

# 长石风化作用及影响因素分析

莫彬彬<sup>1,2</sup>, 连宾<sup>1,\*</sup>

1. 中国科学院地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室, 贵州 贵阳 550002

2. 中国科学院研究生院, 北京 100049

Mo Binbin<sup>1,2</sup>, Lian Bin<sup>1,\*</sup>

1. State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Mo Binbin, Lian Bin. Study on feldspar weathering and analysis of relevant impact factors. *Earth Science Frontiers*, 2010, 17 (3): 281-289

**Abstract:** Feldspar is one of the most common silicate minerals, and the weathering processes of feldspar have significant influences on the earth surface environments, thus feldspar becomes one of the significant silicate minerals in weathering researches. In this paper, exemplified by feldspar, the weathering processes of silicate minerals were summarized on the aspects of natural weathering, simulated chemical weathering and biological weathering. The roles of various impact factors on mineral weathering, and the processes and mechanisms of feldspar weathering were analyzed. Several suggestions were proposed for current existing problems and future exploration, and the study on micro-environmental physicochemical properties of microbe-minerals aggregates is likely to be the breakthrough point in the field of silicate minerals weathering research.

**Key words:** silicate minerals; feldspar; weathering; research progress; mechanism

**摘要:**长石类矿物是地壳中最常见的硅酸盐矿物,其风化作用对地球表面环境有显著影响,因而是风化作用研究的重点矿物之一。文中以长石为例,对硅酸盐矿物的风化作用研究现状从矿物的自然风化、模拟矿物化学风化和矿物的生物风化3个方面进行阐述;对影响矿物风化的各种因素及其在风化过程中所起的作用,以及长石微生物风化作用的机理和过程进行分析;指出目前硅酸盐矿物风化研究中存在的问题,并对未来的发展方向提出建议,指出对微生物-矿物复合体微环境物理化学性质的深入研究可能成为揭示微生物-矿物相互作用机理的一个突破口。

**关键词:**硅酸盐矿物;长石;风化;研究现状;机理

中图分类号: P512.1 文献标志码: A 文章编号: 1005-2321(2010)03-0281-09

风化作用是指岩石矿物在物理、化学或生物因素的作用下发生裂解、破碎、溶解并形成次生矿物的过程,是发生在地表的一种重要的地球化学作用。根据其发生的原因,风化作用可分为物理风化、化学

收稿日期: 2010-02-22; 修回日期: 2010-03-04

基金项目: 国家高技术研究发展计划“863”项目(2008AA06Z108)

作者简介: 莫彬彬(1968—),男,副研究员,主要从事微生物地球化学研究。E-mail: mobinbin@vip.gyig.ac.cn

\* 通讯作者: 连宾。E-mail: bin2368@vip.163.com

风化和生物风化。物理风化包括由地壳运动、温度变化、雨水冲刷、冰冻等因素所引起的岩石矿物剥离、断裂和破碎; 化学风化主要是指水、大气、有机质及各种阴阳离子对岩石矿物的溶解、转化以及形成次生矿物的过程; 生物风化是指生物(动物、植物、微生物)的生长、繁殖过程及其代谢产物对岩石矿物的机械破坏作用和生物化学溶蚀作用, 实际上包含了由生物引起的物理风化和化学风化两种方式。矿物风化研究的内容主要包括矿物风化速率、矿物风化产物及其演化方向、影响矿物风化的各种因素(温度、压力、时间、pH 值、阴阳离子和有机络合物的种类和浓度、系统开放性以及生物因素等)以及矿物风化作用的过程和机理(包括热力学和动力学)等, 其中生物风化特别是微生物对岩石矿物的风化已经成为地学研究的热点问题之一<sup>[1-5]</sup>。

硅酸盐矿物占地壳岩石质量的 80% 以上, 是主要的造岩矿物和土壤的主要成分。硅酸盐矿物的风化与元素的地球化学循环和利用<sup>[5]</sup>、次生矿物和土壤的形成与演化<sup>[6]</sup>, 以及 CO<sub>2</sub> 循环和全球气候变化<sup>[7]</sup> 等都有直接的联系。由于长石类矿物在地壳中具有较高的丰度、矿物成分多样、结构牢固, 因此, 研究长石类矿物的风化作用有重要意义, 对于解释石英和其他硅酸盐矿物的风化作用, 具有借鉴作用。本文综述了长石类矿物风化作用的研究现状和影响因素, 对长石类矿物风化过程和机理进行了分析, 指出了存在的问题, 并提出建议。

## 1 研究现状

(1) 矿物的自然风化作用。长石的自然风化作用是自然条件下化学风化、物理风化与生物风化共同作用的结果, 生物风化将单列在本节(3)中进行阐述。物理风化是岩石矿物颗粒由大变小的量变过程, 化学风化则是岩石矿物的质变过程, 是风化作用研究的重点。前人对硅酸盐矿物的自然风化作用进行了较详细的研究, 结果主要涉及矿物风化的方向及产物, 对长石的自然风化作用研究的结果主要有以下几种观点: ① 钾长石—白云母—伊利石—高岭石<sup>[8]</sup>; ② 斜长石—非晶物质—高岭石—三水铝石<sup>[9]</sup>; ③ 斜长石—水云母—1.4 nm 过渡矿物—蒙脱石<sup>[9]</sup>; ④ 长石—蒙脱石—伊利石—高岭石—埃洛石—硅铝土<sup>[10]</sup>。钾长石的风化产物包括非晶物质、伊利石—白云母、高岭石—伊利石、蒙皂石、高岭石—蒙皂石、

高岭石—蒙皂石—三水铝石、高岭石—三水铝石、高岭石—埃洛石、三水铝石、蒙皂石—非晶物质等<sup>[11-12]</sup>。这些成果对于认识原生硅酸盐矿物的风化作用有重要意义, 但还存在一些问题, 其中最大的问题是风化产物与控制因素之间的对应关系尚不清楚<sup>[13]</sup>; 对长石的风化产物及其演化规律, 以及长石风化所经历的全过程及其演化序列有必要开展深入的实验研究。从上述研究成果来分析, 可以发现长石自然风化的两点共性: ① 风化产物均为含水的铝硅酸盐矿物, 产物中其他金属阳离子所占比例减少甚至没有; ② 除了有少量非晶物质外, 风化产物均为层状硅酸盐矿物, 这对进一步的研究工作有指导和借鉴作用。

(2) 模拟矿物化学风化作用。矿物的自然风化是一个相对比较漫长的过程, 由于影响的因素多且不断变化, 机理复杂, 研究结果往往只能得到风化的产物, 要想了解自然风化的详细过程和机理有一定困难。矿物的化学风化一般是实验模拟自然条件下的温度、压力、水溶液及相关的无机和有机离子浓度对矿物风化的过程和机理进行研究。

Hellmann<sup>[14]</sup> 认为, 长石的溶解速率与溶液的 pH 值成 U 型关系, 即在酸性区域随 pH 增大而减小、中性区域溶解速率低且受影响小、碱性区域随 pH 增大而增大。陈传平等<sup>[15]</sup> 研究发现, 长石的溶解度在酸性的草酸溶液中大于在中性的钠盐溶液中, 而中性钠盐溶液又大于纯水。Brady<sup>[16]</sup> 指出, 钙长石在富含有机质的溶液中的风化速率不受 CO<sub>2</sub> 的影响, 但对温度很敏感, CO<sub>2</sub> 主要是通过增加有机质的活度和产生腐蚀性有机酸来间接促进矿物风化速率。铝的含量对于长石溶解于有机配体溶液中的能力有影响, 铝含量越高, 溶解能力越强<sup>[17-18]</sup>。Icenhower<sup>[19]</sup> 研究认为, 溶液中低浓度的碱性阳离子含量的增加将导致长石溶解速率相应提高一个数量级。罗孝俊等<sup>[20]</sup> 计算了有机酸对长石溶解度的影响。结果表明: 钾长石溶解度在中性和近中性的 pH 值溶液中最小, 在酸性或碱性溶液中随酸度或碱度的增加而增加; 在强酸性溶液中, 温度增加溶解度下降; 在碱性溶液中, 温度升高溶解度增加; 醋酸根与铝的络合只发生在偏酸性条件下有限的 pH 值范围内; 络合作用对长石溶解度的贡献有限, 且随温度的增加而下降。Teng<sup>[21]</sup> 的研究表明, 长石在碱性条件下以化学计量比溶解, 在酸性条件下的非化学计量比溶解只限于一个晶胞深度。肖奕等<sup>[22]</sup> 研究

了碱性溶液中微斜长石的溶解速率, 结果表明, 随 pH 值升高, 微斜长石溶解性增强; 微斜长石的溶解不是被单一反应模式所控制, 而是表面控制、扩散控制和次生物相形成三种过程交替进行的结果。陈庆春<sup>[23]</sup>的研究表明, 长石在酸性和碱性条件下, 其溶解性都比中性条件下高; 在同一酸碱度下, 加(糖)醇时长石的溶解度减小。向廷生等<sup>[24]</sup>进行了不同温度、羧酸溶液中长石溶解的模拟实验, 结果表明: 温度升高、pH 值降低都可以促进长石溶解; 羧酸与长石中溶解出来的铝形成络合物而促进长石溶解, 络合物的亲油性比亲水性强, 易转移到油相中, 使油田水中的铝离子浓度偏低。

综上所述, 长石溶解性质受到 pH 值、温度、有机络合物、离子浓度、次生矿物形成等主要因素的影响。笔者认为, 高 pH 值或低 pH 值都有助于长石的溶解, 但也会影响络合物的存在形态, 并影响矿物溶解及次生矿物的形成, 进而影响矿物的风化作用; 在 pH 值为中性时, 钠、钾等离子可能会与长石晶格内的其他金属离子发生交换作用而促进风化作用的进程; 温度也会有着类似的影响, 即温度升高, 长石溶解性增大, 但温度对络合物的存在形态有影响, 从而影响长石溶解和次生矿物的形成。影响长石风化的这些因素是如何共同作用、如何相互制约、如何控制风化过程与风化产物的, 还有待进一步定量研究。

(3) 矿物的生物风化作用。生物风化是指生物(动物、植物、微生物)在生长、繁殖过程中通过粘着、穿插、挤压、剥离对岩石矿物产生的机械破碎作用, 以及其生命过程中分泌的代谢产物或其分解高分子有机物所产生的低分子有机酸对岩石矿物的化学溶蚀作用, 实际上包含了物理风化和化学风化两种作用<sup>[25]</sup>。

一般认为, 动物对矿物的风化作用主要为机械破坏作用, 也可以通过排泄物对矿物进行化学风化; 植物对矿物的风化作用比较复杂, 其作用力主要在根部, 既可以通过根系的粘着、穿插、挤压、剥离作用来破碎矿物, 也可以通过分泌有机酸来溶解、吸收矿物成分<sup>[26]</sup>, 植物根际硅酸盐矿物的风化作用明显高于非根际区域<sup>[27]</sup>。相对于动植物而言, 微生物是地球上最活跃的生物成员, 无论其种类和数量、影响的时间跨度、生活的空间范围还是微生物所能生存的极端条件都远远大于动物和植物; 微生物适应并利用环境物质生存繁衍的能力极强, 因此, 有人认为, 微生物对矿物产生的总分解力远远超过所有动、植

物具有的总分解力<sup>[28]</sup>。微生物与矿物的相互作用广泛存在, 使微生物成为矿物风化的最重要因素之一, 微生物的地质作用也是地学界研究的热点之一。

微生物可以产生多种胞外聚合物, 使细胞附着在矿物表面时形成凝胶层或生物膜<sup>[29-30]</sup>。微生物分解矿物的主要原因之一是将矿物作为能量来源和营养来源<sup>[31]</sup>。在缺乏 N 和 P 的环境中, 微生物优先生长在包裹体中含有 N 和 P 的长石上并缓慢分解长石<sup>[32-33]</sup>。加入细菌可以加速长石的溶解速率, 但对温度的影响不同于无菌条件, 可能在低温条件下溶解速率还高于高温条件<sup>[34]</sup>。在厌氧微生物控制的系统中, 在自然风化中比较稳定的微斜长石相对易风化, 且风化速率还与细菌类群有关<sup>[33]</sup>。连宾等<sup>[35-38]</sup>先后研究了硅酸盐细菌和真菌烟曲霉对长石的解钾作用, 证实了硅酸盐细菌对钾长石有溶蚀作用, 而且对于不同晶体结构的矿物有“选择性”破坏作用; 真菌烟曲霉对长石有明显的分解作用, 有菌条件下钾长石中钾的释放速率远远大于对比实验, 在真菌与矿物直接接触的情况下, 钾的释放速率又远远大于真菌与矿物间接接触的释放速率。钮旭光等<sup>[39]</sup>也证实硅酸盐细菌对钾长石矿物确有溶解作用, 能使固定钾转化为可溶性钾。细菌对矿物吸附作用有倾向性, 在正长石和黑云母共存体系中, 硅酸盐细菌倾向于选择性吸附在正长石上, 细菌浓度越大这种倾向越明显<sup>[40]</sup>。

有关微生物对长石的风化作用机理已有大量研究工作, 研究者先后提出了酸解、络解、酶解、碱解, 以及夹膜吸收、胞外多糖形成和氧化还原作用等多种观点<sup>[13, 26, 36, 41-43]</sup>, 但还不能完全解释长石的微生物风化过程和分子机理, 需要进一步完善<sup>[42]</sup>。国内学者提出多种因素综合作用的观点<sup>[26, 35-36, 43]</sup>以及微环境的概念<sup>[35, 42, 44]</sup>, 但各种因素究竟是如何共同促进风化作用, 分子机理是什么? 微环境的理化性质怎么样? 与周围环境有多大差别? 等等, 都还需要通过深入系统的研究来完善。要深入探讨微生物对硅酸盐矿物的风化机理, 在微观方面需要对细胞周围的微环境及微生物-矿物界面的微环境进行探究<sup>[42]</sup>。笔者认为, 微生物往往附着在硅酸盐矿物颗粒上形成细菌-矿物复合体, 复合体内的 pH 值、代谢产物浓度、溶液粘度、离子强度与周围环境有较大差别; 酸解、络解、酶解、碱解, 以及夹膜吸收、胞外多糖形成和氧化还原作用等机制可能有一种或多种共

同发挥作用, 只是程度有所不同; 在极端条件下(如高压、高温、低温、强辐射、强酸碱), 多数常见微生物处于休眠或死亡状态导致风化作用较弱(不排除一些极端微生物仍在发挥作用<sup>[45]</sup>), 而物理和化学风化作用则相对增强。

## 2 各种风化因素对矿物风化过程的影响分析

影响矿物风化的因素比较复杂, 主要有温度、压力、pH 值、阴阳离子和有机酸的种类和浓度、系统开放性和时间等。

(1) 温度。温度始终是影响矿物风化的最活跃因素之一, 其作用可以体现在 3 个方面: ①对物理风化的影响。温度的变化, 尤其是剧烈变化, 使矿物内部发生应力变化而破碎, 或者通过水的结冰、融化过程来使矿物风化。②对化学风化的影响。温度对矿物的溶解有直接影响, 影响程度可通过阿仑尼乌斯公式来表达, 温度提高使矿物溶解性对 pH 值的变化更敏感<sup>[46]</sup>。③对生物风化的影响。温度通过影响生物的生长发育和代谢产物来直接或间接地影响矿物的生物风化。

(2) 压力。压力的影响主要体现在物理风化作用上。地壳运动所引起的挤压、变形、沉降都使应力剧烈变化, 从而破坏矿物结构使之破碎; 同时压力对化学风化和生物风化也有一定的影响, 随着埋藏深度的增加, 钾长石的溶解性也增加<sup>[47]</sup>。另外压力通过对某些气体(CO<sub>2</sub>、O<sub>2</sub> 等)的溶解性以及某些嗜压微生物的生长发育的影响也间接影响风化作用。

(3) pH 值。pH 值对矿物的溶解性有直接的影响, 绝大多数的硅酸盐矿物的溶解性随 pH 值的降低而升高, 但影响的程度有所不同, 这与硅酸盐矿物的结构和成分有关。pH 值还可能通过影响有机酸根的存在状态而影响络合作用。

(4) 阳离子、阴离子和低分子量有机酸的种类和浓度。金属阳离子对风化作用的影响可能体现在 3 个方面: ①半径小的金属阳离子与硅酸盐矿物中的阳离子交换发生作用, 促进矿物溶解; ②影响矿物表面的氧化还原电位; ③形成次生矿物。无机阴离子的影响可能体现在 3 个方面: ①与硅酸盐矿物中的 Si 或 Al 离子发生络合作用, 促进矿物溶解; ②影响矿物表面的氧化还原电位; ③形成次生矿物。低分子量有机酸的影响可能体现在两个方面: ①提供

H<sup>+</sup> 离子, 降低体系 pH 值, 促进矿物溶解; ②与硅酸盐矿物中的 Si 或 Al 离子发生络合作用, 促进矿物溶解。

(5) 系统的开放性。如果矿物的风化作用是在一个相对封闭和稳定的系统中进行的, 当矿物与环境达到平衡后, 风化作用将处于动态平衡状态, 直到环境因素发生变化打破这种平衡。如果系统处于开放状态, 当风化产物发生迁移转化, 比如矿物中溶解出来的物质被水带走, 或者有新的物质和离子进入体系, 促进矿物的进一步溶解或生成次生矿物, 或者生物将溶解出来的物质吸收利用, 就会破坏矿物的溶解平衡, 促使矿物不断地风化。

(6) 风化时间。大多数自然条件下的风化作用都比较慢, 因此自然条件下矿物的风化程度受到风化时间的影响较大, 在长时间的风化过程中, 次生矿物很可能会再次风化形成新的次生矿物。

(7) 其他因素。其他一些因素对矿物的风化作用也会产生影响<sup>[48]</sup>。如矿物所处地理条件, 坡度大的地方利于水溶液的排泄并带走溶解的离子, 洼地有利于积水使矿物长期浸泡在水中而风化, 低纬度地区水热条件较好利于矿物风化, 岩石裸露及昼夜温差大的地方矿物的物理风化作用更强, 植被好的地方化学风化和生物风化作用更快, 矿物的粒度大小对风化作用也有影响, 粒度小的更容易风化。

图 1 综合了矿物风化影响因素的各个方面和具体过程。

## 3 风化过程机理分析及存在问题

矿物的化学风化作用实质上是矿物从平衡态→非平衡态→平衡态的过程, 是自由能发生变化的过程。原生矿物由于外界条件的变化(如温度、压力、pH 值的变化, 水分的浸入, 水溶液中阴阳离子浓度的变化, 有机配位体的存在), 破坏了原有的平衡, 从而发生风化作用达到新的平衡。

长石溶解的总体趋势是: 在 pH 值为中性的条件下, 溶解度最低, 随着 pH 值的降低或升高, 长石的溶解度增加, 呈 U 型分布<sup>[14]</sup>; 在有机酸(主要是低分子量有机酸, 也有氨基酸)存在的条件下, 溶解速度加快; 长石的自然风化产物主要是含水的层状铝硅酸盐矿物。综合目前研究的成果来分析, 对长石的溶解过程可作出以下几个推断: (1) 在酸性条件下, 首先 H<sup>+</sup> 置换长石表面的阳离子(K<sup>+</sup>、Na<sup>+</sup>、

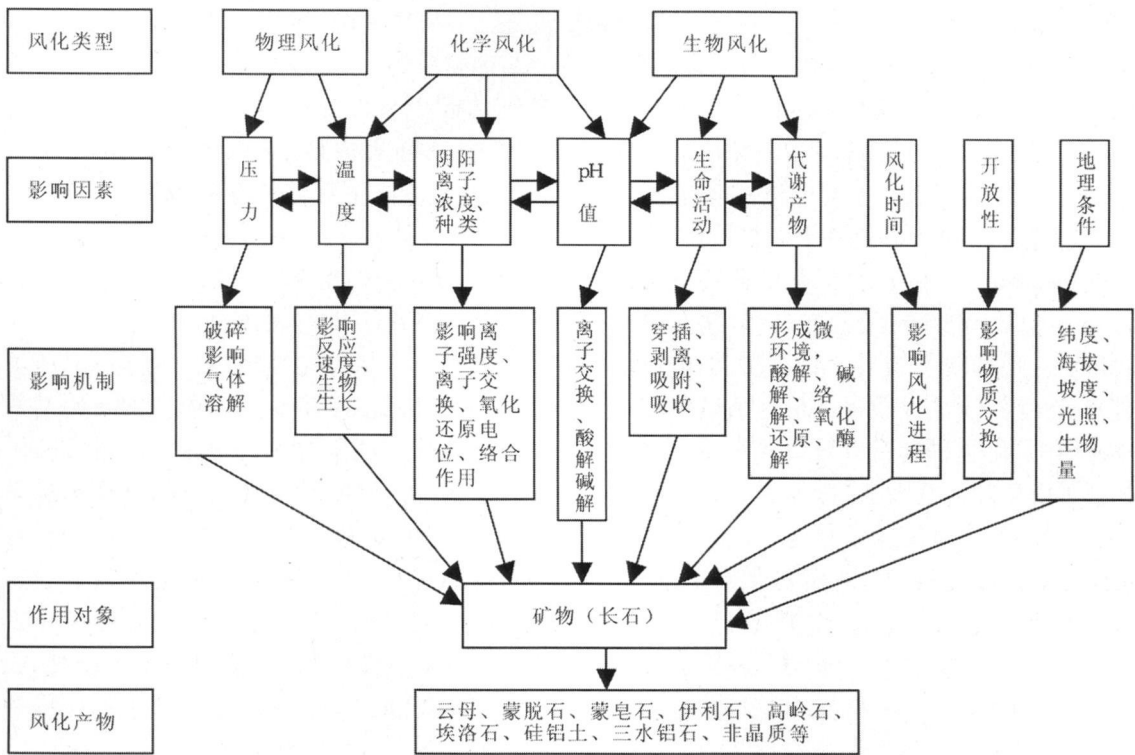


图 1 矿物(长石)风化作用类型、影响因素及机制、风化产物图解

Fig 1 Diagram of weathering types, impact factors and mechanism, weathering products  
图中“ $\rightleftharpoons$ ”表示各种因素之间也有相互影响。

Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>等), H<sup>+</sup> 半径较小, 使晶体表面结构出现空隙并软化, 易于 OH<sup>-</sup> 或有机配位体与 Si 或 Al 的结合, 形成络合物, 促使长石逐渐溶解。离子交换过程比较快, 而 Si 或 Al 形成络合物的过程比较慢, 在溶解初期(矿物表面第一层晶胞), 金属阳离子溶出的速度快于 Al 和 Si 离子的溶出速率, 因此各种元素不按化学计量比例溶出, 并且形成表面富硅层, 之后逐渐达到平衡。(2)在碱性条件下, OH<sup>-</sup> 攻击长石表面 Al 和 Si, 形成络阴离子, 但络合常数较低, 有机配体与 Al 和 Si 的络合常数较高, 与 OH<sup>-</sup> 竞争 Al 和 Si 离子, 形成络合物, 使长石逐渐溶解, 在这一过程中金属阳离子与 Al 和 Si 离子溶出的速率是基本一致的。(3)在封闭的地质条件下, 上述溶解过程在达到平衡后, 将处于一种动态平衡状态, 遇到温度和(或)压力的变化可形成次生矿物。(4)在开放的地质条件下, 环境因素的变化, 以及水和其他阴阳离子的浸入和迁移, 会促进长石的不断溶解和次生矿物的形成。长石的风化过程实质上是矿物的溶解、迁移和生成次生矿物沉淀的过程, 是在外界条件的变化下, 化学反应从平衡→不平衡→平衡的过程。

由于自然条件与实验条件有很大差异, 硅酸盐矿物的模拟化学风化速率的研究结果明显高于自然风化速率的观测结果, 对长石而言要高 3~4 个数量级<sup>[49-50]</sup>, 这可能是因为在自然条件下风化作用基本上处于接近平衡的状态, 而实验条件下远未达到平衡<sup>[51]</sup>。

矿物的生物风化作用有其特殊性, 主要体现在以下几个方面:(1)微生物与矿物相互作用的范围很小;(2)微生物与矿物所形成的微环境与周围环境有较大的差异;(3)生物风化过程伴随着生命活动过程, 风化强度对温度、压力、pH 值、离子浓度等环境因素的响应不同于纯粹的物理化学风化, 生物风化一般需要一个比较合适的物理化学条件(温度、pH 值、营养成分等);(4)生物风化作用往往是多种因素综合作用的结果, 机理远比单纯的物理化学风化作用要复杂得多。

通过对相关文献的调研以及风化过程机理分析, 笔者认为对矿物风化作用的研究还存在以下问题:(1)在长石的风化过程中, 有机配位体发挥着重要的作用, 因此 Si 和 Al 与各种有机配位体(尤其是

种类繁多的各种腐殖质)所形成的络合物的存在形态以及络合常数的测定需要进一步研究。(2)矿物的风化作用包含破碎、剥离、溶解、分解、演化、形成次生矿物等过程,对长石风化速率的定量研究,目前主要是研究溶液中的 Al 和 Si 等离子浓度的变化速率,但这还不能完全代表长石的风化速率,对长石风化速率(包括次生矿物生成速率及其影响因素)的研究有待进一步深入。(3)矿物风化的研究方法主要有现场观测、实验研究和理论计算<sup>[52]</sup>,这3种方法各有其特点。现场观测结果比较真实,但由于所经历的时间跨度大,往往只能得到最终的结果和平均的风化速率,风化过程和机理难以确定。实验研究可以详细了解风化过程及机理,但实验条件和自然条件有较大差异,导致实验结果与自然风化结果有较大偏差。理论计算所建立的模型可能会受到地质背景和条件的限制,因而有一定的局限性。因此,应建立一个多因素的风化模型,确定各种因素对风化作用影响的定量关系,尽可能减少各种方法之间的差异。(4)微生物对长石等硅酸盐矿物的风化作用,不少学者进行了研究,目前对其作用机理的解释有酸解、碱解、络解、酶解等观点,这些观点都有一定的合理性,但还不能完全解释长石的风化过程和分子机理,连宾<sup>[35-36]</sup>提出的微生物对长石风化作用的综合效应还需要进一步的深化和完善。(5)生物风化作用实质上也是物理风化和化学风化的共同作用,但生物风化有其特殊性。无论是微生物与矿物所形成的微环境与宏观环境、还是植物根际的局部环境与周围非根际环境都有较大差异(如 pH 值、有机配位体浓度、粘度、氧化还原电位、温度),有待进一步研究。

## 4 展望

在长石矿物的风化作用过程中,物理风化和生物物理风化只是将长石从大颗粒变为小颗粒,使长石有利于进一步风化。真正使矿物溶解、演化、形成次生矿物,使地表元素和物质迁移转化的还是化学风化和生物化学风化。除了水和部分无机的阴阳离子外,对硅酸盐矿物的化学风化起到重要作用的各种有机物和部分无机物,往往直接或间接地与生物有关,尤其是微生物。只要有微生物的地方,就有微生物与环境物质(包括矿物)的相互作用,微生物与矿物相互作用是地表广泛存在的地质过程,是近年

来地质学、地球化学、环境科学研究的热点之一,也是地学界有望取得突破的一个科学问题。

如前所述,关于环境因素对长石风化作用的机理研究前人已做了大量工作,微生物与长石相互作用的研究目前也取得一些阶段性成果,但是将两者有机地、完整地联系起来还有待进一步深入。微生物与长石的相互作用,其实质也是物理的和化学的作用,只是他们的相互作用是在微生物与矿物所形成的复合体或聚集体内进行的<sup>[35-36, 38, 53]</sup>。这种复合体最突出的特点是“微小”、并与周围环境有显著“差异”,因此,笔者认为,对微生物-矿物复合体微环境的物理化学性质及其代谢产物进行研究,可能是揭示微生物对矿物风化作用机理的一个突破口,不仅可以进一步阐明微生物-矿物相互作用的机理和过程,也是将化学风化和微生物风化联系并统一起来的必要手段,而且对将来在工农业生产中有针对性地选择、应用微生物品种、强化微生物在矿物加工工业及农业生产中的应用等都有广阔的前景。

## References

- [1] Chen F. Mineralogy in the 21th century[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2001, 21(1): 1-13(in Chinese).
- [2] Taylor L L, Leake J R, Quirk J, et al. Biological weathering and the long-term carbon cycle: Integrating mycorrhizal evolution and function into the current paradigm[J]. *Geobiology*, 2009, 7(2): 171-191.
- [3] Sanz-Montero M E, Rodriguez-Aranda J P. Silicate bioweathering and biomineralization in lacustrine microbialites: Ancient analogues from the Miocene Duero Basin, Spain[J]. *Geological Magazine*, 2009, 146(4): 527-539.
- [4] Sanz-Montero M E, Rodriguez Aranda J P, Perez-Soba C. Microbial weathering of Fe-rich phyllosilicates and formation of pyrite in the dolomite precipitating environment of a Miocene lacustrine system[J]. *European Journal of Mineralogy*, 2009, 21(1): 163-175.
- [5] Xie X D, Zhang G S. Environmental significance of the interaction between minerals and microbes[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2001, 20(4): 382-386(in Chinese).
- [6] Maher K, Steefel C I, White A F, et al. The role of reaction affinity and secondary minerals in regulating chemical weathering rates at the Santa Cruz soil chronosequence, California [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2009, 73(10): 2804-2831.
- [7] Power I M, Wilson S A, Thom J M, et al. The hydromagne-

- site playas of Atlin, British Columbia, Canada: A biogeochemical model for CO<sub>2</sub> sequestration[J]. *Chemical Geology*, 2009, 260: 286-300.
- [ 8 ] Berner R A, Holdren G R Jr. Mechanism of feldspar weathering: Some observational evidence[J]. *Geology*, 1977, 5(6): 369.
- [ 9 ] Ma Y J, Luo J X. The weathering and evolution of soil ferrihite minerals in the south china[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1999, 17(12): 681-686(in Chinese).
- [10] Ma Y J, Liu C Q. Sr isotope evolution during chemical weathering of granites[J]. *Science in China: Series D*, 2001, 44(8): 726-734.
- [11] Banfield J F, Eggleton R A. Analytical transmission electron microscope studies of plagioclase muscovite and K-feldspar weathering[J]. *Clays and Clay Minerals*, 1990, 38(1): 77.
- [12] Ma Z P. Feldspar weathering products in tropic and subtropic areas of china[J]. *Journal of the University of Petroleum, China*, 1998, 22(5): 14-18(in Chinese).
- [13] Li F C, Li S, Yang Y Z, et al. Advances in the study of weathering products of primary silicate minerals, exemplified by mica and feldspar[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2006, 25(5): 440-448(in Chinese).
- [14] Hellmann R. The albite-water system; Part I. The kinetics of dissolution as a function of pH at 100, 200, and 300 °C[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1994, 58: 595.
- [15] Chen C P, Mei B W. The initial experimental study for dissolving silicate mineral dicarboxylic acid in aqueous systems[J]. *J Mineral Petrol*, 1993, 13(1): 103-107(in Chinese).
- [16] Brady P V, Carroll S A. Direct effects of CO<sub>2</sub> and temperature on silicate weathering; Possible implications for climate control[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1994, 58(7): 1853-1856.
- [17] Blum A E, Stillings L L. Feldspar dissolution kinetics[J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 1995, 31(1): 291.
- [18] Welch S A, Ullman W J. Feldspar dissolution in acidic and organic solutions; Compositional and pH dependence of dissolution rate[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1996, 60(16): 2939-2948.
- [19] Icenhower J P, Dove P M. The dissolution kinetics of amorphous silica into sodium chloride solutions; Effects of temperature and ionic strength[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2000, 64(24): 4193-4203.
- [20] Luo X J, Yang W D. The effect of organic acid on feldspar solubility; A thermodynamic study[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2001, 21(2): 183-188(in Chinese).
- [21] Teng H H, Fenter P, Cheng L, et al. Resolving orthoclase dissolution processes with atomic force microscopy and X-ray reflectivity[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2001, 65(20): 3459-3474.
- [ 22 ] Xiao Y, Wang R C, Lu X C, et al. Experimental study on the low-temperature dissolution of microperthite in alkaline solution[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2003, 23(4): 333-340 (in Chinese).
- [ 23 ] Chen Q C. Study on the solubility of a kind of feldspar under hydrothermal condition[J]. *Industrial Minerals and Processing*, 2004, 33(11): 28(in Chinese).
- [ 24 ] Xiang T S, Cai C F, Fu H E. Dissolution of microcline by carboxylic acids at different temperatures and complexing reaction of Al anion with carboxylic acid in aqueous solution[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2004, 22(4): 597-602(in Chinese).
- [ 25 ] Lee M R, Parsons I. Biomechanical and biochemical weathering of lichen-encrusted granite; Textural controls on organic-mineral interactions and deposition of silica-rich layers[J]. *Chemical Geology*, 1999, 161(4): 385-397.
- [ 26 ] Li S, Li F C, Cheng L J. Recent development in bio-weathering research[J]. *Mineral Resources and Geology*, 2006, 20(6): 577-582(in Chinese).
- [ 27 ] Calvaruso C, Mareschal L, Turpault M P, et al. Rapid clay weathering in the rhizosphere of Norway Spruce and Oak in an acid forest ecosystem[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2009, 73(1): 331-338.
- [ 28 ] Wang Y H, Liu W R. *Mineralogy*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1985: 1-100(in Chinese).
- [ 29 ] Barker W W, Banfield J F. Biologically versus inorganically mediated weathering reactions; Relationships between minerals and extracellular microbial polymers in lithobiotic communities[J]. *Chemical Geology*, 1996, 132: 55-69.
- [ 30 ] Fortin D, Ferns F G, Beveridge T J. Surface-mediated mineral development by bacteria[J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 1997, 35(1): 161.
- [ 31 ] Ehrlich H L. How microbes influence mineral growth and dissolution[J]. *Chemical Geology*, 1996, 132: 5-9.
- [ 32 ] Rogers J R, Bennett P C, Choi W J. Feldspars as a source of nutrients for microorganisms[J]. *American Mineralogist*, 1998, 83: 1532-1540.
- [ 33 ] Bennett P C, Rogers J R, Choi W J, et al. Silicates, silicate weathering, and microbial ecology[J]. *Geomicrobiology Journal*, 2001, 18(1): 3-19.
- [ 34 ] Welch S A, Ullman W J. The effect of microbial glucose metabolism on bytownite feldspar dissolution rates between 5 and 35 °C[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1999, 63: 3247-3259.
- [ 35 ] Lian B. Research on Potassium Releasing by Silicate Bacteria[M]. Guiyang: Guizhou Science and Technology Press, 1998 (in Chinese).
- [ 36 ] Lian B, Fu P Q, Mo D M, et al. A comprehensive review of

- the mechanism of potassium releasing by silicate bacteria[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2002, 22(2): 179-183(in Chinese).
- [37] Lian B, Chen J, Fu P Q, et al. Weathering of silicate minerals by microorganisms in culture experiments[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2005, 11(2): 181-186(in Chinese).
- [38] Lian B, Wang B, Pan M, et al. Microbial release of potassium from K-bearing minerals by thermophilic fungus *Aspergillus fumigatus*[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2008, 72(1): 87-98.
- [39] Niu X G, Hua X Y, He S C. Studies on the potassium-dissolving ability of silicate bacteria[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2005, 36(6): 950-953(in Chinese).
- [40] Cheng L J, Li F C, Li S. Adsorption of silicate bacteria on surface of orthoclase and biotite and its selectivity[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2007, 13(4): 669-674(in Chinese).
- [41] Berthelin J. Microbial weathering processes in natural environments[J]. *Physical and Chemical Weathering in Geochemical Cycles*, 1988: 33-59.
- [42] Wu T, Chen J, Lian B. 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).
- [43] Sun D S, Zhang X Z, Zhang Q. Leaching effects of metabolites of silicate bacterium on silicate minerals[J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2006, 26(3): 27-29(in Chinese).
- [44] Barker W W, Welch S A, Chu S, et al. Experimental observations of the effects of bacteria on aluminosilicate weathering[J]. *American Mineralogist*, 1998, 83: 1551-1563.
- [45] Chen J, Lian B, Wang B et al. The occurrence and biogeochemistry of microbes in extreme environments[J]. *Earth Science Frontiers*, 2006, 13(6): 199-207(in Chinese).
- [46] Casey W H, Sposito G. On the temperature dependence of mineral dissolution rates[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1992, 56: 3825-3830.
- [47] Shi J A, Jin H J. Analysis on mechanism of feldspar dissolution and its influencing factors in feldspar-rich sandstone reservoir[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1994, 12(3): 67-75(in Chinese).
- [48] Liao S F. Discussion about the meaning of weathering[J]. *Guizhou Geology*, 1997, 14(1): 64-70(in Chinese).
- [49] Suarez D L, Wood J D. Short-and long-term weathering rates of a feldspar fraction isolated from an arid zone soil[J]. *Chemical Geology*, 1996, 132: 143-150.
- [50] White A F, Brantley S L. The effect of time on the weathering of silicate minerals: Why do weathering rates differ in the laboratory and field[J]. *Chemical Geology*, 2003, 202: 479-506.
- [51] Kampman N, Bickle M, Becker J et al. Feldspar dissolution kinetics and Gibbs free energy dependence in a CO<sub>2</sub>-enriched groundwater system, Green River, Utah[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2009, 284: 473-488.
- [52] Duan L, Hao J M. Experimental determination of soil weathering rate[J]. *Acta Scientiae Circumstantia*, 2002, 22(2): 145-149(in Chinese).
- [53] Du Y, Zhou X Y, Lian B. The extracellular secretion of *Bacillus mucilaginosus* and its capability of releasing potassium[J]. *Earth Science Frontiers*, 2008, 15(6): 107-111(in Chinese).

## 参考文献

- [1] 陈丰. 二十一世纪的矿物学[J]. *矿物学报*, 2001, 21(1): 1-13.
- [5] 谢先德, 张刚生. 微生物-矿物相互作用之环境意义的研究[J]. *岩石矿物学杂志*, 2001, 20(4): 382-386.
- [9] 马毅杰, 罗家贤. 我国南方铁铝土矿物组成及其风化和演变[J]. *沉积学报*, 1999, 17(12): 681-686.
- [12] 马在平. 我国热带亚热带部分长石风化产物研究[J]. *石油大学学报: 自然科学版*, 1998, 22(5): 14-18.
- [13] 李福春, 李莎, 杨用钊, 等. 原生硅酸盐矿物风化产物的研究进展: 以云母和长石为例[J]. *岩石矿物学杂志*, 2006, 25(5): 440-448.
- [15] 陈传平, 梅博文. 二元羧酸对硅酸盐矿物溶解的实验初步研究[J]. *矿物岩石*, 1993, 13(1): 103-107.
- [20] 罗孝俊, 杨卫东. 有机酸对长石溶解度影响的热力学研究[J]. *矿物学报*, 2001, 21(2): 183-188.
- [22] 肖奕, 王汝成, 陆现彩, 等. 低温碱性溶液中微纹长石溶解性质研究[J]. *矿物学报*, 2003, 23(4): 333-340.
- [23] 陈庆春. 一种长石的水热溶解性研究[J]. *化工矿物与加工*, 2004, 33(11): 28.
- [24] 向廷生, 蔡春芳, 付华娥. 不同温度、羧酸溶液中长石溶解模拟实验[J]. *沉积学报*, 2004, 22(4): 597-602.
- [26] 李莎, 李福春, 程良娟. 生物风化作用研究进展[J]. *矿产与地质*, 2006, 20(6): 577-582.
- [28] 王永华, 刘文荣. *矿物学*[M]. 北京: 地质出版社, 1985: 1-100.
- [35] 连宾. 硅酸盐细菌的解钾作用研究[M]. 贵阳: 贵州科技出版社, 1998.
- [36] 连宾, 傅平秋, 莫德明, 等. 硅酸盐细菌解钾作用机理的综合效应[J]. *矿物学报*, 2002, 22(2): 179-183.
- [37] 连宾, 陈骏, 傅平秋, 等. 微生物影响硅酸盐矿物风化作用的模拟试验[J]. *高校地质学报*, 2005, 11(2): 181-186.
- [39] 钮旭光, 华秀英, 何随成. 硅酸盐细菌解钾活性的研究[J]. *土壤通报*, 2005, 36(6): 950-953.
- [40] 程良娟, 李福春, 李莎. 硅酸盐细菌在矿物表面上的吸附及



- 其选择性[J]. 高校地质学报, 2007, 13(4): 669-674.
- [42] 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.
- [43] 孙德四, 张贤珍, 张强. 硅酸盐细菌代谢产物对硅酸盐矿物的浸溶作用研究[J]. 矿冶工程, 2006, 26(3): 27-29.
- [45] 陈骏, 连宾, 王斌 等. 极端环境下的微生物及其生物地球化学作用[J]. 地学前缘, 2006, 13(6): 199-207.
- [47] 史基安, 晋慧娟. 长石砂岩中长石溶解作用发育机理及其影响因素分析[J]. 沉积学报, 1994, 12(3): 67-75.
- [48] 廖士范. 关于风化作用涵义的探讨[J]. 贵州地质, 1997, 14(1): 64-70.
- [52] 段雷, 郝吉明. 土壤风化速度的实验测定[J]. 环境科学学报, 2002, 22(2): 145-149.
- [53] 杜叶, 周雪莹, 连宾. 胶质芽孢杆菌的胞外分泌物与细菌的解钾作用[J]. 地学前缘, 2008, 15(6): 107-111.

### 第三届《地学前缘》编辑委员会

## The Third Editorial Committee of *Earth Science Frontiers*

名誉主编 **Honorary Editors-in-Chief:** 王鸿祯 Wang Hongzhen 董申保 Dong Shenbao

主 编 **Editor-in-Chief:** 翟裕生 Zhai Yusheng

副 编 **Deputy Editors-in-Chief:**

马宗晋 Ma Zongjin

潘 懋 Pan Mao

王成善 Wang Chengshan

马鸿文 Ma Hongwen

张立飞 Zhang Lifei

邓 军 Deng Jun

王小龙(常务 Standing) Wang Xiaolong

国内编委 **Members of Editorial Board**(按汉语拼音字母为序 in order of the Chinese phonetic alphabet):

安芷生 An Zhisheng

常印佛 Chang Yinfo

陈 骏 Chen Jun

陈永顺 Chen Yongshun

戴金星 Dai Jinxing

丁梯平 Ding Tiping

杜杨松 Du Yangsong

方念乔 Fang Nianqiao

高 山 Gao Shan

高克勤 Gao Keqin

韩保福 Han Baofu

胡瑞忠 Hu Ruizhong

金之钧 Jin Zhijun

李思田 Li Sitian

李廷栋 Li Tingdong

林畅松 Lin Changsong

刘光鼎 Liu Guangding

刘丛强 Liu Congqiang

刘树文 Liu Shuwen

陆松年 Lu Songnian

罗照华 Luo Zhaohua

毛景文 Mao Jingwen

莫宣学 Mo Xuanxue

欧阳自远 Ouyang Ziyuan

沈照理 Shen Zhaoli

史晓颖 Shi Xiaoying

舒德干 Shu Degan

万 力 Wan Li

万天丰 Wan Tianfeng

万晓樵 Wan Xiaqiao

汪集旻 Wang Jiyang

王京彬 Wang Jingbin

汪品先 Wang Pinxian

王焰新 Wang Yanxin

魏春景 Wei Chunjing

魏文博 Wei Wenbo

吴福元 Wu Fuyuan

吴淦国 Wu Ganguo

夏柏如 Xia Bairu

许志琴 Xu Zhiqin

杨巍然 Yang Weiran

杨文采 Yang Wencai

杨 起 Yang Qi

姚书振 Yao Shuzhen

殷鸿福 Yin Hongfu

游振东 You Zhendong

於崇文 Yu Chongwen

于兴河 Yu Xinghe

袁道先 Yuan Daoxian

张本仁 Zhang Benren

张长厚 Zhang Changhou

张国伟 Zhang Guowei

翟明国 Zhai Mingguo

赵伦山 Zhao Lunshan

赵鹏大 Zhao Pengda

郑海飞 Zheng Haifei

郑永飞 Zheng Yongfei

周瑶琪 Zhou Yaoqi

海外编委 **Overseas Members of the Editorial Board:**

EfSayed Mohamed Abdelrahman 博士, 埃及开罗大学地球物理学教授

Norman Bleistein 博士, 美国科罗拉多矿业学院地球物理学教授

Gregory A. Davis 博士, 美国南加利福尼亚大学地球科学教授

牛耀龄(Yaoling Niu)博士, 英国杜伦大学地球科学教授

Franco Pirajno 博士, 澳大利亚西澳大利亚地质调查所地质学教授

Victor I. Starostin 博士, 俄罗斯莫斯科大学矿床学教授

孙永和(Yonghe Sun) 博士, 美国 Chevron Texaco 公司地球物理学家

Victor T. Trofimov 博士, 俄罗斯莫斯科大学地质学教授

赵大鹏(Dapeng Zhao)博士, 日本东北大学地球物理学教授

Nicholas T. Arndt 博士, 法国 Joseph Fourier 大学地球科学教授

尹 安(An Yin)博士, 美国加利福尼亚大学地球科学教授

英文审校 **English Editing:** Franco Pirajno Gregory A. Davis 潘道均 Pan Daojun 游振东 You Zhendong 文宝萍 Wen Baoping

倪云燕 Ni Yunyan

编辑部主任 **Director:** 李学军 Li Xuejun