

# 胶质芽孢杆菌 3027 对钙基蒙脱石的矿物结构影响

杨晓雪<sup>1</sup>, 王浩然<sup>1</sup>, 李艳<sup>1</sup>, 朱云<sup>2</sup>, 丁竝瑞<sup>1</sup>, 鲁安怀<sup>1</sup>

(1. 造山带和地壳演化教育部重点实验室, 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871;

2. 国家地质实验测试中心, 北京 100037)

**摘要:** 粘土矿物在地球表层分布广泛, 与微生物的交互作用十分常见。微生物能否通过除还原 Fe(III) 之外的其他途径影响贫铁蒙脱石的结构与物相, 成为粘土矿物与微生物交互作用的新问题。本研究选取胶质芽孢杆菌 *Bacillus mucilaginosus* 3027 与钙基蒙脱石在 35°C、常压条件下进行交互作用实验, 考察胶质芽孢杆菌生命活动对蒙脱石晶体结构的影响。实验定期取样进行 pH 值与体系总蛋白含量测试, 并利用显微傅里叶变换红外光谱 (micro-FTIR)、同步辐射 X 射线近边吸收结构 (XANES)、X 射线衍射 (XRD) 和扫描电镜 (SEM) 对最终产物进行矿物学表征。实验结果显示, 胶质芽孢杆菌在蒙脱石矿物悬浊液中生长, 代谢分泌大量有机酸导致体系 pH 值降低, 使蒙脱石中 Si 元素溶出, 并造成蒙脱石晶体结构中硅氧四面体对称性、O—H 振动等发生变化, Fe 配位八面体对称性下降, 矿物表面出现边缘卷曲现象。在微生物作用后的矿物样品中, 探测到新形成的  $\alpha$ -石英物相, 可能与微生物的活动密切相关。

**关键词:** 蒙脱石; 胶质芽孢杆菌; 交互作用

**中图分类号:** P578.967; P579

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-6524(2013)06-0767-06

## The effect of a *Bacillus mucilaginosus* strain 3027 on the structure of Ca-montmorillonite

YANG Xiao-xue<sup>1</sup>, WANG Hao-ran<sup>1</sup>, LI Yan<sup>1</sup>, ZHU Yun<sup>2</sup>, DING Hong-rui<sup>1</sup> and LU An-huai<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Orogenic Belts and Crustal Evolution, School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China; 2. National Research Centre for Geoanalysis, Beijing 100037, China)

**Abstract:** Interactions between clay minerals and microbes are ubiquitous in natural environments. It is widely reported that some bacteria may greatly influence the decomposition and transformation of clay minerals by reducing structural Fe(III) in Fe-rich smectites. However, the Fe-rich nontronite is not the most common type of smectite. Most natural smectite is montmorillonite bearing poor Fe. The question remains to be answered whether there is other ways of interaction between microbes and Fe-poor smectites except for the Fe(III) reduction. The authors therefore studied the effect of *Bacillus mucilaginosus* on the local structure transformation of montmorillonite. Experiments were conducted under aerobic atmosphere at 35°C and 1 atm. The mineral samples were bentonite containing about 90% Ca-montmorillonite and 10% cristobalite, collected from Jianping District of Liaoning Province. The aerobic bacteria named *Bacillus mucilaginosus* 3027, kindly donated by Chinese Academy of Agricultural Science, was inoculated into suspension of sterilized mineral powder and cultured for 20 days. During this period, 3.0 mL solutions were extracted regularly for pH and Si concentration analysis. After the experiments, minerals were collected and characterized by FTIR, XANES, XRD and SEM. Abiotic controls

收稿日期: 2013-10-21; 修订日期: 2013-10-30

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(41230103); 国家自然科学基金面上项目(41272003); 国家自然科学基金青年项目(41202030)

作者简介: 杨晓雪(1988-), 女, 博士, 材料及环境矿物学专业, E-mail: yxx1101@pku.edu.cn; 通讯作者: 鲁安怀, 教授, E-mail: ahlu@pku.edu.cn

with only sterilized bentonite were conducted simultaneously. Initially, the pH of biotic solutions decreased, probably caused by acidic metabolites produced by bacteria during their growth and metabolism. Meanwhile, Si concentration in the solutions increased, suggesting the release of Si from the tetrahedral sheets of solid mineral. These factors might later trigger a local structure distortion in montmorillonite, as indicated by the FTIR spectrum. The local structure change was also implied by reduced symmetry of coordinate octahedral geometry, as observed from the broadened edge crest in the Fe K-edge XANES. More importantly, newly formed  $\alpha$ -quartz was detected in SR-XRD patterns, possibly formed by the Si released from montmorillonite. Furthermore, partial layer and edge curling were observed by SEM.

**Key words:** Fe-poor smectite; *Bacillus mucilaginosus* 3027; interaction

粘土矿物在地球表层分布广泛,与微生物的交互作用十分常见。蒙脱石是土壤中常见的粘土矿物,能与多种微生物发生交互作用,进而发生矿物结构变化或矿物物相转化(Dong, 2012)。许多研究表明,一些微生物能以蒙脱石矿物晶体八面体结构中  $Fd(III)$  作为其生化反应电子传递链的终端受体,将其还原为  $Fd(II)$ ,并进一步影响蒙脱石的结构和物相。例如,一株希瓦氏菌(*Shewanella oneidensis* strain MR-1)在 25℃、常压、中性 pH 值条件下与绿脱石作用两周后,可使其发生明显的部分伊利石化,并伴有蓝铁矿或菱铁矿的生成(Kim *et al.*, 2004)。除此以外,实验发现嗜热厌氧乙醇杆菌(*Thermoanaerobacter ethanolicus*) (Zhang *et al.*, 2007)和硫酸盐还原菌(*Desulfovibrio* spp.) (Li *et al.*, 2004)均能在一定条件下使绿脱石发生部分伊利石化。

然而,这些研究中普遍采用的实验材料绿脱石属于富铁蒙脱石,在自然界中并不常见。贫铁蒙脱石在自然界分布更为广泛(Dong, 2010)。尽管贫铁蒙脱石晶体结构中的  $Fd(III)$  也能与微生物发生作用(Kostka *et al.*, 1999),但其作用后矿物结构变化情况尚不明晰。微生物能否通过除还原  $Fd(III)$  之外的其他途径影响贫铁蒙脱石的结构与物相,成为粘土矿物与微生物交互作用新的研究方向之一。

胶质芽孢杆菌(*Bacillus mucilaginosus*)是一类土壤中常见的细菌,能够通过自身生命活动促进硅酸盐矿物风化(连宾, 1998; 孙德四等, 2005)。近期研究表明,在胶质芽孢杆菌 3025 与贫铁蒙脱石在 30℃、常压条件下作用 7 天后, Si、Al 等元素出现不均衡溶出,矿物结构也出现一定变化(Zhu *et al.*, 2011),然而矿物微观结构在微生物作用下的具体变化情况尚不明。因此,本研究采用胶质芽孢杆菌 3027 与贫铁蒙脱石进行交互作用实验,并在前人研究基础上,改进反应条件,延长反应周期,以求更加

完整地反应胶质芽孢杆菌与蒙脱石交互作用的过程,更加细致地探究胶质芽孢杆菌作用下贫铁蒙脱石结构变化的情况,并为探索微生物与蒙脱石交互作用的多种机制提供实验依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验材料

实验用细菌样品为胶质芽孢杆菌 3027(*B. mucilaginosus* 3027),由中国农业科学院土壤肥料研究所提供,为典型的杆状菌。实验用矿物样品与朱云等(2011)中采用的样品相同,为采自辽宁省建平县的天然钙基蒙脱石。实验前将矿物样品 60℃ 干燥 2 h,研磨过 200 目筛,取筛下样品进行后续实验。

### 1.2 培养基

实验采用统一培养基,用于胶质芽孢杆菌活化培养以及细菌与矿物交互作用介质。培养基成分组成在总结中华人民共和国农业行业标准、微生物肥料(NY882-2004)以及朱云等(2011)的基础上,经调整改良而成。具体如下:蔗糖 5.0 g/L,酵母膏 1.0 g/L,  $MgSO_4$  0.25 g/L,  $K_2HPO_4$  0.2 g/L,  $FeCl_3 \cdot 6 H_2O$  5 mg/L,  $CaCl_2$  10 mg/L,调节 pH 值至 7.2~7.5。

### 1.3 实验步骤

(1)活化菌种:配置培养基,121℃ 高温灭菌 20 min,待冷却后取出,在无菌操作台上,向每 100 mL 培养基接种 1~2 mL 冷藏菌液,于 35℃,150 r/min 条件下振荡培养 1~2 天,对菌种进行活化。

(2)设置细菌-矿物交互作用体系:采用培养基作为反应体系介质,每 50 mL 培养基中加入 1 g 矿物粉末,121℃ 高温灭菌 20 min,菌矿实验组接种 40 mL 活化 1~2 天菌液,同时加入 10 mL 灭菌新鲜培养基,空白对照组加入 50 mL 无菌培养基,于 35℃,150 r/min 条件下振荡反应。

(3) 取样测试:定期从各组均匀混合的悬浊液中取 3.5 mL,其中 0.5 mL 在 10 000 r/min 的条件下离心 10 min,取 0.2 mL 上清液梯度稀释 50 倍,使用电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-AES)测 Si、Al 元素含量;另取 0.2 mL,加入 0.2 M NaOH 溶液以及 1.6 mL 0.9% 生理盐水,沸水浴 10 min 裂解细胞,冷却后离心,取 1.6 mL,加入 0.4 mL 考马斯亮蓝试剂测试体系总蛋白含量,余下 2.8 mL 待静置沉降 15 min 后测上清液 pH 值。

反应进行 20 天后,收集固体产物,60℃ 下烘干,研磨后进行显微傅里叶变换红外光谱(Micro-FTIR)测试、同步辐射 X 射线粉晶衍射(SR-XRD)测试、X 射线吸收近边结构(XANES)测试、扫描电子显微镜(SEM)观察。

#### 1.4 测试方法

根据改良考马斯亮蓝试剂蛋白测试法(Zor and Selinger, 1996),使用实验室 UV-2102 PC 型分光光度计在 595、450 nm 处测吸光度并计算蛋白浓度。标准测试曲线为  $y = 2.180x_1/x_2 - 2.811$ ,相关系数平方( $R^2$ )为 0.998 9,其中  $x_1$ 、 $x_2$  分别为样品在 595、450 nm 处吸光度。

反应溶液中 Si、Al 离子浓度,使用北京大学环境科学与工程学院 PODIGY 型电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-AES)测得。微生物与矿物的形貌观察在北京大学地球与空间科学学院 QUANTA-650FEG 型场发射扫描电镜上完成。红外光谱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,光谱范围为 600~4 000  $\text{cm}^{-1}$ ,分辨率为 4  $\text{cm}^{-1}$ 。

矿物的 X 射线衍射(XRD)分析以及 X 射线吸收近边结构谱(XANES)在上海同步辐射光源 BL15U 线站 3.5 GeV,300 mA, $S(111)$  束斑 50×50  $\mu\text{m}$  进行。X 射线衍射采用微区聚焦透射模式。X 射线吸收近边结构谱采用荧光模式,目标元素 Fe(K 边),能量范围 7 062~7 211.5 eV,步距 0.5 eV,信号采集时间 2.0 s。同步辐射光源测试数据采用 Fit2D、Athena 等软件转化处理。

## 2 结果与讨论

### 2.1 作用过程体系介质变化

#### 2.1.1 pH 值与体系总蛋白含量变化

在接种胶质芽孢杆菌 3027 的钙基蒙脱石体系

(Ca3027)中,pH 值由初始 6.8 下降至约 5.2 后达到稳定,体系总蛋白含量从第 7 天后开始逐渐上升至约 50 mg/L,说明细菌在活化期间充分繁殖生长,产生大量酸性代谢产物,接种进入矿物悬浊液后造成体系 pH 值降低,活化后的细菌在钙基蒙脱石悬浊液中适应一段时间后,充分繁殖生长。第 20 天蛋白含量有所回落,可能由于细菌繁殖数目过多,导致所需生长代谢的空间、营养不足。在无菌体系中,pH 值始终稳定在初始值 7.0 左右;蛋白含量基本维持在 15 mg/L 以下(图 1)。

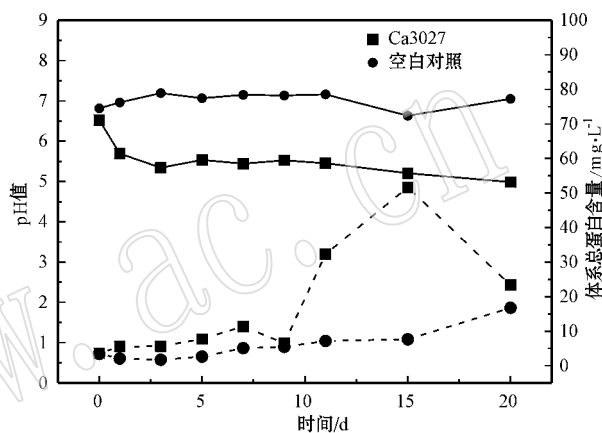


图 1 pH 值(实线)与体系总蛋白含量(虚线)变化曲线  
Fig. 1 pH (full line) and total protein concentration (line of dashes) curves

#### 2.1.2 体系元素浓度变化

在接种胶质芽孢杆菌的钙基蒙脱石体系(Ca3027)中,溶液中 Si 元素浓度逐渐上升至约 45 mg/L,之后逐渐降低至约 25 mg/L,Al 元素浓度基本维持在 2 mg/L 以下;在未加细菌空白对照组中,溶液中 Si 元素浓度基本维持约 15 mg/L 不变,Al 元素浓度基本维持在 2 mg/L 以下(图 2)。由此可知,胶质芽孢杆菌作用一段时间后,蒙脱石结构中 Si 元素发生溶出,考虑初始时每 100 mL 培养基中加入 1.0 g 蒙脱石样品,可计算得 Si 元素最大溶出率大致为 1.15%,而 Al 元素溶出量低于实验所用测试方法最低检测限。

### 2.2 矿物结构变化

#### 2.2.1 显微傅里叶变换红外光谱

经胶质芽孢杆菌作用后的矿物样品(Ca3027)与空白对照组具有类似的特征峰分布,与蒙脱石矿物晶体结构中的化学键振动相对应。O—H 与层间 H<sub>2</sub>O 的伸缩振动出现于高频区 3 650~3 400  $\text{cm}^{-1}$ ,其中 3 620  $\text{cm}^{-1}$  处较强吸收峰归属于 O—H 伸缩振

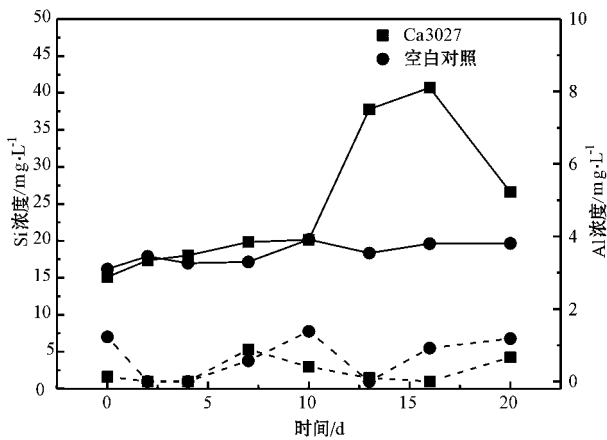


图 2 体系上清液 Si(实线)Al(虚线)元素含量变化

Fig. 2 Silicon (full line) and aluminum (line of dashes) concentration in the supernatant

动,在 $3400\text{ cm}^{-1}$ 附近的吸收带对应层间水分子 H—O—H 的伸缩振动。中频区 $1635\text{ cm}^{-1}$ 处的峰则由 H—O—H 的弯曲振动引起; $1040\text{ cm}^{-1}$ 与 $1080\text{ cm}^{-1}$ 附近的吸收峰分别由蒙脱石中平行层与垂直层的 Si—O 伸缩振动引起(彭文世等,1982)。内层 O—H 摆动体现在 $910\text{ cm}^{-1}$ 附近,同时也与 Al—OH—Al 的振动有关(Cuadros and Dudek,2006)。

值得注意的是,实验中,钙基蒙脱石体系经胶质芽孢杆菌作用后矿物样品在 $3300\sim 3400\text{ cm}^{-1}$ 范围内出现的峰带强度增加、峰宽变窄可能为新峰与原有特征峰叠加造成,说明胶质芽孢杆菌作用影响了钙基蒙脱石 O—H 与层间  $\text{H}_2\text{O}$  分布;经胶质芽孢杆菌作用后矿物样品在 $1043\text{ cm}^{-1}$ 与 $1082\text{ cm}^{-1}$ 出现两个并列的尖锐强峰,而空白对照组仅在 $1043\text{ cm}^{-1}$ 处出现一处强峰,说明经胶质芽孢杆菌作用后,矿物晶体结构中硅氧四面体 Si—O 的平行层伸缩振动与垂直层伸缩振动相对位置和强度发生了变化,蒙脱石晶体结构内硅氧四面体对称性有所改变;另外,细菌作用后的样品在 $2927\text{ cm}^{-1}$ 处出现的吸收峰与脂类 C—H 的伸缩振动有关(Spence and Kelleher,2012),可能是由于胶质芽孢杆菌生长代谢的某些有机产物吸附在矿物表面造成的(图 3)。

### 2.2.2 X 射线吸收近边结构谱

钙基蒙脱石经胶质芽孢杆菌作用后,矿物样品中 Fe 的 K 边吸收谱最强峰的峰冠形态有明显变化,在约 $7126\text{ eV}$ 处的峰冠明显变宽,且有向低能量区域移动的趋势(图 4)。X 射线吸收近边结构谱谱线能够反应蒙脱石中 Fe 元素的价局域环境,谱线最强峰

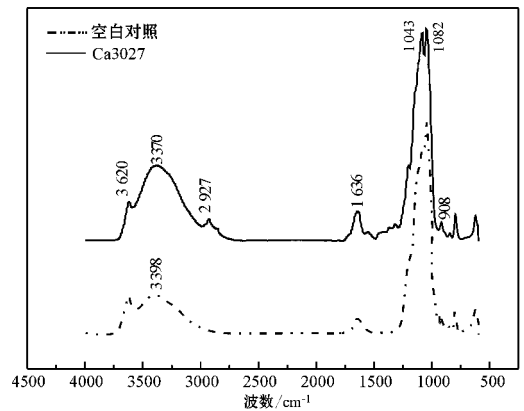


图 3 显微傅里叶变换红外光谱实验结果

Fig. 3 FTIR spectrum results

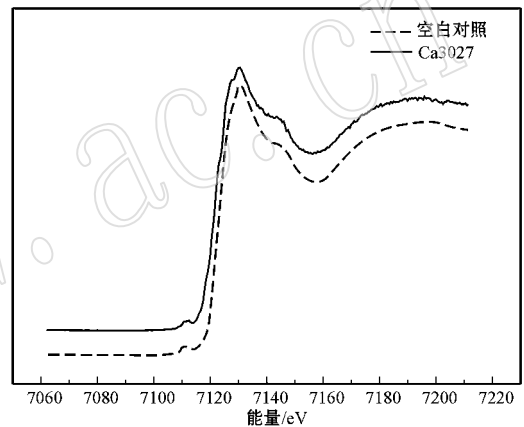


图 4 Fe 的 K 边 X 射线吸收近边结构测试结果

Fig. 4 Fe K edge XANES results

峰冠的位置和形态则与配位原子的种类和数目、配位原子与 Fe 原子之间的距离有关:一般地,六次配位的 Fe 配位多面体对称性越好,峰冠区域越尖锐,反之,配位原子缺失或配体扭曲畸变,峰冠区域越平坦(Waychunas *et al.*,1983;Vantelon *et al.*,2003)。可以推测,胶质芽孢杆菌作用可能使 Fe 元素周围的 Si、O 原子位置畸变或溶蚀流失,使 Fe 所处的配位八面体畸变,对称性下降,造成蒙脱石局域结构的改变。

### 2.2.3 X 射线衍射图谱

实验所用样品的 XRD 分析结果显示,实验所用的矿物主要为天然钙基蒙脱石(PCPDF 号 13-0135),其  $d_{001}$ (Mnt) 值约为 $1.51\text{ nm}$ ,另含低温方石英矿物(PCPDF 号 39-1425),其  $d_{101}$  值约为 $0.404\text{ nm}$ 。经胶质芽孢杆菌作用后的样品(Ca3027)的主要成分仍为钙基蒙脱石,其  $d_{001}$ (Mnt) 约为 $1.51\text{ nm}$ ,说明胶质芽孢杆菌作用后蒙脱石层间距没有明

显变化。然而,空白对照组样品的  $d_{001}$ (Mnt) 半高宽为 0.19 nm,经胶质芽孢杆菌作用后,样品的  $d_{001}$ (Mnt) 半高宽变宽至 0.27 nm,说明胶质芽孢杆菌作用后蒙脱石的晶体结构部分破坏,结晶程度下降。另外,样品 0.335 nm 处出现新的特征峰,经综合分析,与低温石英( $\alpha$ -石英)物相匹配,对应其  $d_{101}$ (PCPDF 号 05-0490)(图 5)。

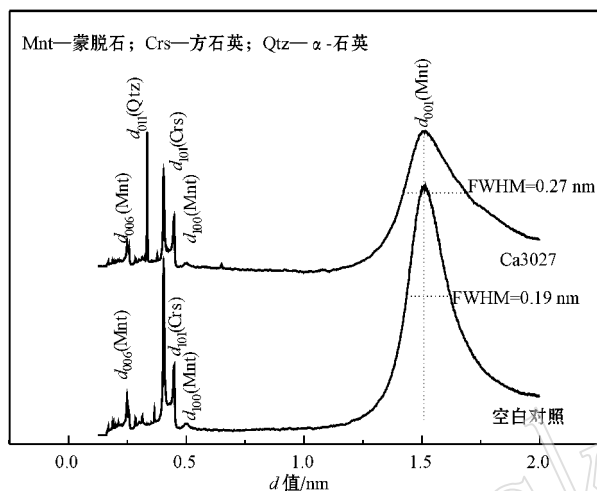


图 5 同步辐射 XRD 图谱  
Fig. 5 SR-XRD patterns

#### 2.2.4 扫描电子显微镜观察

利用扫描电子显微镜对矿物样品表面形貌进行观察发现,空白对照组样品呈片层结构且分布均匀,经胶质芽孢杆菌作用后(Ca3027),矿物的片层出现局部坍塌,一些区域矿物出现卷曲形态,可能是由蒙

脱石晶体结构中,硅氧四面体片层局部区域破坏,致使周围结构扭曲变形所致,也可能由矿物层间不平衡脱水造成(图 6)。

#### 2.3 讨论

已有研究表明,胶质芽孢杆菌与风化的石英二长岩(weathered adamellite,含有石英、斜长石、钾长石、蒙脱石、伊利石、高岭石、绿泥石等)在 28℃,常压条件下作用一段时间后,体系 pH 值从 7.6 下降至 6.8,固体组分的总重量减少,石英含量增加,其他矿物含量减少,并有少量叶腊石、角闪石出现;并发现胶质芽孢杆菌作用能够加速岩石风化(Mo and Lian, 2011)。另有研究发现,一株嗜热菌与绿脱石作用 23 天后,有无定型二氧化硅纳米颗粒形成于生物膜上,120 天后在样品中通过扫描电镜观察到聚集结晶形成的石英(Zhang et al., 2007)。

在本研究中,胶质芽孢杆菌生长代谢产生的有机酸造成蒙脱石局部区域的 Si 等原子的溶蚀流失,造成体系中 Si 浓度先升高,在反应末期逐渐下降,同时伴随蒙脱石晶体结构中硅氧四面体对称性、O—H 振动等发生变化,Fe 配位八面体对称性下降。同步辐射 XRD 探测到新形成的低温石英( $\alpha$ -石英),极有可能是进入体系溶液中的 Si 元素首先沉淀形成无定型或结晶度较低的二氧化硅颗粒,经一定时间聚集结晶逐步形成。低温石英的形成可能也是造成反应末期 Si 体系元素浓度逐渐下降的原因。尽管原样品中含有一定量低温方石英,由于低温方石英在常温条件下稳定,且胶质芽孢杆菌作用前后方石英物相

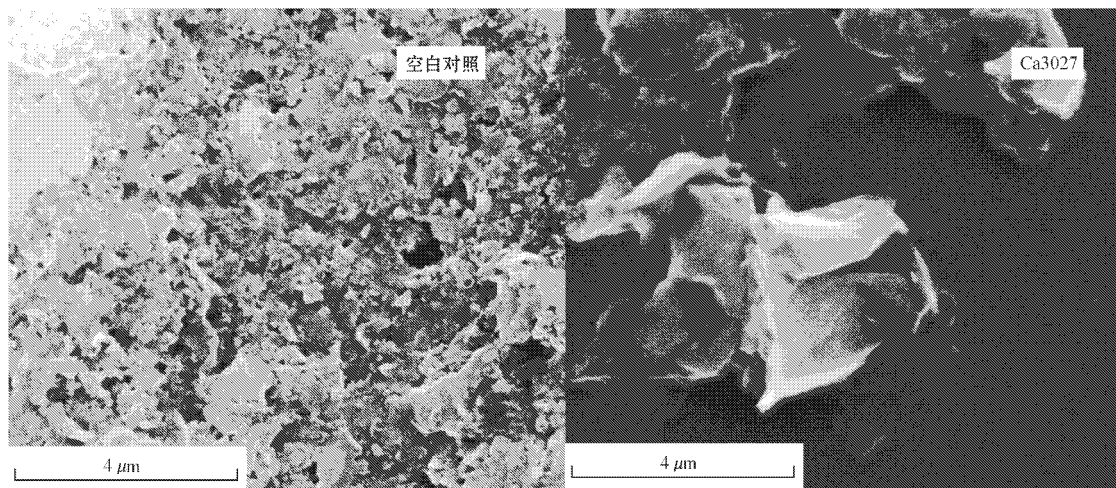


图 6 扫描电镜照片  
Fig. 6 SEM results

特征峰相对强度基本不变,新形成的低温石英( $\alpha$ -石英)中, Si 元素应当主要来源于钙基蒙脱石。微生物作用下在短时间内形成  $\alpha$ -石英比较罕见,胶质芽孢杆菌的某种作用可能加速了石英的结晶沉淀,具体过程尚待进一步探究。胶质芽孢杆菌作用后矿物样品中的蒙脱石结晶程度下降,但其物相没有发生明显转化,可能因为细菌与蒙脱石交互作用的区域有限,蒙脱石晶体结构的影响发生在矿物局部。此时蒙脱石晶体结构的整体框架仍然比较稳定,尚未发生大面积的塌陷或改变(Dudek *et al.*, 2006)。

### 3 结论

(1) 胶质芽孢杆菌在含有蒙脱石矿物的新培养基体系中充分生长繁殖,产生大量代谢产物,其中包含大量有机酸,使体系 pH 值下降至约 5.2,体系总蛋白含量上升。

(2) 介质 pH 值的改变与胶质芽孢杆菌在矿物表面的活动,使得蒙脱石中部分离子不均溶出,其中 Si 的溶出量相对 Al 较高。

(3) 元素 Si 是构建蒙脱石晶体结构骨架的重要组分,局部的 Si 流失造成蒙脱石矿物结构局部发生变化。红外光谱特征反映出, Si 流失对硅氧四面体对称性、O—H 振动等造成明显影响。矿物中 Fe 的 K 边 X 射线吸收近边结构谱特征表明,胶质芽孢杆菌作用蒙脱石后 Si、Al 等原子的流失,造成蒙脱石中 Fe 配位八面体对称性下降。

(4) 在胶质芽孢杆菌作用后的样品中出现低温石英物相,可能由于蒙脱石中溶蚀进入溶液的 Si 元素沉淀形成无定型或低结晶度的二氧化硅颗粒后,进一步聚集结晶形成。

致谢 感谢上海光源 BL15U 线站工作人员对于本研究中同步辐射 XRD 和 XANES 测试的大力协助。

### References

Cuadros J and Dudek T. 2006. FTIR investigation of the evolution of the octahedral sheet of kaolinite-smectite with progressive kaolinization[J]. *Clays and Clay Minerals*, 54: 1~11.  
 Dong H L. 2012. Clay-Microbe interactions and implications for environmental mitigation[J]. *Elements*, 8(2): 113~118.  
 Dong H L. 2010. Mineral-microbe interactions: a review[J]. *Frontiers of Earth Science*, 4(2): 127~147.

Dudek T, Cuadros J and Fiore S. 2006. Interstratified kaolinite-smectite: Nature of the layers and mechanism of smectite kaolinization[J]. *American Mineralogist*, 91: 159~170.  
 Kim J W, Dong H L, Seabaugh J, *et al.* 2004. Role of microbes in the smectite-to-illite reaction[J]. *Science*, 303(5659): 830~832.  
 Kostka J E, Haeefele E, Viehweger R, *et al.* 1999. Respiration and dissolution of iron(III)-containing clay minerals by bacteria[J]. *Environmental Science and Technology*, 33(18): 3127~3133.  
 Li Y L, Zhang C L, Yang J, *et al.* 2004. Dissolution of nontronite N<sub>Au</sub>-2 by a sulfate-reducing bacterium[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 68: 3251~3260.  
 Lian Bin. 1998. A study on how silicate bacteria GY92 dissolves potassium from illite[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 18(2): 234~237( in Chinese with English abstract ).  
 Mo B B and Lian B. 2010. Interactions between *Bacillus mucilaginosus* and silicate minerals( weathered adamellite and feldspar ): Weathering rate, products, and reaction mechanisms[J]. *Chinese Journal of Geochemistry*, 30: 187~192.  
 Spence A and Kelleher B P. 2012. FT-IR spectroscopic analysis of kaolinite-microbial interaction[J]. *Vibrational Spectroscopy*, 61: 151~155.  
 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 with English abstract ).  
 Vantelon D, Montarges-Pelletier E, Michot L J, *et al.* 2003. Iron distribution in the octahedral sheet of dioctahedral smectites. : An Fe K-edge X-ray absorption spectroscopy study[J]. *Physics and Chemistry of Minerals*, 30: 44~53.  
 Waychunas G A, Apter M J and Brown Jr G E. 1983. X-ray K-edge absorption spectra of Fe minerals and model compounds: Near-edge structure[J]. *Physics and Chemistry of Minerals*, 10: 1~9.  
 Zhang G, Dong H L, Kim J W, *et al.* 2007. Microbial reduction of structural Fe<sup>3+</sup> in nontronite by a thermophilic bacterium and its role in promoting the smectite to illite reaction[J]. *American Mineralogist*, 92: 1411~1419.  
 Zhu Yun, Cao Weizheng, Lu Anhuai, *et al.* 2011. A study of the interaction between montmorillonite and a strain of *Bacillus mucilaginosus*[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 30(1): 121~126( in Chinese with English abstract ).  
 Zhu Y, Li Y, Lu A H, *et al.* 2011. Study of the Interaction between bentonite and a strain of bacillus mucilaginosus[J]. *Clays and Clay Minerals*, 59(5): 538~545.  
 Zor T and Selinger Z. 1996. Linearization of the Bradford protein assay increases its sensitivity: theoretical and experimental studies[J]. *Analytical Biochemistry*, 236: 302~308.

### 附中文参考文献

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.  
 彭文世, 刘高魁. 1982. 矿物红外光谱图集[M]. 北京: 科学出版社, 11~12.  
 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.  
 朱 云, 曹维政, 鲁安怀, 等. 2011. 胶质芽孢杆菌-蒙脱石相互作用实验研究[J]. *岩石矿物学杂志*, 30(1): 121~126.  
 中华人民共和国农业行业标准. NY882-2004. 硅酸盐细菌菌种[S].