

DOI: 10.3724/SP.J.1140.2011.03123

洋底热液喷口系统的微生物成矿研究进展

孙治雷^{1,2}, 何拥军^{1,2}, 李军^{1,2}, 齐崇阳^{1,2}, 李季伟³, 刘维亮⁴

(1 国土资源部 海洋油气资源和环境地质重点实验室, 青岛 266071; 2 青岛海洋地质研究所, 青岛 266071;

3 中国科学院 广州地球化学研究所, 广州 510640; 4 中山大学 海洋学院, 广州 510275)

摘要:现代洋底热液喷口系统的微生物成矿研究进展是地球自身发展、生命演化、洋底下的生物圈层以及天文微生物探索工作得以有效开展的重要保障。近 10 余年来,随着微电子和分子生物学技术的发展,热液系统微生物成矿研究得以拓展和深入,逐渐成为地质微生物学研究的一个热点领域。当前在全球的热液喷口系统已经发现微生物在包括 Fe、Mn、S、Si 的氧化物以及硅酸盐矿物的形成过程中起到了重要甚至关键性的作用,同时热液喷口系统依赖于无机化能代谢活动存在的微生物的矿化成为人们理解生命形式与无机地球相互作用历史的最关键的证据之一,已经从根本上补充甚至修正了生命科学与地球演化的一些核心观点。总结了近年来热液喷口系统微生物成矿研究的最新进展,论述了该环境中微生物成矿的机制和类型,探讨了微生物和部分矿物之间的相互作用以及现代热液微生物成矿研究的地质意义,以期加深人们对热液喷口微生物成矿过程的理解与重视。

关键词:热液喷口系统;生物成矿;化能自养微生物

中图分类号:P736.3 文献标识码:A 文章编号:0256-1492(2011)03-0123-10

深海沉积物和热液喷口系统在有机物质、氧化还原电位、压力以及温度方面均具有多种多样的变化梯度,使大量极端微生物在此处的生长成为可能^[1-4]。1977年,人们最先在加拉帕戈斯裂谷的深海热液喷口发现了热液群落的存在^[5],随后开展的研究又表明,地球生命可能起源于海底热液喷口系统^[6-8],这引发了人们极大的研究兴趣和对热液喷口微生物系统的重视,其中该系统内微生物矿化、成矿的研究成为一个重要的方向。

当前已经知道,在围绕热液喷口系统存在的丰富的微生物类型中,化能合成自养微生物是生命新陈代谢的初级能量制造者,它们的存在是热液生物群落繁衍的基础^[4,9-10]。由于该系统的微生物表面常具有一系列活性位点^[11-13],在水体环境中可积极与周围的成矿离子发生化学反应,使热液喷口处的微生物成矿成为可能。大量研究也早已证明,在该系统中大多数的矿物形成过程中都离不开微生物的参与。本文根据当前现代热液喷口微生物成矿的研究成果,总结了微生物作用下的 Fe、Mn 氧/羟化物,硅酸盐,无定形蛋白石以及硫(包括 H₂S 的氧化以

及金属硫化物的蚀变)矿化过程,探讨了现代热液喷口微生物成矿的某些机理和模式以及其地质意义,以期加深人们对热液喷口微生物成矿过程的理解与重视。

1 Fe 氧/羟化物的形成

就现代热液喷口系统而言,Fe 的微生物成矿过程可能是最普遍和重要的。首先,Fe 在地壳中含量占第四位^[14],Fe(II)与 Fe(III)之间在氧化还原反应中化合价态的转换在现代环境中的生物地球化学过程中扮演着一个基础性的重要角色;其次,Fe 的微生物成矿也可能是早期的地球演化中的重要生物化学过程,在绝大多数环境中微生物的代谢控制了 Fe 的氧化还原反应^[15]。现代热液喷口存在着大量丝缕状结构的 Fe 氧/羟化物的沉淀,而这些具有复杂形态的丝缕体,非常类似于一些嗜中性 Fe 氧化微生物本身或其附属结构的形貌,包括 *Gallionella ferruginea*, *Leptothrix discophora* 等^[14,16-22],这表明嗜中性 Fe 氧化菌很可能在这些 Fe 氧化物沉积体的形成中起到了重要作用。尽管如此,对于该机制的研究仍存在困难,一个重要的原因是自热液喷口获得的现代微生物难以在实验室培养,同时某些微生物还可以通过非接触的方式使 Fe 在细胞表面沉淀下来^[23]。Emerson 等^[18]研究了夏威夷 Loihi 海山的 Fe 氧化物菌席,并且从其中分离培养出来

基金项目:国家自然科学基金项目(40976036);国家自然科学基金青年基金(40906033);国际海底区域研究开发“十一五”项目(DYXM11502109)

作者简介:孙治雷(1975—),男,博士,主要从事与深海环境有关的地球化学与矿物学研究,E-mail:zhileisun@yeah.net

收稿日期:2010-12-11;改回日期:2011-01-19. 周立君编辑

了两株嗜氧的专性嗜中性 Fe 氧化菌(PV-1 和 JV-1 菌株),其中 PV-1 即后来的 *Mariiprofundus ferrooxydans*,属于新近从变形杆菌门划分出来的 *Zetaproteobacteria*^[24]。它能在可溶态 Fe 丰富的热液喷口系统中在胞外形成特征的无规则弯曲状 Fe 氧化物丝缕体,后来的一系列研究证实了其在热液喷口存在的普遍性^[19-21,24]。

化能自养型的 Fe 氧化菌能从 Fe^{2+} 向 Fe^{3+} 的氧化过程中获取能量将 CO_2 固定下来,这种新陈代谢机制是导致 Fe 氧化物发生沉淀的最可能的原因^[19,26]。有研究发现,中性条件下有 Fe 氧化菌参与的 Fe 的氧化速度可达到相同条件下无机氧化速度的 4 个数量级以上^[27],表明其在 Fe 的地球化学循环中的重要意义。微生物表面具有很多功能基团(如羧基和磷酸基)能有效吸附流体中的带正电荷的阳离子(例如可溶性的 Fe, Mn 等),从而能使某些矿物首先在微生物表面发生异质性聚集成核。此后,流体中的成矿物质就可以此为基础大量沉淀下来。例如, *Mariiprofundus ferrooxydans* 菌株在胞外分化出螺旋缠绕状茎杆结构,来转运含难溶的 Fe 的代谢终产物,同时,利用胞外多聚物中有机分子和氧化后的 Fe 结合,以延缓晶体生长,避免结壳现象的发生,其模式总结见图 1^[22]。

人们研究热液喷口 Fe 氧化还原微生物的一个重要原因是寻找确凿可信的生物标志,来还原 Fe 的生物循环的整个过程与演化历史。目前在两个方向的努力获得了初步进展:一是现在确实已发现某些特定形态只能由微生物代谢活动或者本身的矿化产生,如长杆状的 Fe 氧化物代表了 *Leptothrix discophora* 的外鞘,螺旋缠绕状的形状则被认为是 *Mariiprofundus ferrooxydans* 附属的茎杆结构。而现在已知最古老的 Fe 氧化物丝缕体出现于 17 亿年前,包裹于古老的碧玉沉积体内^[28]。对此样品的详细研究结果表明它们具有和现代热液喷口中分离出来的 *Mariiprofundus ferrooxydans* 菌株类似的特征,因此标志着 Fe 氧化菌的生命活动可以追溯到 17 亿年前;二是建立某些矿物和生命活动的关系并探讨了其生物地球化学循环的意义。如现在已经知道,与嗜中性 Fe 氧化菌代谢活动关联最密切的 Fe 的矿物形式是在 X 射线衍射谱图上有两个隆起峰的水铁矿(其隆起中心分别位于约 $d=1.5\text{\AA}$ 和 $d=2.5\text{\AA}$ 处),即所谓的二峰水铁矿^[29]。该矿物颗粒非常微小(约 3 nm)^[30],比表面积大($100\sim 700\text{ m}^2/\text{g}$)^[31],致使其具有强烈的吸附性能^[30]。在热液水体环境中,由于水体具有略显正电性的表面^[32],

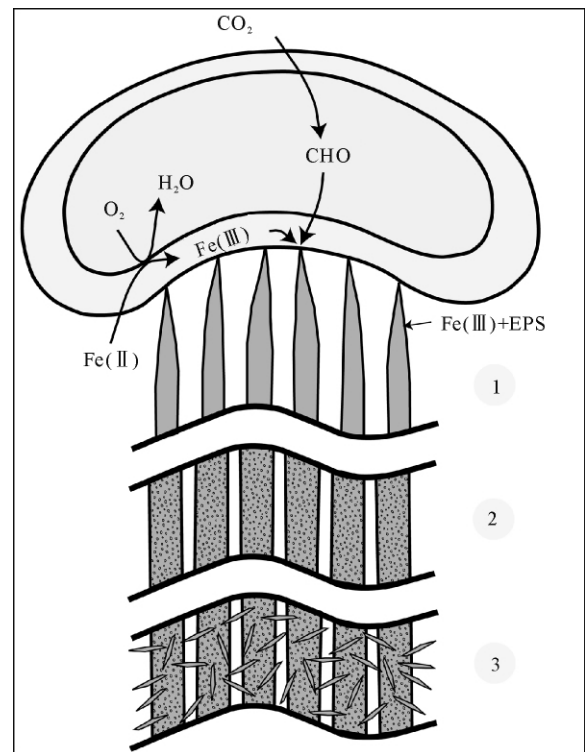


图 1 *Mariiprofundus ferrooxydans* 菌株细胞茎杆结构的形成和矿化模式^[22]

Fe 的氧化与 O_2 的还原过程相耦合

- (1) 从细胞内分泌出富 Fe(III) 多聚物(EPS)纤维体;
- (2) 随着时间推移,Fe(III) 氧化物沉淀下来成为 Fe 氧/羟化物;
- (3) 伴随着茎杆结构的老化,结晶度更好的纤铁矿在纤维体表面成核

Fig. 1 Model of stalk formation and mineralization process by *Mariiprofundus ferrooxydans*

可以对水体中以水合阴离子存在的 P、U、V、Gr 等元素进行有效清扫。从这个角度上来看,Fe 氧化微生物活动代谢终产物可以作为海洋中微量元素的一个重要的汇,不但控制了 Fe 元素的地球化学循环,同时也深刻影响着一系列其他元素在整个海洋循环过程中的地球化学行为^[33]。

当前,关于热液喷口系统中 Fe 的沉淀的一个研究焦点是如何定量判断无机因素和微生物因素在该过程中的作用。虽然大量矿物学和分子生物学的实例已经确定无疑地表明微生物在此过程中的重要作用,但仍不能排除无机因素在同一过程中的意义。这是因为即使仅靠无机作用本身,还原性的 Fe 在海水环境中的氧化速度也是相当快的;加上 Fe 氧化物沉淀后的成岩蚀变或矿物相变也使微生物的代谢信息变得难以辨认,这些问题需要将来在热液喷口附近开展更多更准确的原位实验来研究。此外,在地球完全富氧(约 23~24 亿年前)^[34-35]到

来前的一段漫长时期内,是否存在更老的 Fe 氧化菌?其代谢活动如何以及对环境中 Fe 循环的影响如何?这一系列问题的解决也需要在现代热液喷口进行更详细的寻找理想生物标志物的研究来支持。

2 Mn 氧/羟化物的形成

与 Fe 相比, Mn 在玄武岩中的含量较低 (< 0.2%)^[36],但这并不妨碍它成为洋底不依赖光合作用存在的黑暗食物链的一种重要能量来源^[37]。与呈中到碱性的氧化性海水相比,热液喷口系统能提供丰富的还原性的 Mn^{2+} ,并且具有相对较低的溶解 C,这使其成为支持化能自养专性或兼性 Mn 氧化菌生存的理想环境^[38]。最近,人们在夏威夷海岸附近的海底活火山的新鲜玄武岩表面上获取了大量被 Fe、Mn 氧化物包裹的微生物膜。由于这些玄武岩基底并未发生明显的风化蚀变,且这些生物膜中的 Fe、Mn 富集程度也大大超出了玄武岩的供给能力,所以,研究者断定这些 Fe、Mn 氧化微生物的能量来源,主要是该区存在的热液喷口系统^[39]。

环境中的 Mn 氧化菌能大大提高 Mn 的氧化速率,最高可达 5 个数量级以上^[40-42],同时,一些 Mn 氧化微生物也可以产生载体细胞来转运 Mn(III)^[43],这导致了 Mn 氧化微生物在深海热液环境中成矿的作用丝毫不逊于 Fe 氧化微生物。当前,人们在羽流中或从与热液喷口环境的沉积物、蚀变玄武岩中已经发现了许多能利用还原态 Mn 作为电子供体而生长的微生物,包括 Mn 氧化菌或真菌^[36, 38, 43-44]。一些 Mn 氧化菌也从这些环境中分离培养出^[36, 38, 44-45],如 Dick 等^[44]从瓜伊马斯盆地热液喷口附近的羽流和沉积物中分离出了大量的产孢子的 Bacillus 菌株,通过 16S rRNA 和 mnxG 多铜氧化酶编码基因,证明了它们参与了 Mn 的氧化过程。相关的实验研究表明,热液环境中,不但细菌能在其细胞外面形成 Mn 氧化物的结壳^[45],一些真菌也具有类似的功能,如能在胞外聚集 Mn 氧化物的 *Rhodotorula graminis* 菌株,见图 2^[43],这大大加深了人们对于热液环境中 Mn 的微生物成矿机制的认识。

目前已经发现的 Mn 氧化物/羟化物超过 30 种^[46],但是最常见的与微生物活动有关的通常有 δ - MnO_2 (水羟锰矿)、水钠锰矿、似水锰矿以及钡镁锰矿几种^[42]。比如, Dick 等^[44]在墨西哥瓜伊马斯盆地热液喷口附近的羽流中获取的微生物成因的

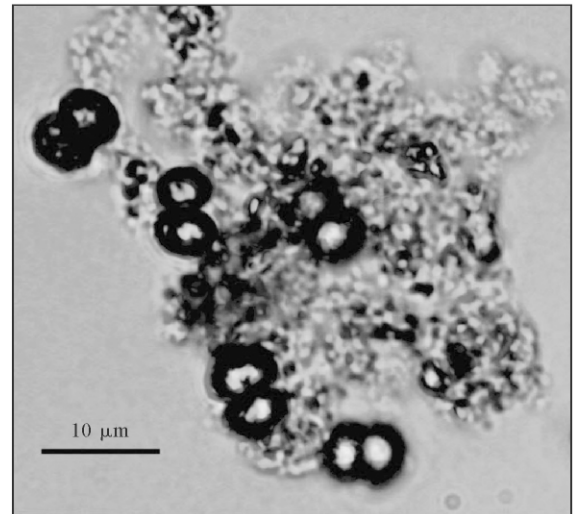


图 2 自 Vailulu'u 海山分离出来的真菌 *Rhodotorula graminis* 在室温条件下培养 7 天,在胞外形成微晶 Mn(III/IV)氧化物(黑色圆环状物质)
Fig. 2 Brightfield image of *Rhodotorula* sp. grown at room temperature in an artificial seawater basal salts medium. After 7 days, the cells are all associated with abundant clusters of nanocrystalline Mn(III/IV) oxides

Mn 氧化物主要具有 δ - MnO_2 或水钠锰矿的结构。这些微生物成因的 Mn 氧化物的共同特征是结晶度差^[47-48],颗粒尺寸小(仅为 4~100 nm)^[49-50],通常以凝聚体形式附着于细胞表面,此特征也导致了微生物成因的 Mn 氧化物具有较大的表面积(98~224 m^2/g)^[49,51]。同时,由于 Mn(IV)氧化物表面通常存在着部分 Mn(III)(某些时候也可能存在着 Mn(II)和其他异价态离子)以及八面体片上或晶格结构中的空穴导致环境中出现的 Mn 氧化物具有负电性的表面^[42]。这使质子、碱金属或碱土金属以及过渡金属元素的阳离子能强烈地吸附到其上,从而也对周围水体中的其他元素比如过渡金属元素起着强烈的控制作用,这也成为热液系统中 Mn 的微生物成矿的一个重要意义。

3 硅酸盐矿物及硅质的热液微生物成矿

3.1 硅酸盐矿物微生物成矿

微生物和硅酸盐(包括层、架状硅酸盐)的相互作用最近逐渐引发了人们的兴趣。已有研究表明,热液喷口系统最普遍的与微生物活动有关的硅酸盐矿物为绿脱石。人们在 Iheya 盆地、冲绳海槽^[52]、

东北太平洋 Southern Explorer 洋脊^[53]、Eolo 海山^[54]、加拉帕戈斯裂谷以及马里亚纳海沟^[55]的热液喷口的沉积物中以及与矿物表面接触的低温弥散流中均发现了绿脱石部分或完全地包裹在细胞表面的现象(表 1)。这些绿脱石的一个共同特征是形成温度具有适宜微生物生存的跨度范围:20~67.3 °C (氧同位素测温,见表 1)。此外,大多数绿脱石具有类似于微生物的丝缕状形貌,内部圆形或椭圆形的空穴(直径约 2~6 μm)很可能是微生物死后分解后

残余的铸模结构(图 3)。研究者认为,富 Fe 绿脱石盐能在胞外多聚物(EPS)沉淀下来仍是由于细胞或 EPS 表面所具有的活性功能基团(例如羧基)对于流体中可溶性的 Si、Fe 的浓缩和键合作用的结果^[52]。它的形成可能包括复杂的键合机制,而金属离子比如 Fe 能通过离子桥将细胞壁存在的活性位点与硅酸盐阴离子相键合,从而在细胞表面首先使矿物成核^[53],最终导致丝缕状的硅酸盐晶体包裹于细胞表面形成(图 4)。

表 1 现代热液喷口系统微生物作用下的硅酸盐成矿实例

Table 1 Occurrences of biogenic silicates in modern submarine hydrothermal vent systems

地点	深度/m	温度/°C	矿物类型	矿物及细菌形貌	来源
Red 海山, 21°N, EPR		30	绿脱石	直径 1 μm, 似细胞状丝缕体, 与类似形状的生物性的 Fe 氧化物共生	文献[16]
Izu-Bonin 弧前盆地	759~1 404*		绿色黏土(海绿石、绿磷石)、沸石	丝缕状的细菌或有机碎屑存在于绿色黏土中, TEM 显示黏土矿物主要由直径约 50 nm 的小球组成	文献[58]
加拉帕 戈斯裂谷	2 529~2 580	52	绿脱石	由折叠状微小黏土晶体构成似管状结构, 直径 2.5±0.5 μm, 壁厚 1±0.2 μm, 富 Si、Fe, 含 As、Zn、Cu	文献[55]
马里亚 纳海沟	3 607~3 614	21.5~67.3	绿脱石	由微小黏土晶体构成似管状结构, 晶体向内部空穴生长, 直径 2.5±0.5 μm, 壁厚 1.9±0.3 μm, 富 Si、Fe, 贫 Al	文献[55]
Southern Explorer 洋脊	1 794~1 808	2~50	富 Si、Fe 氧化物及 富 Fe 硅酸盐	针状或片状晶粒围绕矿化的细胞壁或者细胞分解后留下的椭圆形空穴生长, 晶粒 <20nm, 主要由 Fe 和 Si(5~65%)组成	文献[53]
Iheya 盆地, 冲绳海槽		6~7#	绿脱石	胞外物质(EPS)内发现极薄垂直于同一方向生长的绿脱石, 结晶度较差	文献[52]
Eyja fjordur Fjord, 冰岛北部	30~57	~80	皂石	分枝状丝缕体 5~10 μm, 内部存在椭圆或圆形空穴似微生物铸模, 外部伴随有微球体, 富 Fe、Mg、As、Ba	文献[57]
Eolo 海山	1 050	30	绿脱石	鳞球状或管状丝缕体由厚 1.2~1.8 μm 的小小晶体构成, 生长于似细胞壁表面, 细胞长度 10~20 μm, 直径 4~6 μm	文献[54]
Emperor 海山	179~825*		钙十字沸石, Fe 氧化物	直径 5 μm, 长约 100~200 μm 的波状丝缕体与直径 1~2 μm 的微球状结构附着于沸石表面, C 含量 5~55%, Fe 含量 1%	文献[56]

注:带*的深度指洋底之下,其余的为海水深度;带#为最大环境流体温度,其余均为氧同位素测温结果。

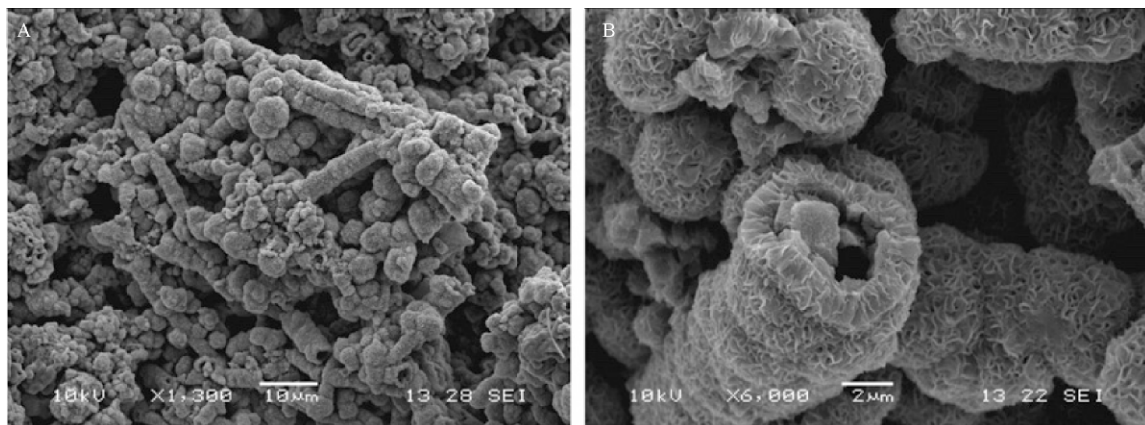


图 3 热液系统中微生物成因的绿脱石^[54]

样品取自 Tyrrhenian 海域 Eolo 海山, SEM 照片

Fig. 3 Biogenic hydrothermal nontronite from Eolo Seamount, Tyrrhenian Sea

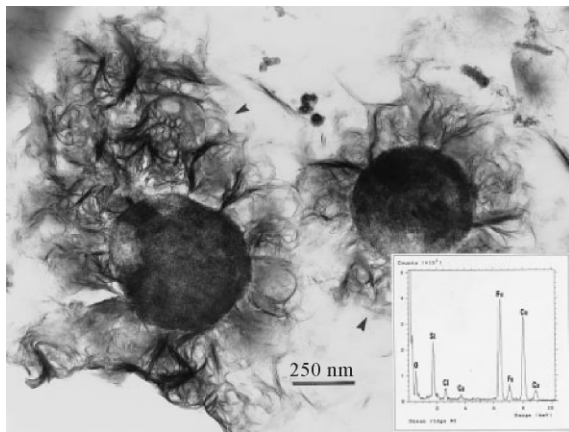


图 4 在细胞表面生长的富 Fe 层状硅酸盐矿物(绿脱石?)
(据文献[53])

样品来自 Juan de Fuca 洋脊 Magic Mountain 热液场沉积物。

TEM 照片,右下角分图为箭头处 EDS 分析结果

(分图布置原文如此),其中元素 Cu 来自实验用 Cu 质栅格

Fig. 4 Thin section of a rock coating showing crumpled sheet silicate (nontronite?) growing on the surface of completely mineralized bacteria

此外,与现代热液活动有关的微生物成因的硅酸盐矿物还涉及了包括沸石、皂石、绿色黏土(比如绿鳞石和海绿石)在内的其他矿物。从当前的研究来看,除了以细胞壁作为成核点,成矿物质直接键合在细胞表面促使成矿发生,可能还存在着其他的机制。比如 Ivarsson 等^[56]发现,微生物可以将沸石作为基底生长,并在沸石表面形成一层特征的生物膜以此来捕获流体中的营养物质以供自己生存需要。Geptner 等^[57]则认为热液系统中皂石的形成有可能是一种凝胶状基底在微生物的催化作用下发生的相变或重结晶;Tazaki 等^[58]通过研究发现,绿色黏土(海绿石和绿鳞石)是火山碎屑物质在热液环境中由微生物催化发生的蚀变作用所形成的,同时伴生的已石墨化的微生物残体证实了这一点。类似的现象在出露于地表的现代热泉区也有发现^[59]。尽管实际上现代热液喷口中硅酸盐矿物的形成尚未得到充分的关注,但以上研究无疑表明了硅酸盐特别是黏土矿物的微生物矿化现象是相当普遍的,这应属于今后继续深入研究的一个重要领域。

3.2 微生物的硅化

当前,对于微生物硅化现象的研究大多聚焦于出露于陆地表面的热泉,最成熟的研究地区包括美国黄石国家公园^[60]、冰岛^[61]以及新西兰^[62]。事实上,与陆地热泉流体相比,现代洋底热液流体中同样富 Si,这导致主要由无定形蛋白石(Opal-A)组成的

似生物丝缕体普遍出现于现代洋底热液喷口^[63-64],与金属硫化物、Fe-Mn 氧化物一起成为现代热液沉积物的重要组成部分。对于古代洋底热液沉积物的一系列研究表明,微生物在热液系统中的硅化非常普遍,同时,也是古代微生物在沉积物中得以保存的重要机制。同时,一些基于实验室模拟的热液微生物在富 Si 流体中的硅化过程的研究也开展起来^[65-66]。通过以上这些研究,研究者想达到如下两个主要目的:(1)探究微生物在硅化过程中的作用。因为对于微生物在硅化过程中仅仅是被动作为沉淀模板还是主动诱使硅质在自己表面成矿且从中获取能量当前仍存在争论;(2)更好地理解古代地球(特别是前寒武纪)的演化过程。人们目前已经逐步达成共识:现代洋中脊系统寡氧、相对高温、充满还原性流体的环境类似于地球早期的表面^[66],而太古代沉积体中发现的已经硅化的微生物的形态也非常类似于现代的微生物^[67]。对于现代热液环境中微生物硅化机制的研究,可以更好地推知地球早期各种地质现象(如富 Fe、Si 氧化物的条带状 Fe 建造、热液活动)和生命演化的历程。作者认为随着研究的深入,今后对于热液环境中微生物硅化的研究需实现从陆到海的转变,利用原位实验与实验室模拟相结合的手段,搞好古今对比,提高硅化机制研究在热液微生物成矿研究中的份量,以使其地位与 Si 质沉积在海洋沉积体中的实际数量相称。

4 硫化物在热液环境中的微生物成矿

热液喷口环境中,微生物对各种还原态的 S(尤其是 H_2S)的氧化过程是该系统中 C 和 S 生物循环的关键环节^[68],海水与热液混合过程中 H_2S 的氧化为热液喷口微生物群落提供了最主要的能量来源^[69]。广泛开展的微生物研究结果表明,以共生体或自由生长形式存在的包括 *Gamma proteobacteria*、*Epsilon proteobacteria* 以及 *Aquificaceae* 等微生物是海底热液喷口环境中最重要的硫氧化微生物^[68]。

热液环境中 S 的微生物氧化导致多种多样的矿物形成(如 S 单质、金属硫化物、硫酸盐等),这构成了该环境中重要的矿物组成。如丝缕状的 S 是 H_2S 与 O_2 相互过渡环境中最为普遍的产物,也是热液喷口环境中从数量上来说最为重要的生物过程^[70-71]。人们频频在刚刚发生喷发或有大范围热液流体排泄的热液区发现白色的絮状物质伴随海底流体一同喷出现象^[71-75]。通过研究,证实这些絮状物质由无机

S 和已经矿化了的 S 氧化菌组成^[72], 这表明了利用 S 的微生物在热液喷口的普遍性和重要性。Fiori 等^[76]运用 PIXE(粒子诱发 X 射线荧光分析)和 Micro-XANES(微区 X 射线吸收近边结构分析)等多种手段对于从东太平洋洋隆(EPR), 以及大西洋洋中脊(MAR)热液场获取的样品进行了微区化学成分和结构等方面的综合研究, 发现无论已经矿化的还是活体的微生物表面都具有复杂的含硫矿物, 包括硫酸盐、亚硫酸盐以及有机硫等形式, 显示出 S 氧化菌复杂的成矿机制。Zierenberg 等^[77]则发现, 部分微生物的催化过程会有选择地使 Ag、As 和 Cu 等元素首先发生沉淀, 因此, 在一些海底热液金属硫化物沉积体中, 微生物的催化可能是某些贵金属富集的重要原因。

与 H₂S 的氧化相比, 金属硫化物氧化的能量效应更小一些, 但在热液活动结束后, 在 H₂S 缺失的条件下, 推测残留金属硫化物的氧化作用很可能是支持化能合成微生物继续存在和繁衍的重要保证^[17,78]。据 McCollom^[79]计算, 热液系统中的金属硫化物可为该系统中的化能合成微生物的生长提供至少 40% 的能量。通过与海水的接触, 金属硫化物会遭受直接的氧化作用, 在微观尺度上显示出风化特征(如矿物表面的溶蚀坑)^[80], 主要由次生 Fe 氧化物/羟氧化物构成的大规模的橙—棕色的外壳层(特别在已熄灭的尖塔/烟囱体上最为常见^[38])以及岩屑堆积和风化产物存在的证据^[81]。在对 MAR 的 TAG (Trans-Atlantic Geotraverse) 地区和 Snake Pit 处的多金属硫化物堆积体表面的微生物菌席的研究中, Wirsén 等^[82]和 Eberhard 等^[78]均分离出了专性的非嗜酸性化能自养硫氧化菌, 这种细菌在近中性条件下可对金属硫化物进行氧化。Eberhard 等^[78]开展了原位、甲板和实验室的综合性工作来研究需氧嗜温硫氧化菌对硫化物的氧化过程, 两个实验结果都表明金属硫化物氧化过程中, 均发生了 CO₂ 的固定。Edwards 等^[83]在热液喷口附近开展包括单质 S 和各种含金属(Cu、Fe、Pb)硫化物在内的矿物原位培养实验, 两个月后, 原本光滑的矿物表面均发生了不同程度的蚀变, 被各种微生物和次生矿物所占据, 其中单质 S 的表面微生物密度最大。这充分表明 S 氧化微生物和 Fe 氧化微生物一起在金属硫化物蚀变过程中起到了重要的作用。

上述研究证明, 热液喷口系统中硫氧化微生物可以从各种形式的硫化物中获取到足够的能量, 这为深海热液喷口群落的存在提供了重要的物质基础。但关于硫化物所提供能量的定量研究以及涉及

到其中的微生物代谢的机制和意义的研究仍需更多的工作来支持。

5 研究意义及展望

远在 40 亿年前, 热液喷口系统就广泛地分布在地球表面上^[84]。同时, 热液喷口系统又是生命的摇篮^[6,85-86], 从地球演化早期到现代洋底的热液喷口系统都孕育着独特的生物群落。由于热液系统中的矿物沉淀具有较快的沉淀速度, 再加上普遍涉及的上述各种微生物的成矿作用, 可以使各个时期的微生物信息得到保存^[17,38,87]。实验证明, 微生物的原始形貌与成分是否能通过矿化得以有效保存, 并不仅仅取决于后期成岩作用以及风化变质作用的影响, 而在矿化发生早期的很短时间内(比如数天到数月)就可能决定了^[66]。这表明对地质历史时期热液喷口区微生物矿化的研究能为地球历史及生命演化提供一系列可靠的证据。如人们在澳大利亚 Sulfur Springs 32.35 亿年前的深海火山成因块状硫化物(VMS)沉积体中已识别出矿化生物的存在^[88], 而在 Pilbara 克拉通 34.66 亿年前的火山碎屑岩中, 又发现了已经硅化了的球菌状微生物^[87], 这些发现都大大推进了人们对于生命演化历史的研究。不仅如此, 有关现代热液喷口的一系列研究还揭示出洋底之下的生物圈的广泛存在^[4,56,89]。在洋底热液系统中普遍存在的丝缕状微生物化石连同一些生物成因的矿物同样存在于洋底之下的生物圈内^[56,90]。热液喷口系统是认识洋底生物圈的最重要的窗口, 对于热液喷口的微生物成矿的研究可以大大促进洋底下生物圈层的研究; 同样, 由于某些类地星体(比如火星)的表层环境与地球现代热液喷口系统非常类似, 探寻天文微生物的任务对于现代热液喷口的微生物的矿化研究也提出了现实性的挑战^[64,66,90-91]。

基于此, 国际上对于热液喷口系统微生物成矿的研究越来越多。特别是随着分子生物学的引入以及微电子探测技术的发展, 有关热液喷口生物多样性及微生物矿化的研究现已经向纵深发展, 逐渐成为生命科学和地质微生物学研究中的一个热点领域。当前, 热液喷口系统微生物成矿的研究尚集中于微观的矿化机理以及涉及到其中的微生物多样性方面的研究, 而对于宏观尺度上的微生物在热液矿床形成及后期矿体改造方面的作用还很少涉及; 由于极端环境下微生物的分离和纯培养相对困难, 大多数热液微生物在实验室条件下的成矿过程模拟的开展尚存在困难, 一些可以指示特定分类学或代谢

作用的生物标志仍然难以寻找^[22];此外,相比较为成熟的Fe、Mn、S的微生物成矿研究,热液喷口系统中,硅质(Opal-A)和硅酸盐矿物等其他元素/矿物的微生物成矿过程研究尚显薄弱。这些问题都需要进一步的研究工作来加强。

我国对海底热液系统的研究起步较晚,且研究重点均聚焦于热液烟囱体矿物学方面,在热液喷口系统生物多样性及微生物成矿方面与少数发达国家还有很大的差距。随着深海探测工作的蓬勃开展,近一段时期大量自主发现的热液场为中国科学家开展包括微生物成矿在内的热液喷口系统的研究提供了难得的契机和物质基础。作者相信,在不远的未来,我们一定能在包括深部生物圈和地外生命的探索方面的前沿领域有所突破,为人类生命科学和地球科学的发展作出应有的贡献。

参考文献 (References)

- [1] Yayanos A A. Microbiology to 10 500 meters in the deep-sea [J]. *Annual Review of Microbiology*, 1995, 49: 777-805.
- [2] Deming J W. Deep ocean environmental biotechnology [J]. *Current Opinion in Biotechnology*, 1998, 9: 283-287.
- [3] Vetriani C, Jannasch H W, MacGregor B J, et al. Population structure and phylogenetic characterization of marine benthic archaea in deep-sea sediments [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1999, 65: 4375-4384.
- [4] Jørgensen B B, Boetius A. Feast and famine-microbial life in the deep-sea bed [J]. *Nature Reviews Microbiology*, 2007, 5: 770-781.
- [5] Corliss J B, Dymond J, Gordon L I, et al. Submarine thermal springs on the Galápagos Rift [J]. *Science*, 1979, 203: 1073-1083.
- [6] Corliss J B, Baross J A, Hoffman S E. An hypothesis concerning the relationship between submarine hot springs and the origin of life on Earth [J]. *Oceanologica Acta*, 1981, suppl: 59-69.
- [7] Baross J A, Hoffman S E. Submarine hydrothermal vents and associated gradient environments as sites for the origin and evolution of life [J]. *Origins of Life and Evolution of Biospheres*, 1985, 15: 327-345.
- [8] Martin W, Baross J, Kelley D, et al. Hydrothermal vents and the origin of life [J]. *Nature Reviews Microbiology*, 2008, 6: 805-814.
- [9] Johnson K S, Childress J J, Hessler R R, et al. Chemical and biological interactions in the Rose Garden hydrothermal vent field, Galapagos spreading center [J]. *Deep-Sea Research*, 1988, 35: 1723-1744.
- [10] Elderfield H, Schultz A. Mid-ocean ridge hydrothermal fluxes and the chemical composition of the ocean [J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 1996, 24: 191-224.
- [11] Cox J S, Smith D S, Warren L A, et al. Characterizing heterogeneous bacterial surface functional groups using discrete affinity spectra for proton binding [J]. *Environmental Science & Technology*, 1999, 33: 4514-4521.
- [12] Martinez R E, Smith D S, Kulczycki E, et al. Determination of intrinsic bacterial surface acidity constants using a Donnan shell model and a continuous pKa distribution method [J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2002, 253: 130-139.
- [13] Yee N, Fowle D A, Ferris F G. A Donnan potential model for metal sorption onto *Bacillus subtilis* [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2004, 68: 3657-3664.
- [14] Fortin D, Langley S. Formation and occurrence of biogenic iron-rich minerals [J]. *Earth-Science Reviews*, 2005, 72: 1-19.
- [15] Weber K A, Achenbach L A, Coates J D. Microorganisms pumping iron: Anaerobic microbial iron oxidation and reduction [J]. *Nature Reviews Microbiology*, 2006, 4: 752-764.
- [16] Alt J C. Hydrothermal oxide and nontronite deposits on seamounts in the eastern Pacific [J]. *Marine Geology*, 1988, 81: 227-239.
- [17] Juniper S K, Fouquet Y. Filamentous iron-silica deposits from modern and ancient hydrothermal site [J]. *Canadian Mineralogist*, 1988, 26: 859-869.
- [18] Emerson D, Moyer C L. Neutrophilic Fe-oxidizing bacteria are abundant at the Loihi Seamount hydrothermal vents and play a major role in Fe oxide deposition [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2002, 68: 3085-3093.
- [19] Kennedy C B, Scott S D, Ferris F G. Characterization of bacteriogenic iron oxide deposits from Axial Volcano, Juan de Fuca Ridge, Northeast Pacific Ocean [J]. *Geomicrobiology Journal*, 2003, 20: 199-214.
- [20] Kennedy C B, Scott S D, Ferris F G. Ultrastructure and potential sub-seafloor evidence of bacteriogenic iron oxides from Axial Volcano, Juan de Fuca Ridge, north-east Pacific Ocean [J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 2003, 43: 247-254.
- [21] Langley S, Igric P, Takahashi Y, et al. Preliminary characterization and biological reduction of putative biogenic iron oxides (BIOS) from the Tonga-Kermadec Arc, southwest Pacific Ocean [J]. *Geobiology*, 2009, 7: 35-49.
- [22] Chan C S, Fakra S C, Emerson D, et al. Lithotrophic iron-oxidizing bacteria produce organic stalks to control mineral growth: implications for biosignature formation [J]. *The ISME Journal*, 2011, 5: 717-727.
- [23] Forget N L, Murdock S A, Juniper S K. Bacterial diversity in Fe-rich hydrothermal sediments at two South Tonga Arc submarine volcanoes [J]. *Geobiology*, 2010, 8: 417-432.
- [24] Rassa A C, McAllister S M, Safran S A. Zeta-Proteobacteria dominate the colonization and formation of microbial mats in low-temperature hydrothermal vents at Loihi Seamount, Hawaii [J]. *Geomicrobiology Journal*, 2009, 26: 623-638.
- [25] Emerson D, Rentz J A, Lilburn T G, et al. A novel lineage of proteobacteria involved in formation of marine Fe-oxidizing

- microbial mat communities[J]. PLOS ONE, 2007, 2(8): e667. doi: 10.1371/journal.pone.0000667.
- [26] Emerson D. Microbial oxidation of Fe(II) and Mn(II) at circumneutral pH, in Environmental Microbe Metal Interactions [M]. (ed. D. R. Lovely), ASM Press, Washington DC, 2000: 31-52.
- [27] Kasama T, Murakami T. The effect of microorganisms on Fe precipitation rates at neutral pH [J]. Chemical Geology, 2001, 180: 117-128.
- [28] Slack J F, Grenne T, Bekker A, et al. Suboxic deep seawater in the late Paleoproterozoic: evidence from hematitic chert and iron formation related to seafloor-hydrothermal sulfide deposits, central Arizona, USA[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2007, 255: 243-256.
- [29] Boyd T D, Scott S D. Two-XRD-line ferrihydrite and Fe-Si-Mn oxyhydroxide mineralization from Franklin Seamount, western Woodlark Basin, Papua New Guinea[J]. Canadian Mineralogist, 1999, 37: 973-990.
- [30] Zhao J, Huggins F E, Feng Z, et al. Ferrihydrite: Surface structure and its effects on phase transformation[J]. Clays and Clay Minerals, 1994, 42: 737-746.
- [31] Cornell R M, Schwertmann U. The Iron Oxides: Properties, Reactions, Occurrences and Uses[M]. Berlin: Wiley-VCH, 2003.
- [32] Dekov V M, Kamenov G D, Savelli C, et al. Metalliferous sediments from Eolo Seamount (Tyrrhenian Sea): Hydrothermal deposition and re-deposition in a zone of oxygen depletion[J]. Chemical Geology, 2009, 264: 347-363.
- [33] German C R, von Damm K L. Hydrothermal Processes[C]// Treatise on Geochemistry, Elsevier Science Ltd, 2003, 6: 181-222.
- [34] Farquhar J, Bao H, Thiemens M. Atmospheric influence of Earth's earliest sulfur cycle[J]. Science, 2000, 289: 756-758.
- [35] Bekker A, Holland H D, Wang P L, et al. Dating the rise of atmospheric oxygen[J]. Nature, 2004, 427: 117-120.
- [36] Templeton A S, Hubert S, Tebo B M. Diverse Mn(II)-Oxidizing Bacteria Isolated from Submarine Basalts at Loihi Seamount[J]. Geomicrobiology Journal, 2005, 22: 127-139.
- [37] Santelli C M. Life in the deep sea[J]. Nature Geosciences, 2009, 2: 825-826.
- [38] Juniper S K, Tebo B M. Microbe-metal interactions and mineral deposition at hydrothermal vents[C]// The Microbiology of Deep-Sea Hydrothermal Vents. New York: CRC Press, 1995: 219-253.
- [39] Dick G J, Lee Y E, Tebo B M. Manganese(II)-oxidizing Bacillus spores in Guaymas Basin hydrothermal sediments and plumes[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2006, 72: 3184-3190.
- [40] Templeton A S, Knowles E J, Eldridge D L, et al. A seafloor microbial biome hosted within incipient ferromanganese crusts[J]. Nature Geoscience, 2009, 2: 872-876.
- [41] Hastings D, Emerson S. Oxidation of manganese by spores of a marine Bacillus: kinetic and thermodynamic considerations[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1986, 50: 1819-1824.
- [42] Nealson K, Tebo B M, Rosson R A. Occurrence and mechanisms of microbial oxidation of manganese[J]. Advances in Applied Microbiology, 1988, 33: 279-318.
- [43] Tebo B M, Bargar J R, Clement B G, et al. Biogenic manganese oxides: Properties and mechanisms of formation[J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 2004, 32: 287-328.
- [44] Connell L, Barrett A, Templeton A, et al. Fungal diversity associated with an active deep sea volcano: Vailulu'u Seamount, Samoa[J]. Geomicrobiology Journal, 2009, 26: 597-605.
- [45] Dick G J, Clement B G, Webb S M, et al. Enzymatic microbial Mn(II) oxidation and Mn biooxide production in the Guaymas Basin deep-sea hydrothermal plume[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2009, 73: 6157-6530.
- [46] Ehrlich H L. Geomicrobiology, 2nd edition[M]. New York: Marcel Dekker, 1990, 646.
- [47] Feng X H, Zhu M, Ginder-Vogel M, et al. Formation of nano-crystalline todorokite from biogenic Mn oxides [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2010, 74: 3232-3245.
- [48] Villalobos M, Toner B, Bargar J, et al. Characterization of the manganese oxide produced by pseudomonas putida strain mnbl [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2003, 67: 2649-2662.
- [49] Webb S M, Tebo B M, Bargar J R. Structural characterization of biogenic Mn oxides produced in seawater by the marine bacillus sp strain sg-1[J]. American Mineralogist, 2005, 90: 1342-1357.
- [50] Nelson Y M, Lion L W, Ghiorse W C, et al. Production of biogenic Mn oxides by leprothrix discophora ss-1 in a chemically defined growth medium and evaluation of their Pb adsorption characteristics[J]. Applied and Environmental Microbiology, 1999, 65: 175-180.
- [51] Kim H S, Pasten P A, Gaillard J F, et al. Nanocrystalline todorokite-like manganese oxide produced by bacterial catalysis[C]. Abstracts of the American Chemical Society, 2004, 227, U1213-U1213.
- [52] Villalobos M, Bargar J, Sposito G. Trace metal retention on biogenic manganese oxide nanoparticles[J]. Elements, 2005, 1: 223-226.
- [53] Ueshima M, Tazaki K. Possible role of microbial polysaccharides in nontronite formation[J]. Clay and Clay Minerals, 2001, 49: 292-299.
- [54] Fortin D, Ferris F G, Scott S D. Formation of Fe-silicates and Fe-oxides on bacterial surfaces in samples collected near hydrothermal vents on the Southern Explorer Ridge in the northeast Pacific Ocean[J]. American Mineralogist, 1998, 83: 1399-1408.
- [55] Dekov V M, Kamenov G D, Stummeyer J, et al. Hydrothermal nontronite formation at Eolo Seamount (Aeolian volcanic

- arc, Tyrrhenian Sea) [J]. *Chemical Geology*, 2007, 245: 103-119.
- [56] Köhler B, Singer A, Stoffers P. Biogenic nontronite from marine white smoker chimneys [J]. *Clays and Clay Minerals*, 1994, 42: 689-701.
- [57] Ivarsson M, Lindblom S, Broman C, et al. Fossilized microorganisms associated with zeolite carbonate interfaces in sub-seafloor hydrothermal environments [J]. *Geobiology*, 2008, 6: 155-170.
- [58] Geptner A, Kristmannsdóttir H, Kristjánsson J, et al. Biogenic saponite from an active submarine hot spring, Iceland [J]. *Clay and Clay Minerals*, 2002, 50: 174-185.
- [59] Tazaki K, Fyfe W S. Microbial green marine clay from Izu-Bonin deep-sea sediments (west Pacific) [J]. *Chemical Geology*, 1992, 102: 105-118.
- [60] Konhauser K O, Schiffman P, Fisher Q J. Microbial mediation of authigenic clays during hydrothermal alteration of basaltic tephra, Kilauea Volcano [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2002, 3, 1075, doi:10.1029/2002GC000317.
- [61] Guidry S A, Chafetz H S. Siliceous shrubs in hot springs from Yellowstone National Park, Wyoming, U. S. A. [J]. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 2003, 40: 1571-1583.
- [62] Konhauser K O, Phoenix V R, Bottrell S H, et al. Microbial-silica interactions in Icelandic hot spring sinter: possible analogues for some Precambrian siliceous stromatolites [J]. *Sedimentology*, 2001, 48: 415-433.
- [63] Jones B, De Ronde C E J, Renaut R W, et al. Siliceous sublacustrine spring deposits around hydrothermal vents in Lake Taupo, New Zealand [J]. *Journal of the Geological Society*, 2007, 164: 227-242.
- [64] Stüben D, Eddine Taibi N, McCuthry G M, et al. Growth history of a hydrothermal silica chimney from the Mariana backarc spreading centre (southwest Pacific, 18°13'N) [J]. *Chemical Geology*, 1994, 113: 273-296.
- [65] Al-Hanbali H S, Sowerby S J, Holm N G. Biogenicity of silicified microbes from a hydrothermal system: relevance to the search for evidence of life on earth and other planets [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2001, 191: 213-218.
- [66] Fein J B, Scott S, Rivera N. The effect of Fe on Si adsorption by *Bacillus subtilis* cell walls: insights into non-metabolic bacterial precipitation of silicate minerals [J]. *Chemical Geology*, 2002, 182: 265-273.
- [67] Orange F, Westall F, Disnar J -R, et al. Experimental silicification of the extremophilic Archaea *Pyrococcus abyssi* and *Methanocaldococcus jannaschii*: applications in the search for evidence of life in early earth and extraterrestrial rocks [J]. *Geobiology*, 2009, 7: 403-418.
- [68] Westall F, de Vries S T, Nijman W, et al. The 3.466 Ga "Kitty's Gap Chert", an early Archean microbial ecosystem [J]. *Geological Society of America Special Paper*, 2006, 405: 105-131.
- [69] Sievert S M, Hügler M, Taylor C D, et al. Sulfur Oxidation at Deep-Sea Hydrothermal Vents [C]// *Microbial Sulfur Metabolism*. Heidelberg: Springer, 2008: 238-258.
- [70] McCollom T, Shock E L. Geochemical constraints on chemolithoautotrophic metabolism by microorganisms in seafloor hydrothermal systems [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1997, 61: 4375-4391.
- [71] Taylor C D, Wirsén C O. Microbiology and ecology of filamentous sulfur formation [J]. *Science*, 1997, 277: 1483-1485.
- [72] Taylor C D, Wirsén C O, Gail F. Rapid microbial production of filamentous sulfur mats at hydrothermal vents [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1999, 65: 2253-2255.
- [73] Nelson D, Haymon R M, Lilley M, et al. Rapid growth of unusual hydrothermal bacteria observed at new vents during ADVENTURE dive program to the EPR crest at 9°45'-52'N [J]. *EOS Trans Am Geophys Union*, 1991, 72: 481.
- [74] Embley R W Jr, Chadwick W W, Jonasson I R, et al. Initial results of the rapid response to the 1993 CoAxial event: relationships between hydrothermal and volcanic processes [J]. *Geophysical Research Letters*, 1995, 22: 143-146.
- [75] Embley R W, Chadwick W W Jr, Perfit M R, et al. Recent eruptions on the CoAxial segment of the Juan de Fuca ridge: implications for mid-ocean ridge accretion processes [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2000, 105: 16501-16526.
- [76] Moyer C L, Dobbs F C, Karl D M. Phylogenetic diversity of the bacterial community from a microbial mat at an active, hydrothermal vent system, Loihi seamount, Hawaii [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1995, 61: 1555-1562.
- [77] Foriel J, Philippot P, Susini J, et al. High-resolution imaging of sulfur oxidation states, trace elements, and organic molecules distribution in individual microfossils and contemporary microbial filaments [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2004, 68: 1561-1569.
- [78] Zierenberg R A, Schiffman P. Microbial control of silver mineralization at a sea-floor hydrothermal site on the northern Gorda Ridge [J]. *Nature*, 1990, 348: 155-157.
- [79] Eberhard C, Wirsén C O, Jannasch H W. Oxidation of polymetal sulfides by chemolithoautotrophic bacteria from deep-sea hydrothermal vents [J]. *Geomicrobiology Journal*, 1995, 13: 145-164.
- [80] McCollom, T M. Geochemical constraints on primary productivity in submarine hydrothermal vent plumes [J]. *Deep-sea Research I*, 2000, 47: 85-101.
- [81] Verati C, de Donato P, Prieur D, et al. Evidence of bacterial activity from micrometer-scale layer analyses of black-smoker sulfide structures (Pito Seamount Site, Easter microplate) [J]. *Chemical Geology*, 1999, 158: 257-269.
- [82] Scott S D. *Submarine hydrothermal systems and deposits [C]//Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits*. New York: John Wiley, 1997, 797-875.
- [83] Wirsén C O, Jannasch H W, Molyneux S J. Chemosynthetic microbial activity at Mid-Atlantic Ridge Hydrothermal vent sites [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1993, B98: 9693-

- 9703.
- [84] Edwards K J, McCollom T M, Konishi H, et al. Seafloor bioalteration of sulfide minerals: Results from in situ incubation studies[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2003, 67: 2843-2856.
- [85] Nisbet E G, Fowler C M R, 1999. Archaeal metabolic evolution of microbial mats[J]. *Proceedings of the Royal Society of London Series B*, 266: 2375-2382.
- [86] Nisbet E G, Fowler C M R. Some liked it hot[J]. *Nature*, 1996, 382: 404-405.
- [87] Nisbet E G. The realms of Archaeal life[J]. *Nature*, 2000, 405: 625-626.
- [88] Westall F, Southam G. The early record of life[J]. *Archean Geodynamics and Environments*, 2006, 164: 283-304.
- [89] Rasmussen B. Filamentous microfossils in a 3 235-million-year-old volcanogenic massive sulphide deposit[J]. *Nature*, 2000, 405: 676-679.
- [90] Fisk M R, Giovanoni S J, Thorseth I H. Alteration of oceanic volcanic glass: textural evidence of microbial activity[J]. *Science*, 1998, 281: 978-980.
- [91] Hofmann B A, Farmer J D, Von Blanckenburg F, et al. Subsurface filamentous Fabrics: an evaluation of origins based on morphological and geochemical criteria, with implications for exopaleontology[J]. *Astrobiology*, 2008, 8: 87-117.
- [92] Kyle J E, Schroeder P A, Wiegel J. Microbial Silicification in Sinters from Two Terrestrial Hot springs in the Uzon Caldera, Kamchatka, Russia[J]. *Geomicrobiology Journal*, 2007, 24: 627-641.

THE RECENT PROGRESS OF SUBMARINE HYDROTHERMAL BIOMINERALIZATION

SUN Zhilei^{1,2}, HE Yongjun^{1,2}, LI Jun^{1,2}, QI Chongyang^{1,2}, LI Jiwei³, LIU Weiliang⁴

(1 Key Laboratory of Marine Hydrocarbon Resources and Environmental Geology, Ministry of Land and Resources, Qingdao 266071;

2 Qingdao Institute of Marine Geology, Qingdao 266071; 3 Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640; 4 School of Marine Sciences, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510275)

Abstract: The study of biomineralization in modern hydrothermal vent system is one of the keys to the research and the exploring of the early history of the earth, the evolution of life, the subsurface biosphere and the study of terrestrial planets (such as the Mars). It has in the past decade become one of the focuses of geobiological research with the application of the microelectronic technology and molecular biology technology. Available information indicates that microorganisms play a critical role in the formation of oxyhydroxides (for instance, Fe, Mn, S or Si oxyhydroxide) and silicates in the hydrothermal systems of the earth. Furthermore, the biomineralization of modern chemolithoautotrophic microorganisms has been identified to be the nexus of the interaction between the geosphere and the biosphere and one of the forces to push forward the in-depth study of bioscience and geosciences. In this paper, we summarized the ongoing research of hydrothermal biomineralization, including the biogenic minerals, the microbial biodiversity and the interactions between the minerals and microorganisms. In the foreseeable future, the research of hydrothermal biomineralization will inspire both the development of geosciences and biosciences and deepen our understanding of the earth history, life evolution and even astrobiology.

Key words: hydrothermal vent systems; biomineralization; chemolithoautotrophic microorganisms