

短小芽孢杆菌-蒙脱石相互作用实验研究

赵玉连¹, 代群威^{1,2}, 董发勤², 许凤琴¹, 邬琴琴¹, 王 岩¹

(1. 西南科技大学 环境与资源学院, 四川 绵阳 621010; 2. 固体废物处理与资源化省部共建教育重点实验室, 四川 绵阳 621010)

摘 要: 主要探讨短小芽孢杆菌与钙基蒙脱石相互作用过程中的现象及机理。SEM 结果显示, 大量土壤菌黏附、包裹于蒙脱石表面。加入蒙脱石后, 短小芽孢杆菌-钙基蒙脱体系中有有机酸含量明显降低。XRD 结果表明, 短小芽孢杆菌作用后蒙脱石层间距增大, 001 面衍射峰钝化。FTIR 显示作用后蒙脱石出现了来自于土壤菌的新峰, 其他基团峰出现蓝移或红移现象。经二阶导数红外光谱分析验证, 蒙脱石中确实出现了来自于土壤菌的其他基团振动, 揭示土壤菌代谢产物进入蒙脱石层间域内的初步可能性, 这将为矿物-微生物相互作用间的机理研究提供新依据。

关键词: 蒙脱石; FTIR; 二阶导数红外光谱; 短小芽孢杆菌; 矿物-微生物相互作用

中图分类号: P578.967; P579

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2015)06-0939-06

An experimental study of the interaction between *Bacillus pumilus* and montmorillonite

ZHAO Yu-lian¹, DAI Qun-wei^{1,2}, DONG Fa-qin², XU Feng-qin², WU Qin-qin¹ and WANG Yan¹

(1. School of Environment and Resource, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China;
2. Key Laboratory of Solid Waste Treatment and Resource Recycle (SWUST), Ministry of Education, Mianyang 621010, China)

Abstract: This paper aims to investigate the phenomena and the mechanism of the interaction between *Bacillus pumilus* and Ca-montmorillonite. SEM results showed that a large number of *Bacillus pumilus* attached to and wrapped up the surface of Ca-montmorillonite. The content of organic acids of the *Bacillus pumilus* - Ca-montmorillonite system decreased obviously after joining the Ca-montmorillonite. XRD results showed that the inter-layer spacing of Ca-montmorillonite increased, and diffraction peak of 001 exhibited passivation after interacting with *Bacillus pumilus*. FTIR results showed that peaks assigned to soil bacteria appeared, and peaks of the structural groups of Ca-montmorillonite exhibited blue-shift or red-shift as well. Verification by second derivative FTIR spectroscopy analysis is that Ca-montmorillonite really shows the vibration of other group assigned to soil bacteria. It is thus inferred that there is a preliminary possibility that the metabolic products of soil bacteria enter the interlayer space of Ca-montmorillonite. The result obtained by the authors will provide a new basis for the mechanism of the interaction between mineral and microorganism.

Key words: montmorillonite; FTIR; second derivative FTIR spectroscopy analysis; *Bacillus pumilus*; microbe-mineral interaction

收稿日期: 2015-01-20; 修订日期: 2015-04-02

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(41130746); 国家自然科学基金青年项目(41102212); 西南科技大学研究生创新基金项目(14ycxjj0033)

作者简介: 赵玉连(1989-), 女, 硕士, 环境工程专业, E-mail: zhaoyuhao123you@163.com; 通讯作者: 代群威, 副教授, E-mail: qw_dai@163.com。

微生物是土壤中最活跃的有机组成部分,数量庞大,1 g 土壤中可以有达几百亿个微生物,它们参与了土壤中绝大多数生物化学反应,诸多重要反应过程也都是在微生物直接或间接作用下发生的,如有机污染物的生物降解、重金属及放射性核素的迁移转化、土壤矿物的形成及演化等。蒙脱石是土壤粘土矿物中最为常见的一种,为典型的 2:1 型层状硅酸盐矿物,具有可膨胀性、吸附性及比表面积大等特点。朱建喜、吴平霄等课题组对蒙脱石的研究主要集中在柱撑、有机改性、插层及吸附方面的实验研究,并对蒙脱石改性后的性质进行了探讨(薛卫红等, 2007; 陈冬等, 2009; 代亚平等, 2012)。而土壤矿物-微生物相互作用研究,自 20 世纪 60 年代就开始给予了关注(Stotzky, 1967)。微生物-矿物相互作用普遍存在于自然界中,微生物能够促进矿物的生物化学进程,近年来越来越多研究者已经对微生物-矿物相互作用过程进行了相应的研究,并取得了一定的研究成果。董海良等课题组研究了含铁蒙脱石在微生物作用下铁的氧化还原研究(Deb *et al.*, 2007; Zhang *et al.*, 2012),鲁安怀、陆现彩、连宾等课题组在微生物-矿物相互作用实验过程中,发现微生物致使矿物晶体结构破坏并使其向其他矿物相转化(Zhu *et al.*, 2011; 朱婷婷等, 2011; 杨晓雪等, 2013; 董翠玲等, 2014)。荣兴民等研究了微生物生长过程中的新陈代谢活动对蒙脱石、高岭土及针铁矿的影响(Rong *et al.*, 2007),代群威等研究了土壤中细菌作用下对膨润土的作用特性研究(Dai *et al.*, 2014)。

本文实验选用购于新疆阿尔泰地区的蒙脱石和一株革兰氏阳性土壤中常驻菌,研究蒙脱石与微生物的相互作用,并对作用后的蒙脱石进行了一系列分析测试,探讨蒙脱石层间域的变化特性。这将为矿物-微生物相互作用机理研究提供新依据,并能为土壤粘土与微生物构成体系对污染物迁移影响有关研究提供一定参考。

1 材料与方法

1.1 蒙脱石

蒙脱石原矿产自新疆阿尔泰地区,采用自然沉降法提纯(李雪梅等, 2006; 吴选军等, 2008)。提纯后对其进行了 XRD、XRF 等理化性质测试。测试结果显示该蒙脱石属钙基蒙脱石,含有少量石英、白

云母杂质,其中蒙脱石含量大于 80%。

1.2 土壤菌

土壤菌提取于四川盆地紫色土中。采用平板划线法将土壤中提取的细菌提纯,提纯后对菌株进行去除 Sr^{2+} 的筛选实验,并进行革兰氏染色、显微镜观察等(代群威等, 2009)。综合分析菌株的生长情况及去除 Sr^{2+} 的效果,选取一株合适的土壤菌进行进一步实验。此研究中选取的菌株为革兰氏阳性菌, Sr^{2+} 吸附效率为 88.71%,对其进行 16S rDNA 序列测定,所选菌株鉴定为短小芽孢杆菌。此土壤菌株需在有氧、光照条件下生长,20 h 左右进入稳定生长期,菌落较大。

1.3 培养基

普通(含葡萄糖, GLU)液体培养基:牛肉膏 5 g, 蛋白胨 10 g, NaCl 5 g, GLU 6 g, 蒸馏水 1 000 mL, 调 pH 值 7.0~7.2 范围内。高压蒸汽(1.05 kg/cm², 121.0℃)灭菌 20 min。

1.4 实验步骤

(1) 于斜面接种土壤菌株至无 GLU 液体培养基中,培养 24 h 作为菌种备用。

(2) 配置 300 mL 含 GLU 液体培养基,按 100 mL 分装于 250 mL 锥形瓶中,蒙脱石添加量为 1.6 g/L,称取蒙脱石 0.16 g 共 3 份,用称量纸包扎好。上述实验材料均在 1.05 kg/cm²、121℃ 下蒸汽灭菌 20 min,备用。实验组:将灭菌后蒙脱石加入至含 GLU 液体培养液中,并按 1:100 体积比接入 1 mL 短小芽孢杆菌菌种;无菌组:将灭菌后的蒙脱石加入至含 GLU 液体培养基中,不接入菌种;无矿组:不加入蒙脱石,只接入相应比例的短小芽孢杆菌菌种。统一 35℃、150 r/min 条件下振荡培养 24 h。24 h 后,立即取样,取 0.2 mL 悬浊液滴在擦拭干净的盖玻片上,作为 SEM 样品,而后 10 000 r/min 条件下离心 10 min,取上清液 1~2 mL,作为有机酸测定样品。沉淀物用去离子水洗涤 3 次后,60℃ 下烘干,碾磨,放置干燥皿中,作为 XRD、FTIR 样品备用。

1.5 测试方法

SEM 分析:场发射扫描电子显微镜系统(FSEM)(德国),15 kV 加速电压下分辨率 0.8 nm。有机酸含量测定:Agilent 1260 型高效液相色谱仪(美国),二极管阵列检测器波长范围:190~800 nm;四元梯度泵流速范围:0.001~10.0 mL/min。蒙脱石 XRD 分析:X'Pert PRO 型多功能 X 射线衍射仪(荷兰),测试条件:Cu 靶,管压 40 kV,管流 40

mA,扫描方式：连续扫描,狭缝系统 DS 1/2°, SS 0.04 rad,AAS 5.5 mm。FTIR 分析：Nicolet5700 型傅里叶变换红外光谱仪(美国),主要技术指标：光谱范围4 000~225 cm⁻¹,最高分辨率 0.4 cm⁻¹,波数精度 0.01 cm⁻¹,;扫描速度0.158 1~3.164 7 cm/s。

2 结果与讨论

2.1 SEM 分析

图 1 为短小芽孢杆菌-蒙脱石相互作用体系 SEM。图中显示大量短小芽孢杆菌菌体黏附于蒙脱石表面或包裹于蒙脱石中,短小芽孢杆菌呈直杆状,菌长 2 μm 左右。蒙脱石呈不规则的片状集合体,有一定的团聚现象,颗粒大小不一。菌-矿界面作用充

分,短小芽孢杆菌于蒙脱石表面进行生长代谢,其过程中产生的代谢产物极有可能影响蒙脱石的层状结构。

2.2 有机酸含量分析

图 2 为短小芽孢杆菌-蒙脱石体系有机酸含量变化。由图可知,短小芽孢杆菌生长代谢过程中,产生的有机酸主要有草酸、苹果酸、乳酸、乙酸、柠檬酸及琥珀酸等,并同时伴有其他代谢产物如氨基酸、多糖等的产生。与对照组相比,加入蒙脱石作用后,有机酸含量大量降低,草酸由 311.47 mg/L 降至 150.28 mg/L,苹果酸由 465.99 mg/L 降至 192.22 mg/L,乳酸由 844.58 mg/L 降至 462.04 mg/L,乙酸由 376.79 mg/L 降至 258.64 mg/L,其含量均降至无蒙脱石组的 31.36%~58.75%。

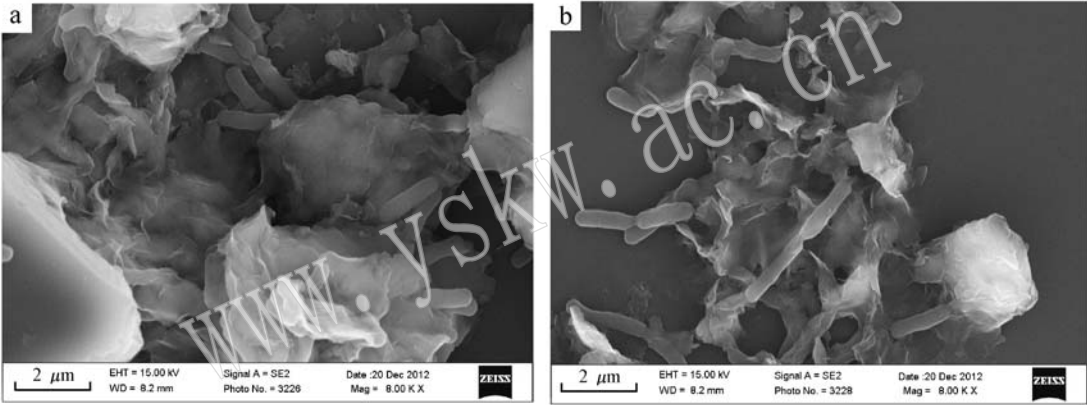


图 1 短小芽孢杆菌-蒙脱石体系 SEM 图像

Fig. 1 The SEM of the *Bacillus pumilus*-montmorillonite system

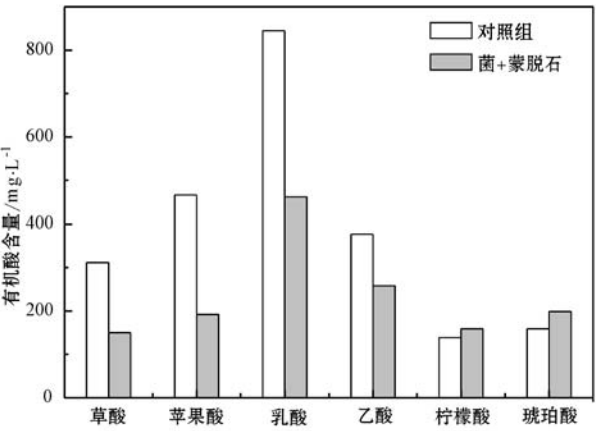


图 2 短小芽孢杆菌-蒙脱石体系有机酸含量变化

Fig. 2 The concentration change of organic acids of the *Bacillus pumilus*-montmorillonite system

2.3 离子溶出分析

表 1 为短小芽孢杆菌-蒙脱石体系离子溶出量变化。由表 1 可知,短小芽孢杆菌-蒙脱石体系的 Si、Al、Ca、Mg 溶出量分别为 0.56×10^{-6} 、 0.05×10^{-6} 、 3.25×10^{-6} 、 0.64×10^{-6} ,无菌组蒙脱石的 Si、Al、Ca、Mg 溶出量分别为 0.49×10^{-6} 、 0.03×10^{-6} 、 2.39×10^{-6} 、 0.58×10^{-6} 。无菌条件下蒙脱石中 Al 基本无溶出,Ca 溶出量最大,Si、Mg 均有一定的溶出。比较有无菌体系,可知短小芽孢杆菌作用下蒙脱石离子溶出较大于无菌组,但两者差值较小,离子均有一定的溶出。

2.4 XRD 分析

图 3 为蒙脱石原矿、无菌组蒙脱石及短小芽孢杆菌作用后的蒙脱石 XRD 图。由图 3 a 可知,此

表 1 短小芽孢杆菌-蒙脱石体系离子溶出 $w_B/10^{-6}$

Table 1 The ions dissolution of the *Bacillus pumilus*-montmorillonite system

离子溶出	Si	Al	Ca	Mg
蒙脱石-菌体系	0.56	0.05	3.25	0.64
无菌组蒙脱石	0.49	0.03	2.39	0.58

蒙脱石为钙蒙脱石,其 d_{001} 值为 1.49 nm, 归属于钙型蒙脱石(吴平霄, 2004), 并含有少量石英等杂质。由图 3b 可知, 无菌组蒙脱石 d_{001} 值为 1.81 nm, 生化测试显示, GLU 含量无变化, 仍为 6 g/L, 蒙脱石对 GLU 既不吸附也无消耗。由于普通液体培养基中的成分含有蛋白胨、牛肉膏生化试剂, 成分复杂, 因此蒙脱石层间距增大可能是由培养基中的某些有机物质进入至蒙脱石层间所致, 差值为 0.32 nm, 峰型较原蒙脱石尖锐化, 峰宽变窄, c 轴方向堆垛有序程序较原矿相对有序化。图 3c 显示, 蒙脱石经短小芽孢杆菌作用后, 001 面衍射峰基本消失, c 轴方向堆垛有序程序无序化, 无明显鼓包状峰型, 层间距扩增, 矿物晶体结构发生变化。结合 SEM、有机酸含量变化及离子溶出分析, 蒙脱石层间结构无序化极有可能由菌体产生的代谢产物所致。

2.5 FTIR 分析

图 4 为短小芽孢杆菌-蒙脱石体系的 FTIR 变化。经短小芽孢杆菌作用后, 蒙脱石 FTIR 仍大体保

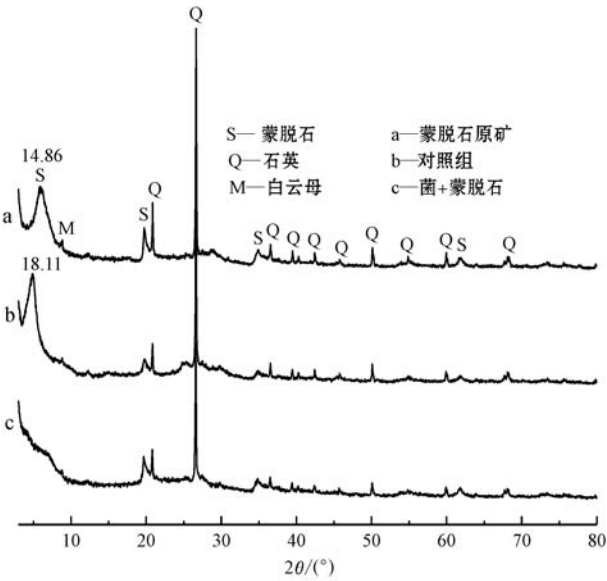


图 3 短小芽孢杆菌-蒙脱石体系 XRD 变化

Fig. 3 The XRD of the *Bacillus pumilus*-montmorillonite system

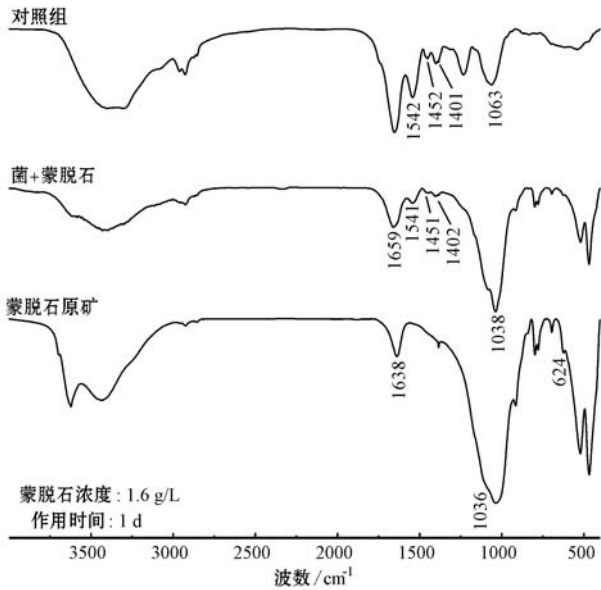


图 4 短小芽孢杆菌-蒙脱石体系 FTIR 分析

Fig. 4 The FTIR of the *Bacillus pumilus*-montmorillonite system

持与原矿一致, 菌体作用有一定的影响。短小芽孢杆菌为革兰氏阳性菌, 其细胞壁主要由蛋白质、酶、肽聚糖及磷酸组成。短小芽孢杆菌作用 1 d 后 FTIR 的 1655 cm^{-1} 处强而尖锐吸收带属于酰胺 I 键的振动, 1541 cm^{-1} 归属于菌体胞壁肽聚糖层肽链上酰胺键缔合态的 N—H 变角振动与 C—N 伸缩振动偶合产生的吸收带, 1452 cm^{-1} 属于氨基酸特征基团酰胺基(—CO—NH—)振动, 1401 cm^{-1} 归属肽链侧链的氨基酸残基离子化羧基(—COO—)的 $\text{C}(=\text{O})_2$ 对称伸缩振动带, 1063 cm^{-1} 归属于糖类羟基吸收带(代群威等, 2012; Fang *et al.*, 2014)。蒙脱石原矿 624 cm^{-1} 属于 Si—O—Fe 的弯曲振动, 1036 cm^{-1} 处强而尖锐的单一峰为 Si—O—Si 伸缩振动, 1638 cm^{-1} 归属于 H—O—H 弯曲振动, 3434 cm^{-1} 处宽吸收带归属于蒙脱石吸附水的伸缩振动, 3622 cm^{-1} 处吸收带归属于蒙脱石结构 OH 基团的—OH 键伸缩振动(Brnardic *et al.*, 2008; Magana *et al.*, 2008)。

经短小芽孢杆菌作用后, 蒙脱石中出现了 1541 、 1452 、 1402 cm^{-1} 三处新峰, 分别归属于菌体 N—H 变角振动与 C—N 伸缩振动、酰胺基(—CO—NH—)振动及 $\text{C}(=\text{O})_2$ 对称伸缩振动; 1638 cm^{-1} 蓝移至 1659 cm^{-1} , 表明蒙脱石层间 H_2O 的弯曲振动受到影响; 624 cm^{-1} 处峰消失, 即 Si—O—Fe 的弯曲振动

消失; $3\,650\text{--}3\,400\text{ cm}^{-1}$ 处吸收带均受土壤菌的影响, $3\,434\text{ cm}^{-1}$ 处峰变宽, 蒙脱石层间 H_2O 的伸缩振动受到影响; $3\,622\text{ cm}^{-1}$ 逐渐变宽、红移至 $3\,585\text{ cm}^{-1}$, 蒙脱石结构羟基(OH)伸缩振动受到影响。因此, 短小芽孢杆菌与蒙脱石相互作用过程中, 蒙脱石中的层间 H_2O 、结构羟基及 Si—O 键均受到短小芽孢杆菌或其生长代谢过程的影响。

2.6 二阶导数红外光谱分析

图5为短小芽孢杆菌-蒙脱石体系的二阶导数红外光谱, 导数光谱可以提高谱图的分辨率。二阶导数红外光谱图中, 可观察到蒙脱石经短小芽孢杆菌作用后, $1\,400\text{--}1\,700\text{ cm}^{-1}$ 受到菌体影响, 层间 H_2O 弯曲振动变化及表面出现来自于菌体代谢产物基团变化新峰; $1\,042\text{ cm}^{-1}$ 红移至 $1\,039\text{ cm}^{-1}$, Si—O 键伸缩振动受到影响; 990 cm^{-1} 蓝移至 $1\,006\text{ cm}^{-1}$, 层间羟基基团振动变化; 421 cm^{-1} 蓝移至 424 cm^{-1} , Si—O 键弯曲振动受到影响。在二阶导数红外光谱图上, 各个谱图的谱峰位置更加清楚, 可以观察到原始红外光谱图中未能区分的吸收峰。SEM 显示大量菌体生长代谢过程发生于蒙脱石表面, 并结合蒙脱石作用后的层间距变化, 加之其 Si—O 键及层间羟基、 H_2O 的振动变化, 可以推测, 菌体代谢产物与蒙脱石表面基团及层间基团结合的可能性, 进而推导出菌体代谢产物进入蒙脱石层间域的初步可能性, 使得蒙脱石层间距增大。但由于所构建体系成

分过于复杂, 进入蒙脱石层间域内的具体有机物质仍需深入研究。

3 结论

(1) SEM 显示, 大量土壤菌黏附于蒙脱石表面或包裹于蒙脱石中。蒙脱石-短小芽孢杆菌体系中有有机酸含量明显降低, 较无蒙脱石组降低 $31.36\%\sim 58.75\%$ 。离子溶出结果显示 $\text{Ca} > \text{Mg} > \text{Si} > \text{Al}$, 短小芽孢杆菌-蒙脱石体系离子溶出大于无菌组, 但差值较小。

(2) 蒙脱石经短小芽孢杆菌作用后, XRD 结果显示蒙脱石 001 面衍射峰基本消失, 层间距扩增, 表明蒙脱石经土壤菌作用后晶体结构发生一定变化。

(3) FTIR 及二阶导数红外光谱分析显示, 蒙脱石经短小芽孢杆菌作用后, 出现来自于土壤菌代谢产物的新峰, 即 N—H 变角振动与 C—N 伸缩振动、酰胺基(—CO—NH—)及 C(=O)_2 振动, 蒙脱石层间 H_2O 、结构羟基及 Si—O 键均受到短小芽孢杆菌或其生长代谢过程的影响。

综合分析, 菌体代谢产物进入蒙脱石层间域内极具初步可能性, 使得蒙脱石层间距增大, 进入蒙脱石层间域内的具体有机物质仍需深入研究。

References

- Brnardic I, Huskic M, Zigon M, Ivankovic M. 2008. Montmorillonite modified with liquid crystalline diol hydrochlorides: Preparation and characterization[J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 354: 1 986 ~1 991.
- Chen Dong, He Hongping, Zhu Jianxi, *et al.* 2009. The preparation and characterization of anion-cation surfactantsmodified montmorillonite[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 29(2): 137 ~144(in Chinese with English abstract).
- Dai Qunwei, Dong Faqin, Wu Xiaoli, *et al.* 2012. FTIR analysis of Sr^{2+} biosorption by bacillus spp. strains isolated from soil treated with γ -ray radiation[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 32 (12): 3 234 ~3 237(in Chinese with English abstract).
- Dai Qunwei, Li Qiongfang, Yang Lijun, *et al.* 2009. Environmental Engineering Microbiology Experiment[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 27 ~71(in Chinese).
- Dai Q W, Zhao Y L, Dong F Q, *et al.* 2014. Interaction between ben-

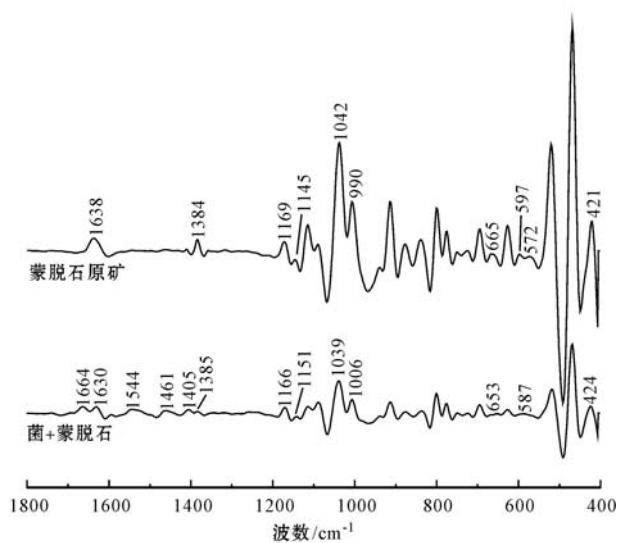


图5 短小芽孢杆菌-蒙脱石体系二阶导数红外光谱

Fig. 5 The second derivative infrared spectra of the *Bacillus pumilus*-montmorillonite system

- tonite and *Bacillus litoralis* strain SWU9[J]. *Applied Clay Science*, 100: 88~94.
- Dai Yaping and Wu Pingxiao. 2012. Characterization of APTES-modified montmorillonite and adsorption of $\text{Sr}(\text{II})$ [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 32(10): 2 402~2 407(in Chinese with English abstract).
- Deb P J, Dong H L, Liu C X. 2007. Influence of biogenic $\text{Fe}(\text{II})$ on the extent of microbial reduction of $\text{Fe}(\text{III})$ in the clay minerals nontronite, illite, and chlorite[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 71: 1 145~1 158.
- Dong Cuiling and Lian Bin. 2014. Comparing the bio-weathering effects for biotite by *Bacillus Mucilaginosus* and *Aspergillus Niger*[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 30(3): 304~310(in Chinese with English abstract).
- Fang L C, Yang S S, Huang Q Y, *et al.* 2014. Biosorption mechanisms of $\text{Cu}(\text{II})$ by extracellular polymeric substances from *Bacillus subtilis*[J]. *Chemical Geology*, 386: 143~151.
- Li Xuemei and Wang Yanli. 2006. The progress of research on smectite purification[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 25: 252~258(in Chinese with English abstract).
- Magana S M, Quintana P, Aguilar D H, *et al.* 2008. Antibacterial activity of montmorillonites modified with silver[J]. *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical*, 281: 192~199.
- Rong X M, Huang Q Y and Chen W L. 2007. Microcalorimetric investigation on the metabolic activity of *Bacillus thuringiensis* as influenced by kaolinite, montmorillonite and goethite[J]. *Applied Clay Science*, 38: 97~103.
- Stotzky G. 1967. Clay minerals and microbial ecology[J]. *Transactions of the New York Academy of Sciences*, 30(1): 11~21.
- Wu Pingxiao. 2004. *Clay Minerals Materials and Environmental Restoration*[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 30~37(in Chinese).
- Wu Xuanjun, Yu Yongfu and Yuan Jizu. 2008. Study on preparation and organ-modification of Na^+ -smectite[J]. *Non-Metallic Mines*, 31: 1~3(in Chinese with English abstract).
- Xue Weihong, He Hongping, Zhu Jianxi, *et al.* 2007. Synthesis and Characterization of Ctab-Al-Montmorillonite [J]. *J. Mineral. Petrol.*, 27(2): 1~6(in Chinese with English abstract).
- Yang Xiaoxue, Wang Haoran, Li Yan, *et al.* 2013. The effect of a *Bacillus mucilaginosus* strain 3207 on the structure of Ca-montmorillonite[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 32(6): 767~772(in Chinese with English abstract).
- Zhang J, Dong H L, Liu D, *et al.* 2012. Microbial reduction of $\text{Fe}(\text{III})$ in illite-smectite minerals by methanogen *Methanosarcina mazei*[J]. *Chemical Geology*, 292~293: 35~44.
- Zhu Tingting, Fan Jian, Lu Xiancai, *et al.* 2011. Experimental Study on the Interaction between *Pseudomonas Mendocina* and Montmorillonite[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 30(3): 304~310(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]. *Clay and Clay Minerals*, 59(5): 538~545.

附中文参考文献

- 陈冬, 何宏平, 朱建喜, 等. 2009. 阴-阳离子表面活性剂复合柱撑蒙脱石的制备与表征[J]. *矿物学报*, 29(2): 137~144.
- 代群威, 董发勤, 吴晓利, 等. 2012. γ 辐照下土壤分离菌对 Sr^{2+} 吸附特性及其 FTIR 分析[J]. *光谱学与光谱分析*, 32(12): 3 234~3 237.
- 代群威, 李琼芳, 杨丽君, 等. 2009. 环境工程微生物实验[M]. 北京: 化学工业出版社, 27~71.
- 代亚平, 吴平霄. 2012. 3-氨丙基三乙氧基硅烷改性蒙脱石的表征及其对 $\text{Sr}(\text{II})$ 的吸附研究[J]. *环境科学学报*, 32(10): 2 402~2 407.
- 董翠玲, 连宾. 2014. 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[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 33(6): 772~777.
- 李雪梅, 王延利. 2006. 蒙脱石提纯研究进展[J]. *岩石测试*, 25: 252~258.
- 吴平霄. 2004. 黏土矿物材料与环境修复[M]. 北京: 化学工业出版社, 30~37.
- 吴选军, 余永富, 袁继祖. 2008. 钠基蒙脱石的制备及有机改性研究[J]. *非金属矿*, 31: 1~3.
- 薛卫红, 何宏平, 朱建喜, 等. 2007. CTAB-Al 复合改性蒙脱石的合成及表征[J]. *矿物岩石*, 27(2): 1~6.
- 杨晓雪, 王浩然, 李艳, 等. 2013. 胶质芽孢杆菌 3207 对钙基蒙脱石的矿物结构影响[J]. *岩石矿物学杂志*, 32(6): 767~772.
- 朱婷婷, 范健, 陆现彩, 等. 2011. 门多萨假单胞菌-蒙脱石相互作用的实验研究[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 30(3): 304~310.