

门多萨假单胞菌—蒙脱石相互作用的实验研究

朱婷婷, 范 健, 陆现彩, 李 娟, 陆建军, 王汝成

南京大学 内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室, 地球科学与工程学院, 南京 210093

摘要: 微生物广泛分布在岩石圈、水圈、土壤圈和大气圈中, 在矿物风化作用过程中扮演着重要的角色。本文选取门多萨假单胞杆菌(*Pseudomonas mendocina*)为代表性菌种, 研究微生物与含铁蒙脱石矿物相互作用的现象和机理。通过测量反应溶液 pH 值、元素含量的变化, 以及不同时段蒙脱石的 XRD 和红外光谱等, 发现 pH 值在实验过程中缓慢上升, Si、Al、Fe 元素不断溶出, 矿物结构特征与主要基团也显示出相应的变化, 表明细菌会破坏蒙脱石的晶体结构, 并加速蒙脱石的伊利石化作用。根据分析结果推测, 硅氧四面体优先被破坏, Si 的溶出显著, *P. mendocina* 可同时还还原蒙脱石晶格中的 Fe^{3+} , 并释放至溶液中。

关键词: 门多萨假单胞杆菌; 蒙脱石; 伊利石化; 溶解

中图分类号: X172 文献标识码: A 文章编号: 1007-2802(2011)03-0304-07

Experimental Study on the Interaction between *Pseudomonas Mendocina* and Montmorillonite

ZHU Ting-ting, FAN Jian, LU Xian-cai, LI Juan, LU Jian-jun, WANG Ru-cheng

State key laboratory for Mineral Deposits Research, School of Earth Science
and Engineering, Nanjing University, Nanjing, 210093, China

Abstract: Microorganisms, which distribute widely in lithosphere, hydrosphere, pedosphere and atmosphere, play important roles in weathering processes of minerals and rocks. In this study, *Pseudomonas mendocina* was chosen as a representative strain to investigate the phenomenon and mechanism of the interaction between microbe and Fe-containing montmorillonite. The pH value and the element contents of the supernatant was analyzed; the X-ray diffraction spectrum (XRD) and the infrared spectrum (IR) of montmorillonite were measured. The results found that the pH values increased slightly, and that Si, Al and Fe were released continuously. The results also found that the clay structure and surface functional groups were slightly changed, indicating that montmorillonite had been attacked by *P. mendocina* and presented as an illitization process. According to the analysis results, silico-oxygen tetrahedron tended to be attacked firstly and the dissolution of Si was relatively remarkable. At the same time, *P. mendocina* was able to reduce Fe^{3+} in the montmorillonite crystal and thus to release Fe^{2+} to the solution.

Key words: *Pseudomonas mendocina*; montmorillonite; illitization; dissolution

微生物广泛地分布在地球的岩石圈、水圈、土壤圈和大气圈中, 是外生地质作用的重要营力。研究表明, 微生物在岩石风化、土壤形成和元素的地球化学循环过程中扮演着重要的角色^[1~7], 其中硅酸盐细菌能够有效提高常见造岩矿物的风化速率^[8,9], 而硅酸盐矿物风化在 CO_2 循环中起重要作用。细

菌能促进高岭土中 Si 和 Al 的释放, 还可促使粘土矿物晶格中的 Fe 和粘土岩中含铁杂质的溶解^[10,11]。由于硅酸盐矿物风化和铁的表生地球化学作用与碳循环密切相关^[12], 硅酸盐的微生物风化和海洋、沉积物孔隙流体中溶解态铁的微生物地球化学受到重视^[13], 近年来又开始重视硅酸盐矿物晶

收稿日期: 2010-12-30 收到, 2011-04-18 改回

基金项目: 国家重点基础研究发展计划资助项目(2007CB815603); 国家自然科学基金资助项目(40930742, 10979018)

第一作者简介: 朱婷婷(1987-), 女, 硕士研究生, 专业方向: 地质微生物学。

通讯作者: 陆现彩. E-mail: xcljun@nju.edu.cn.

格中 Fe 是否与微生物有相互作用。一般认为,粘土矿物是地表环境中最重要的铁储库^[14,15],它主要存在于粘土矿物的八面体片层中,很难被微生物所利用^[16],但在还原条件下,这些 Fe^{3+} 可被多种还原菌溶出,形成菱铁矿、针铁矿或水铁矿^[17~23],促进了蒙脱石的伊利石化^[24,25]。但很少有人研究地表氧化条件下含铁粘土矿物与微生物相互作用过程中铁的行为。Schwertmann^[26] 认为土壤可利用的铁含量受控于土壤中铁的溶解速率。研究表明,门多萨假单胞菌(*Pseudomonas mendocina*, 简称 *P. mendocina*)能分泌铁质运输体,从环境中的针铁矿、赤铁矿和水铁矿等含铁矿物中获得 Fe,显著提高了矿物释放 Fe 的速率^[27](如针铁矿等矿物可提高 10~11 个数量级)。*P. mendocina* 还能加速高岭石的溶解,提高 Al、Si 的释放速率,并能利用粘土矿中的微量 Fe^{11} ;但它在粘土矿物溶解中的作用机制及其对粘土结构的影响,尚有待研究。本文以这种好氧的化能异养菌 *P. mendocina* 为代表性细菌,因为它不能利用铁进行氧化磷酸化作用,故其所需铁的含量仅为 μM 数量级^[28,29]。本次实验研究了含铁蒙脱石与微生物的相互作用,考察了粘土矿物的结构变化和元素释放的特征,以揭示这种细菌促进铝硅酸盐矿物风化的过程和机理。

1 实验材料与设计

1.1 蒙脱石

本次实验样品为提纯了的含铁蒙脱石。XRD 谱图显示蒙脱石很纯(图 1)。X 荧光光谱分析结果表明,蒙脱石为钙基含铁蒙脱石,其成分(wt %)为: SiO_2 54.86, Al_2O_3 13.81, Fe_2O_3 3.52, CaO 1.53, MgO 3.48, Na_2O 0.09, K_2O 0.17, MnO 0.03, TiO_2 0.27, P_2O_5 0.05, LOI 21.87(由南京大学现代分析中心完成)。参照蒙脱石矿物的晶体化学分类^[30],该样品为二八面体蒙脱石。透射电子显微镜显示其粒径为 0.1~1.5 μm (图 1),BET 比表面积为 46.23 m^2/g (美国麦克公司 ASAP 2010M 全自动比表面积仪测定,氮气吸附法),相对于普通的蒙脱石有更大的表面反应面积^[31]。

1.2 菌种

实验所用 *P. mendocina* 系从中国普通微生物菌种保藏管理中心(CGMCC)购得,编号为 CGM-CC1.766。*P. mendocina* 在土壤和水中分布广泛,大小为(0.7~0.8) $\mu\text{m} \times$ (1.4~2.8) μm ,杆状,主要以单极毛运动。该菌为革兰氏阴性,化能异养,严格

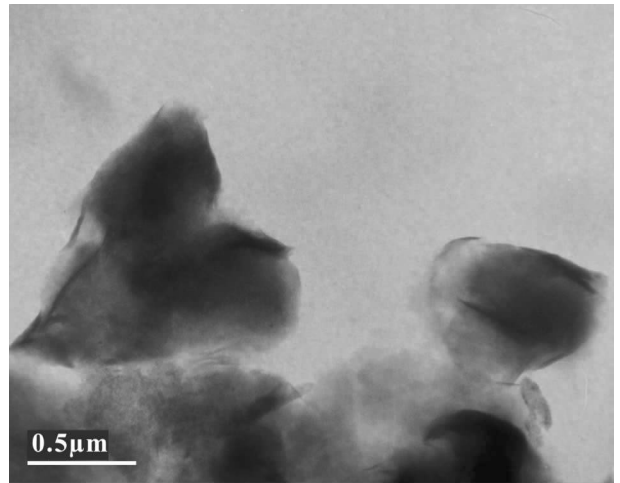


图 1 蒙脱石的透射电子显微镜照片

Fig. 1 TEM of montmorillonite

好氧。培养基的配置为 1 L 去离子水含有:0.5 g K_2HPO_4 ;1.0 g NH_4Cl ;0.2 g $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$;0.05 g CaCl_2 ;5 g 琥珀酸;痕量元素从母液中取 0.125 mL(母液:0.005 g $\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$;0.0065 g $\text{CoSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$;0.0023 g CuSO_4 ;0.0033 g ZnSO_4 及 0.0024 g MoO_3 溶于 100 mL 去离子水),并将培养基 pH 调至 7.1。*P. mendocina* 的生长曲线(图 2)利用分光光度计(型号 723PC,上海先科)测得,细菌很快就进入了对数生长期。

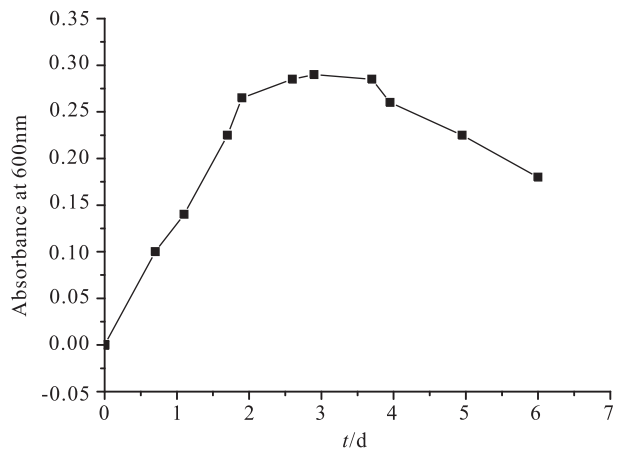


图 2 *P. mendocina* 的生长曲线

Fig. 2 Growth curve of *P. mendocina*

1.3 溶解实验

实验样品分为 7 组,每组两个平行样。取 14 个 250 mL 锥形瓶,瓶中盛有 100 mL pH 已调节至 7.1 的培养基和已灭菌的 1 g 蒙脱石,待细菌生长到对数期初期时(600 nm 时吸光度值为 0.2 abs),将菌株 *P. mendocina* 接种到锥形瓶中。每隔 12 h 取出一组锥形瓶进行离心分离。分离后得到的蒙脱石样品在 80℃ 下烘干 4 h,进行 XRD 和 IR 分析;离心

得到的上清液用 ICP-AES 分析。

1.4 样品测试

X 射线衍射分析(XRD):样品用 HSIANGTAI 离心机分离后,烘干研磨成粉末,KBr 压片后进行 X 射线衍射分析。XRD 分析在南京大学现代分析中心的日本理学 D/Max-RA 型转靶 X 射线衍射仪上完成,实验条件为管压 40 kV,管流 40 mA,Cu 靶,积分时间为 0.2 s,步长为 $0.02^\circ/\text{s}$ 。

傅立叶转换红外光谱(FT-IR):将离心后的蒙脱石样品烘干,磨成粉末进行红外光谱分析。实验在南京大学化学化工学院的德国 BRUKER 傅立叶变换红外光谱仪上测试,采谱范围为 $400 \sim 4000 \text{ cm}^{-1}$,采样间隔为 2 cm^{-1} 。

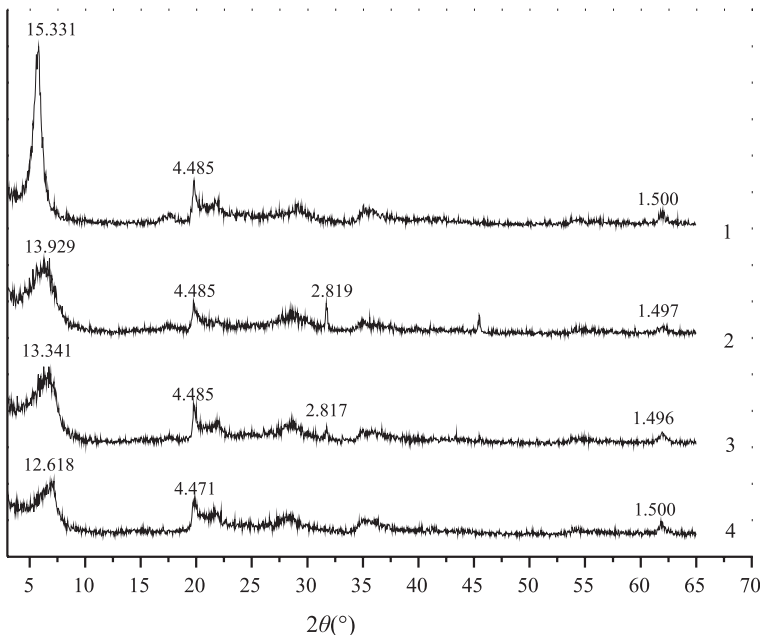
电感耦合等离子体原子发射光谱(ICP-AES):用内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室的单扫描型等离子光谱仪(法国克梅福,JY38S)测量 Si、Al 和 Fe 等元素含量。

pH 值测定:均用 METTLER-TOLEDO 公司的 DELTA 320 pH 计测定。

2 实验结果与讨论

2.1 蒙脱石的结构变化

图 3 显示原矿物在 1.5 nm 左右尖锐的峰,随细菌的作用逐渐钝化、减弱并开始分裂,表明蒙脱石



1 为原样;2、3、4 分别为溶解 24 h、48 h、72 h 的样品
1 original sample; 2,3,4 sample reacted with bacterial
for 24h,48h and 72h respectively

图 3 蒙脱石样品的 XRD 分析数据

Fig. 3 The XRD spectra of the montmorillonite samples

的晶体结构遭到了破坏。此外,该峰代表 $d(001)$ 面,其峰值由 1.533 nm 逐渐缩短至 1.262 nm,表明蒙脱石经过细菌作用后,基面间距发生变化。尽管培养基中的 K、Mg 等离子将 Ca 离子置换可能引起一定的变化,但近 0.2 nm 的缩小和峰的钝化不可能是单纯的离子交换作用造成的。根据前人的研究,这种 d 值降低的现象可能与发生伊利石化作用有关^[24,25],至少表明了蒙脱石矿物晶格已经被破坏。图 3 中的 2 曲线表明,样品中除了蒙脱石外,还有新的物相石盐。这可能是培养基中的部分 NaCl 附着在蒙脱石表面,烘干后成结晶状石盐所致。在 XRD 中未明确见到有菱铁矿、针铁矿或水铁矿衍射峰,但是反应后粘土矿物衍射谱图具更高的基线,表明反应产物中含有一定量的非晶态物质。根据 XRD 分析结果,可以认为 *P. mendocina* 在试验时间内没有生成含量可观或结晶度很高的铁矿物相。

由图 4 发现,反应前后红外光谱在 1643 cm^{-1} 、 918 cm^{-1} 、 833 cm^{-1} 、 796 cm^{-1} 和 623 cm^{-1} 处的吸收峰始终保持一致,表明水分子中 OH 的弯曲振动、AlAlOH 弯曲振动、AlMgOH 弯曲振动、石英和二氧化硅中的 Si—O 伸缩振动,以及平面外共轭的 Al—O 和 Si—O 键振动基本没有改变^[32]。原样中结构羟基(OH)的伸缩振动吸收峰 3626 cm^{-1} 在与细菌反应了 24 h 时迁移到 3628 cm^{-1} 位置。原样中 1434 cm^{-1} 的吸收峰随细菌的作用逐渐红移,在 24、36、48、60 和 72 h 时,分别移至 1427、1422、1411 和 1410 cm^{-1} 处。反应至 24 h 时,蒙脱石结构中出现了一个新的峰 878 cm^{-1} ,接近于平面外的碳酸根振动峰,可能是细菌呼吸过程中产生的二氧化碳与溶液中的某种金属阳离子发生沉淀,沉淀物可能是 FeCO_3 、 MgCO_3 或 CaCO_3 中的一种或多种。 706 cm^{-1} 处的吸收峰在反应过程中逐渐弱化并消失,表明 OH 伸缩振动受到细菌作用的影响。此外,反应至 24 h 时,蒙脱石中的一些吸收峰强度突然增强,此后又逐渐减弱,这些峰分别在 1030 cm^{-1} 、 521 cm^{-1} 和 464 cm^{-1} 处,代表 Si—O—Si 伸缩振动、Si—O—Al 吸收峰、Si—O—Si 吸收峰。综上所述,蒙脱石结构中四面体片层中的 Si—O 键受细菌的影响更大。

2.2 pH 值的变化

实验溶液的 pH 值由起始培养基的

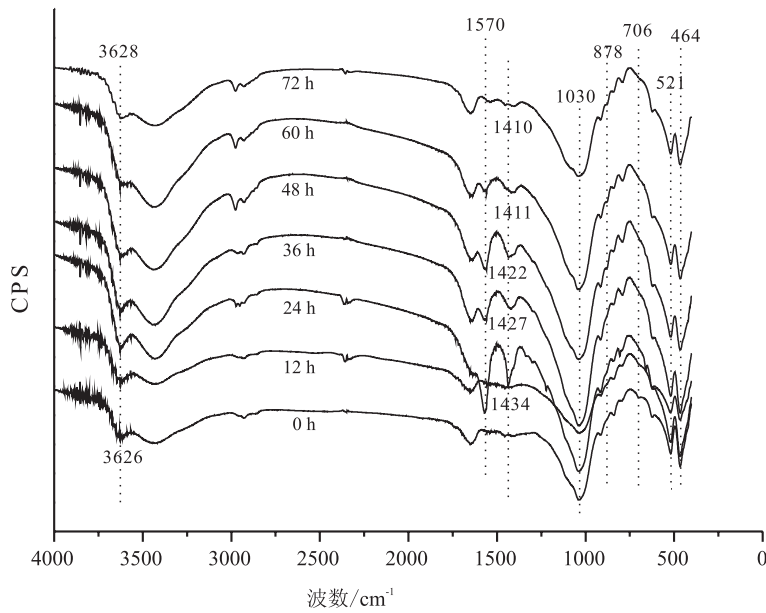


图4 蒙脱石样品的红外光谱分析数据
Fig. 4 Infrared spectra of the montmorillonite samples

7.1 逐渐上升至 8.3 左右(图 5)。实验过程中体系中的 pH 值始终呈中性至弱碱性,因此蒙脱石的化学溶解作用几乎可以忽略不计^[33]。在类似条件下,无细菌参与的实验 pH 值是逐渐下降的^[11],而在 *P. mendocina* 菌参与下 pH 值却逐渐升高。尽管在反应体系中有几种原因会使溶液的酸性增高,如 *P. mendocina* 菌生长分泌的有机酸、释放出的 Al、Si 和 Fe 的水解作用都会降低 pH 值,但是蒙脱石矿物的伊利石化是一个耗酸的过程,每摩尔的蒙脱石转化为伊利石会消耗 0.5 摩尔的质子和 0.45 摩尔的 K^+ ^[34,35]。考虑到实验溶液中含有较多的 K^+ ;结合 XRD 分析结果,笔者认为蒙脱石的伊利石化作用可能是 *P. mendocina* 作用下的主要过程,与层间

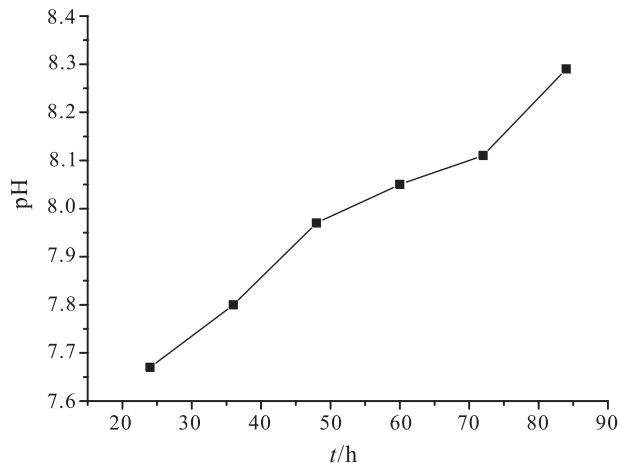


图5 pH 随时间变化的曲线
Fig. 5 The curve of pH changes with time

离子交换一起是造成溶液呈碱性的主要原因。溶液的弱碱性特征不仅有利于 Si、Al 以离子态存在,而且可通过粘土矿物的表面羟基化作用促进了两种元素的溶出^[20]。

2.3 上层清液元素含量的变化

离心所得上层清液的 ICP-AES 分析结果显示(表 1),溶液中不仅 Si 和 Al 的含量增高(图 6A),Fe 的含量也发生了较为明显的变化。有细菌参与的实验中,由蒙脱石释放出来的铁部分是 *P. mendocina* 维持自身生命活动所必需的,甚至有些会作为有机配体出现在生物膜中,还有一些以离子态存在于溶液中,因此 ICP-AES 所测得的铁浓度不一定真正代表 *P. mendocina* 作用下蒙脱石释放铁的量。然而,可以从细菌的生长曲线来间接推测蒙脱石在溶解过程中铁的释放量,因为铁是 *P. mendocina* 生长过程中的必需营养物,而

培养基中铁的含量又是有限的。由图 2 可知,将近 48 h 时细菌开始进入稳定期,此时 *P. mendocina* 利用蒙脱石铁的量会达到极大值;在 72 h 时细菌已进入衰亡期,细菌利用粘土矿物 Fe 能力的下降,加上细胞的死亡,部分被细菌吸收的铁会再次释放进入溶液。观察到的实验现象也支持这一推断:在实验持续 48 h 后,实验溶液由白色的蒙脱石胶体溶液逐渐转变成浅绿色,指示溶液中 Fe^{2+} 的含量增加;这也间接表明了 *P. mendocina* 可能有还原粘土矿物中 Fe^{3+} 的能力,这一点与文献[27]的结果一致。

表 1 ICP-AES 定量分析结果

元素	Si	Al	Fe
12 h	6.68	0.3019	0.0751
24 h	11.85	0.4192	0.0903
36 h	14.92	0.4228	0.0793
48 h	15.71	0.4150	0.0830
60 h	13.36	0.5120	0.0867
72 h	14.41	0.5170	0.0953

蒙脱石全化学成分分析的元素质量比 Si:Al:Fe 约为 21:3:1,而在任意时刻溶液中无论是 Si:Al, Si:Fe,还是 Al:Fe 的数值,均大于蒙脱石成分中的比值,说明 Si 的溶出更为强烈;其次是 Al 的溶出,溶液中的 Fe 含量最低。Si 的优先溶出与红外光谱分析结果一致,细菌主要对四面体片层的 Si—O 键

有破坏作用而对八面体片层的 Al—O 键的作用相对较弱;也与文献[34]的作者提出的伊利石化反应方程一致。但是 Fe 的含量不一定真实反映了 Fe 的溶出,因为曾有报道细菌分泌的铁质运输体能与 Fe 形成复合体,部分也能与 Al 形成复合体,故有大量的 Fe 和少量的 Al 已脱离矿物晶格,但未被释放到溶液中^[36,37]。由图 6 可知,在实验的初期,溶液的 Si:Al、Si:Fe 和 Al:Fe 均呈上升趋势,且比值均远大于 1,说明在此过程中三种元素溶出的难易程度基本保持不变;但随着时间的推移,这些比值出现波动,甚至明显下降,可能与有沉淀产生有关,pH 值上升会导致无定型铝硅酸盐的析出^[38]。在无细菌参与的实验中,pH 在 6~9 时粘土矿物中 Al 的

释放量会随 pH 的升高而增加,而 Si 则相反^[39]。在有细菌存在时, Si 显示出比 Al 更易溶出的趋势,并在实验初期, Si:Al 值显著上升。显然, *P. mendocina* 的存在改变了蒙脱石的溶解行为,通过破坏矿物晶格而促进了 Si 的释放。

另外,从溶液中元素含量的变化看,有两个时间点值得关注:一个为细菌由对数期进入稳定期时(48 h), Fe 的含量开始呈一个固定的斜率上升, Si、Al 的含量则均呈现相对稳定;另一个是 72 h 后细菌由稳定期进入衰亡期时, Fe 的含量仍按原来的速率上升,而 Si 的含量则稍微下降, Al 的含量又继续上升。这些变化可能与死亡细胞促进两种元素沉淀有关。

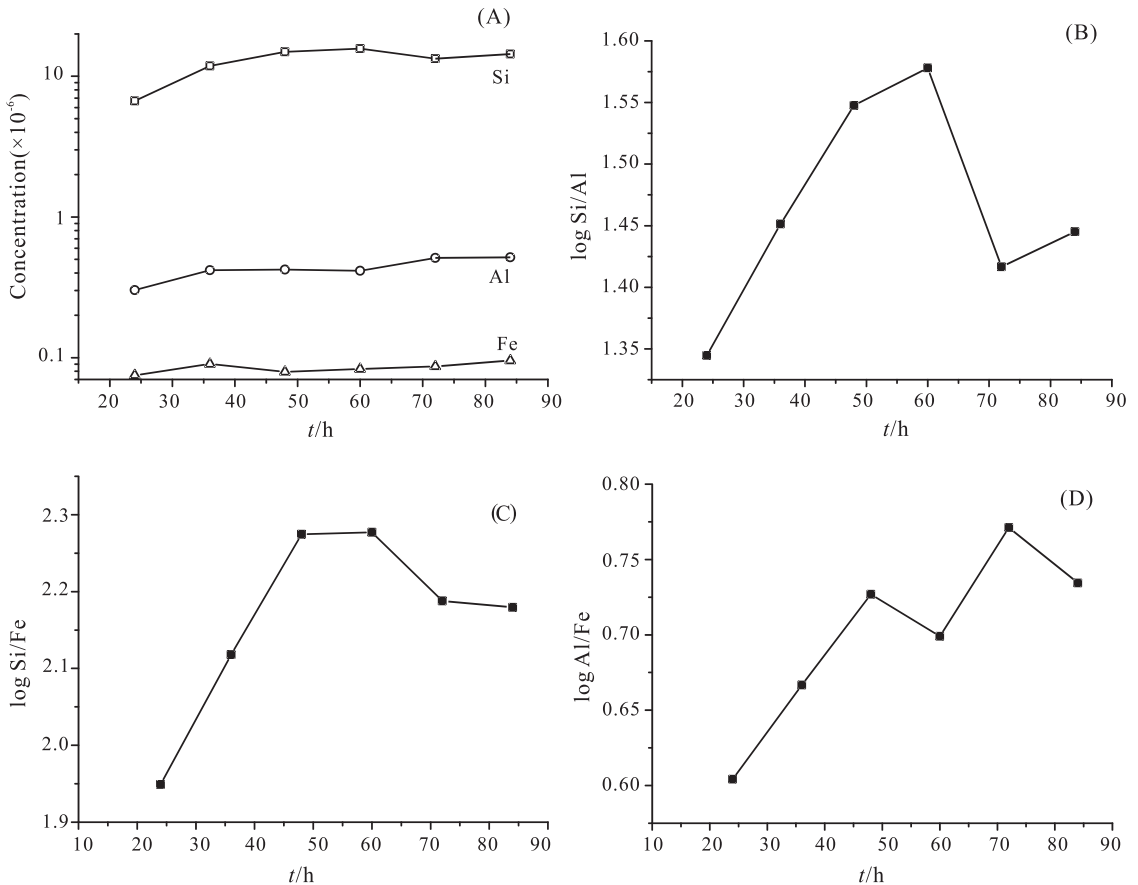


图 6 上清液中元素含量随时间的变化

Fig. 6 The changes of element concentrations in the supernatant versus time

3 结 论

实验结果表明, *P. mendocina* 会破坏蒙脱石的晶体结构,加速了蒙脱石的伊利石化。在此过程中,微生物优先破坏四面体片层的 Si—O 键,也有部分

八面体片层发生溶解。 *P. mendocina* 对蒙脱石矿物的溶蚀作用主要表现为 Si、Al 和 Fe 元素的溶出,其中对 Si 的溶出最为明显; Fe 的溶出主要是通过微生物还原作用实现的。

参考文献 (References):

- [1] 连宾. 硅酸盐细菌 GY92 对伊利石的解钾作用[J]. 矿物学报, 1998, 18(2): 234—237.
Lian, Bin. Study on how silicate bacteria GY92 dissolves potassium from illite[J]. Acta Mineralogica Sinica, 1998, 18(2): 234—237. (in Chinese with English abstract)
- [2] Sharp M, Parkes J, Cragg B, Fairchild I J, Lamb H, Tranter M. Widespread bacterial populations at glacier beds and their relationship to rock weathering and carbon cycling[J]. Geology, 1999, 27: 107—110.
- [3] Bousserhine N, Gasser U G, Jeanroy E, Berthelin J. Bacterial and chemical reductive dissolution of Mn-, Co-, Cr-, and Al-substituted goethites[J]. Geomicrobiology Journal, 1999, 16: 245—258.
- [4] Bottrell S H, Newton R J. Reconstruction of changes in global sulfur cycling from marine sulfate isotopes[J]. Earth Science Review, 2006, 75: 59—83.
- [5] Gorbushina A A. Life on the rocks[J]. Environmental Microbiology, 2007, 9: 1613—1631.
- [6] Wu L L, Jacobson A D, Hausner M. Characterization of elemental release during microbe-granite interactions at T = 28 degrees C[J]. Geochim. Cosmochim. Acta, 2008, 72: 1076—1095.
- [7] Balland C, Poszwa A, Leyval C, Mustin C. Dissolution rates of phyllosilicates as a function of bacterial metabolic diversity[J]. Geochim. Cosmochim. Acta, 2010, 74: 5478—5493.
- [8] Lian B, Wang B, Pan M, Liu C Q, Teng H H. Microbial Release of Potassium from K-Bearing Minerals By Thermophilic Fungus *Aspergillus fumigatus*[J]. Geochim. Cosmochim. Acta, 2008, 72(1): 87—98.
- [9] 吴涛, 陈骏, 连宾. 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, 2007, 26(3): 263—268.
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. (in Chinese with English abstract)
- [10] Kostka J E, Haeefe E, Viehweger R, Stucki J W. Respiration and dissolution of iron(III)containing clay minerals by bacteria[J]. Environmental Science & Technology, 1999, 33(18): 3127—3133.
- [11] Patricia A M, Melania A V, Larry E H, Julia E F, Amy F. Enhancement of Kaolinite Dissolution by an Aerobic *Pseudomonas mendocina* Bacterium [J]. J. Geomicrobiology, 2001, 18: 21—35.
- [12] Buesseler K O, Andrews J E, Pike S M, Charette M A. The effects of iron fertilization on carbon sequestration in the Southern Ocean[J]. Science, 2004, 304: 414—417.
- [13] Nealson K H, Saffarini D. Iron and manganese in anaerobic respiration; Environmental significance, physiology, and regulation[J]. Ann. Rev. Microbiology, 1994, 48: 311—343.
- [14] Lyle M. The brown-green color transition in marine sediments; A marker of the Fe(III)-Fe(II) redox boundary[J]. Limnology and Oceanography, 1983, 28: 1026—1033.
- [15] Konig I, Drott M, Suess E, Trautwein A X. Iron reduction through the tan-green colour transition in deep-sea sediments [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1997, 61: 1679—1683.
- [16] Schwertmann U. Solubility and dissolution of iron oxides[J]. Plant Soil, 1991, 130: 1—25.
- [17] Li Y L, Vali H, Sears S K, Yang J, Deng B L, Zhang C L. Iron reduction and alteration of nontronite NAu-2 by a sulfate-reducing bacterium [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2004, 68(15): 3251—3260.
- [18] Jaisi D P, Kukkadapu R K, Eberl D D, Dong H L. Control of Fe(III) site occupancy on the rate and extent of microbial reduction of Fe(III) in nontronite [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2005, 69(23): 5429—5440.
- [19] Jaisi D P, Dong H L, Liu C X. Influence of biogenic Fe(II) on the extent of microbial reduction of Fe(III) in clay minerals nontronite, illite, and chlorite [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2007, 71(5): 1145—1158.
- [20] O'Reilly S E, Furukawa Y, Newell S. Dissolution and microbial Fe(III) reduction of nontronite (NAu-1) [J]. Chemical Geology, 2006, 235(1—2): 1—11.
- [21] Mockovciakova A, Iveta S, Jiri S, Ivana K. Characterization of changes of low and high defect kaolinite after bioleaching [J]. Applied Clay Science, 2008, 39(3—4): 202—207.
- [22] Vorhies J S, Gaines R R. Microbial dissolution of clay minerals as a source of iron and silica in marine sediments [J]. Nature Geoscience, 2009, 2(3): 221—225.
- [23] Perdrial J N, Warr L N, Perdrial N, Lett M C, Elsass F. Interaction between smectite and bacteria; Implications for bentonite as backfill material in the disposal of nuclear waste [J]. Chemical Geology, 2009, 264(1—4): 281—294.
- [24] Zhang G X, Dong H L, Kim J W, Eberl D D. Microbial reduction of structural Fe³⁺ in nontronite by a thermophilic bacterium and its role in promoting the smectite to illite reaction [J]. American Mineralogists, 2007, 92(8—9): 1411—1419.
- [25] Zhang G X, Kim J W, Dong H L, Sommer A J. Microbial effects in promoting the smectite to illite reaction; Role of organic matter intercalated in the interlayer [J]. American Mineralogists, 2007, 92(8—9): 1401—1410.
- [26] Schwertmann U, Cornell R M. Iron oxides in the laboratory. VCH, New York, NY, 1991.
- [27] Hersman L E, Forsythe J H, Ticknor L O, Maurice, PA. Growth of *Pseudomonas mendocina* on Fe(III)(hydr)Oxides [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2001, 67(10): 4448—4453.
- [28] Hersman L, Maurice P, Sposito G. Iron acquisition from hydrous Fe(III) oxides by an aerobic *Pseudomonas* sp. [J]. Chemical Geology, 1996, 132: 25—31.
- [29] Forsythe J H, Maurice P A, Hersman L. Attachment features between an aerobic *Pseudomonas* sp. bacteria and hematite observed with atomic-force microscopy [A]. Proceedings, WRI—IX [C]. Balkema, Rotterdam, 1998: 927—930.

