

# 微生物作用下玄武岩的溶解：粘附作用和温度的影响

周跃飞<sup>1,2</sup>, 王汝成<sup>2</sup>, 陆现彩<sup>2</sup>

(1. 南京农业大学 资源与环境科学学院, 江苏 南京 210095; 2. 内生金属成矿机制研究国家重点实验室, 南京大学 地球科学与工程学院, 江苏 南京 210093)

**摘要:** 使用透析的方法, 设计实验探讨了多粘芽孢杆菌(*Paenibacillus polymyxa*) 的粘附对玄武岩中矿物溶解的影响, 同时通过改变实验温度, 探讨了岩石的微生物溶解与温度的关系。10 d 的实验结果表明, 在 30 °C 条件下, 细菌 *P. polymyxa* 及其代谢产物对玄武岩的溶解有显著促进作用, 加速了橄榄石中 Mg、Fe、Mn 的溶出及辉石和长石中 Ca、Al 的溶出, 而在 5 °C 条件下, 这种促进作用不明显。细菌及其代谢物的粘附能加速 Mg、Fe、Mn 的溶出, 抑制 Ca 的溶出, 这种不同的影响与两组元素的溶出机制不同, 且粘附对各溶出机制的影响也不同有关, Al 的溶出受粘附作用的影响较小。低温条件下, 粘附作用对玄武岩中各元素的溶出基本无影响。

**关键词:** 玄武岩; 多粘芽孢杆菌; 粘附; 溶解; 温度影响

中图分类号: P588.14<sup>+</sup>5; P579

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2009)06-0565-10

## Microbial-mediated dissolution of basalt: Effects of bacterial adhesion and temperature

ZHOU Yue-fei<sup>1,2</sup>, WANG Ru-cheng<sup>2</sup> and LU Xian-cai<sup>2</sup>

(1. College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; 2. State Key Laboratory for Mineral Deposits Research, School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

**Abstract:** Employing the dialysis method, the authors designed experiments to probe into the effect of adhered *Paenibacillus polymyxa* on the dissolution of minerals within basalt as well as the effect of temperature on such adhesion-mediated dissolution. The results of ten days' experiment show that the dissolution of basalt is highly promoted by *P. polymyxa* and its metabolites at 30 °C, with Fe, Mg and Mn being released mainly from olivine and Ca and Al from augite and feldspar. At 5 °C, however, the promotion is very insignificant. Adhered bacteria and metabolites are advantageous to the release of Mg, Fe and Mn but disadvantageous to that of Ca. The reason is that these two groups of elements are released through different mechanisms which are diversely affected by adhered bacteria. The release of Al is insignificantly affected by the adhesion of bacteria. At 5 °C, the adhered bacteria have no effect on element release.

**Key words:** basalt; *Paenibacillus polymyxa*; adhesion; dissolution; effect of temperature

玄武岩是地球上出露最广、数量最多的火山岩, 广泛分布于大洋底部和火山岛, 以及印度德干高原、美国哥伦比亚河流域等广大的大陆地区(都城秋穗等, 1984)。在矿物组合上, 玄武岩主要由辉石和基性斜长石(有时含较丰富的橄榄石)以

及少量的钛、铁氧化物(磁铁矿、钛铁矿、赤铁矿等)、正长石、石英或似长石、沸石等组成(孙霖等, 1985)。玄武岩的广泛分布和矿物组合特征决定了它的风化是一种重要的地质作用过程, 这一过程无论对研究成岩、成矿作用过程, 还是研究地

收稿日期: 2009-08-31; 修订日期: 2009-10-10

基金项目: 国家重点基础研究发展计划“973”资助项目(2007CB815603); 国家自然科学基金资助项目(40802015)

作者简介: 周跃飞(1977-), 男, 博士后, 主要从事地质微生物学和环境矿物学研究工作, E-mail: yfzhou@njau.edu.cn; 通讯作者: 王汝成, E-mail: rcwang@nju.edu.cn

球及其他星体的物质循环(元素、大气等)均具有重要的意义(Schwarz, 1997; Dessert *et al.*, 2003; 马金龙等, 2007; 唐艳等, 2008; 王志兵等, 2008; Rasmussen *et al.*, 2009), 因此, 玄武岩的风化受到越来越多的研究者的关注。

大量研究表明, 在自然和实验室条件下, 玄武岩的风化分解除了受非生物因素(pH 值、温度、水活度等)的影响, 生物及其代谢产物的作用同样不可忽视(Drever, 1994; Moulton *et al.*, 2000; Oelkers and Gislason, 2001; Neaman *et al.*, 2005)。其中, 微生物作用下玄武岩的溶解是一种广泛存在的作用过程, 已有研究表明, 在该过程中, 微生物及其代谢产物能同时通过质子交换(酸解)和配体络合作用加速玄武岩的溶解(Brady *et al.*, 1999; Oelkers, 2001; Daughney *et al.*, 2004; Neaman *et al.*, 2005; Wu *et al.*, 2007)。在自然界, 微生物通常以粘附于矿物/岩石表面的形式存在(Brisou, 1995; Madigan *et al.*, 2000), 有的研究认为, 当微生物粘附于矿物/岩石表面时, 质子交换和配体络合作用均会增强, 从而矿物/岩石的溶解速率也会增强(Bennett *et al.*, 1996; Barker *et al.*, 1998; Rogers and Bennett, 2004; Lian *et al.*, 2008)。然而也有研究发现, 微生物对矿物/岩石的溶解并不只具有促进作用, 有时也具有抑制作用, 这种抑制作用在很大程度上与微生物粘附于矿物/岩石表面时, 抑制其表面反应有关(Lüttge and Conrad, 2004; Benzerara *et al.*, 2004; Santelli *et al.*, 2001; Welch and Banfield, 2002)。当微生物粘附于矿物/岩石表面时, 可以通过多种方式抑制其溶解, 如加速淋滤层的形成、抑制元素的释放、阻止溶蚀坑的形成等。然而在玄武岩的微生物风化分解研究中, 目前此方面的报道还比较匮乏。

因此, 本研究通过透析的方法, 阻止大分子代谢物及细菌与岩石接触, 通过对比接触和不接触条件下玄武岩中元素溶出的速率差异, 探讨微生物及其大分子代谢物在与玄武岩接触时对岩石中不同矿物溶解的影响。此外, 由于温度不仅是微生物生长的重要条件, 也是玄武岩溶解的重要参数, 因此, 研究同时通过改变实验温度探讨低温条件下(5℃)微生物的粘附作用对玄武岩溶解的影响。

## 1 实验材料及方法

### 1.1 实验材料

实验使用的岩石样品为山东昌乐方山碱性橄榄玄武岩, 斑晶及基质矿物组成主要为橄榄石、辉石、斜长石和钛磁铁矿, 此外还含少量的磷灰石等矿物, 其中橄榄石发生了较强烈的伊丁石化(董泽龙等, 2007)。全岩化学成分及矿物电子探针成分分析结果见周跃飞等(2008)的相关文章。根据计算, 玄武岩中橄榄石、辉石和斜长石的质量比为 1:1:2.2。橄榄石同时富 Mg 和 Fe, 二者的原子数比约为 2.6, 辉石为普通辉石, Mg、Ca、Fe、Al 含量均较高, 其原子数比约为 3:4:1:1.4, Na、K 含量低; 长石为基性斜长石, Ca 含量高, Na、K 含量低。将新鲜玄武岩粉碎后过筛, 选取 100~200 目( $d = 0.075 \sim$

0.150 mm)部分用于实验, 同时, 制备单面抛光的玄武岩光片若干(0.8 cm×0.8 cm×0.3 cm), 用于观察实验前后的表面微形貌变化。实验前先用酒精将玄武岩粉末和光片超声清洗 5 次(每次 10 min), 再于 pH=4.0 的盐酸中浸泡 2 h, 最后用二次水超声清洗, 直至清洗液澄清(同时 pH 值达到 7.0, 否则仍需继续清洗)。将清洗后的玄武岩粉末及光片在 70℃条件下烘干备用。由于玄武岩蚀变产生的粘土矿物含量较低, 且粉末样品粒度较大, 故在清洗的全过程中未见粉末的结块现象, 这对样品清洗和随后实验的正常开展均是有利的。

选用多粘芽孢杆菌(*Paenibacillus polymyxa*)进行实验, 菌种购自中国普通微生物菌种保藏管理中心(CGMCC), 菌种编号 1.224。该菌为化能异养型兼性厌氧菌, 其代谢能产生多种有机酸(甲酸、乙酸、乳酸、柠檬酸等)及多聚糖。菌种经牛肉蛋白培养基(牛肉膏 3、蛋白胨 10、NaCl 5) (g·L<sup>-1</sup>)进行活化和多次培养后保存待用。

为了阻止细菌及其高分子量代谢物与玄武岩接触, 采用透析袋包裹玄武岩颗粒和光片的方法开展溶解实验。选用的纤维素聚酯透析袋孔径为 14 000(即只能透过分子量低于 14 000 的物质, 物理孔径约 25 Å)。由于多粘芽孢杆菌代谢产生的高分子量代谢物主要为分子量在 17 000 左右的中性糖(约占多聚糖质量的 80%)和糖醛酸(约 16.5%) (Santhiya *et al.*, 2002), 因此在使用透析袋的条件下, 细菌及多聚糖均不能通过透析袋与矿物接触。实验前, 为了激活和清洁透析袋, 根据生产厂家(Union Carbide)的建议, 将透析袋进行了预处理, 方法为: 首先将透析袋在 pH=8.0 的 NaHCO<sub>3</sub>(0.24 mol/L)+EDTA(1 mmol/L)溶液中煮沸 10 min, 用去离子水清洗后, 再于 pH=8.0 的 EDTA(1 mmol/L)中煮沸 10 min, 用二次水多次清洗后, 保存于 4℃条件下的二次水中备用。

### 1.2 30℃实验

主要开展了 3 组该温度条件下的实验: ①无菌; ②有培养基、有菌、无透析袋; ③有培养基、有菌、使用透析袋。实验步骤为: 选取玄武岩样 9 份, 每份含 2 g 粉末样和 1 块光片, 其中 3 份装入透析袋, 以橡皮筋封口, 将 9 份样品连同配制好的改性布氏培养基(蔗糖 5、酵母膏 0.2、(NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 1) (g/L)及一定量的二次水在 121℃条件下蒸汽灭菌 20 min, 将灭菌并冷却后的培养基分装入灭菌聚乙烯三角瓶中, 每瓶 100 mL, 总共装 6 瓶, 其中的 3 只加入未装入透析袋的灭菌样品, 另 3 只加入装入透析袋的灭菌样品, 将灭菌二次水装入 3 只灭菌聚乙烯三角瓶中, 每瓶 100 mL, 每瓶中分别加入一份无透析袋的灭菌样品, 量取 2 mL 经牛肉蛋白培养基培养了 18 h 的 *P. polymyxa* 菌液, 以 5000 r/min 的速度离心 10 min 后, 使用灭菌二次水离心清洗沉淀 5 遍, 最后将之接种到含培养基的三角瓶中, 其余 5 个含培养基三角瓶中以同样方式接菌, 将 3 组共 9 个三角瓶置于恒温摇床上, 在 30℃及 100 r/min 的条件下进行 10 天培养实验。

在表征岩石在微生物作用下的溶解时, 目前使用的方法主要有元素浓度测定、形貌变化观察及粉末破碎情况观察等

(Daughney *et al.*, 2004; Puente *et al.*, 2006; Wu *et al.*, 2007) 本研究以测定元素浓度及岩石的表面微形貌变化为主要表征手段。溶液取样分别在 0、18、48、96、168 和 240 h 时进行, 每次取实验溶液 5 mL, 测定 pH 值后用 10% HNO<sub>3</sub> 酸化至  $1 < \text{pH} < 2$ , 静置 1 h 后在高速离心机上以 10 000 r/min 的速度离心 10 min, 取上清液进行元素浓度测定。采用电感耦合等离子体发射光谱(ICP-AES)测定 Mg、Ca、Fe、Mn、Al、Si 等 6 种元素的浓度, 仪器型号为 JY38S, 检测限为(nmol/L): Mg 2.9、Ca 0.7、Fe 7.5、Mn 3.6、Al 150、Si 110, 测试在南京大学生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室完成。

实验完毕后, 将光片取出进行冷冻干燥(干燥时间为 24 h)将干燥后的光片喷 Pt 处理后进行扫描电镜观察。扫描电镜型号为 JSM-6300, 加速电压为 20 kV, 测试在南京师范大学分析测试中心进行。

### 1.3 5℃ 实验

共开展了接触和透析两组实验。溶解实验开始前的实验操作与 30℃ 条件下相同。

由于周跃飞等(2007)在同等培养条件下测得 *P. polymyxa* 在 18 h 时达到生长稳定期, 因此本研究人为控制这一时间点为改变实验温度的时间。具体做法为: 将准备好的两组 6 个三角瓶置于恒温摇床上, 在 30℃、100 r/min 的条件下培养 18 h 后, 调节摇床温度为 5℃, 在此温度条件下进行培养直至第 10 d 实验结束。

分别在 0、18、48、96、168 和 240 h 时抽取实验溶液用于

测试元素浓度, 取样及分析测试方法与 30℃ 实验相同。

## 2 结果

### 2.1 pH 值

图 1 为实验的 pH 值-时间曲线。从图 1a 可看出, 对无菌实验, 整个实验过程中 pH 值变化不大, 溶液保持近中性。而对接触和透析实验, pH 值在实验过程中变化均较大, 并且其变化特征具有相似性, 具体表现为: 在实验初始 18 h 迅速降低, 在 18~96 h 的时间段内仍持续下降, 但下降速率趋缓, 96 h 时达到最低, 约 4.5, 96 h 后开始缓慢上升, 直到实验结束, 此时两组实验的 pH 值均上升到 5.0 左右。相对于无菌条件下 pH 值的微量变化, 有菌条件下溶液 pH 值的大幅度降低表明细菌的生长是导致酸度增加的主因, 而随后 pH 值的上升则表明酸产生了消耗, 由于溶液中除细菌外仅有玄武岩存在, 因此这种 pH 值的上升只可能与玄武岩溶解耗酸有关。

从图 1b 可看出, 在 5℃ 实验中, 接触和透析实验的 pH 值变化特征也具有相似性。在初始 18 h 溶液 pH 值迅速降低, 18 h 时约为 5.3, 当将实验转入 5℃ 条件下时, 接触和透析实验的 pH 值均发生了持续但缓慢的上升, 直至实验结束, 此时接触实验中 pH 值上升到 6.0 左右, 而透析实验中上升到 5.8 左右。这种溶液 pH 值的降低同样与细菌生长产酸有关, 而 pH 值的上升则与玄武岩的溶解耗酸有关。

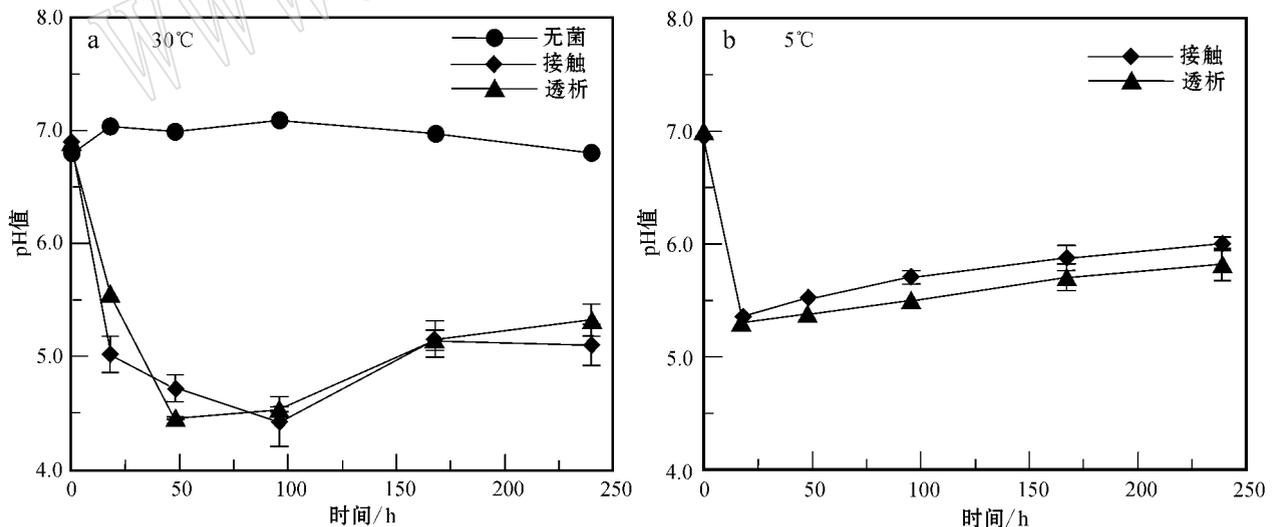


图 1 实验溶液的 pH 值变化

Fig. 1 Variations of pH in experimental solution

### 2.2 元素浓度

图 2 为 30℃ 实验溶液中各元素浓度变化曲线。可以看出, 除 Si 外(图 2f), 其余元素的浓度在无菌实验中增加不多, 而这些元素在有菌实验中的浓度增加均显著高于无菌实验。

各元素在有菌实验中的浓度变化特征为:

Mg、Fe、Mn 具有相似的浓度变化特征, 实验结束后, 其浓度增加均为有菌实验大于无菌实验, 接触实验大于透析实验(图 2a, b, c)。此时 Mg 在透析实验中的浓度约为接触实验

中浓度的 65%、Fe 约为 18%、Mn 约为 85%。而无论是在接触还是透析实验中，Mg、Fe、Mn 的浓度增加量均为 Mg 最高，Fe 次之，Mn 最少。从浓度变化过程上看，在初始 18 h，各种元素浓度的增加均较少（透析实验中的 Mg 除外）；18 h 后，3 种元素浓度都出现了较快增长。

Ca 的浓度变化特征与上述 3 种元素不同，主要表现在实验结束时，Ca 在透析实验中浓度增加更多，接触实验中增加较少，仅略高于无菌实验，实验结束时接触实验中 Ca 的增加

量仅约为透析实验中的 22%；从过程上看，透析实验中 Ca 在开始 18 h 即开始了浓度的快速增长，并且在整个实验过程其一直保持较高的浓度增长水平，而在接触实验中，其增长速率一直较低。由于实验过程中透析袋阻止了细菌与岩石的直接接触，因此，导致 Ca 在两种实验条件下其浓度变化特征与 Mg、Fe、Mn 不同的原因，是与细菌与岩石接触时对不同元素的溶出影响不同有关的，深入的探讨将在后文的讨论部分进行。

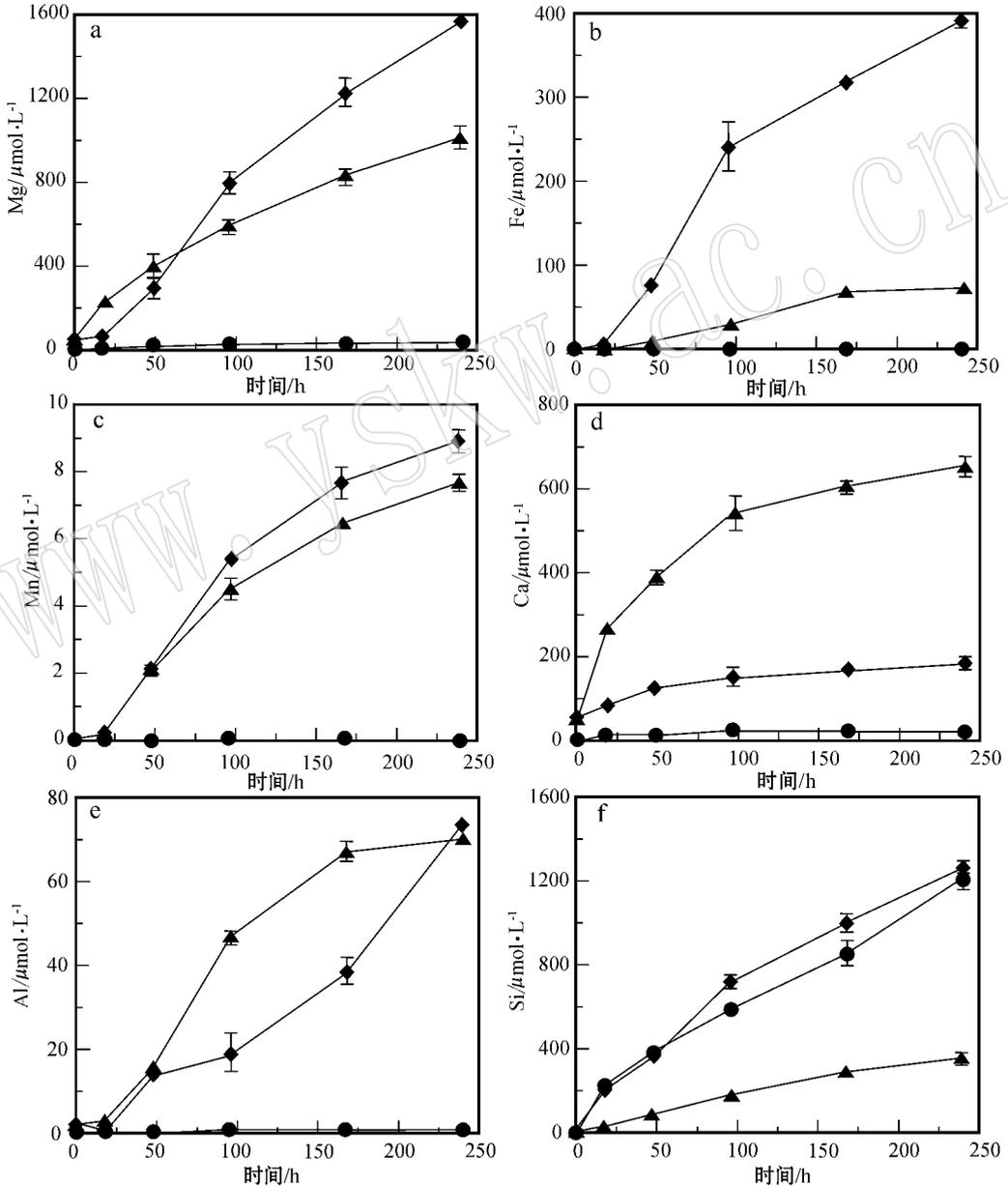


图 2 30℃ 实验的元素浓度变化

Fig. 2 Variations of element concentration in 30 °C experiment

●—无菌；◆—接触；▲—透析  
●—control；◆—contact；▲—dialysis

Al 也表现出了与其他元素不同的浓度变化特征。实验结束时,接触实验和透析实验中元素浓度差异不大,但都远高于无菌实验。从浓度变化过程上看,初始 18 h,Al 浓度变化不大,18 h 后浓度出现了较快增长,一直到实验结束。

Si 的浓度变化特征具有特殊性,在无菌条件下,在实验的 10 d 时间里其浓度出现了持续的较快增长。接触实验中的 Si 浓度在实验结束时与无菌实验相似,并且其浓度增长过程也与无菌实验相似。与前两组实验不同,透析实验中 Si 浓度增加缓慢,实验结束时其浓度仅约为无菌和接触实验的

1/4。这表明了透析袋确实能有效阻止物质的扩散。

图 3 为 5 °C 实验中各元素浓度变化曲线。可以看出,各元素浓度变化可以明显分为 18 h 前和 18 h 后两个阶段。在初始 18 h 的 30 °C 实验条件下,各元素浓度均有一定程度的升高(由于与图 2 的纵坐标取值不同,所以在图 2 中很小的上升在图 3 变得相对较大);在 18 h 后的 5 °C 条件下,各元素在两种实验条件下的浓度增长速率均出现了降低,由原来相对较快的增长变为缓慢增长(Al 甚至出现了一定的降低)。对比接触和透析实验,除 Fe 在 18~48 h 的时间段内浓度增

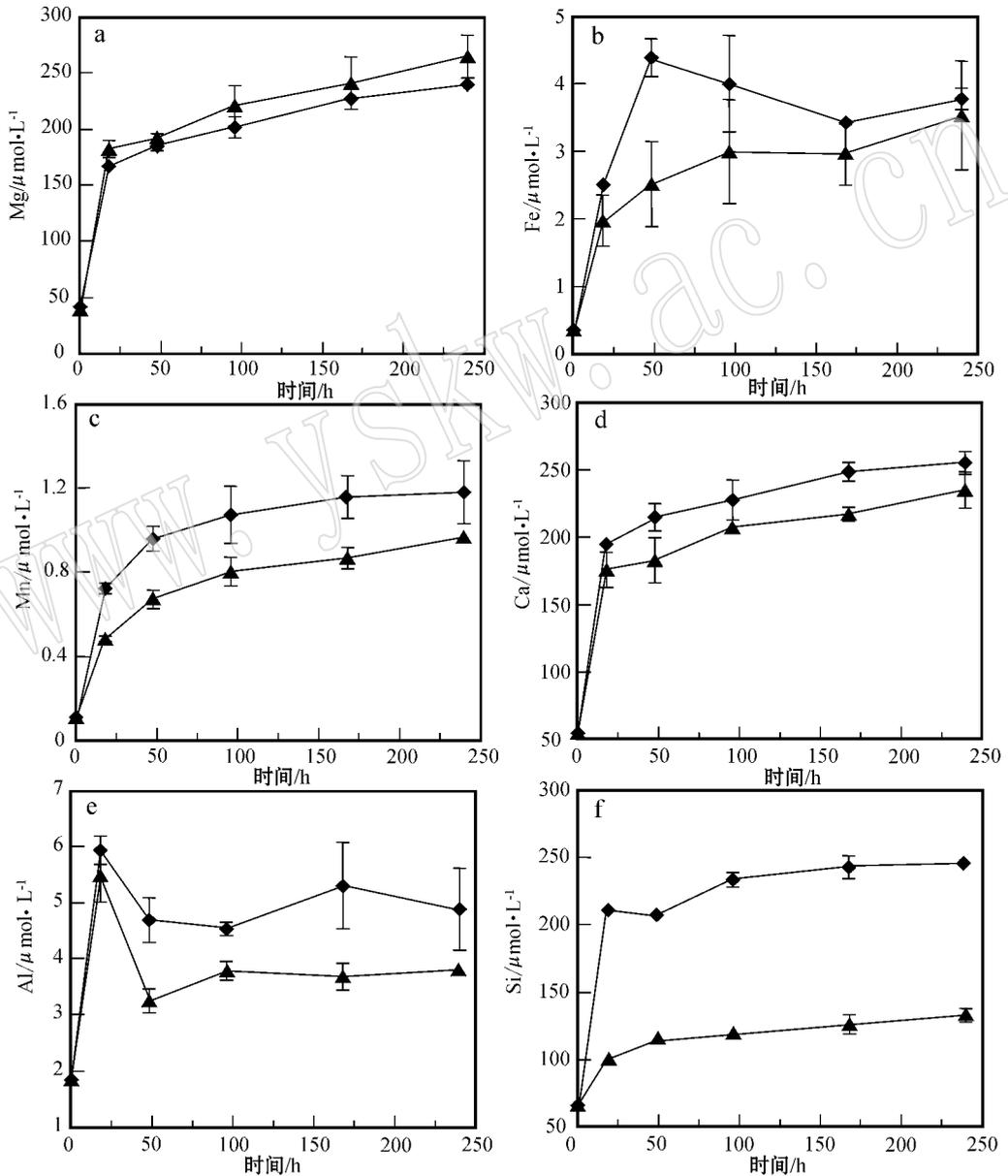


图 3 5 °C 实验的溶液元素浓度变化

Fig. 3 Variations of element concentration in 5 °C experiment

◆—接触; ▲—透析  
◆—contact; ▲—dialysis

长速率不一致(接触较快,透析较慢),其他元素的浓度变化速率在两种实验条件下均是一致的。该温度条件下各元素浓度的变化与 30 °C 条件下的差异性表明温度是影响玄武岩微生物溶解的重要条件。

### 2.3 表面形貌

由于实验使用的玄武岩主要由橄榄石、辉石和长石组成,因此本研究重点对实验前后的橄榄石、辉石和长石这 3 种造岩矿物的形貌变化进行了扫描电镜观察。图 4 为 30 °C 时实验前后的玄武岩微形貌观察结果。由图 4a 可见,实验使用的玄武岩在矿物的边部有一定的蚀变,其中尤以橄榄石为甚,其边部发生了较强烈的伊丁石化。图 4b 为无菌溶解 10 d 的结果,可以显示其抛光面仍较光滑,而由于 SEM 分析时随机选点的原因,该图中在各矿物接触的位置,各矿物的溶蚀程度反而不如图 4a 未溶解前的。由此可见,10 d 的无菌溶解并未导致玄武岩形貌的剧烈改变,这种改变远不如玄武岩的前期蚀变剧烈。

图 4c~图 4e 为接触实验的结果,可以看出,在该实验条件下,细菌广泛粘附于橄榄石、辉石和长石表面。在橄榄石的光滑表面,仅见有微生物粘附,少见溶解成因的形貌(图 4c);而从图 4d 可以看出,在辉石和长石的结合部,出现了比较明显的辉石溶蚀的痕迹,而在光滑表面,仅见有细菌粘附,少见溶蚀痕迹。值得注意的是,除了出现溶蚀痕迹,在接触实验中还形成了无定形的沉淀,这些沉淀物多与菌体一起构成了细菌-沉淀物复合体(图 4e)。

图 4f~图 4h 分别为透析实验后的橄榄石、辉石和长石表面形貌特征,与接触实验不同,透析实验后各矿物表面没有出现细菌的粘附(这表明本实验使用的透析袋对阻止细菌的透过是有效的),也没有相应的沉淀产生。3 种矿物除橄榄石边部因溶解而变得圆滑,同时在新鲜表面出现了一些明显的蚀坑外,辉石和长石的抛光面均很少有溶蚀现象。

## 3 讨论

### 3.1 玄武岩的微生物溶解机理

在本研究中,细菌生长产生了大量有机/无机酸,致使溶液 pH 值一度降到了 5.0 以下(图 1),许多研究表明,在这样的酸性条件下,玄武岩中的橄榄石、辉石和长石均能通过质子交换作用发生溶解(Siegel and Pfannkuch, 1984; Amrhein and Suarez, 1988; Wogelius and Walther, 1991; Oxburgh *et al.*, 1994; Chen and Brantley, 2000; Duro *et al.*, 2005),而玄武岩中的 Fe、Mg、Mn 等元素,也已被证明能主要通过细菌及其代谢物的络合作用从矿物中溶出(Hersman *et al.*, 1995; Lienmann *et al.*, 2000; Brantley *et al.*, 2004; Duckworth and Sposito, 2007)。可见,在本研究 *P. polymyxa* 存在的条件下,质子交换和配体络合均存在,是加速玄武岩溶解的两种主要机制,只是对岩石中不同矿物和矿物中的不同元素,两种作用机制在强度上会有差别。

### 3.2 细菌粘附对玄武岩溶解的影响

当不考虑沉淀生成对溶液中可溶性元素浓度的影响时(事实上如图 4e 所示,实验是有沉淀产生的,但因为没进入溶液,所以可初步看作未溶出),各元素的最终浓度即为其溶出量,因此,30 °C 条件下接触和透析实验中的元素浓度差异反映了细菌粘附对其溶出的影响。其中,接触实验中 Fe 的溶出远高于透析实验,这表明 Fe 的溶出主要是通过细菌及多聚糖的粘附进行的。接触实验中的 Mg 和 Mn 相对于透析实验也有一定程度的增加,这表明细菌的粘附同样能促进两种元素的溶出,但未粘附的物质同样对其溶出有较大贡献。与这 3 种元素不同的是 Ca 在接触实验中的浓度远低于透析实验,这表明细菌的粘附抑制了 Ca 的溶出。对于 Al,由于实验结束后两组实验中的浓度差别不大,可以认为细菌的粘附对其溶出影响不大。虽然 Si 在接触实验中的浓度远高于透析实验,但由于无菌实验中其浓度与接触实验相似,远高于透析实验,因此难以通过透析方法考察细菌粘附对 Si 溶出的影响,推测出现这一特殊现象的原因是玄武岩的前期蚀变生成了富 Si 的纳米级物质(如橄榄石的伊丁石化产物),这些物质进入水溶液中,以胶体的形式存在,从而使得测试的结果为溶液富 Si,而由于透析袋阻止了 Si 胶体的透过,因此 Si 在透析实验中浓度较低。

当细菌粘附于矿物/岩石表面时,通常会改变其粘附环境(如生物膜)的理化条件(酸度、水活度、配体浓度等)(Bennett *et al.*, 1996; Barker *et al.*, 1998),这种改变无疑将影响该微环境中质子交换和配体络合的效率。已有不少研究认为,铁的(氢)氧化物的溶解通常是通过微生物及其代谢物的络合作用进行的(Forsythe *et al.*, 1998; Yoshida *et al.*, 2002; Wiederhold *et al.*, 2006),据此推测在本研究中,络合作用可能也是 Fe 溶出的主要机制,而微生物的粘附作用显著增强了该作用。而对 Mg 和 Mn,也有相关研究发现配体络合作用对其从矿物中的溶出有较大影响(Pokrovsky *et al.*, 2005; Duckworth and Sposito, 2007),因此,有理由认为细菌的粘附同样增强了对矿物中 Mg 和 Mn 的络合,加速了其溶出。实际上,由于菌体的细胞壁和大分子代谢物中含有大量络合基团,所以细菌和矿物/岩石的充分接触能增加络合的机会,从而加速被络合元素的溶出。

而细菌粘附对 Ca 溶出的抑制作用,很可能是由于 Ca 主要通过质子交换作用溶出,因此在该研究中,细菌及多聚糖的粘附作用对质子交换反应的促进作用并不大,相反却限制了 Ca 向溶液中的扩散和 H<sup>+</sup> 向粘附了细菌的矿物表面的扩散,阻碍了其溶出。

电子探针成分分析结果(周跃飞等, 2008)显示,Fe、Mg、Mn 3 种元素主要赋存于橄榄石和辉石中,因此,3 种元素的浓度变化仅与橄榄石和辉石的溶解有关。又由于 3 种元素在两种矿物中的质量百分含量均接近 3:1,并且矿物总量比约为 1:1,因此可以大致算得玄武岩中的 Fe、Mg、Mn 在橄榄石和辉石中的含量比均为 3:1。由前人的研究知道,在微生物

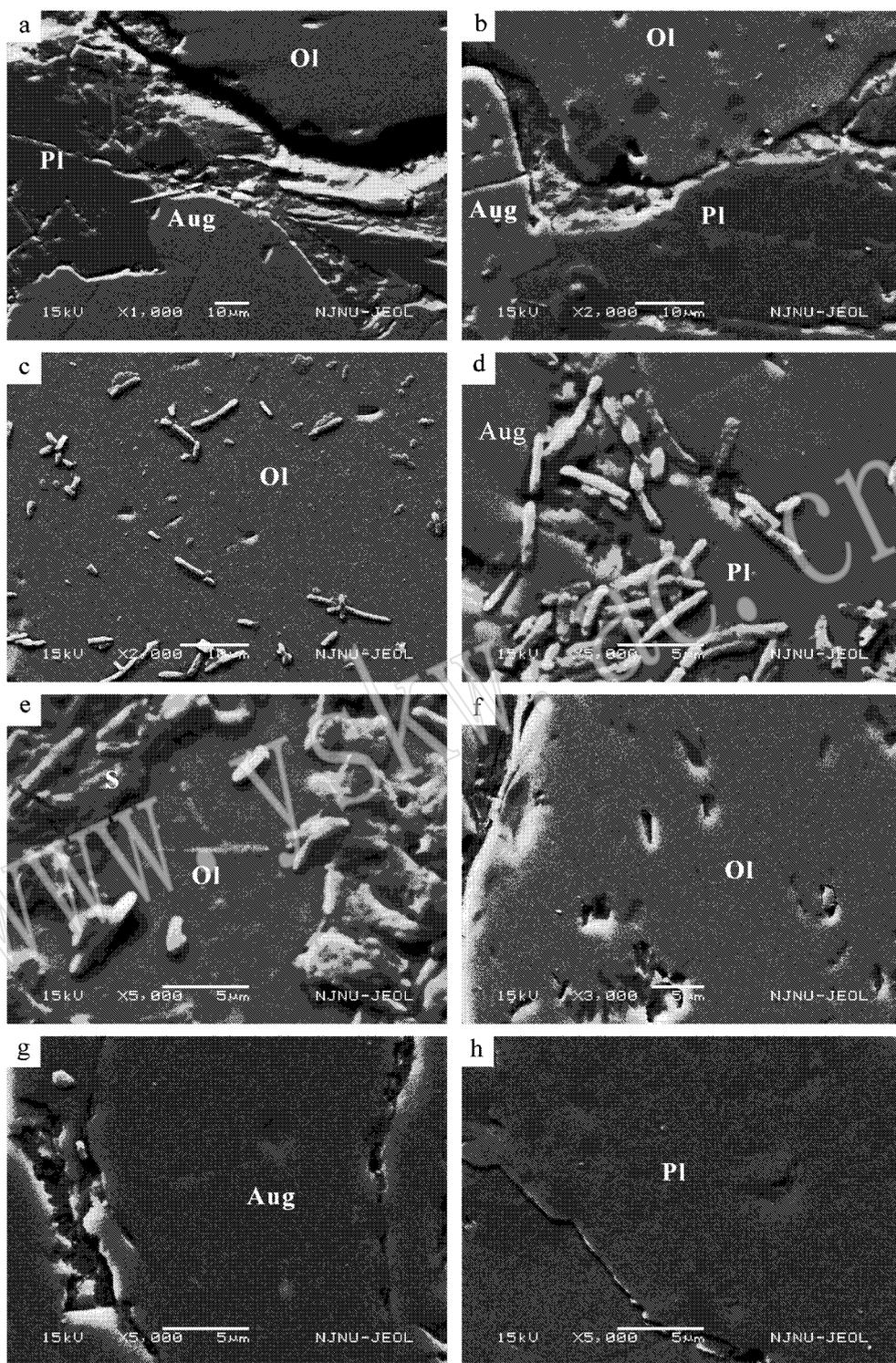


图 4 实验前后玄武岩及相关造岩矿物的微形貌特征

Fig. 4 Micromorphologies of basalt and related rock-forming minerals before and after dissolution experiments  
 a—玄武岩原岩；b—无菌溶解后的玄武岩；c—接触溶解后的橄榄石；d—接触溶解后的辉石和长石；e—接触实验中形成的细菌-沉淀复合体；f—透析溶解后的橄榄石；g—透析溶解后的辉石；h—透析溶解后的长石；S—细菌-沉淀复合体；Ol—橄榄石；Aug—辉石；Pl—斜长石  
 a—original basalt；b—basalt after control experiment；c—olivine after contact experiment(CE)；d—augite and plagioclase after CE；e—complex of bacteria-precipitation in CE；f—olivine after dialysis experiment(DE)；g—augite after DE；h— plagioclase after DE；S—complex of bacteria-precipitation；Ol—olivine；Aug—augite；Pl—plagioclase

物(尤其是 *P. polymyxa*)作用下,玄武岩中各矿物溶解能力强弱依次为橄榄石 > 辉石 > 长石(Eick *et al.*, 1996; 周跃飞等, 2008)。因此,有理由认为溶液中 Fe、Mg、Mn 浓度的升高主要与橄榄石的溶解有关。粘附的细菌和代谢物通过增强配体络合作用加速了橄榄石的溶解。

由于 Ca 在辉石和长石中的含量大致相等,而辉石的溶解速率大于长石,所以可能 Ca 浓度的增加与辉石的溶解关系较大(但不能忽视长石溶解的贡献)。由此可见,粘附的细菌可能通过抑制质子交换反应,阻止了辉石的进一步溶解,在细菌粘附抑制辉石溶解方面, Benzerara 等(2004)也曾有过相关报道。

对 Al, 由于其主要赋存于长石中,但是长石的溶解速率不如辉石,所以可能两种矿物的溶解均对 Al 浓度的增加有贡献,由于 Al 的浓度在两组实验中变化不大,所以通过 Al 浓度特征,很难考察细菌粘附对辉石和长石溶解的影响。

因此,可以初步做出如下判断:在本研究的实验条件下,细菌及其大分子代谢物在玄武岩表面的粘附会抑制质子交换反应,进而阻止辉石中 Ca 的溶出,但能促进配体络合反应,加速橄榄石中 Fe、Mg、Mn 的溶出。

### 3.3 低温条件对玄武岩微生物溶解的影响

在 5 °C 的实验条件下,有菌溶液的 pH 值变化明显不同于 30 °C 实验(图 1)。30 °C 条件下由于温度适宜,细菌在生长达到稳定期后,仍有代谢行为并产生酸,使 pH 值持续降低,直至 4 d 后岩石溶解消耗酸的量大于细菌代谢产酸量后方出现 pH 值上升现象。而在 5 °C 实验中,实验一达到该温度, pH 值马上上升,这表明在该温度条件下细菌的代谢能力很弱,产酸能力不如耗酸能力,致使 pH 值出现上升。而对比图 2 和图 3 可见,无论接触还是透析实验中,低温条件下玄武岩的溶解均远弱于高温条件。

尽管 5 °C 条件下细菌及其代谢物对玄武岩的溶解影响较小,但从溶液浓度看,在该温度下, Fe、Mg、Mn、Ca 等仍有一定的溶出,并且各元素的溶出速率在接触和透析实验中相似,由此可见,低温条件下微生物的粘附没有改变质子交换和配体络合的速率,因此对各元素的溶出速率无影响。推测其原因,一方面可能在低温条件下,矿物本身的溶解能力较差,质子交换和配体络合的作用都不强,细菌粘附导致的很小的溶解速率变化在图中无法反映;另一方面,可能与细菌的活性有关,在低温条件下,细菌代谢能力很弱,粘附的细菌不会持续产生能加速玄武岩溶解的酸和络合物。

## 4 结论

通过使用透析方法,开展微生物作用下玄武岩的 10 d 溶解实验,研究得出了以下一些初步认识:

(1) 在 30 °C 的实验条件下,细菌 *P. polymyxa* 及其代谢产物能同时通过质子交换和配体络合两种方式加速玄武岩的溶解,促进橄榄石中 Mg、Fe、Mn 的溶出及辉石与长石中

Ca、Al 的溶出。

(2) 细菌及其代谢物的粘附能加速 Mg、Fe、Mn 的溶出,抑制 Ca 的溶出,这种不同的影响可能与两组元素的溶出机制不同,而粘附对各溶出机制的影响也不同有关,粘附对 Al 的溶出影响不大。

(3) 低温条件下,细菌及其代谢产物对玄武岩溶解的影响不大,而粘附作用对各元素的溶出基本无影响。

## References

- Amrhein C and Suarez D L. 1988. The use of a surface complexation model to describe the kinetics of ligand-promoted dissolution of anorthite[J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 52: 2785~2793.
- Barker W W, Welch S A, Chu S, *et al.* 1998. Experimental observations of the effects of bacteria on aluminosilicate weathering[J]. *Am. Mineral.*, 83: 1551~1563.
- Bennett P C, Hiebert F K and Choi W J. 1996. Microbial colonization and weathering of silicates in a petroleum-contaminated groundwater[J]. *Chem. Geol.*, 132(1~4): 45~53.
- Benzerara K, Barakat M, Menguy N, *et al.* 2004. Experimental colonization and alteration of orthopyroxene by the pleomorphic bacteria *Ramlibacter tataouinensis*[J]. *Geomicrobiol. J.*, 21: 341~349.
- Brady P V, Dorn R I, Brazel A J, *et al.* 1999. Direct measurement of the combined effects of lichen, rainfall, and temperature on silicate weathering[J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 63(19~20): 3293~3300.
- Brantley S L, Liemann L J, Guynn R L, *et al.* 2004. Fe isotopic fractionation during mineral dissolution with and without bacteria[J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 68(15): 3189~3204.
- Brisou J F. 1995. *Biofilms: Methods for Enzymatic Release of Microorganisms*[M]. CRC Press, Florida, USA, 204.
- Chen Y and Brantley S L. 2000. Dissolution of forsteritic olivine at 65 °C and 2 < pH < 5[J]. *Chem. Geol.*, 165: 267~281.
- Daughney C J, Rioux J P, Fortin D, *et al.* 2004. Laboratory investigation of the role of bacteria in the weathering of basalt near deep sea hydrothermal vent[J]. *Geomicrobiol. J.*, 21: 21~31.
- Dessert C, Dupré B, Gaillardet J, *et al.* 2003. Basalt weathering laws and the impact of basalt weathering on the global carbon cycle[J]. *Chem. Geol.*, 202: 257~273.
- Dong Zelong, Chen Xiaoming, Hu Wenxuan, *et al.* 2007. Coronas of corundum megacrysts in the Neogene Changle basalt and its forming mode[J]. *Acta Petrol. Sinica*, 23(4): 805~816 (in Chinese with English abstract).
- Drever J I. 1994. The effect of land plants on weathering rates of silicate mineral[J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 58: 2325~2332.
- Duckworth O W and Sposito G. 2007. Siderophore-promoted dissolution of synthetic and biogenic layer-type Mn oxides[J]. *Chem. Geol.*, 242: 497~508.
- Duro L, Aamrani F El, Rovira M, *et al.* 2005. The dissolution of high-FeO olivine rock from the Lovasjarvi intrusion (SE-Finland) at 25

- ℃ as a function of pH [ J ]. Appl. Geochem. , 20 : 1 284 ~ 1 291.
- Eick M J , Grossl P R , Golden D C , *et al.* 1996. Dissolution of a lunar basalt stimulant as affected by pH and organic anions [ J ]. Geoderma , 74 : 139 ~ 160.
- Forsythe J H , Maurice P A and Hersman L E. 1998. Attachment of a *Pseudomonas* sp. to Fe(III) hydroxide surfaces [ J ]. Geomicrobiol. J. , 15(4) : 293 ~ 308.
- Hersman L , Lloyd T and Sposito G. 1995. Siderophore-promoted dissolution of hematite [ J ]. Geochim. Cosmochim. Acta , 59(16) : 3 327 ~ 3 330.
- Lian B , Wang B , Pan M , *et al.* 2008. Microbial release of potassium from K-bearing minerals by thermophilic fungus *Aspergillus fumigatus* [ J ]. Geochim. Cosmochim. Acta , 72(1) : 87 ~ 98.
- Liermann L J , Kalinowski B E , Brantley S L , *et al.* 2000. Role of bacterial siderophores in dissolution of hornblende [ J ]. Geochim. Cosmochim. Acta , 64(4) : 587 ~ 602.
- Lüttge A and Conrad P G. 2004. Direct observation of microbial inhibition of calcite dissolution [ J ]. Appl. Environ. Microbiol. , 70(3) : 1 627 ~ 1 632.
- Ma Jinlong , Wei Gangjian and Xu Yigang. 2007. Relationship between REE and Al , P , Fe and Mn in basaltic weathering products : Evidences from hydrochloric acid leaching [ J ]. Geochimica , 36(6) : 633 ~ 637 (in Chinese with English abstract).
- Madigan M T , Martinko J M and Parker J. 2000. Brock Biology of Microorganisms [ M ]. Prentice Hall , New Jersey , USA , 991.
- Miyashiro A and Kawamoto T. 1984. Petrology [ M ]. Beijing : Science Press , 1 ~ 344 (in Chinese).
- Moulton K L , West J and Berner R A. 2000. Solute flux and mineral mass balance approaches to the quantification of plant effects on silicate weathering [ J ]. Am. J. Sci. , 300 : 539 ~ 570.
- Neaman A , Chorover J and Brantley S L. 2005. Implications of the evolution of organic acid moieties for basalt weathering over geological time [ J ]. Am. J. Sci. , 305(2) : 147 ~ 185.
- Oelkers E H and Gislason S R. 2001. The mechanism , rates and consequences of basaltic glass dissolution : I. An experimental study of the dissolution rates of basaltic glass as a function of aqueous Al , Si and oxalic acid concentration at 25 °C and pH = 3 and 11 [ J ]. Geochim. Cosmochim. Acta , 65(21) : 3 671 ~ 3 681.
- Oelkers E H. 2001. General kinetic description of multioxide silicate mineral and glass dissolution [ J ]. Geochim. Cosmochim. Acta , 65 : 3 703 ~ 3 719.
- Oxburgh R , Drever J I and Sun Y. 1994. Mechanism of plagioclase dissolution in acid solutions at 25 °C [ J ]. Geochim. Cosmochim. Acta , 58 : 661 ~ 669.
- Pokrovsky O , Schott J and Castillo A. 2005. Kinetics of brucite dissolution at 25 °C in the presence of organic and inorganic ligands and divalent metals [ J ]. Geochim. Cosmochim. Acta , 69(4) : 905 ~ 918.
- Puente M E , Rodriguez-Jaramillo M C , Li C Y , *et al.* 2006. Image analysis for quantification of bacterial rock weathering [ J ]. J. Microbiol. Method , 64(2) : 275 ~ 286.
- Rasmussen C , Dahlgren R A and Southard R J. 2009. Basalt weathering and pedogenesis across an environmental gradient in the southern Cascade Range , California , USA [ J ]. Geoderma , doi : 10. 1016/j. geoderma. 2009. 05. 019.
- Rogers J R and Bennett P C. 2004. Mineral stimulation of subsurface microorganisms : release of limiting nutrients from silicates [ J ]. Chem. Geol. , 203 : 91 ~ 108.
- Santelli C M , Welch S A , Westrich H R , *et al.* 2001. The effect of Fe-oxidizing bacteria on Fe-silicate mineral dissolution [ J ]. Chem. Geol. , 180(1~4) : 99 ~ 115.
- Santhiya D , Subramanian S and Natarajan K A. 2002. Surface chemical studies on sphalerite and galena using extracellular polysaccharides isolated from *Bacillus polymyxa* [ J ]. J. Colloid. Interf. Sci. , 256 : 237 ~ 248.
- Schwarz T. 1997. Lateritic bauxite in central Germany and implications for Miocene palaeoclimate [ J ]. Palaeogr. Palaeoclimat. Palaeoecol. , 129(1~2) : 37 ~ 50.
- Siegel D I and Pfannkuch H O. 1984. Silicate mineral dissolution at pH 4 and near standard temperature and pressure [ J ]. Geochim. Cosmochim. Acta , 48 : 197 ~ 201.
- Sun Nai and Peng Yaming. 1985. Igneous Rock Geology [ M ]. Beijing : Geological Publishing House , 1 ~ 324 (in Chinese).
- Tang Yan , Chen Qianwang , Tao Nang , *et al.* 2008. Laboratory-simulated weathering of olivine-rich basalt in methanol-thermal system : Implication for early Martian climate [ J ]. China J. Inorg. Chem. , 24(4) : 586 ~ 592 (in Chinese with English abstract).
- Wang Zhibing and Xu Zemin. 2008. Petrochemistry and mineralogy of basalt saprolite in Touzhai landslide [ J ]. Acta Mineral. Sinica , 28(4) : 447 ~ 454 (in Chinese with English abstract).
- Welch S A and Banfield J F. 2002. Modification of olivine surface morphology and reactivity by microbial activity during chemical weathering [ J ]. Geochim. Cosmochim. Acta , 66(2) : 213 ~ 221.
- Wiederhold J G , Kraemer S M , Teutsch N , *et al.* 2006. Iron isotope fractionation during proton-promoted , ligand-controlled , and reductive dissolution of goethite [ J ]. Environ. Sci. Technol. , 40 : 3 787 ~ 3 793.
- Wogelius R A and Walther J V. 1991. Olivine dissolution at 25 °C : Effects of pH , CO<sub>2</sub> , and organic acids [ J ]. Geochim. Cosmochim. Acta , 55 : 943 ~ 954.
- Wu L L , Jacobson A D , Chen H C , *et al.* 2007. Characterization of elemental release during microbe-basalt interactions at T = 28 °C [ J ]. Geochim. Cosmochim. Acta , 71 : 2 224 ~ 2 239.
- Yoshida T , Hayashi K and Ohmoto H. 2002. Dissolution of iron hydroxides by marine bacterial siderophore [ J ]. Chem. Geol. , 184(1~2) : 1 ~ 9.
- Zhou Yuefei , Wang Rucheng and Lu Xiancai. 2008. The effects of mineral surface properties on bacteria mediated dissolution of basalt [ J ]. Acta Petrol. Mineral. , 27(1) : 59 ~ 66 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Yuefei , Wang Rucheng , Lu Xiancai , *et al.* 2007. Influence of microbe-mineral contact model on mineral dissolution : A primary

study on micropertthite dissolution by *Paenibacillus polymyxa* [ J ].  
Geol. J. China Univ. , 13( 4 ): 657~661( in Chinese with English  
abstract ).

#### 附中文参考文献

董泽龙, 陈小明, 胡文瑄, 等. 2007. 山东昌乐新近纪玄武岩中刚玉  
巨晶反应边的成因 [ J ]. 岩石学报, 23( 4 ): 805~816.  
都城秋穗, 久城育夫. 1984. 岩石学 [ M ]. 北京: 地质出版社, 1~  
344.  
马金龙, 韦刚健, 徐义刚. 2007. 用稀盐酸浸取方法探讨玄武岩风化  
产物中 REE 与 Al、P、Fe 和 Mn 的依存关系 [ J ]. 地球化学, 36

( 6 ): 633~637.

孙 霖, 彭亚鸣. 1985. 火成岩石学 [ M ]. 北京: 地质出版社, 1~  
324.  
唐 艳, 陈乾旺, 陶 楠, 等. 2008. 富含橄榄石的玄武岩模拟风化:  
对火星早期环境的启示 [ J ]. 无机化学学报, 24( 4 ): 586~592.  
王志兵, 徐则民. 2008. 头寨滑坡玄武岩腐岩的岩石化学和矿物学特  
征 [ J ]. 矿物学报, 28( 4 ): 447~454.  
周跃飞, 王汝成, 陆现彩. 2008. 微生物溶解玄武岩的矿物表面效应  
[ J ]. 岩石矿物学杂志, 27( 1 ): 59~66.  
周跃飞, 王汝成, 陆现彩, 等. 2007. 微生物-矿物接触模式影响矿物  
溶解机制的实验研究 [ J ]. 高校地质学报, 13( 4 ): 657~661.

## 2009 年《岩石矿物学杂志》第五届编委会工作会议在北京圆满召开

2009 年《岩石矿物学杂志》第五届编委会工作会议于 10 月 16 日在北京圆满召开。参加会议的有我刊  
第五届编委中的 27 位专家以及地科院地质所高锦曦副所长和中国地质学会地质期刊专业委员会郝梓国主  
任。

会议由本刊新任主编、中国地质科学院地质研究所所长侯增谦研究员主持。荣誉主编沈其韩院士首先  
致辞, 表达了对与会专家的欢迎与感激之情, 并希望在新任主编和第五届编委会的支持与努力下《岩石矿物  
学杂志》能够更上一层楼。然后编辑部就近期办刊情况和数据库建设做了工作汇报, 最后专家们围绕期刊定  
位、稿源拓展、论文评选与网站建设等四个方面进行了深入讨论, 确立了在新的形式下“立足核心, 谋求长  
远, 树立观念, 狠抓质量, 精品期刊, 表里并重, 依靠编委, 拓展稿源, 办会评优, 制度先行, 完善网站, 相得益  
彰”的办刊方针。

2009 年《岩石矿物学杂志》踏上了新的起点, 我们相信, 在新任主编的带领下, 在第五届编辑委员会的  
大力支持下, 《岩石矿物学杂志》必将有所突破, 收获新的硕果!

