China; 2. Exploration and Development Research Institute, Daqing Oilfield Company Ltd., Co., PetroChina, Daqing 163712, China)

Abstract: The impact of microbes on lithosphere starts with the change of minerals comprising rocks, whereas the impact of microbes on minerals starts with the change of the composition of minerals. Based on previous researches on the interaction between microbes and minerals, this paper studied the interaction between silicate bacteria *Bacillus mucilaginosus* and bentonite, which is mainly composed of layer silicate montmorillonite and a small amount of other silicate minerals such as quartz and feldspar, and analyzed the impact of microbes on bentonite in such aspects as composition and microstructure. The concentrations of elements Si, Al and Mg in solution were tested by Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectrometer (ICP-AES), after being treated by hydrogen peroxide. The minerals after bacteria dissolution were analyzed by X-ray Diffraction (XRD) and Micro-Fourier Transform Infrared Spectroscopy (Micro-FTIR). The pH values of the reaction solution rapidly decreased from 7.5 to 4.3 in the first 2 days. Then the pH values became gradually stabilizing. The dissolution quantities of Si, Al and Mg from the mineral crystal lattice were unbalanced. The X-ray diffraction patterns (XRD) showed that the phase of calcite (Ca) disappeared in bacteria dissolution products (BM), which was probably caused by acid metabolic products of bacteria, and there was a new faint diffraction peak that appeared

收稿日期: 2010-01-28; 修订日期: 2010-06-07

基金项目: 国家重点基础研究发展计划资助项目(973项目)(2007CB815602); 大庆油田对外协作计划项目(2009-JS-1006)

作者简介: 朱云(1982-), 女, 博士, 材料及环境矿物学专业, E-mail: zhuyun@pku.edu.cn; 通讯作者: 鲁安怀, 教授, E-mail: ahlun@pku.edu.cn.

between 9° to 10° in the samples treated by bacteria. According to the Micro-FTIR spectra, the absorption peaks at $3\ 620$ and $3\ 400\ \text{cm}^{-1}$ shifted to higher wavenumber and the intensity decreased, and the intensity of weak absorption peak at $1\ 635\ \text{cm}^{-1}$ decreased too, suggesting that the content of ions in montmorillonite was changed. The disappearance of CO_3^{2-} band absorption peak at $1\ 434$ and $880\ \text{cm}^{-1}$ was consistent with the XRD result of the disappearance of calcite phase. Through analyzing pH changes in solution, variations of major elements in solution and minerals, and structural, infrared spectroscopic and specific surface area changes, the authors inferred that the bacteria dissolution process is like this: first, acidic metabolites produced during the growth of bacteria and contact interaction between minerals and bacteria dissolve the vulnerable parts of mineral surface, and some cations in mineral structure are dissolved. With the dissolution, the uneven exsolution of cations may cause the change of mineral grains surface and even the collapse of the silicate layer, and the mineral structure is changed at last.

Key words: micro-mineral interaction; silicate bacteria; *Bacillus mucilaginosus*; montmorillonite

硅酸盐细菌(silicate bacteria)是一类能够通过自身生命活动分解硅酸盐矿物的细菌。它包括胶质芽孢杆菌(*Bacillus mucilaginosus*)、环状芽孢杆菌(*Bacillus circulans*)和土壤芽孢杆菌(*Bacillus edaphius*)等。目前,俄罗斯学者和我国学者普遍认为硅酸盐细菌是特指胶质芽孢杆菌(*Bacillus mucilaginosus*) (吴小琴, 1997),本文中提到的硅酸盐细菌均为此菌。该细菌自上世纪初被发现并分离,到1939年前苏联学者亚历山大罗夫将其命名为硅酸盐细菌(亚历山大罗夫, 1955),至今已有近百年的历史。在这一个世纪的时间里,科研人员对硅酸盐细菌的研究从未停止过,对其生理生化性质、培养条件、代谢产物等生物学方面的研究已较为成熟(吴小琴, 1997)。由于硅酸盐细菌可分解土壤中含钾的硅酸盐矿物如云母、长石等,释放出钾元素,并分解释放磷灰石中的磷元素等,改善植物营养条件,促进植物生长(陈廷伟等, 1960; 连宾, 1998),从而被广泛应用于微生物肥料的研究中。硅酸盐细菌可分解矿物的功能应用在冶金上,可用于矿石除杂、提高矿石品质等,例如利用硅酸盐细菌进行生物选矿,浸出铝土矿中的硅、铝等(Monib *et al.*, 1984; 周吉奎等, 2002; 孙德四等, 2005)。又由于硅酸盐细菌在生长过程中会产生较大的胞外荚膜,可形成大量的菌胶团,从而在环境领域常被用作絮凝剂处理工业废水中的重金属及难溶难氧化的有机物等(Lian *et al.*, 2007; 张杰等, 2007)。

微生物与矿物的交互作用普遍存在于自然界中(谢先德等, 2001)。随着矿物-微生物受到越来越多的关注,微生物作用促进矿物变化及其机理研究已成为目前矿物-微生物交叉研究领域的热点之一。

而作为岩石圈的主要造岩矿物,硅酸盐矿物在自然界具有极为广泛的分布。因此,研究硅酸盐细菌对硅酸盐矿物的风化、成岩及成矿过程中的影响,对研究岩石圈矿物变化具有重要意义(William *et al.*, 1996; Fortin *et al.*, 1997; Maurice, 2001; 吴涛等, 2007)。微生物对岩石圈的影响,从改变构成岩石的矿物开始,而微生物对矿物的影响,则应从改变矿物成分开始。本文在前人研究微生物-矿物交互作用的基础上,选取具有层状结构的硅酸盐矿物蒙脱石与硅酸盐细菌交互作用,从矿物学角度分析了细菌作用对蒙脱石矿物成分、微结构等方面的影响。

1 实验材料与方法

1.1 材料

本文使用的硅酸盐细菌为胶质芽孢杆菌(*B. mucilaginosus*)编号3025,由中国农业科学院土壤肥料研究所提供。

矿物样品采用主要成分为钙基蒙脱石的辽宁省建平县天然钙基膨润土,根据化学成分分析结果,通过计算确定其实际化学式为(周建功, 2007) $(\text{Ca}_{0.19}\text{Na}_{0.17}\text{K}_{0.08})_{1.44}(\text{Al}_{1.36}\text{Mg}_{0.32}\text{Fe}_{0.26})_{1.94}(\text{Si}_{3.87}\text{Al}_{0.13})_{4.00}\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ 。

1.2 培养基

实验采用两种培养基:种子液和发酵液,前者用于活化硅酸盐菌种,后者用于硅酸盐细菌与矿物交互作用实验。培养基在参考中华人民共和国农业行业标准、微生物肥料(NY882-2004)的基础上稍做调整,具体成分如下:

硅酸盐细菌种子液:淀粉 5.0 g/L,酵母膏 1.0

g/L, K_2HPO_4 0.2 g/L, $MgSO_4 \cdot 7 H_2O$ 0.5 g/L, $CaCO_3$ 0.1 g/L, $FeCl_3 \cdot 6 H_2O$ 5 mg/L, 用稀的 KOH 溶液调节 pH 值至 7.5 左右。

硅酸盐细菌发酵液:蔗糖 10.0 g/L, $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ 0.5 g/L (NH_4)₂SO₄ 0.2 g/L, KCl 0.1 g/L, $CaCO_3$ 0.1 g/L, 用稀盐酸调节 pH 值至 7.0 左右, 分装至 500 mL 烧瓶, 每瓶加入 1.0 g 钙基膨润土, 加入膨润土后溶液 pH 值上升至 7.5 左右, 用透气封口膜密封。

上述培养基均在 121℃ 下高温灭菌 20 min。

1.3 实验步骤

(1) 活化硅酸盐细菌, 从冷藏的硅酸盐菌种上接 1 到 2 环至种子液, 于 30℃, 150 r/min 条件下摇床培养, 对菌种进行活化。

(2) 将装有矿物和培养液的烧瓶, 灭菌后分为 3 组, 每组 7 瓶, 其中一组为空白对照, 编号 Blank; 为了检验实验可重复性, 另外两组每瓶接入活化 24~48 h 的菌液 1 mL, 条件相同, 编号分别为 BM1、BM2。

(3) 从反应进行第 1 天开始, 每天从上述 3 组样品中各取 1 瓶, 将反应溶液在 9 000 r/min 的条件下离心 15 min, 测上清液 pH 值, 用 30% 的双氧水消解有菌组上清液中有有机质后, 再使用电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-AES)测试其中 Si、Al、Mg 元素含量, 固体产物在 80℃ 下烘干, 研磨后做 X 射线粉末衍射(XRD)及显微红外光谱(Micro-FTIR)分析。

1.4 测试方法

使用 UV-2102 PC 型分光光度计在 600 nm 处测硅酸盐细菌生长曲线。反应溶液中 Si、Al、Mg 离子浓度在北京大学分析测试中心, 使用美国 Leeman 公司 PROFILE SPEC 型电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-AES)测得。

微生物作用后的矿物及空白对照实验中矿物的 X 射线衍射(XRD)分析在中国地质大学(北京)X 射线粉末衍射实验室日本理学 D/Max-RC 粉末 X 射线衍射仪上完成, 辐射源为 $CuK\alpha_1$ ($\lambda = 0.15406$ nm), 步宽为 0.02° 。粘土矿物自然片制样方法同常规粉末衍射制样方法; 为了获得粘土样品更接近于单晶衍射的数据, 可制作粘土自然定向片: 将 40 mg 粘土加入 0.7 mL 去离子水, 均匀分散后倒在载玻片上, 风干(中华人民共和国石油天然气行业标准, SY/T 5163-1995)。

上述两组矿物样品的红外分析测试在北京大学

化学学院 NICOLETiN10 MX 显微红外光谱仪上进行, 设置光谱为 $600 \sim 4000$ cm^{-1} , 分辨率为 4 cm^{-1} 。

2 结果与讨论

2.1 硅酸盐细菌生长曲线

由于细菌浓度与吸光度成正比, 因此可利用分光光度计测定菌悬液的光密度来推知菌液的浓度, 并将所测的吸光度与其对应的培养时间作图, 即可绘出该菌在一定条件下的生长曲线, 来定性反映细菌生长情况。本文采用分光光度法, 测试了硅酸盐细菌 3025 的种子液每隔 12 h 在波长 600 nm 处的吸光度, 并绘制其生长曲线。由图 1 可知, 硅酸盐细菌 3025 在 24 到 48 h 进入对数生长期, 此时细胞数以几何级数增长, 酶系活跃、代谢旺盛, 因此, 最适宜将该阶段的菌液接种至发酵液。48 h 后, 细菌进入稳定期, 代谢产物累积和 pH 变化, 逐步不适宜细菌生长, 导致生长速率逐渐降低。

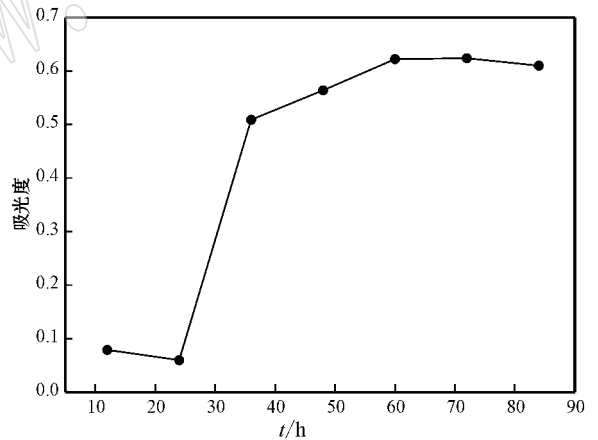


图 1 硅酸盐细菌 3025 的生长曲线

Fig. 1 Growth curve of No. 3025 silicate bacteria

2.2 溶液 pH 值变化

从图 2 可以发现, 随着时间增加, 接入硅酸盐细菌 3025 的两组矿物悬浊液 BM1、BM2 的 pH 值从初始值 7.5 不断下降, 在反应两天后 pH 值降至 4.3 左右后趋于稳定; 而未接入菌液的矿物悬浊液空白对照组 pH 值保持在 7.5 左右不变。

接种硅酸盐细菌的两组溶液的 pH 值变化趋势与硅酸盐细菌 3025 的生长趋势相反, 即随着细菌进入对数生长期, 细胞大量生长, 并产生大量的有机酸, 如草酸、酒石酸、柠檬酸、苹果酸等以及多种氨基酸(孙德四等, 2006), 从而造成矿物溶液 pH 值快速

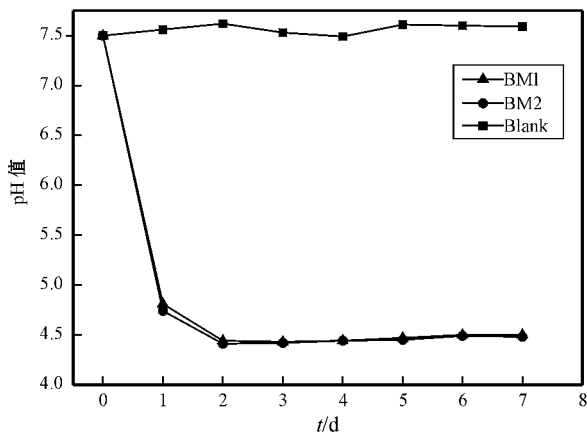


图 2 硅酸盐细菌作用后溶液 pH 值变化

Fig. 2 pH change of solution after silicate bacteria activity

下降,细菌生长进入稳定期后,代谢速度及产物降低和减少,生长环境不再发生较大变化,故矿物溶液的 pH 值也趋于稳定。

2.3 溶液中离子浓度的变化

测试了两组硅酸盐细菌分别作用(BM1 和 BM2)1、2、4、7 d 后,溶液中 Si、Al、Mg 离子浓度以及相同时间空白对照样品(Blank)中 Si、Al、Mg 离子浓度。由于上述 3 种阳离子是蒙脱石成分中最主要的 3 种金属元素,因此,可以通过观察溶液中溶出 Si、Al、Mg 的量,间接反映硅酸盐细菌对蒙脱石结构中各金属元素的影响。

与空白样品比较,硅酸盐细菌作用后的溶液中 Si、Al、Mg 离子浓度大量增加(表 1)。虽然细菌作用

表 1 实验溶液及空白实验溶液中 Si、Al、Mg 离子的浓度

mg/L

Table 1 Concentrations of Si, Al, Mg in the solution after bacteria activity (BM) and blank

| t/d | 1 | | | 2 | | | 4 | | | 7 | | |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | Blank | BM1 | BM2 | Blank | BM1 | BM2 | Blank | BM1 | BM2 | Blank | BM1 | BM2 |
| Si | 5.47 | 8.46 | 8.78 | 6.77 | 14.72 | 15.06 | 7.03 | 16.34 | 16.54 | 5.25 | 13.52 | 13.88 |
| Al | 0.018 | 0.486 | 0.494 | 0.069 | 0.490 | 0.496 | 0.072 | 0.950 | 0.640 | 0.040 | 0.614 | 0.876 |
| Mg | 19.8 | 25.8 | 26.4 | 19.7 | 27.0 | 27.0 | 18.5 | 26.6 | 27.2 | 19.5 | 27.6 | 28.2 |

后,溶液中 Al 溶出量较小,但是溶出率高于 Si 和 Mg;Mg 溶出量较大,但相对空白样品中 Mg 的含量,其溶出率较小。细菌作用组样品溶液中 Al 和 Si 的溶出浓度随反应时间增加而增加。Mg 溶出量则不受反应时间明显影响。空白样品溶液中 Si、Al、Mg 离子浓度基本不受时间变化影响。

从表 1 中的数据可知,硅酸盐细菌对蒙脱石中的 Si、Al、Mg 离子溶出的影响程度并不相同,其中对 Al 影响最大, Si 次之, Mg 影响最小。这种不均衡的元素溶出作用会造成矿物中原有元素含量构成的改变,从而引起矿物微结构的变化甚至发生物相转变。

2.4 作用后矿物 XRD 分析

为了观察硅酸盐细菌对蒙脱石的结构影响,本文对所得样品进行了 X 射线衍射分析。

分别将反应 7 d 后的有菌组(BM)和空白对照组固体产物(Blank)研磨至 200 目以下的粉末压制成片,扫描速度 $8^\circ/\text{min}$,扫描范围 $3^\circ \sim 70^\circ$,获得 XRD 图谱如图 3 所示。对比细菌作用后样品与空白组样品物相,发现空白样品的主要成分蒙脱石(S)及少量的长石(An)、石英(Q)的物相并未发生明显变化,方解石(Ca)物相消失。从微生物作用后溶液 pH 值明显呈酸性,可以判断方解石的分解是溶液中的

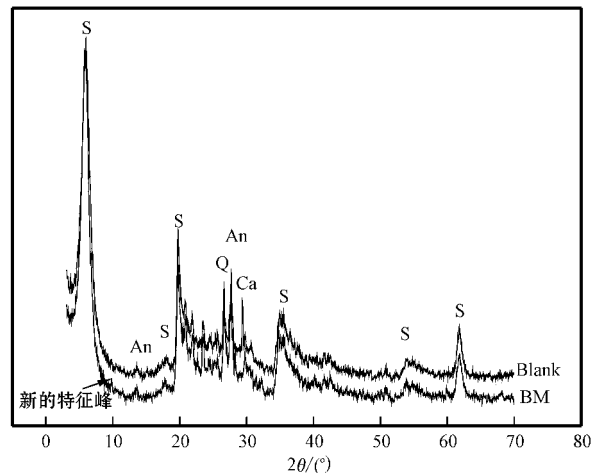


图 3 空白和微生物作用后矿物 XRD 自然片图谱

Fig. 3 Natural flakes XRD patterns of minerals in BM and blank

酸性代谢产物作用的结果。而值得引起注意的是, XRD 图谱中在 2θ 角 $9 \sim 10^\circ$ 之间,出现 1 个新的微弱衍射峰。

为了进一步确定上述 XRD 测试结果,将上述两个样品制成粘土自然定向片,在 $2^\circ/\text{min}$ 的速度下,重新扫描 $2.5 \sim 30^\circ$ 范围,获得衍射图谱如图 4 所示。

衍射图中,主要衍射峰均为蒙脱石特征峰,而在 2θ 角为 9.77° 处,新出现的微弱衍射峰仍然存在,这与前人研究蒙脱石经生物作用后出现伊蒙混层 9.72° 峰相近(Zhang *et al.*, 2007)。新出现的衍射峰往往可以暗示矿物物相发生了细微的变化,本文硅酸盐细菌作用的蒙脱石是否也发生了伊利石化,还有待于进一步的考证。

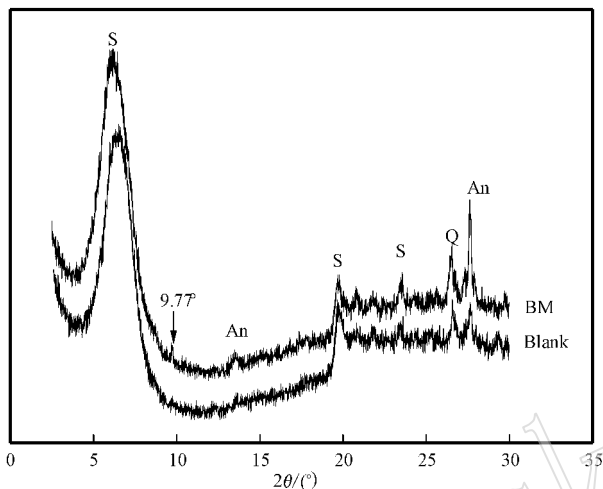


图 4 空白样品和微生物作用后矿物 XRD 定向片图谱
Fig. 4 Orientated flakes XRD patterns of minerals in BM and blank

2.5 作用后矿物红外光谱分析

将硅酸盐细菌作用 7 d 后的矿物样品与空白对照组矿物样品烘干研磨后,进行显微红外光谱测试,结果见图 5。将测得的红外光谱图与 Sadtler 红外光谱数据库中蒙脱石的标准红外光谱对比,可以得知在空白对照组矿物的红外光谱图中, $3\ 620\text{ cm}^{-1}$ 左右

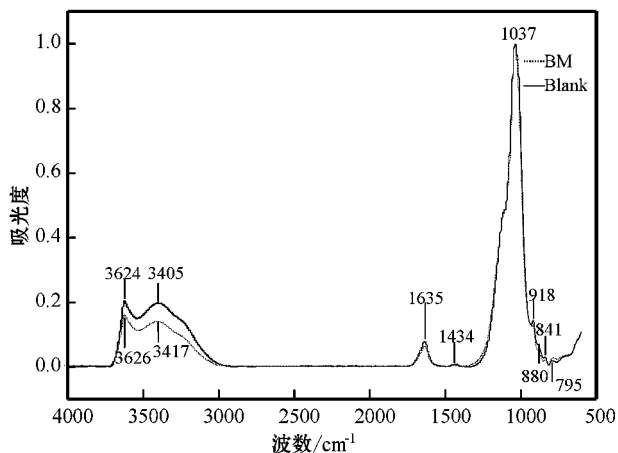


图 5 空白和微生物作用后矿物显微红外光谱图
Fig. 5 Infrared absorbency spectra of minerals in BM and blank

的峰是蒙脱石 Al—O—H 的伸缩振动引起的,在 $3\ 400\text{ cm}^{-1}$ 附近的峰被认为与蒙脱石层间水分子 H—O—H 的伸缩振动有关,而中红外区 $1\ 635\text{ cm}^{-1}$ 处的峰则与 H—O—H 的弯曲振动相对应; $1\ 037\text{ cm}^{-1}$ 处的峰是蒙脱石及少量长石和石英中 Si—O—Si 的反对称伸缩振动引起的,同样由 Si—O—Si 键振动引起的还有 795 cm^{-1} 处的弱峰(法默,1982;彭文世等,1982;聂俊杰等,2009); 918 cm^{-1} 处的弱峰则被认为是与蒙脱石中的 Al—O—H 键有关,此处的峰是离子交换的“敏感峰”,受八面体层中的 Mg^{2+} 和 Al^{3+} 含量变化的影响明显。当 Mg^{2+} 增加时,该峰向高波数段位移,而 Al^{3+} 减少时,该峰强度发生相对降低。测试结果中 $1\ 434\text{ cm}^{-1}$ 和 880 cm^{-1} 处的峰则有可能与矿物样品中少量的碳酸盐矿物中 CO_3^{2-} 的振动有关(聂俊杰等,2009)。

硅酸盐细菌作用后矿物样品的红外光谱图发生了变化。首先是 $3\ 620\text{ cm}^{-1}$ 和 $3\ 400\text{ cm}^{-1}$ 附近的峰向高波数段发生偏移,且强度减弱,同时 $1\ 635\text{ cm}^{-1}$ 处的峰强度变弱,即层间水的氢键发生了变化,这意味着蒙脱石结构中的阳离子发生变化。结合 918 cm^{-1} 处“敏感”弱峰变得更弱来看,可以得知上述变化与蒙脱石结构中 Al^{3+} 含量减少、阳离子发生变化有关,该结果与 ICP-AES 测得细菌作用后溶液中 Al^{3+} 溶出率远高于 Si^{2+} 和 Mg^{2+} 的结果一致。 $1\ 434\text{ cm}^{-1}$ 和 880 cm^{-1} 处峰的消失,则是因为样品中碳酸盐矿物被分解,这也与 XRD 分析中方解石物相消失相吻合。

3 结论

(1) 硅酸盐细菌(*Bacillus mucilaginosus*)3025 作用于蒙脱石后,会造成蒙脱石中的 Si 、 Al 、 Mg 离子溶出,其中溶出量 Mg^{2+} 最大, Si^{2+} 、 Al^{3+} 次之;而与空白样品中 3 种元素溶出量比较后,可发现 Al^{3+} 溶出率最高, Si^{2+} 次之, Mg^{2+} 最小。

(2) 红外光谱测试结果显示,微生物作用使蒙脱石结构中的 Al^{3+} 含量降低,结构中主要阳离子的比例发生了变化。微生物作用后的样品制作自然片和定向片后进行 XRD 分析,获得的图谱均显示在 2θ 角约为 9.77° 处,出现了新的微弱的特征峰,这暗示矿物结构受到了影响。

(3) 通过分析硅酸盐细菌作用前后溶液的 pH 值变化、溶液中主要阳离子浓度变化以及作用前后矿物的 XRD、Micro-FTIR 测试结果的变化,对硅酸

盐细菌对蒙脱石的作用过程有以下几点认识:首先,细菌的生长产生大量的酸性代谢产物,细菌与矿物的接触作用使矿物颗粒表面较脆弱部位发生溶蚀作用,蒙脱石二八面体层中的主要金属阳离子被溶出;随着溶蚀作用的进行,金属阳离子不均衡地出溶,可能促使部分被侵蚀的矿物颗粒晶格发生变形或崩解,甚至蒙脱石层的坍塌,最终导致蒙脱石矿物结构发生变化。

References

- Aleksandrov Igor(translated by Ye Weiqing). 1955. Silicate Bacteria [M]. Beijing : Science Press(in Chinese).
- Chen Tingwei and Chen Huakui. 1960. Physiological characteristic of the potassium bacteria and their capacities of dissolving minerals rich in potassium and phosphorus[J]. Acta Microbiologica Sinica , 2 : 104 ~ 112(in Chinese).
- Farmer V C(translated by Ying Yupu). 1982. The Infrared Spectroscopy of Mineral[M]. Beijing : Science Press(in Chinese).
- Fortin D , Farris F G and Beveridge T J. 1997. Surface mediated mineral development by bacteria[A]. Geomicrobiology : Interactions Between Microbes and Minerals[C]. Washington D C : Mineralogical Society of America , 161~180.
- Lian Bin. 1998. A study on how silicate bacteria GY92 dissolves potassium from illite[J]. Acta Mineralogica Sinica , 18(2) : 234~237(in Chinese).
- Lian Bin , Chen Ye , Zhao Jin , et al. 2007. Microbial flocculation by Bacillus mucilaginosus : Applications and mechanisms[J]. Biore-source Technology , 09 : 45.
- Maurice P A , Vierkorn M A , Hersman L E , et al. 2001. Enhancement of kaolinite dissolution by an aerobic pseudomonas mendocina bacterium[J]. Geomicrobiology Journal , 18 : 21~35.
- Monib M , Zahra M K , Abdel el-Al SI , et al. 1984. Role of Silicate Bacteria in Releasing K and Si from Biotite and Orthoclase[J]. Soil Biology and Conservation of the Biosphere , 2 : 733~743.
- Nie Junjie , Wang Lijin and Zhou Huan. 2009. Infrared spectroscopic analysis of bentonite from Balikun in Xinjiang[J]. Rock and Mineral Analysis , 28(1) : 69~71(in Chinese).
- Peng Wenshi and Liu Gaokui. 1982. The Collection of Infrared Spectroscopy of Mineral[M]. Beijing : Science Press(in Chinese).
- Sun Desi and Zhang Qiang. 2005. Research on growth of silicate bacteria and their leaching and dissolution of silicon and aluminium in silicate minerals[J]. Metal Mine , 9 : 38~40(in Chinese).
- Sun Desi , Zhang Xianzhen and Zhang Qiang. 2006. Leaching effects of metabolites of silicate bacterium on silicate mineral[J]. Mining and Metallurgical Engineering , 26(3) : 27~30(in Chinese).
- The People 's Republic of China agricultural standards. NY882-2004. Silicate-Dissolving Bacteria Culture[S].
- The People 's Republic of China Oil and Gas Industry Standards. SY/ T5163-1995. Quantitative Analytic Method of X-ray Diffraction Phase of Clay Mineral[S].
- William J U , David L K , Susan A W , et al. 1996. Laboratory evidence for microbially mediated silicate mineral dissolution in nature[J].

Chemical Geology , 132 : 11~17.

- Wu Tao , Chen Jun and Lian Bian. 2007. Advance in studies on the function of microbes to the weathering of silicate mineral[J]. Bulletin of Mineralogy , Petrology and Geochemistry , 26(3) : 263~273 (in Chinese).
- Wu Xiaoqin. 1997. Applicable basic facts of silicate bacteria[J]. Jiangxi Science , 15(1) : 60~66(in Chinese).
- Xie Xiande and Zhang Gangsheng. 2001. Environmental significance of the interaction between minerals and microbes[J]. Acta Petrologica et Mineralogica , 20(4) : 382~386(in Chinese with English abstract).
- Zhou Jikui , Hu Yuehua and Qiu Guanzhou. 2002. Advances in the application research of silicate bacteria in mineral engineering field[J]. Metal Mine , (1) : 26~28(in Chinese).
- Zhang Jie , Liang Shiqiang and Liu Shi. 2007. The application potential and action mechanism of silicate bacteria in heavy metal-bearing wastewater treatment[J]. Water & Wastewater Engineering , 33 : 142~146.
- Zhang Gengxin , Dong Hailiang , Kim Jinwook , et al. 2007. Microbial reduction of structural Fe³⁺ in nontronite by a thermophilic bacterium and its role in promoting the smectite to illite reaction[J]. American Mineralogist , 92 : 1411~1419.
- Zhou Jianguo. 2007. Experimental Study on Combined Treatment of Municipal Landfill Leachate from Beijing Landfill Sites by Mineral Method[D]. Beijing : PKU(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈廷伟 , 陈华葵. 1960. 钾细菌的形态生理及其对磷钾矿物的分解能力[J]. 微生物学报 , 2 : 104~112.
- 连 宾. 1998. 硅酸盐细菌 GY92 对伊利石的解钾作用[J]. 矿物学报 , 18(2) : 234~237.
- 聂俊杰 , 汪立今 , 周 欢. 2009. 新疆巴里坤膨润土的红外光谱分析[J]. 岩矿测试 , 28(1) : 69~71.
- 彭文世 , 刘高魁. 1982. 矿物红外光谱图集[M]. 北京 : 科学出版社.
- 孙德四 , 张 强. 2005. 硅酸盐细菌生长及对硅酸盐矿物中硅铝的浸溶[J]. 金属矿山 , 9 : 38~40.
- 孙德四 , 张贤珍 , 张 强. 2006. 硅酸盐细菌代谢产物对硅酸盐矿物的浸溶作用研究[J]. 矿冶工程 , 26(3) : 27~30.
- 法默(应育译). 1982. 矿物的红外光谱[M]. 北京 : 科学出版社.
- 吴小琴. 1997. 硅酸盐细菌的应用概况[J]. 江西科学 , 15(1) : 60~66.
- 吴 涛 , 陈 骏 , 连 宾. 2007. 微生物对硅酸盐矿物风化作用研究进展[J]. 矿物岩石地球化学通报 , 26(3) : 263~273.
- 谢先德 , 张刚生. 2001. 微生物-矿物相互作用之环境意义的研究[J]. 岩石矿物学杂志 , 20(4) : 382~386.
- 亚历山大罗夫(叶维青译). 1955. 硅酸盐细菌[M]. 北京 : 科学出版社.
- 张 杰 , 梁世强 , 刘 石. 2007. 硅酸盐细菌处理含重金属污水的试验与分析[J]. 给水排水 , 33 : 142~146.
- 中华人民共和国农业行业标准. NY882-2004. 硅酸盐细菌菌种[S].
- 中华人民共和国石油天然气行业标准. SY/T5163-1995. 沉积岩粘土矿物相对含量 X 射线衍射分析方法[S].
- 周吉奎 , 胡岳华 , 邱冠周 , 等. 2002. 硅酸盐细菌在矿物工程领域应用研究进展[J]. 金属矿山 , 1 : 26~28.
- 周建功. 2007. 北京市生活垃圾填埋场渗滤液矿物法组合处理实验研究[D]. 北京 : 北京大学地质系.