

多金属矿山环境中矿物的微生物分解及环境效应研究进展

陆建军¹, 陆现彩¹, 王睿勇², 王汝成¹, 李娟¹,
赵兴青¹, 徐兆文¹, 胡欢¹, 韩晓冬³

(1. 内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室, 南京大学地球科学系, 南京 210093;
2. 南京大学生命科学学院, 南京 210093; 3. 南京大学医学院, 南京 210093)

摘要: 多金属矿山矿物的分解不仅可以形成酸矿水, 而且可释放大量有害元素, 造成严重的环境污染。在矿物分解、元素释放、迁移、沉淀和富集过程中微生物起了非常重要的作用。在总结微生物分解矿物的机制、微生物—矿物界面作用及生物膜在矿物分解过程中所起的作用基础上, 概述了酸矿水中微生物群落的特征和种系演化, 对矿山环境金属硫化物生物氧化释放的有害元素的微生物地球化学循环过程以及重金属元素对微生物氧化作用的影响做了系统的论述并讨论了微生物在环境修复中的作用。

关键词: 微生物氧化; 分解机制; 界面作用; 金属硫化物; 多金属矿山

中图分类号: Q939.99

文献标识码: A

文章编号: 1006-7493(2007)04-0621-09

微生物矿化和矿物微生物分解的产物具有独特的结晶学、同位素组成和元素地球化学特征, 同时亦蕴涵着与生命活动、演化及环境变化等有关的丰富信息 (Gajdardziska-Josifovska et al, 2001; Garcia-Valles et al, 2003; Popa et al, 2004; Fairen et al, 2005)。因此研究微生物与矿物相互作用及其产物中记录的地质地球化学信息, 可以深化对地球上生命演化和环境演变的系统认识。目前, 微生物与矿物的相互作用研究已经成为极具生命力和发展前景的交叉学科 (Weiner and Dove, 2003), 其发展不仅促进了生命科学、地球科学和化学等学科交叉, 而且在材料研发和环境修复等工程学领域得到了高度重视 (Lottermoser, 2003)。

探讨微生物参与的矿物分解过程是微生物—矿物相互作用研究中的重要领域之一。在特定环境下 (如多金属矿山、煤矿尾矿堆等), 微生物通过复杂的生物化学过程使金属硫化物矿物的氧化分解作用加速, 随着矿物表面结构的破坏和重金属元素的快速释放和排出, 可导致对环境中水体和土壤的污染。金属硫化物矿山中重金属污染

已经成为世界性的重要环境问题之一 (谢先德, 2001)。因此, 系统研究和科学评价微生物活动对自然界重金属元素的地球化学循环的影响及其环境污染效应, 可为人类生存环境的评价和改善、发展高效的污染防治技术提供理论依据。

1 微生物分解矿物的研究新进展

1.1 分解机制和分解速率

微生物氧化硫化物的机理研究是国内外地质学家、微生物学家和化学家争论的焦点之一。金属硫化物是地表环境中, 特别是矿山中最不稳定的也是最为常见的矿物。微生物分解硫化物的过程, 实质上是细菌氧化矿物中铁或硫的过程。在微生物存在的情况下, Fe^{2+} 的氧化作用要比单纯的无机化学氧化速率快大约6个数量级 (Singer et al, 1970; Edwards et al, 2000)。在硫化物分解过程中不仅仅是有害金属元素得到释放, 而且还产生一系列中间产物。如黄铁矿分解过程中可产生 HS^- , $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$, S , SO_4^{2-} 和黄钾铁矾等产物 (Rodríguez, 2003a, b, c; 朱长见等, 2005; Gleisner et al,

收稿日期: 07-11-04; 修回日期: 07-11-08

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (2007CB815603); 国家自然科学基金 (40573001); 博士点基金 (20050284043, 20050284044) 资助。

作者简介: 陆建军, 男, 1962年生, 教授, 矿床学和地质微生物学; E-mail: lujj@nju.edu.cn

2006)。然而对其氧化机理尚无统一认识。继 Silverman 和 Ehrlich (1964) 首先提出直接氧化和间接氧化两种机理以来, Schippers 和 Sand (1999) 提出微生物淋滤硫化物是通过硫代硫酸盐或复硫化物和硫间接实现的。Tributsch (2001) 对硫化物氧化机理进行了深入讨论, 提出硫化物的生物氧化机制实际上存在间接淋滤、接触淋滤和共生淋滤3种形式。Rodríguez (2003a, b, c) 先后实验模拟了黄铁矿、闪锌矿和黄铜矿的微生物分解过程, 提出了接触氧化分解和间接氧化分解机制。最近 Lu Jianjun 等, (2006) 指出细菌侵蚀可能是硫化物分解的重要机制, 直接机制起了很重要的作用。因此, 微生物在硫化物矿物氧化过程中所起的作用研究仍是需要进一步探讨的重要科学问题。

氧化分解速率是矿物分解动力学研究的重要领域。微生物分解矿物的速率取决于痕量的营养成分、含氧量和微生物生态等因素。微环境中痕量元素和含氧量的差异, 可使微生物改变矿物的分解作用模式, 使得稳定矿物先于不稳定矿物氧化分解。Maurice et al (2001) 在有氧的条件下利用假单胞菌在高岭石粘土矿物上进行培养实验后发现, 好氧假单胞菌 (*Pseudomonas mendocina*) 可以促进高岭石分解以获取微量的铁元素。许多研究者研究了在Fe供给受到限制的条件下好氧的假单胞菌从(氢)氧化铁(Fe(Ⅲ))中获取铁的能力、速率和机制 (Hersman et al, 1996; Maurice et al, 2001), 结果得出细菌可以通过分解赤铁矿、针铁矿和水针铁矿等铁(氢)氧化物而获得Fe。Glowa et al (2003) 比较了真菌 *Piloderma* 从黑云母、微斜长石、绿泥石三种矿物中吸取K和Mg的能力, 结果表明真菌是通过进一步分解矿物而获取营养的。Gleisner等在2006年的实验中发现, 含氧量对黄铁矿的风化速率有着显著的影响, 黄铁矿的氧化速率与体系中溶解氧浓度、Fe(Ⅲ)浓度和细菌生物量呈显著正相关关系, 在富氧条件下, 溶解氧首先氧化黄铁矿生成Fe(Ⅲ), Fe(Ⅲ)再被微生物还原为Fe(Ⅱ)释放; 但在低溶解氧条件下, 微生物可直接氧化黄铁矿中Fe(Ⅱ)使矿物分解 (Rodriguez et al, 2003a)。

1.2 矿物-微生物界面作用

矿物—微生物界面过程研究也是当前最为活

跃的研究领域之一 (Benzerara et al, 2005)。一方面, 微生物可以加速矿物的分解, 提高有害元素的释放速率 (Schmidt et al, 2005); 另一方面, 微生物矿化作用是重金属元素沉淀、赋存形式转换的重要机制 (Raina et al, 2000)。研究表明, 某些微生物种群有助于重金属的沉淀固定, 微生物生物膜和蛋白酶对金属元素沉淀结晶具有重要的促进作用 (Anderson et al, 2006)。许多研究者 (Crundwell, 1996; Dziurla et al, 1998; Konishi et al, 1990; Ohmura et al, 1993; Brieley, 1982; Blight et al, 2000) 利用微束分析技术研究了生物氧化后硫化物的形貌特征, 并以此讨论硫化物的生物氧化机制, 得出: 微生物可以附着于矿物表面, 进而加速矿物的溶解。Rodriguez-Leiva and Tributsch (1988) 指出, 细菌优先附着于矿物的晶格缺陷、破裂面, Sanhueza et al (1999) 后来发现细菌优先选择结晶度低的矿物颗粒表面吸附。相关的研究先后表明, 吸附于矿物表面的微生物可以侵蚀矿物表面, 并产生大量的侵蚀坑 (Antweiler et al, 1983; Bennet and Tributsch, 1978; Fernandez et al, 1995; Gómez et al, 1996; Schippers and Sand, 1999; Sampson et al, 2000)。Rodriguez-Leiva and Tributsch (1988) 的研究还显示, 氧化亚铁硫杆菌 (*Thiobacillus ferrooxidans*) 侵蚀合成黄铁矿表面产生的侵蚀坑与细菌的尺寸相当。Lu Jianjun et al (2006) 提出细菌可能是通过表面侵蚀来分解矿物的。虽然研究者们都强调细菌的吸附和侵蚀作用对矿物溶解的重要性, 但细菌的吸附和侵蚀的微观机理仍不清晰 (Fernandez et al, 1995; Escobar et al, 1996; Karan et al, 1996)。微生物与矿物表面金属元素的螯合作用可能是溶出金属离子的微观机制 (Lovley and Woodward, 1996; Hersman, 1996; Cervini-Silva and Sposito, 2002)。Benzerara et al (2005) 利用X射线显微镜 (STXM) 系统研究了生物-辉石界面的物质组成和纳米结构, 发现其化学组成呈现出复杂的带状结构, 与矿物表面紧密结合的极性分子和有机酸等是促进矿物分解的主要成分。随着以原子力显微镜、高分辨电子显微镜等为代表的微束分析技术的迅速发展, 已经可以实时和定量地测量细菌和矿物表面的相互作用力, 获得纳米尺度内矿物与微生物之间吸引与

排斥力的微小变化, 借之认识纳米尺度界面上的元素地球化学过程。

1.3 生物膜

生物膜是由微生物细胞、无机碎屑和细胞间液组成的高度水化的胶状物质(Videla, 1996), 是生物-矿物间物质交换和化学反应最为活跃的微观环境(Hochella, 2002), 广泛分布于各类岩石表面(Herrera et al, 2004)。微生物可以通过新陈代谢产物和分泌的化学物质, 包括HNO₃和H₂SO₄等无机酸、多糖、肽化合物以及多种有机酸等(Ehrlich, 1997; Bennett et al, 1996, 2001; Chapelle et al, 2002; Banfield and Navrotksy, 2001), 改变岩石和矿物表面的物理化学环境, 促进矿物的分解作用(Videla and Characklis, 1996; Ehrlich, 1997; Barker et al, 1998)。Crundwell(1996)系统观察了黄铁矿表面生物膜生长和矿物侵蚀过程, 认为生物膜的功能之一是形成一个局部富含铁离子的微观环境, 来支撑微生物的营养供给。Herrera et al(2004)研究了橄榄岩表面生物膜侵蚀岩石的现象和机理, 发现生物膜中多种异养细菌、真菌和藻类等的酸性分泌物及其生理代谢活动是橄榄石分解的主要动力, 而化学侵蚀作用相对于岩石表面的生物侵蚀作用则可以忽略不计。

2 微生物功能群及其作用

微生物群落分析是微生物分解矿物研究的基础, 微生物群落组成通常与环境中矿物类型、含氧量、湿度、温度、养分、pH等密切相关, 不同的微生物功能群在元素地球化学循环中起着不同的作用(Heywood, 1995)。微生物的鉴定和分类是微生物功能群研究的基础, 传统方法(如表型特征、显微镜观察、平板接种培养等)能够分离培养的微生物种类还不到已知微生物总数的1% (Torsvik et al, 1990)。各种分子生物学手段的深入发展, 不仅能够探测含量极低的微生物属种, 还可揭示更多未知的微生物类群(Ward et al, 1990; Baker et al, 2003), 可为理解自然环境的微生物组成和功能群结构提供更加客观可靠的依据。

虽然矿山酸矿水中微生物种的丰度较低, 但在不同环境的酸矿水具有不同的微生物群落, 微生物种类受到温度、矿物类型、离子强度和pH的

限制(Bond et al, 2000)。与其他环境相比, 酸矿水中虽然原核生物较少, 但至少包括2个门类的古生菌和8个门类的细菌(Baker et al, 2003; Bond et al, 2000)。其中细菌种类最多, 主要包括变形杆菌、硝化螺旋菌、厚壁菌和嗜酸细菌。其中研究最多的是变形杆菌(包括 α 亚纲、 β 亚纲、 γ 亚纲和 δ 亚纲), 特别是 γ 亚纲的硫杆菌属(*Acidithiobacillus*)和 β 亚纲的硫单胞菌属(*Thiomonas*); 此外, 硝化螺旋菌中的氧化亚铁勾端螺旋体(*Leptospirillum ferrooxidans*)和厚壁菌中的不动杆菌(*Actinobacteria*)也受到较多关注。古生菌包括热原体目(Thermoplasmatales)和硫叶菌目(Sulfobolales); 真核生物包括原生动物、真菌和藻类(Schleper et al, 1995; Ehrlich, 1963; Edwards et al, 2000)。

横向基因转移(LGT)分析表明, 极端嗜酸细菌相互间可以发生基因交换(Ruepp et al, 2000)。Baker and Banfield(2003)对酸矿水中微生物的演化进行总结时指出, 酸矿水中的微生物具有适应独特生境(如抗金属)所必需的基因, 这种基因的系统演化与16S rRNA基因相匹配; 目前已研究的多处现代酸矿水中的微生物之间有着非常近的亲缘关系, 这表明在局部酸性环境存在的条件下, 酸矿水中的微生物并非是从非极端微生物演化而来。但目前对这种传播机制还不了解。

微生物功能群结构与矿物氧化分解特征之间存在相互对应和制约关系(Edwards et al, 2000)。微生物一方面分解矿物, 并从中汲取所需营养促进其生长发育(Bennett et al, 2001), 另一方面在分解矿物过程中微生物的基因也发生变异, 生理行为发生变化(Abeye et al, 2005)。不同微生物功能群的营养需求(如钾、铁、钙、钠等)差异表现为有选择性地分解矿物。已有研究揭示, 双球菌(*Diplococcus*)对钙长石具有明显的选择性, 而环状芽孢杆菌(*Bacillus circulans*)、胶质芽孢杆菌(*Bacillus mucilaginosus*)和土壤芽孢杆菌(*Bacillus edaphicus*)等所谓的硅酸盐细菌和青霉菌(*Penicillium* sp.)等真菌可选择性地破坏含钾的硅酸盐矿物(Bennett, et al, 1996)。在酸矿水环境中, 则发育有多种嗜酸的氧化菌, 随着酸矿水pH的变化, 微生物功能群的组成发生了规律性的变

化 (Edwards et al, 2000)。

3 多金属硫化物矿山环境的重金属微生物地球化学

岩石中的金属矿物，特别是矿山中的金属硫化物矿物往往含有大量的Cu, Pb, Zn和As等有害元素 (Licskóa et al, 1999; Wang, 1999; Johnson et al, 2000; 许乃政等, 2001)。其氧化分解可以导致酸矿水的形成和重金属元素的释放，造成严重的环境污染。自从Nathanson于1902年在矿山环境中首次分离出可氧化硫的氧化菌后，目前已在矿山环境中发现了大量可分解硫化物的微生物。Wichlacz and Unz (1981) 从酸矿水中分离出37种嗜酸性的异养微生物。笔者在安徽铜陵硫化物矿山中也分离出嗜酸细菌，并对污染元素的地球化学分布开展了初步研究 (陆建军等, 2005)。由于重金属元素的可交换态和碳酸盐态在酸性环境中极易释放出来，致使这些有毒元素在矿山酸性废水中的释放率很高，并随之迁移造成更大范围的环境污染 (Siger & Stumm, 1970; Nadine & Robert, 2004; Giere et al, 2003; Shabnam et al, 2004; Sracek et al, 2004; Philip et al, 2004)。因此，研究不同重金属元素的微生物地球化学行为及其致污机制是环境污染修复的基础。

3.1 微生物在重金属污染形成中的作用

多金属硫化物矿山环境常见的有害元素包括金属元素Pb, Zn, Cu, Cd, Ni, Co和准金属元素As等，环境科学称之为重金属污染元素。这些元素一旦进入水环境，通过沉淀-水解作用、吸附-解吸作用、共沉淀与离子交换作用、氧化-还原作用、胶体形成作用等一系列地球化学过程进行迁移和转化，最终以一种或多种相对稳定的形态长期驻留在环境中，造成永久性的潜在危害 (Lu et al, 2005; Akcil and Koldas, 2006)。

针对矿山环境中重金属元素的赋存形式及其环境效应研究已取得了一些重要进展。Lu et al (2005) 对安徽铜陵矿山黄铁矿氧化过程中重金属元素的释放规律及其对周围环境影响的研究得出，S和Co的活动性比As, Cu和Zn更强。邱廷省等 (2005) 自矿山环境中筛选并培养出了嗜水气单胞菌，实验研究了细菌吸附酸性废水中Cu²⁺的影

响因素和机理，发现溶液的pH值、预处理方式、吸附时间、共存离子以及菌体浓度等均对吸附作用有重要影响，菌体表面的氨基和羧基是主要的吸附基团。Vartanyan et al (1990) 发现Cu²⁺, Zn²⁺和Ni²⁺对铁离子的*Sulfobacillus thermosulfidooxidans* subsp. *asporogenes* 菌的生物氧化具有抑制作用；Sampson 和 Philips (2001) 研究发现在嗜温细菌氧化过程中，Cu²⁺, Co²⁺和Ni²⁺浓度为8 mM时对Fe²⁺的生物氧化不产生影响，但在浓度增加时呈现抑制作用，不同离子抑制氧化作用的临界浓度存在差异，Cu²⁺的抑制作用尤为突出；在嗜热细菌氧化过程中，这些离子对Fe²⁺的生物氧化能力也有很大影响，在Cu²⁺, Co²⁺和Ni²⁺浓度为80 mM时Fe²⁺的生物氧化能力降低。Johnson et al (2000) 亦发现类似现象，认为在pH为2.0时Fe³⁺的络合作用是导致Fe²⁺不完全氧化的原因。这些研究表明，微生物能够促进硫化物的氧化并受到介质条件和细菌类型的明显影响。

3.2 典型污染元素砷的微生物地球化学行为

砷污染威胁着饮水安全和人类健康。砷有两种氧化态，不同化学形态的砷具有不同的可迁移性和毒性，一般来说砷化物的毒性有如下顺序：As³⁺>As⁵⁺>As⁰ (Hopenhayn, 2006)。前人研究了沉积物和含水层中砷的分布和循环，认为富砷黄铁矿氧化是砷释放到环境水体中的可能机制之一 (Das et al, 1996; Chowdhury et al, 1999)。尽管对砷释放到环境中是化学过程还是微生物起主要作用还存在争论，但多数研究者认为微生物还原作用对沉积物中活性As³⁺的形成起了很大的作用 (Nickson et al, 2000; Smedley and Kinniburgh, 2002; Akai et al, 2004; Islam et al, 2004; van Geen et al, 2004; Lloyd and Oremland, 2006)。细菌在含砷硫化物的分解、砷的迁移和沉淀过程中起着重要的作用，极大地影响砷的地球化学循环。Bruneel et al (2003) 研究得出，硫单胞菌可加速As³⁺的氧化作用。Leblanc et al (1996), Morin et al (2003) 和 Duquesne et al (2003) 的研究表明，氧化亚铁硫杆菌仅能氧化Fe²⁺而不能氧化As³⁺，可导致形成Fe³⁺-As³⁺的无定型含羟基硫酸盐和Tooeleite [Fe₆(AsO₃)₄SO₄(OH)₄·4H₂O] 纳米晶体的混合体，或含As³⁺的施氏矿物 (schwertmannite)

[$\text{Fe}_8\text{O}_8(\text{OH})_6\text{SO}_4$] ; 而细菌 *Thiomonas* 既可氧化 As^{3+} 也可氧化 Fe^{2+} , 导致 $\text{Fe}^{3+}-\text{As}^{5+}$ 的无定型含羟基硫酸盐 (As-Fe摩尔比可达0.7) 快速形成。Barret et al (1989) 研究得出, As^{3+} 在2 mM时会抑制黄铁矿的生物氧化, 在46 mM时会明显抑制黄铁矿的氧化, 而 As^{5+} 在23 mM时不会对黄铁矿的生物氧化产生影响。Morin et al (2003) 和Casiot et al (2005) 等在研究酸矿水中砷的生物地球化学作用时指出, 砷的含量和赋存形式还具有空间和季节性的变化。Lloyd et al (2006) 和Blum et al (1998) 研究了美国加里福尼亚Mono和Searles湖中砷的分布和砷的生物地球化学循环, 发现砷在湖中的分布与 *Bacillus arseniciselenatis* 和 *Bacillus selenitireducens* 细菌的作用有关。

在矿山环境中, 砷的化学形态多种多样。Foster et al (1998) 和Brown et al (1999) 首先研究了砷在尾矿砂中主要存在形式, 发现砷可以吸附在铁的氧化物和氢氧化物表面、进入黄钾铁矾结构或以铁的砷酸盐矿物等形式存在。砷矿物或含砷矿物是砷的主要赋存形式。Morin and Galas (2006) 认为矿山环境中砷的存在形式与砷的来源均与生物活动有密切关系, 铁的硫酸盐矿物往往具有很高的As吸附容量。Foster et al (1998) 和Savage et al (2000) 先后指出在pH<2.5的酸矿水中砷可以进入黄钾铁矾; Fukushi et al (2003) 和Courtin-Nomade et al (2005) 研究发现在pH值相对较高的酸矿水中砷可以被比表面积较高的矿物 (如六方针铁矿、施氏矿物) 吸附; 朱长见等 (2005) 和陆现彩等 (2005) 研究发现生物参与形成的铁硫酸盐矿物具有很高的比表面积和表面能, 可作为理想的离子吸附剂。Waychunas et al (1995) 利用分光镜证实施氏矿物表面可形成稳定的砷络合物, Carlson et al (2002) 进而得出砷可以抑制施氏矿物的形成, 甚至导致富砷的 Fe^{3+} 的无定型含羟基硫酸盐矿物的形成。研究发现吸附于铁氧化物表面的砷甚至比结晶的砷铁钙石更不易溶出 (Paktunc et al, 2004), 在酸矿水流出矿山与洁净河水混合时, 会有砷酸盐和亚砷酸盐的溶解 (Gault et al, 2003) , 但被含水的Fe和Al氧化物吸附的砷则能随胶体颗粒继续迁移 (Kimball et al, 1995) 。

3.3 矿山环境重金属污染的微生物修复

微生物活动对矿山环境中污染元素的释放、迁移和沉淀的控制作用在环境修复技术研究中越来越受到重视 (Essa et al, 2002; Gadd, 2004; Ryan et al, 2005) 。谢先德等 (2001) 对微生物-矿物相互作用及其意义进行了展望, 任万吉 (2002) 、石贵勇等 (2004) 、徐晓春等 (2005) 针对矿山酸矿水污染的严重性提出了处理技术。微生物不仅可以直接吸积重金属, 还可以降低重金属的毒性或改变根际环境、提高植物对重金属的吸收, 如动胶菌、蓝细菌、硫酸盐还原菌等, 能够产生胞外聚合物与重金属离子形成络合物而固定金属元素 (Rother, 1982) 。因此, 微生物修复技术有着很大的发展空间。

由于氧化细菌可以加速矿物的氧化, 许多研究者在探索使用抗菌物质进行污染环境修复, 如选用多种阴离子表面活性剂、防腐剂等阻隔微生物和矿物的直接接触 (Ledin and Pederen, 1996; Kleinmann, 1997, 1998) 。Lottermoser (2003) 发现抗菌物质的加入可使环境中氢离子直接侵入生物膜使细菌致死, 进而减缓重金属的释放速率。但是, 不容忽视的是抗菌剂的应用有可能引发其它新的环境问题 (Environment Australia, 1997) , 只有通过对环境中固有细菌功能群落的配置干预, 抑制氧化性细菌群落的活性, 降低矿物分解速率, 才是最安全的环境治理手段。

4 结束语

酸矿水中微生物种群比较简单, 相比而言, 酸矿水中微生物群落给研究特有的生物类群提供了极好的机会 (Baker et al, 2003) 。此类研究能更好地帮助我们了解酸矿水系统中微生物的分布和多样性以及系统演化。酸矿水中的微生物群落有较低的物种丰度, 这有利于重建来自于微生物群落的基因文库的基因组, 研究相关的基因表达有助于更好地建立酸矿水生态模型。利用酸矿水生态模型可以在分子水平上研究单个物种的贡献, 以描述并量化能量和物质的流动, 确定物种的共生关系和竞争策略。多金属矿山矿物的分解, 有害重金属元素的释放、迁移及其沉淀和富集, 都与微生物活动密切相关。因此, 将地球化学与微生物学结合起来研究酸矿水生态系统, 不仅可以

深入了解微生物群落的地球化学功能及其作用机制，建立综合的酸矿水成因模型，而且可以加速推进微生物地球化学的发展，深入揭示元素的微生物地球化学循环过程。微生物地球化学已成为极具发展潜力的新兴学科（陈骏等，2004）。

微生物-矿物相互作用是研究元素微生物地球化学循环的基础。虽然国内外在微生物与矿物相互作用和微生物分解矿物方面已经取得了许多重要的成果，并在环境修复工程应用中初有成效。但是，还有很多基础问题需要特别重视：（1）典型矿山环境中微生物功能群与矿物分解之间的相互作用关系研究还没有系统开展；（2）至今主要利用实验地球化学方法采用单一微生物物种研究矿物分解作用，尚缺乏对自然界微生物群落分解矿物现象的描述和研究；（3）模拟实验多局限于矿物表界面特征的现象观察，而对微生物体表分子官能团与矿物之间的表界面作用及其机制还缺乏深入研究；（4）对微生物的代谢活动、生理特性（如细胞活性、凋亡、细胞膜结构、酶活性、细胞内活性氧含量等）等与矿物分解的相互影响还缺乏研究；（5）基于微生物—矿物界面作用研究提出的微生物环境修复技术还鲜有涉及。

随着分子生物学技术的发展和纳米研究技术的引入，以及地球系统科学观念的深入，相信微生物-矿物相互作用研究将得到快速发展。对金属硫化物矿物的微生物分解机制研究不仅对认识和评价矿山环境致污机理有重要意义，而且能够驱动更为有效的重金属污染修复技术的研发和应用。

参考文献 [References] :

- Abay D A, Lawlor K, Hirsch P R, et al. 2005. Changes in the microbial community of an arable soil caused by long-term metal contamination. *European Journal of Soil Science*, 56 (1): 93–102.
- Akai J, Izumi K, Fukuhara H, et al. 2004. Mineralogical and geomicrobiological investigations on groundwater arsenic enrichment in Bangladesh. *Applied Geochemistry*, 19: 215–230.
- Akcil A, Koldas S. 2006. Acid mine drainage (AMD): Causes, treatment and case studies. *Journal of Cleaner Production*, 14: 1139–1145.
- Anderson C, Pedersen K, Jakobsson A M. 2006. Autoradiographic comparisons of radionuclide adsorption between subsurface anaerobic biofilms and granitic host rocks. *Geomicrobiology Journal*, 23 (1): 15–29.
- Antweiler R C and Drever J I. 1983. The weathering of a late Tertiary volcanic ash: importance of organic solutes. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 47: 623–629.
- Banfield J F and Navrotsky A. 2001. Nanoparticles and the Environment. *Reviews in Mineralogy and geochemistry*, 44: 1–349.
- Baker B J and Banfield J F. 2003. Microbial communities in acid mine drainage. *FEMS Microbiology Ecology*, 44: 139–152.
- Barker W W, Welch S A, Chu S, et al. 1998. Experimental observations of the effects of bacteria on aluminosilicate weathering. *American Mineralist*, 83: 1551–1563.
- Barrett J, Ewart D K, Hughes M N, et al. 1989. The oxidation of arsenic in arsenopyrite: the toxicity of As (III) to a moderately thermophilic mixed culture. *Proceeding of Biometallurgy-1989*, 49–57.
- Bennett J C, Tributsch H. 1978. Bacterial leaching patterns on pyrite crystal surfaces. *Journal of Bacteriology*, 134 (1): 310–317.
- Bennett P C, Hiebert F K, Wan J C. 1996. Microbial colonization and weathering of silicates in a petroleum-contaminated groundwater. *Chemical Geology*, 132: 45–53.
- Bennett P C, Rogers J R, Choi W J. 2001. Silicates, silicate weathering and microbial ecology. *Geomicrobiology Journal*, 18 (1): 3–19.
- Benzerara K, Hyun Y, Menguy N, et al. 2005. Nanoscale environments associated with biowathering of a Mg-Fe-pyroxene. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*, 102: 979–982.
- Blight K, Ralph D E, Thurgate S. 2000. Pyrite surface after bio-leaching: a mechanism for bio-oxidation. *Hydrometallurgy*, 58: 227–237.
- Blum J, Burns B A, Buzzelli J, et al. 1998. *Bacillus arsenicoselenatis*, sp. nov., and *Bacillus selenitireducens* sp. nov: two haloalkaliphiles from Mono Lake, California, that respire oxyanions of selenium and arsenic. *Archives of Microbiology*, 171: 19–30.
- Bond P L, Smriga S P, and Banfield J F. 2000. Phylogeny of microorganisms populating a thick, subaerial, predominantly lithotrophic biofilm at an extreme acid mine drainage site. *Applied Environmental Microbiology*, 66: 3842–3849.
- Brieley C L. 1982. Microbiological mining. *Scientific American*, 247: 42–50.
- Brown G E Jr, Foster A L, Ostergren J D. 1999. Mineral surfaces and bioavailability of heavy metals: A molecular-scale perspective. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*, 96: 3388–3395.
- Bruneel O, Personné J-C, Casiot C, et al. 2003. Mediation of arsenic oxidation by *Thiomonas* sp. in acid mine drainage (Carnoules, France). *Journal of Applied Microbiology*, 95: 492–499.
- Carlson L, Bigham J M, Schwertmann U, et al. 2002. Scavenging of As from acid mine drainage by schwertmannite and ferrihydrite: A comparison with synthetic analogues. *Environmental Science & Technology*, 36: 1712–1719.
- Casiot C, Lebrun S, Morin G, et al. 2005. Sorption and redox processes controlling arsenic fate and transport in a stream impacted by acid mine drainage. *Science of the Total Environment*, 347: 122–130.
- Cervini-Silva J, Sposito G. 2002. Steady-state dissolution kinetics of aluminum-goethite in the presence of desferrioxamine-B and oxalate ligands. *Environmental Science & Technology*, 36, 337–342.
- Chapelle F H, O'Neill K, Bradley P M, et al. 2002. A hydrogen-based subsurface microbial community dominated by methanogens. *Nature*, 415: 312–315.
- Chowdhury T R, Kumar Basu G, Mandal B K, et al. 1999. Arsenic poisoning in the Ganges delta. *Nature*, 401: 545–546.
- 陈骏, 姚素平, 季峻峰, 等. 2004. 微生物地球化学及其研究进展. 地质论评, 50 (6): 620–631.
- [Chen Jun, Yao Suping, Ji Junfeng, et al. 2004. The history and advances of microbial geochemistry. *Geological Review*, 50 (6): 620–631. (in Chinese with English abstract)]
- Courtin-Nomade A, Grosbois C, Bril H, et al. 2005. Spatial variability of

- arsenic in some iron-rich deposits generated by acid mine drainage. *Applied Geochemistry*, 20: 383–396.
- Crundwell F. 1996. The formation of biofilms of iron-oxidising bacteria on pyrite. *Mineral Engineering*, 9: 1081–1089.
- Das D, Samanata G, Mandal B K, et al. 1996. Arsenic in groundwater in six districts of West Bengal, India. *Environmental Geochemistry and Health*, 18: 5–15.
- Duquesne K, Lebrun S, Casiot C, et al. 2003. Immobilization of arsenite and ferric iron by *Acidithiobacillus ferrooxidans* and its relevance to acid mine drainage. *Applied and Environmental Microbiology*, 69: 6165–6173.
- Dziurla M A, Achouak W, Lam B T, et al. 1998. Enzyme-linked immunofiltration assay to estimate attachment of *Thiobacilli* to pyrite. *Applied Microbiology*, 64: 2937–2942.
- Edwards K J, Bond P L, Druschel G K, et al. 2000. Geochemical and biological aspects of sulfide mineral dissolution: Lessons from Iron Mountain, California. *Chemical Geology*, 169: 383–397.
- Ehrlich H L. 1997. Microbes and metals. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 48 (6): 687–692.
- Ehrlich H L. 1963. Microorganisms in acid mine drainage from copper mine. *Journal Bacteriology*, 86: 350–352.
- Environment Australia. 1997. Managing Sulphidic Mine Wastes and Acid Drainage. Canberra: Commonwealth of Australia, 1–76.
- Escober B, Jedlicki E, Wiertz J, et al. 1996. A method for evaluating the proportion of free and attached bacteria in the bioleaching of chalcopyrite with *Thiobacillus ferrooxidans*. *Hydrometallurgy*, 40: 1–10.
- Essa A M M, Macaskie L E, Brown N L. 2002. Mechanisms of mercury bioremediation. *Biochemical Society Transactions*, 30: 672–674.
- Faivre D, Menguy N, Guyot F, et al. 2005. Morphology of nanomagnetite crystals: Implications for formation conditions. *American Mineralogist*, 90 (11–12): 1793–1800.
- Fernandez M G M, Mustin C, de Donato P, et al. 1995. Occurrence at mineral–bacteria interface during oxidation of arsenopyrite by *Thiobacillus ferrooxidans*. *Biotechnology and Bioengineering*, 46: 13–21.
- Foster A L, Brown Jr G E, Tingle T N, et al. 1998. Quantitative arsenic speciation in mine tailings using X-ray absorption spectroscopy. *American Mineralogist*, 83: 553–568.
- Fukushi K, Sasaki M, Sato T, et al. 2003. A natural attenuation of arsenic in drainage from an abandoned arsenic mine dump. *Applied Geochemistry*, 18: 1267–1278.
- Gadd G M. 2004. Microbial influence on metal mobility and application for bioremediation. *Geoderma*, 122 (2–4): 109–119.
- Gajardziska-Josifovska M, McClean R G, Schofield M A, et al. 2001. Discovery of nanocrystalline botanical magnetite. *European Journal of Mineralogy*, 13 (5): 863–870.
- Garcia-Valles M, Gimeno-Torrente D, Martinez-Manent S, et al. 2003. Medieval stained glass in a Mediterranean climate: Typology, weathering and glass decay, and associated biomineratization processes and products. *American Mineralogist*, 88 (11–12): 1996–2006.
- Gault A G, Polya D A, Lythgoe P R, et al. 2003. Arsenic speciation in surface waters and sediments in a contaminated waterway: an IC–ICP–MS and XAS based study. *Applied Geochemistry*, 18: 1387–1397.
- Gieré R, Sidenko N V, Lazareva E V. 2003. The role of secondary minerals in controlling the migration of arsenic and metals from high sulfide wastes (Berikul gold mine, Siberia). *Applied Geochemistry*, 2003, 18 (9) : 1347–1359.
- Gleisner M, Herbert Jr R B, Frogner P C. 2006. Pyrite oxidation by *Acidithiobacillus ferrooxidans* at various concentrations of dissolved oxygen. *Chemical Geology*, 225: 16–29.
- Glowa K R, Arocena J M, Massicot H B. 2003. Extraction of potassium and/or magnesium from selected soil minerals by *Piloderma*. *Geomicrobiology Journal*, 20 (2): 99–111.
- Gómez E, Blázquez M L, Ballester A, et al. 1996. Study by SEM and EDS of chalcopyrite bioleaching using a new thermophilic bacteria. *Minerals Engineering*, 9 (9): 985–999.
- Herrera L K, Arroyave C, Guiamet P, et al. 2004. Biodeterioration of peridotite and other constructional materials in a building of the Colombian cultural heritage. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 54: 135–141.
- Hersman L, Maurice P, Sposito G. 1996. Iron acquisition from hydrous Fe (III)–oxides by an aerobic *Pseudomonas* sp. *Chemical Geology*, 132, 25–32.
- Heywood V H. 1995. Global Biodiversity Assessment, United Nations Environment Programme, Cambridge University Press, Cambridge.
- Hochella Jr M F. 2002. There's plenty of room at the bottom: Nanoscience in geochemistry. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 66 (5): 735–743.
- Hopenhayn C. 2006. Arsenic in drinking water: impact on human health. *Elements*, 2 (2): 103–107.
- Islam F S, Gault A G, Boothman C, et al. 2004. Role of metal-reducing bacteria in arsenic release from Bengal delta sediments. *Nature*, 430: 68–71.
- Johnson R H, Blowes D W, Robertson W D, et al. 2000. The hydrogeochemistry of the Nickel Rim mine tailing impoundment, Sudbury, Ontario. *Journal of Contaminant Hydrology*, 41: 49–80.
- Johnson D B, Body D A, Bridge T A M, et al. 2000. Biodiversity of acidophilic moderate thermophiles isolated from two sites in Yellowstone National Park, and their roles in the dissimilatory oxido-reduction of iron. // Resenbach A L and Voytek A eds, Biodiversity, Ecology and Evolution of Thermophiles in Yellowstone National Park, Plenum Press, New York. 23–39.
- Karan G, Natarajan K A, Modak J M. 1996. Estimation of mineral-adhered biomass of *Thiobacillus ferrooxidans* by protein assay: some problems and remedies. *Hydrometallurgy*, 42: 169–175.
- Kimball B A, Callender E, Axtmann E V. 1995. Effects of colloids on metal transport in a river receiving acid mine drainage, upper Arkansas River, Colorado, U.S. A. *Applied Geochemistry*, 10: 285–306.
- Kleinmann R L P. 1998. Bactericidal control of acidic drainage. // Coal Mine Drainage Prediction and Pollution Prevention in Pennsylvania. DEP, Chap. 15, 1–7.
- Kleinmann, R L P. 1997. Mine drainage systems. // Marcus J J ed. Mining Environmental Handbook. London: Imperial College Press. 1–237.
- Konishi Y, Asai S, Katoh H. 1990. Bacterial dissolution of pyrite by *Thiobacillus ferrooxidans*. *Bioprocess Engineering*, 5: 231–237.
- Leblanc M, Achard B, Ben Othman D, et al. 1996. Accumulation of arsenic from acidic mine waters by ferruginous bacterial accretions (stromatolites). *Applied Geochemistry*, 11: 541–549.
- Ledin M and Pedersen K. 1996. The environmental impact of mine wastes—roles of microorganisms and their significance in treatment of mine wastes. *Earth Science Review*, 41: 479–489.
- Licskó I, Loibl L, Székely G. 1999. Tailings as a source of environmental pollution. *Water Science and Technology*, 39 (10–11): 333–336.
- Lloyd J R, Oremland R S. 2006. Microbial transformations of arsenic in the environment: from soda lakes to aquifers. *Elements*, 2(2): 85–90.
- Lottermoser B G. 2003. Mine Wastes: Characterization, treatment and environmental impacts. Berlin, Heidelberg, Heidelberg: Springer-Verlag, 80–81.

- Lovley D R, Woodward V. 1996. Mechanisms for chelator stimulation of microbial Fe (III)-oxide reduction. *Chem. Geol.*, 132, 19–24.
- 陆建军, 陆现彩, 朱长见, 等. 2005. 氧化亚铁硫杆菌对矿山酸矿水中金属污染元素分布的影响. 南京大学学报(自然科学版), 41 (2): 113–119.
- [Lu Jiamjun, Lu Xiamcai, Zhu Changjian, et al. 2005. The effect of *Thiobacillus ferrooxidans* on the distribution of metal trace elements of acid mine drainage resulting in environmental pollution. *Journal of Nanjing University (Natural Sciences)*, 41(2): 113–119. (in Chinese with English abstract)]
- Lu J J, Lu X C, Wang R C, et al. 2006. Pyrite surface after *Thiobacillus Ferrooxidans* leaching at 30°C. *Acta Geologica Sinica*, 80 (3): 451–455.
- Lu L, Wang R C, Chen F R, et al. 2005. Element mobility during Pyrite weathering: implications for acid and heavy metal pollution at mining-impacted sites. *Environmental Geology*, 49: 82–89.
- 陆现彩, 陆建军, 朱长见, 等. 2005. 微生物矿化成因的铁硫酸盐矿物表面特征初探. 高校地质学报, 11 (2): 194–198.
- [Lu Xiancai, Lu Jianjun, Zhu Changjian, et al. 2005. Preliminary study on surface properties of iron sulfate formed by microbially induced mineralization. *Geological Journal of China Universities*, 11(2): 194–198. (in Chinese with English abstract)]
- Maurice P A, Vierkorn M A, Hersman L E, et al. 2001. Dissolution of well and poorly ordered kaolinites by an aerobic bacterium. *Chemical Geology*, 180: 81–97.
- Morin G. and Calas G. 2006. Arsenic in soils, mine tailings, and former industrial sites. *Elements*, 2 (2): 97–101.
- Morin G, Juillet F, Casiot C, et al. 2003. Bacterial formation of tooeelite and mixed arsenic (III) or arsenic (V)-iron (III) gels in the Carnoulès acid mine drainage, A XANES, XRD, and SEM study. *Environmental Science & Technology*, 37: 1705–1712.
- Nadine M P, Robert R S. 2004. Mineralogical and geochemical controls on the release of trace elements from slag produced by base and precious metal smelting at abandoned mine sites. *Applied Geochemistry*, 19 (7): 1039–1064.
- Nathanson A. 1902. Über eine neue Gruppe von Schwefelbakterien und ihren Stoffwechsel. *Mitt Zool Stn Neapel*, 15: 665–680.
- Nickson R T, McArthur J M, Ravenscroft P, et al. 2000. Mechanism of arsenic release to groundwater, Bangladesh and West Bengal. *Applied Geochemistry*, 15: 403–413.
- Ohmura N, Kitamura K, Saiki H. 1993. Selective adhesion of *Thiobacillus ferrooxidans* to pyrite. *Applied Environmental Microbiology*, 59: 4044–4050.
- Paktunc D, Foster A, Heald S, et al. 2004. Speciation and characterization of arsenic in gold ores and cyanidation tailings using X-ray absorption spectroscopy. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 68: 969–983.
- Philip L V, Nordstrom D K, Howard E T, et al. 2004. Rare earth element partitioning between hydrous ferric oxides and acid mine water during iron oxidation. *Applied Geochemistry*, 19 (8): 1339–1354.
- Popa R, Kinkle B K, Badescu A. 2004. Pyrite framboids as biomarkers for iron-sulfur systems. *Geomicrobiology Journal*, 21 (3): 193–206.
- 邱廷省, 江乐勇, 唐海峰. 2005. 矿山含铜重金属废水微生物处理试验研究. 矿冶工程, 25 (3): 50–54.
- [Qiu Tingshang, Jiang Leyong, Tang Haifeng. 2005. Treatment of Cu²⁺-containing mine wastewater with a hydrophila. *Mining and Metallurgical Engineering*, 25 (3): 50–54. (in Chinese with English abstract)]
- Raina M M, Ian L P, Charles P G. 2000. Environmental Microbiology . NewYork: Academic Press, 1–585.
- 任万古. 2002. 德兴铜矿酸性废水处理实践. 采矿技术, 2(2): 57–59.
- [Ren Wangu. 2002. Treating practice of acidic mining water in Dexing copper deposit. *World Mining Express*, 2 (2): 57–59. (in Chinese)]
- Rodríguez Y, Ballester A, Blázquez M L, et al. 2003a. New information on the pyrite bioleaching mechanism at low and high temperature. *Hydrometallurgy*, 71: 37–46.
- Rodríguez Y, Ballester A, Blázquez M L, et al. 2003b. New information on the chalcopyrite bioleaching mechanism at low and high temperature. *Hydrometallurgy*, 71: 47–56.
- Rodríguez Y, Ballester A, Blázquez M L, et al. 2003c. New information on the sphalerite bioleaching mechanism at low and high temperature. *Hydrometallurgy*, 71: 57–66.
- Rodríguez-Leiva M, Tributsch H. 1988. Morphology of bacterial leaching patterns by *Thiobacillus ferrooxidans* on synthetic pyrite. *Archives of Microbiology*, 149: 401–405.
- Rother J A. 1982. Seasonal fluctuations in nitrogen fixation by freeliving bacteria in soils contaminated with cadmium, lead and zinc. *Journal Soil Science*, 33: 101–113.
- Ruepp A, Graml W, Santos-Martinez, et al. 2000. The genome sequence of the thermoacidophilic scavenger *Thermoplasma acidophilum*. *Nature*, 407: 508–513.
- Ryan R P, Ryan D J, Dowling D N. 2005. Multiple metal resistant transferable phenotypes in bacteria as indicators of soil contamination with heavy metals. *Journal of Soil and Sediments*, 5 (2): 95–100.
- Sampson M I, Phillips C V, Ball A S. 2000. Investigation of the attachment of *Thiobacillus ferrooxidans* to mineral sulphides using scanning electron microscopy analysis. *Minerals Engineering*, 13(6): 643–656.
- Sampson M I and Philips C V. 2001. Influence of base metals on oxidizing ability of acidophilic bacteria during oxidation of ferrous sulfate and mineral sulfide concentrates using mesophiles and moderate thermophiles. *Minerals Engineering*, 14 (3): 317–340.
- Sanhueza A, Ferrer I J, Vargas T, et al. 1999. Attachment of *Thiobacillus ferrooxidans* on synthetic pyrite of varying structural and electronic properties. *Hydrometallurgy*, 51 (1): 115–129.
- Savage K S, Tingle T N, O'Day P A, et al. 2000. Arsenic speciation in pyrite and secondary weathering phases, Mother Lode Gold District, Tuolumne County, California. *Applied Geochemistry*, 15: 1219–1244.
- Schippers A and Sand W. 1999. Bacterial leaching of metal sulfides proceeds by two indirect mechanisms via thiosulfate or via polysulfides and sulfur. *Applied and Environmental Microbiology*, 65 (1): 319–321.
- Schleper C, Puhler G, Kuhlmann B, et al. 1995. Life at extremely low pH. *Science*, 375: 741–742.
- Schmidt A, Haferburg G, Sineriz M, et al. 2005. Heavy metal resistance mechanisms in actinobacteria for survival in AMD contaminated soils. *Chemie Der Erde-Geochemistry*, 65 (Suppl.): 131–144.
- Shabnam Q, Brian K R, Tammo S S, et al. 2004. Microbial acidification and pH effects on trace element release from sewage sludge. *Environmental Pollution*, 132 (1): 61–71.
- 石贵勇, 周永章, 杨志军, 等. 2004. 广东河台金矿尾矿库金属硫化物环境地球化学效应. 矿产与地质, 18 (6): 579–582.
- [Shi Gui yong, Zhou Yong zhang, Yang Zhijun, et al. 2004. Study on the environmetal geochemical effect of metal sulfide in tailing pool of Hetai Gold Mine. *Mineral Resources and Geology*, 18 (6): 579–582. (in Chinese with English abstract)]
- Silverman M P, Ehrlich H L. 1964. Microbial formation and degradation of minerals. *Advanced Applied Microbiology*, 6:153–206.
- Singer P C, Stumm W. 1970. Acid mine drainage: the rate determining step. *Science*, 167, 1121–1123.

- Smedley P L, Kinniburgh D G. 2002. A review of the source, behaviour and distribution of arsenic in natural waters. *Applied Geochemistry*, 17: 517–568.
- Sracek O, Choquette M, Gélinas P, et al. 2004. Geochemical characterization of acid mine drainage from a waste rock pile, Mine Doyon, Québec, Canada. *Journal of Contaminant Hydrology*, 69 (1–2): 45–71.
- Torsvik V, Goksoyr Y J, Daae F L. 1990. High diversity in DNA of soil bacteria. *Applied Environmental Microbiology*, 56: 782–787.
- Tributsch H. 2001. Direct versus indirect bioleaching. *Hydrometallurgy*, 59: 177–185.
- van Geen A, Rose J, Thoral S, et al. 2004. Decoupling of As and Fe release to Bangladesh groundwater under reducing conditions. Part II: Evidence from sediment incubations. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 68: 3475–3486.
- Vartanyan N S, Karavaido G I, Pivovarova T A, et al. 1990. Resistance of *Sulfobacillus thermosulfidoxidans* subsp. *asporigenes* to Cu²⁺, Zn²⁺ and Ni²⁺ ions. translated from *Mikrobiologiya*, 59 (2): 587–594.
- Videla H A. 1996. Manual of Biocorrosion. London: CRC Lewis Publishers, 1–11.
- Videla H A, Characklis W G. 1992. Biofouling and microbiologically influenced corrosion. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 29: 195–212.
- Wang Z J. 1999. Major environmental and ecotoxicological processes of heavy metals in Lean River polluted. *Journal Environmental Science*, (China), 11 : 322–327.
- Ward D M, Weller R, Bateson M M. 1990. 16 S rDNA sequences reveal numerous uncultured microorganisms in a natural community. *Nature*, 345: 63–65.
- Waychunas G A, Xu N, Fuller C C, et al. 1995. XAS study of AsO₄³⁻ and SeO₄²⁻ substituted schwertmannites. *Physics (B)*, 208–209: 481–483.
- Weiner S, Dove P M. 2003. An overview of biomining processes and the problem of the vital effect. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 54: 95–114.
- Wichlacz P L, and Unz R F. 1981. Acidophilic, heterotrophic bacteria of acidic mine water. *Applied Environmental Microbiology*, 41(5): 1254–1261.
- 谢先德, 张刚生. 2001. 微生物-矿物相互作用之环境意义的研究. 岩石矿物学杂志, 20 (4): 382–386.
- [Xie Xiande, Zhang Gangshang. 2001. Environmental significance of the interaction between minerals and microbes. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 20 (4): 382–386. (in Chinese with English abstract)]
- 许乃政, 陶于祥, 高南华. 2001. 金属矿山环境污染及整治对策. 火山地质与矿产, 22 (1): 63–70.
- [Xu Naizhong, Tao Xuxiang, Gao Nanhua. 2001. Metal deposit environmental pollution and its remediation. *Volcanology & Mineral Resources*, 22 (1): 63–70. (in Chinese with English abstract)]
- 徐晓春, 陈芳, 王军, 等. 2005. 铜陵矿山酸性排水及固体废弃物中的重金属元素. 岩石矿物学杂志 24 (6): 591–597.
- [Xu Xiaochun, Chen Fang, Wang Jun, et al. 2005. Acid mine drainage and heavy metal elements of solid waste in Tongling mines. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 24 (6): 591–597. (in Chinese with English abstract)]
- 朱长见, 陆建军, 陆现彩, 等. 2005. 氧化亚铁硫杆菌作用下形成的黄钾铁矾的SEM研究. 高校地质学报, 11 (2): 234–238.
- [Zhu Changjian, Lu Jianjun, Lu Xiancai, et al. 2005. SEM study on jarosite mediated by *Thiobacillus ferrooxidans*. *Geological Journal of China Universities*, 11 (2): 234–238. (in Chinese with English abstract)]

Advances in Microbiologically Mediated Dissolution of Metal Sulfides in Polymetallic Mines and Its Environmental Significance

LU Jian-jun¹, LU Xian-cai¹, WANG Rui-yong², WANG Ru-cheng¹, LI Juan¹, ZHAO Xing-qing¹, XU Zhao-wen¹, HU Huan¹, HAN Xiao-dong³

(1. State Key Lab for Mineral Deposit Research, Department of Earth Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093, China; 2. College of Life Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093, China;

3. College of Medicine, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

Abstract: The dissolution of the metal sulfides in polymetallic mines not only produces acid mining drainage (AMD), but also releases the abundant heavy metals into the surroundings, which results in serious environmental contamination. Existing studies indicate that various microorganisms play important roles in the dissolution of minerals and in the release, transportation, precipitation and enrichment of heavy metals. In this paper, the new approaches on the mechanisms of microbiologically mediated dissolution of minerals, the interfacial processes between microbes and minerals, and the function of biofilms are summarized. The features of microbes community and species phylogeny are discussed. Furthermore, the microbiogeochemical cycles of the heavy metals released by the microbiological dissolution of metal sulfides and the influence of the heavy metals on the microbiological oxidation are reviewed. Finally, the potential applications of microorganisms in the remediation of contaminated environments are also addressed.

Key words: microbiological oxidation; dissolution mechanism; interfacial process; metal sulfide; polymetallic mine