

·环境矿物学·

## 原地栖息真菌 *Talaromyces flavus* 作用下不同 粒径利蛇纹石的风化作用研究

孙 晟, 王艺谭, 刘连文

(南京大学 地球科学与工程学院 表生地球化学教育部重点实验室, 江苏 南京 210046)

**摘 要:** 主要研究了原地栖息真菌 *Talaromyces flavus* 作用下不同粒径的蛇纹石矿物粉末的风化作用。蛇纹石矿物粉末被筛分为不同粒度的4组(150~300、100~150、75~100和45~75  $\mu\text{m}$ )后进行真菌溶蚀实验, 并使用pH计、ICP-OES、FTIR、XRD、SEM对反应产物进行了分析。结果表明, 真菌作用显著加快了蛇纹石矿物的溶蚀, 当蛇纹石矿物粒度降低到100  $\mu\text{m}$ 左右时, Mg的溶出率从21.56%明显增加到35.91%。该现象可能与矿物比表面积的增大以及生物物理作用的增强有关。在此基础上粒径进一步减小并未使Mg溶出率明显提高, 因此该粒径可以作为真菌对蛇纹石溶解工业化应用的最优粒径。扫描电镜观察与矿物相分析表明, 反应过程中真菌分化产生的菌丝与矿物紧密接触, 破坏了矿物的晶体结构, 导致矿物相的改变。该研究结果可为相关菌种在浸矿等工业领域上的应用提供参考依据。

**关键词:** 蛇纹石; 生物风化; *Talaromyces flavus*; 丝状真菌; 粒径

**中图分类号:** Q939.99; P578.964

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-6524(2016)05-0885-08

## The weathering of serpentine of different particle sizes under the action of native fungi *Talaromyces flavus*

SUN Sheng, WANG Yi-tan and LIU Lian-wen

(Key Laboratory of Surficial Geochemistry, School of Earth Science and Technology, Nanjing University, Nanjing 210046, China)

**Abstract:** This paper aims at revealing the effect of particle size in the dissolution process of serpentine with the participation of native fungus *Talaromyces flavus*. Serpentine minerals of four different particle sizes were chosen for fungal leaching experiments: 150~300  $\mu\text{m}$ , 100~150  $\mu\text{m}$ , 75~100  $\mu\text{m}$  and 45~75  $\mu\text{m}$ . The pH meter, ICP-OES, FTIR, XRD and SEM were used to characterize the samples. The results show that the final dissolution rate of Mg in each group with fungus was higher than other two controls without fungus. With the decrease of serpentine particle size from 100  $\mu\text{m}$ ~150  $\mu\text{m}$  to 100  $\mu\text{m}$ , the ratio of Mg increased conspicuously from 21.56% to 35.91%, and this is considered to be related to the increase of specific surface area and the strengthening of bio-leaching action. Meanwhile, the increase of ratio became inconspicuous with further decrease of particle sizes, suggesting that 100  $\mu\text{m}$  is a valuable particle size for industrial application of the fungus-serpentine system. SEM images and the analysis of fungus-mineral aggregates showed that, during the process of reaction, serpentine particles were wrapped by hyphae which caused destruction of lattices and change of mineral phases. These results can provide theoretical basis and references for further industrial application of leaching serpentine by related fungus.

收稿日期: 2013-11-19; 接受日期: 2016-06-28

基金项目: 中国国土资源部地质调查局项目(12120113005400); 国家大学生创新性实验计划项目(XZ11102840100)

作者简介: 孙 晟(1990-), 男, 硕士研究生, 从事矿物的生物风化研究, E-mail: sunweki@163.com; 通讯作者: 刘连文(1970-), 男, 博士, 副教授, 从事表生地球化学研究, E-mail: liulw@nju.edu.cn

**Key words:** serpentine; biological leaching; *Talaromyces flavus*; mycelium fungus; particle size

**Fund support:** Project from China Geological Survey (12120113005400); Project from National University Student Innovation Program (XZ11102840100)

作为吸收  $\text{CO}_2$  以应对全球气候变化的有效手段,含 Mg 或 Ca 的硅酸盐矿物的碳酸盐化作用近年来日益受到重视(Broecker, 2007),而蛇纹石因其具极高的 Mg 含量(MgO 含量高达 40%)及分布广泛,被认为是最有潜力封存  $\text{CO}_2$  的矿物材料(Metz, 2005)。蛇纹石碳酸盐化受限于  $\text{Mg}^{2+}$  的提取效率和速率,大量的无菌化学溶解研究表明无机和有机试剂可以极大地加快岩石和矿物中 Mg 或 Ca 的溶出(Alexander *et al.*, 2007; Krevor and Lackner, 2011; Wang and Maroto-Valer, 2011; Sanna *et al.*, 2013)。这些研究注重于对反应化学试剂的种类、浓度以及反应温压条件的分析,反应矿物在反应前缺少粒径分选,矿物的不同粒径对岩石中 Mg 或 Ca 的溶出的影响受到忽视。由于蛇纹石碳酸盐化的化学方法工业化应用受制于高成本和极端的反应条件,使目前研究重点转向了微生物提取的方法,因此,微生物与蛇纹石的相互作用研究受到学界越来越多的关注。目前,细菌和古菌加速矿物风化的微生物-矿物相互作用研究取得了较多的认识(Burford *et al.*, 2003b),而真菌与矿物相互作用的研究较少,一些实验结果表明真菌可以显著地提高蛇纹石矿物的风化(Wilson *et al.*, 1981; Daghino *et al.*, 2008; Daghino *et al.*, 2009, 2012; Li *et al.*, 2014)。Wilson 在使用真菌 *Aspergillus niger* 于常温(20℃)常压下风化蛇纹石的实验中,发现真菌实验组 Mg 的淋出率比无菌风化实验高 300 倍(Wilson *et al.*, 1981)。Daghino 用从蛇纹石土壤中分离出的真菌 *Verticillium leptobactrum* 在 25℃ 条件下、20 d 内对 Mg 和 Si 的溶出率分别为 22.3% 和 11.7%(Daghino *et al.*, 2009)。矿物溶解过程受表面控制,其粒径大小直接影响溶解速率,工业应用中,所需加工的矿物粒径大小对经济效率有重要影响,而目前缺少粒径影响蛇纹石与微生物相关作用方面的研究,故本研究探讨蛇纹石粒径对真菌风化蛇纹石效率的影响并讨论其可能的机理,为相关菌种在随后工业化中的应用提供理论参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验材料

本实验的蛇纹石样品采自连云港东海县山左口乡蛇纹石矿(34°37'N, 118°30'E),XRD 分析结果表明该样品矿物相主要为利蛇纹石,其化学成分( $w_B/\%$ )为 MgO 38.55,  $\text{SiO}_2$  38.45,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  8.33,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  0.89, CaO 0.17, MnO 0.09,  $\text{Na}_2\text{O}$  0.01,  $\text{K}_2\text{O}$  0.11,  $\text{P}_2\text{O}_5$  0.01,  $\text{TiO}_2$  0.02, LOI 13.31, Sum 99.96(XRF, ThermoARL 9900)。样品用研钵研磨,并使用 50 目(300  $\mu\text{m}$ )、100 目(150  $\mu\text{m}$ )、150 目(100  $\mu\text{m}$ )、200 目(75  $\mu\text{m}$ )、325 目(45  $\mu\text{m}$ )筛对样品进行筛分后,使之构成 4 组不同粒级的样品:A 组样品粒径为 150~300  $\mu\text{m}$ , B 组样品粒径为 100~150  $\mu\text{m}$ , C 组样品粒径为 75~100  $\mu\text{m}$ , D 组样品粒径为 45~75  $\mu\text{m}$ 。

实验所用真菌 *Talaromyces flavus* (黄蓝状菌)为连云港东海县蛇纹石风化面土壤原地栖息真菌,菌丝为黄色,个体直径为 2~5  $\mu\text{m}$ 。这种真菌目前主要应用于农业上的植物病菌防治(李国庆等, 1995)。Li 等在对连云港东海县蛇纹石土壤中的真菌进行了培养、分离、鉴定后,通过含有 1 mol/L  $\text{Mg}^{2+}$  和 10 mM/L  $\text{Ni}^{2+}$  的培养基对该风化面土壤中的微生物进行筛选,发现仅有 *Talaromyces flavus* 在该培养基中生长未受到抑制,此后又进行了该真菌-利蛇纹石矿物溶液培养实验,发现其对蛇纹石的溶解效果十分明显,在 28℃ 和 38℃ 条件下,其 Mg 的淋出率分别达 39% 和 48%(Li *et al.*, 2014),故本研究采用该真菌进行相关实验。

### 1.2 实验步骤及测试方法

为了研究 *Talaromyces flavus* 作用下不同粒度蛇纹石的溶蚀作用,本实验对每个不同粒级均设计了一组真菌溶蚀实验和两组对照实验。其中在真菌溶蚀样品中,矿物与加入了真菌的液体培养基直接接触反应;对照组一为矿物与未加入真菌的液体培养基直接接触反应;对照组二为矿物与仅含有草酸(本实验所采用的草酸初始 pH=4,这是目前该真菌对蛇纹石溶蚀研究中所测出过的最低的 pH 值)的溶

液直接接触反应。每组实验至少进行3个重复,每个样品含0.5 g不同粒径的蛇纹石粉末和100 mL的反应溶液,反应容器为250 mL锥形瓶中。实验所用培养基为查氏培养基,其成分为:  $\text{NaNO}_3$  3 g/L,  $\text{KCl}$  0.5 g/L,  $\text{K}_2\text{HPO}_4$  1 g/L,  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  0.5 g/L,  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  0.01 g/L, 蔗糖 30 g/L, 使用时用无水二吗啉乙磺酸将pH值调至5.5。为了保证实验所用的菌落恢复活力,开始实验前先对 *Talaromyces flavus* 进行活化,活化方法: 抽滤收集真菌菌丝体,并用灭过菌的去离子水清洗两遍后加入至100 mL培养基中。所有样品在反应开始之前均进行严格的灭菌,反应开始时在真菌溶蚀样品中加入2 mL菌液,随后将所有样品置入28℃、120 r/min的摇床中反应30 d。

反应进行过程中按周期取样,每次取溶液2 mL,并立即测试溶液的pH值。取样溶液经0.22  $\mu\text{m}$  滤膜过滤后,用HCl酸化至2.0左右,冷藏以备ICP-OES(iCAP 6300, England)分析。反应结束后对真菌溶蚀实验中的真菌-矿物混合物进行抽滤(Whatman, England),取部分固体样进行扫描电子显微镜(SEM, JEOL JSM-6490)观察,其余矿物样品磨细至200目后使用粉晶X射线衍射仪(XRD, X'TRA)、傅立叶变换红外光谱(FTIR, NEXUS870)进行物相与结构分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 矿物中Mg的溶出趋势

图1显示了不同粒径利蛇纹石在真菌溶蚀实验和两组对照实验中Mg的溶出趋势(图中的数据为重复样的平均值),表1为该实验各组中Mg的最终溶出率结果。从图表可以看出,矿物粒度对蛇纹石中Mg的溶解效率有明显影响,在所有反应物相同的实验组中,Mg的溶出率均随着矿物粒度的减小而增加; *Talaromyces flavus* 对蛇纹石溶解作用明显,不同实验组Mg的最终溶出率均为真菌组>草酸对照组>培养基对照样,经过30 d的反应,相比于其对应的矿粉培养基作用样,矿粉真菌作用样多溶出原矿物中9.4%~19.7%的Mg,比矿粉草酸作用样多溶出了原矿物中3.8%~14.4%的Mg,这表明即使是在相同的 $\text{H}^+$ 最大浓度下,真菌对蛇纹石的溶蚀作用也强于单纯的酸溶过程;100  $\mu\text{m}$ 左右是真菌溶解蛇纹石效率变化最为明显的粒径,粒径为150~300

$\mu\text{m}$ 和100~150  $\mu\text{m}$ 的真菌溶蚀实验组中Mg的溶出率较对照组增加效果并不十分显著,而在75~100  $\mu\text{m}$ 和45~75  $\mu\text{m}$ 的两组实验中,真菌溶蚀实验组Mg的溶出率却得到了较大提升,如75~100  $\mu\text{m}$ 矿粉真菌作用样中Mg的最终溶出率是100~150  $\mu\text{m}$ 矿粉真菌作用样的1.6倍。

### 2.2 反应过程中pH值的变化

图2显示了真菌溶蚀实验和对照实验中溶液pH值随时间的变化特征。在整个溶蚀过程中,各个对照组的pH值均迅速上升并很快趋于平稳,具典型的矿物化学溶蚀过程特征。而在真菌溶蚀实验中,溶液的pH值在前7 d均低于初始的5.5,甚至在45~75  $\mu\text{m}$ 实验组中仅为4.6。在此期间,被溶蚀的矿物粒径越小,溶液pH值的降低程度越大。在随后的7~15 d区间内,溶液的pH值均有大幅度的提升,尤其在45~75  $\mu\text{m}$ 实验组中,pH从4.6提升到8.6,高于其他粒级的平行实验。反应开始15 d之后,pH值的增长速率趋于平缓,最终均稳定在9左右。

真菌溶蚀过程中,初始pH值降低的主要原因是真菌氧化蔗糖产生的小分子有机酸对溶液进行了酸化。这些有机酸既降低了溶液的pH值,同时有效酸化了矿物-水反应界面,并在真菌吸附于矿物表面时产生富集作用,加快矿物的溶蚀(Gharieb and Gadd, 1999)。这点也从本实验真菌-矿物反应组远高于对照组的Mg的溶出率得到印证。值得一提的是,此过程中释放有机酸的种类与浓度受到生物物种与矿物相的严格控制(Balland *et al.*, 2010),如加强砂岩的风化作用时,真菌作用产生的有机酸为乙酸、草酸、柠檬酸、甲酸、富马酸、乙醛酸、葡糖酸、琥珀酸和酒石酸等酸(Burford *et al.*, 2003)。另外,真菌产生的许多金属螯合物(例如铁载体、羧酸、氨基酸和酚类化合物)也在反应过程中起到了十分重要的作用,这使得相同酸度条件下,真菌对矿物溶蚀速率可达到无机酸的10倍(Welch and Ullman, 1993)。综上所述,酸化和配位体络合的协同效应为本研究中 *Talaromyces flavus* 促进蛇纹石溶解的驱动机制。本过程的反应式为:



上式中的 $\text{H}^+$ 主要在真菌生长过程产生,该过程伴随着以蔗糖为主的营养物质的消耗。随着反应的进一步进行,产生的质子与矿物表面的Mg进行交换,促使Mg的溶出,大部分溶液的pH值在第14 d上升至8左右。随后由于培养基中营养的减少,真菌活性降

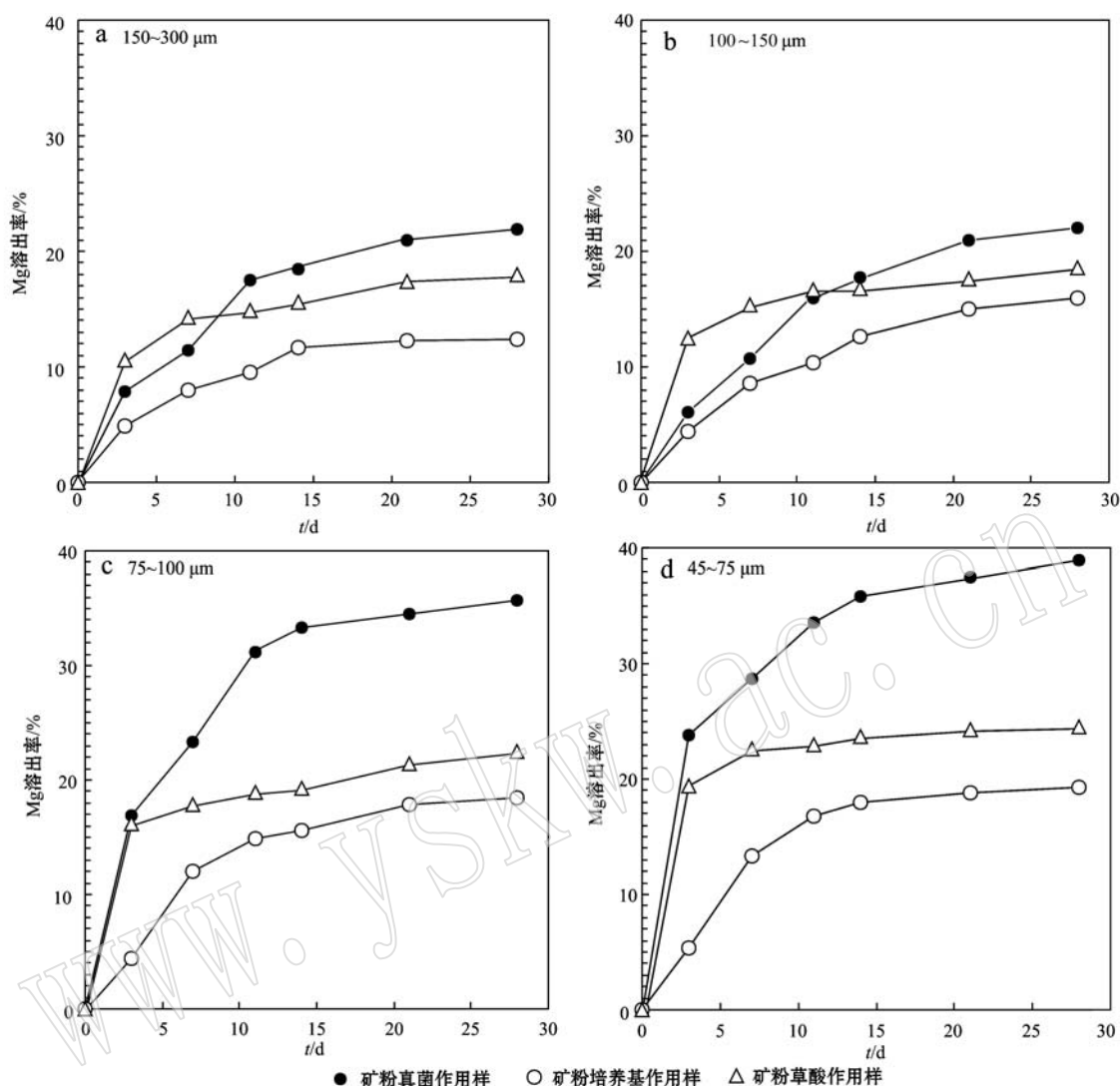


图 1 不同蛇纹石矿物颗粒在真菌溶蚀实验和对照实验中 Mg 的溶出率变化趋势图

Fig. 1 Change of Mg concentration during leaching process in fungus and control group samples

表 1 实验样品中 Mg 的最终溶出率 %  
Table 1 Final Mg concentration in the samples

粒度/ $\mu\text{m}$	矿粉真菌作用样	矿粉培养基作用样	矿粉草酸作用样
150~300	21.87	12.40	18.02
100~150	22.00	15.98	18.58
75~100	35.67	18.46	22.46
45~75	38.97	19.24	24.58

低,溶液 pH 值上升,反应体系在 14 d 之后趋向平衡。

### 2.3 真菌作用下矿物溶解过程中矿物相的变化

在真菌作用下矿物的化学溶蚀过程中, *Talaromyces flavus* 对蛇纹石中活化的氧原子上的孤对电子结构进行质子化。氧原子的被质子化可以极化

和削弱 Mg—O 键,从而使得 Mg 原子从原晶格中脱离,暴露更多的活化氧原子,加快蛇纹石的溶蚀速率 (Gadd and Raven, 2010)。图 3 是真菌作用样的剩余矿物以及蛇纹石原样的 FTIR 吸收光谱,最上方谱图为原始样品的 FTIR 吸收光谱,具典型的蛇纹石红外光谱特征,3 689  $\text{cm}^{-1}$  处峰对应 Mg—OH 的振动,1 146、1 071、942  $\text{cm}^{-1}$  处峰分别为 Si—O—Si、Si—O—Mg 和 Si—O 的振动 (Sugama *et al.*, 1998)。当矿物被真菌溶蚀后,各主要振动峰的强度均出现了明显下降,其中粒径较小的两组 3 689  $\text{cm}^{-1}$  处 Mg—OH 振动峰吸收度降低至 1.6 以下,1 071、942  $\text{cm}^{-1}$  处两个振动带强度减小并趋向于合并为一个宽吸收带,这表明蛇纹石的八面体结构受到破坏,



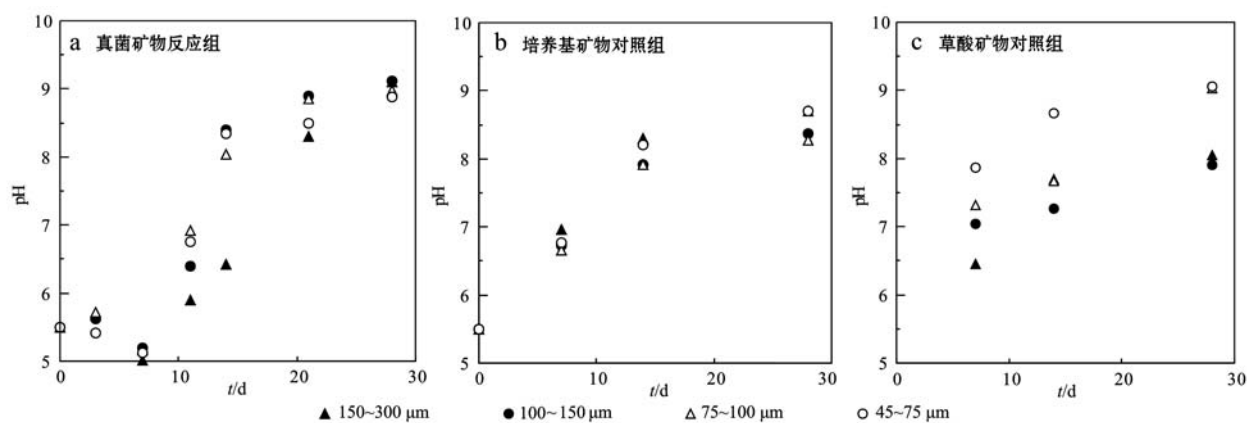


图 2 真菌溶蚀实验和对照实验中溶液 pH 值随时间的变化特征(平均值)

Fig. 2 Change of pH value during leaching process in fungus and control group samples (on average)

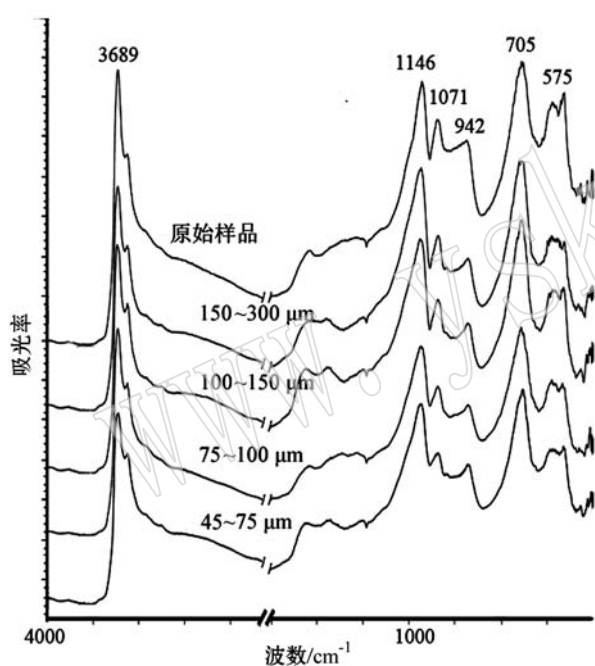


图 3 不同粒径蛇纹石在真菌溶蚀作用后对应的 FTIR 图

Fig. 3 FTIR spectra of serpentine of different particle sizes in bio-leaching

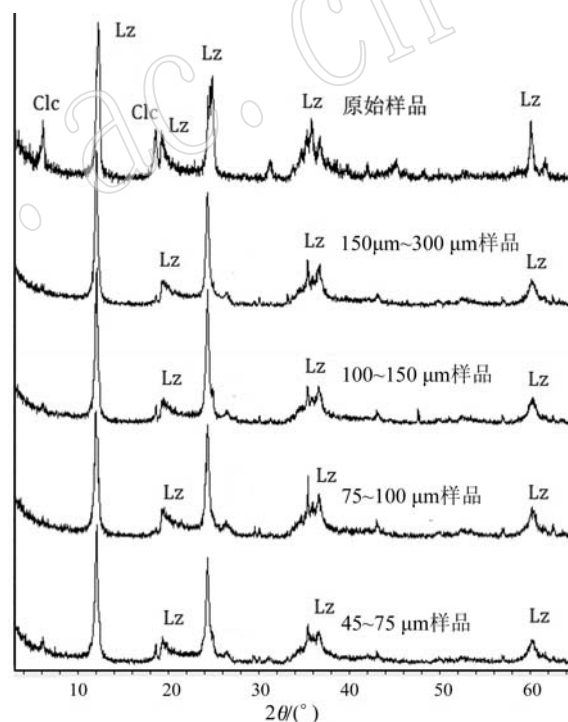


图 4 不同粒径蛇纹石在真菌溶蚀作用后对应的 XRD 图

Fig. 4 XRD spectra of serpentine of different particle sizes in bio-leaching

矿物原有结构可能已经发生一定的变形。图 4 为原始样品和真菌与矿物反应样品的 XRD 衍射峰谱,通过对比可以看出,经过真菌溶蚀作用后,原始样品衍射谱图中高强度的利蛇纹石特征峰(Lz)均出现减弱,其中  $36^\circ$ 、 $60^\circ$  的特征峰的减弱尤为明显,另外原始样品中含有的次要矿物斜绿泥石(Clc)的特征峰强度大幅减弱,甚至在部分样品的谱图中难以辨别,与此同时这些谱图上  $20^\circ \sim 30^\circ$  衍射强度变强,这与反应过程中蛇纹石、斜绿泥石的被溶蚀破坏及  $\text{SiO}_2$  等

次生矿物生成有关,体现了该过程中矿物相的变化。

#### 2.4 真菌-矿物反应过程中形貌特征

SEM 镜下观察表明,在实验过程中,粒径  $\geq 100 \mu\text{m}$  的样品中,蛇纹石颗粒以较为分散的形式分布,很少与真菌形成微生物矿物集合体,样品表面菌丝往往呈零星点、线式的孤立分布,未大规模覆盖表面,鲜有溶蚀坑的产生,该现象在某些大而平整的表面尤其明显(图 5a、5b);而在粒径  $< 100 \mu\text{m}$  样品中,

蛇纹石颗粒普遍被真菌的菌丝包裹,并形成可观数量的微生物矿物集合体,菌丝以富集成群的方式大量分布,并伴随有溶蚀坑的出现(图 5c、5d)。联系前面 Mg 的溶出速率与最终溶出率实验结果,可以认

为粒径降低到  $100\text{ }\mu\text{m}$  以下时, *Talaromyces flavus* 在溶蚀过程中对矿物颗粒的生物机械作用大幅增强,使其溶蚀效率有了显著提高。

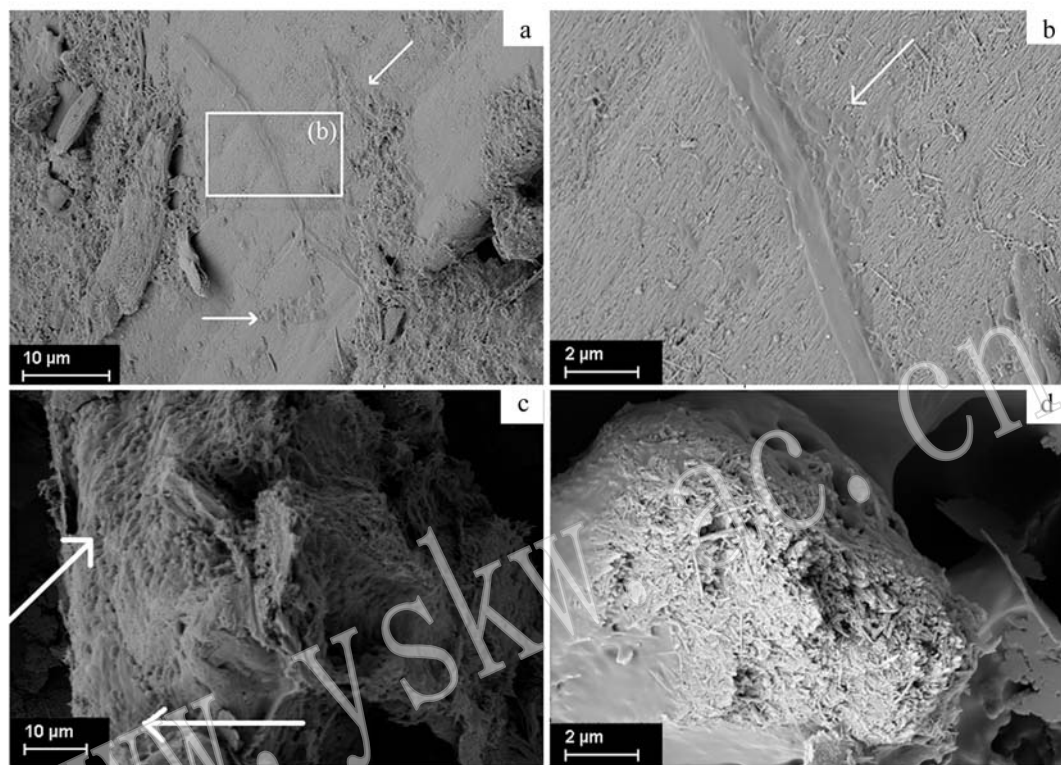


图 5 蛇纹石矿物颗粒与 *Talaromyces flavus* (白色箭头处) 反应的表面微形貌特征

Fig. 5 SEM images of serpentine surface after interaction with *Talaromyces flavus* (marked by white arrow)

### 3 讨论

在微生物作用下矿物的溶蚀过程中,溶质迁移和物理化学反应是两个最基本的过程,并主要受微生物的生物化学作用与生物物理作用控制(Önal *et al.*, 2005),其中同种矿物的生物化学作用的强度与矿物的粒径有着很大的关系。研究发现在一定的矿物颗粒的粒径范围内,硅酸盐矿物的溶解速率变化与矿物粒径变化所导致的比表面积变化之间呈明显的正比关系(Tole, 1982),而 Mg 的溶出速率与溶出率也呈现出随着矿物粒度的减小而增加的特征。但这一变化并非没有极限,Holdren 在对硅酸盐矿物的溶解速率研究中发现,当矿物粒径接近相邻缺陷间距时,即使将颗粒进一步研磨减小其粒径而增大其比表面积,暴露的新鲜反应面也不会与比表面积增量呈正比例增长,部分矿物甚至会出现不增长的情

况,硅酸盐溶解速率的增长受此影响会得到限制,如长石的粒径在  $37\sim 75\text{ }\mu\text{m}$  时,其表面积的变化对溶解速率无任何影响(Holdren and Speyer, 1985, 1987)。这一机制一定程度上可以解释本实验中  $75\sim 100\text{ }\mu\text{m}$  和  $45\sim 75\text{ }\mu\text{m}$  的两组真菌-矿物反应实验中,虽然最后一组比表面积明显增加, Mg 的溶出速率与最终溶出率却并没有明显上升的现象。

而在微观尺度上,化学溶蚀作用以矿物颗粒破裂面的扩大、破裂程度加深、溶蚀坑形成为主要特征,这些特征在颗粒的棱角处以及凹陷或突起处表现的更加强烈。图 6 为反应后图 5d 中蛇纹石颗粒中 Mg、Si 元素含量的比较, point-1 位于该颗粒未破裂的表面,该位置 Mg/Si 值为 1.487(接近 XRF 测定值的 1.504); point-2 位于溶蚀坑内部,该处 Mg/Si 值为 0.953,这说明在真菌溶蚀过程中, Mg 被优先溶出,该溶出过程破坏矿物晶格进而导致溶蚀坑的形成,与此同时部分 Si 则以  $\text{SiO}_2$  等形式在矿物表面沉淀

富集,并与其它次生矿物覆盖了反应面,降低反应速率,阻止了真菌的进一步溶蚀。

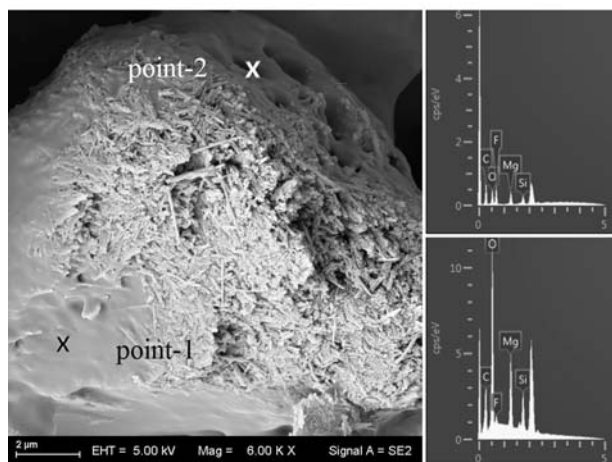


图6 溶蚀坑和未破裂表面 Mg、Si、O 原子比变化情况

Fig. 6 Share of Mg, Si, O in all masses on formal surface and at erosion site

除了化学侵蚀作用,真菌与矿物表面直接接触会产生生物机械力。菌丝生长过程中,其半球或椭圆体的尖端区域会形成高达  $10 \sim 20$  MPa 的内部渗透压力(Howard *et al.*, 1992),在这个压力下,蛇纹石的晶体结构将受到破坏,从而加快与加深矿物溶解。菌丝体完成对矿物的吸附后,在生长过程中会对矿物颗粒进行穿插包裹,促使矿物颗粒逐渐破碎,加快生物物理风化作用;并同时产生更多的活性反应面,促进化学溶蚀作用的进行(姚敏杰等,2011)。在野外情况下,*Talaromyces flavus* 菌丝长度为  $200 \sim 500 \mu\text{m}$ (李国庆等,1995),只有当被溶蚀矿物粒径小于此值时,*Talaromyces flavus* 才可能对其产生有效的穿插包裹作用,而有效的穿插包裹作用反过来促进菌丝体对矿物颗粒的机械破坏、化学溶蚀和酸解等协同作用。 $100 \mu\text{m}$  左右真菌溶解蛇纹石效率变化以及在样品形貌出现的矿物颗粒粒径  $\geq 100 \mu\text{m}$  与粒径  $< 100 \mu\text{m}$  的样品矿物表面菌丝分布、附着的差异,正反映了穿插包裹作用等物理作用的强度对真菌溶蚀蛇纹石效率的重要影响。

## 4 结论

根据实验结果,可以得到以下结论:

(1) 真菌 *Talaromyces flavus* 能有效地溶出蛇纹石中的 Mg,其中  $75 \sim 100 \mu\text{m}$  和  $45 \sim 75 \mu\text{m}$  组的

Mg 溶出率分别达到 35.91% 和 38.97%。

(2) *Talaromyces flavus* 对蛇纹石的溶蚀效率随着粒度的降低而增加,在粒度小于  $100 \mu\text{m}$  时,蛇纹石的溶出率得到了显著提高,粒度较小的两组真菌溶蚀实验 Mg 的最终溶出量较前者平均多出 70%~80%,在此基础上粒径进一步减小并未使其溶出率明显提高,因此该粒径可以作为真菌对蛇纹石溶解工业化应用的最优粒径。

(3) 根据溶液 pH 值的变化结合 Mg 的溶出率,可以将 *Talaromyces flavus* 作用下矿物的溶蚀过程分为 3 个阶段:反应初期真菌大量繁殖并产生有机酸,菌丝吸附矿物表面初步生长,Mg 被一定程度溶出,pH 值降低;反应中期菌丝生长,生物机械作用加强,pH 值随 Mg 溶出率变高而上升;反应后期随着营养的消耗和矿物表面可反应面积的降低,Mg 的溶出率、pH 值趋于平缓。

## References

- Alexander G, Maroto-Valer M M and Gafarova-Aksoy P. 2007. Evaluation of reaction variables in the dissolution of serpentine for mineral carbonation[J]. Fuel, 86(1): 273~281.
- Balland C, Poszwa A, Leyval C, *et al.* 2010. Dissolution rates of phyllosilicates as a function of bacterial metabolic diversity[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 74(74): 5 478~5 493.
- Broecker W S. 2007. Arithmetic 2 Climate Change: CO<sub>2</sub>[J]. Science, 1139585(1 371): 315.
- Burford E P, Fomina M and Gadd G M. 2003. Fungal involvement in bioweathering and biotransformation of rocks and minerals[J]. Mineralogical Magazine, 67(6): 1 127~1 155.
- Daghino S, Martino E, Vurro E, *et al.* 2008. Bioweathering of chrysotile by fungi isolated in ophiolitic sites[J]. Fems Microbiology Letters, 285(2): 242-9.
- Daghino S, Turci F, Tomatis M, *et al.* 2009. Weathering of chrysotile asbestos by the serpentine rock-inhabiting fungus *Verticillium leptobactrum*[J]. Fems Microbiology Ecology, 69(1): 132~141.
- Daghino S, Murat C, Sizzano E, *et al.* 2012. Fungal diversity is not determined by mineral and chemical differences in serpentine substrates[J]. PloS One, 7(9): e 44233.
- Gadd G M and Raven J A. 2010. Geomicrobiology of eukaryotic microorganisms[J]. Geomicrobiology, 27(6): 491~519.
- Gharieb M M and Gadd G M. 1999. Influence of nitrogen source on the

- solubilization of natural gypsum and the formation of calcium oxalate by different oxalic and citric acid-producing fungi[J]. *Mycological Research*, 103(4): 473~481.
- Holdren G R and Speyer P M. 1985. Reaction rate-surface area relationships during the early stages of weathering. I. Initial observations[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 49(3): 675~681.
- Holdren G R and Speyer P M. 1987. Reaction rate-surface area relationships during the early stages of weathering. II. Data on eight additional feldspars[J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 51(9): 2 311~2 318.
- Howard R J, Ferrari M A, Roach D H, *et al.* 1992. Penetration of hard substrates by a fungus employing enormous turgor pressures[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 88(24): 11 281-4.
- Krevor S C M and Lackner K S. 2011. Enhancing serpentine dissolution kinetics for mineral carbon dioxide sequestration[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 5(4): 1 073~1 080.
- Metz B. 2005. IPCC special report on carbon dioxide capture and storage [A]. Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva (Switzerland). Working Group III[C].
- Li Guoqing, Hu Shengyuan and Wang Daoben. 1995. Preliminary studies on the biology and parasitism of the mycoparasite *Talaromyces flavus* of *Sclerotinia sclerotiorum*[J]. *Microbiology China*, 22(3): 131~135 (in Chinese with English abstract).
- Li Z, Xu J, Teng H, *et al.* 2014. Bioleaching of lizardite by magnesium- and nickel-resistant fungal isolate from serpentinite soils-Implication for carbon capture and storage[J]. *Geomicrobiology Journal*, 32(2): 181~192.
- Önal G, Bulut A, Gül O, *et al.* 2005. Flotation of Aladag oxide lead-zinc ores[J]. *Minerals Engineering*, 18(2): 279~282.
- Sanna A, Wang X, Lacinska A, *et al.* 2013. Enhancing Mg extraction from lizardite-rich serpentinite for CO<sub>2</sub> mineral sequestration[J]. *Minerals Engineering*, 49: 135~144.
- Sugama T, Sabatini A R and Petrakis L. 1998. Decomposition of chrysotile asbestos by fluorosulfonic acid[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 37(37): 79~88.
- Tole M P. 1982. Factors Controlling the Kinetics of Silicate-water Interactions[M]. Pennsylvania State University.
- Wang X and Maroto-Valer M M. 2011. Dissolution of serpentine using recyclable ammonium salts for CO<sub>2</sub> mineral carbonation[J]. *Fuel*, 90(3): 1 229~1 237.
- Wilson M J, Jones D and McHardy W J. 1981. The weathering of serpentinite by *Lecanora atra*[J]. *The Lichenologist*, 13(2): 167~176.
- Welch S A and Ullman W J. 1993. The effect of organic acids on plagioclase dissolution rates and stoichiometry[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 57(12): 2 725~2 736.
- Yao Minjie and Lian Bin. 2011. Experimental study of weathering of serpentine and olivine by *Aspergillus fumigatus*[J]. *Acta Geologica Sinica*, 85(9): 1 477~1 485(in Chinese with English abstract).

## 附中文参考文献

- 李国庆, 胡圣远, 王道本. 1995. 菌核寄生菌 *Talaromyces flavus* 的生物学特性及寄生菌核规律初探[J]. *微生物学通报*, 22(3): 131~135.
- 姚敏杰, 连 宾. 2011. 烟曲霉对蛇纹石和橄榄石风化作用的试验研究[J]. *地质学报*, 85(9): 1 477~1 485.