

文章编号: 1000-4734(2016)04-0510-09

# 云南马关都龙锡锌多金属矿床 鲕状黄铁矿微束分析

李忠烜<sup>1,2,3</sup>, 刘玉平<sup>1\*</sup>, 叶霖<sup>1</sup>, 廖震<sup>4</sup>, 张乾<sup>1</sup>, 王彪<sup>3</sup>

(1. 中国科学院 地球化学研究所 矿床地球化学国家重点实验室, 贵州 贵阳 550081; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 贵州省地矿局 一一三地质大队, 六盘水 553001; 4. 中色地科矿产勘查股份有限公司, 北京 100012)

**摘要:** 鲕状黄铁矿是都龙锡锌多金属矿床中的特殊硫化物矿物之一。本文通过扫描电镜观测其矿物微形貌结构特征, 并利用电子探针分析其化学成分, 为认识该类矿物成因及其与成矿作用的关系提供依据。扫描电镜观测显示, 该矿床中黄铁矿鲕粒主要由黄铁矿微晶组成, 在鲕粒纹层孔隙中发现了丝状体、杆状体、球状体等微生物成因显微结构。这些微生物化石与热液喷流沉积成因硫化物矿床、热泉、海底热液喷口中的微生物化石具有诸多相似特征, 表明该矿床形成过程中可能存在热水沉积成矿作用, 微生物在黄铁矿鲕粒形成过程中可能起到转换硫源、吸附金属元素、粘结黄铁矿微晶等作用。电子探针观测显示, 黄铁矿鲕粒中的 Zn 含量较高, 暗示鲕状黄铁矿可能作为后期成矿作用 Fe、Zn、S 等成矿元素的物源之一。从鲕粒边部到中心 Zn 含量逐渐递减的趋势, 并由交代作用在鲕粒边部形成富 Zn 边。

**关键词:** 鲕状黄铁矿; 微生物化石; 热水沉积; 成矿物源; 都龙锡锌多金属矿床

**中图分类号:** P579; P618.4

**文献标识码:** A

**doi:** 10.16461/j.cnki.1000-4734.2016.04.009

**作者简介:** 李忠烜, 男, 1989年生, 硕士研究生, 矿物学、岩石学、矿床学专业。E-mail: lizhongxuan@mail.gyig.ac.cn

## Microanalysis of Oolitic Pyrite in Dulong Sn-Zn Polymetallic Deposit, Maguan, Yunnan Province, China

LI Zhong-xuan<sup>1,2,3</sup>, LIU Yu-ping<sup>1\*</sup>, YE Lin<sup>1</sup>, LIAO Zhen<sup>4</sup>, ZHANG Qian<sup>1</sup>, WANG Biao<sup>3</sup>

(1. State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Science, Guiyang 550081, China; 2. University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. 113 Geological Party, Guizhou Bureau of Geology and Mineral Exploration & Development, Liupanshui 553001, China; 4. Sinotech Minerals Exploration Co., Ltd. Beijing 100012, China)

**Abstract:** Oolitic pyrite is one kind of feature minerals in Dulong Sn-Zn polymetallic deposit, Yunnan Province, China. In this paper, the micro-morphological characteristics of oolitic pyrite were studied by using field emission scanning electron microscope (SEM) and its chemical components were analyzed with electronic probe. These analytic results provide micro-scale evidences for the genesis of oolitic pyrite and its relationship with mineralization. The SEM results show that a lot of filaments, rhabdoids and spheroidites occur at micro fractures in the lamina of ooids. These micro-textures have similar morphology characteristics with micro-fossils occurring at exhalative hydrothermal sedimentary sulfide ore deposits, hot springs and hydrothermal vents under sea, indicating that their microbe genesis which might be related to exhalative hydrothermal sedimentation. The microbes might play a role to transform sulfide source, absorb metal elements and cement pyrite crystallites during pyrite ooids' forming. In addition, the electronic probe results show that the pyrite ooids have a high concentration of Zn, suggesting that pyrite ooids might be a source providing some ore-forming elements such as S, Fe and Zn, etc. The edge of ooids is brighter than inner under

收稿日期: 2016-05-11

基金项目: 云南华联锌铜股份公司委托项目 (KY20120910); 矿床地球化学国家重点实验室“十二五”项目群 (SKLOGD-ZY125-04)

\* 通讯作者, E-mail: liuyuping@vip.gyig.ac.cn

micro-scope as the result of metasomatism. The characteristics of the concentration of Zn show a gradually decreasing trend from edge to center.

**Keywords:** oolitic pyrite; micro-fossils; hot-water sedimentation; source of ore-forming material; Dulong Sn-Zn polymetallic deposit

南岭西段滇东南—桂西成矿带是我国重要的多金属成矿带，产出锡、锌、铜、铅、钨等矿产。该带南缘的都龙锡锌多金属矿床，位于云南省马关县都龙镇境内，其开采及研究较早，关于该矿床成因存在多种观点，主要有岩浆热液成因<sup>[1-3]</sup>、热水喷流沉积成因<sup>[4]</sup>、热水喷流叠加后期岩浆热液改造成因<sup>[5-6]</sup>等，有关矿床的年代学、地球化学、矿床系列、矿物组构等已有较深入的研究<sup>[2,5,7]</sup>。黄铁矿是该矿床主要的金属硫化物矿物之一，可分为3期：第一期为热水沉积形成的鲕状黄铁矿；第二期黄铁矿主要为半自形-自形立方体、五角十二面体，集合体呈星点状分布于含矿地层中，推测为早期鲕状黄铁矿受后期变质或热液交代重结晶而成；第三期为岩浆热液期黄铁矿，主要为它形-半自形不规则状、粒状，集合体呈脉状、斑点状、团块状分布于矿石及围岩中。该矿床矿石以条带状、片状、块状为主，鲕状黄铁矿具交代结构、变余结构<sup>[4-5,8]</sup>，是该矿床存在热水沉积作用的主要证据之一<sup>[5,9-10]</sup>。在邻区的个旧 Sn 多金属矿床中，也有鲕状黄铁矿存在的报道<sup>[7]</sup>。高分辨率的扫描电镜能从微尺度上揭示鲕状黄铁矿的结构特征，为黄铁矿鲕粒的成因等提供有效信息<sup>[11]</sup>。本文以都龙锡锌多金属矿床中的鲕状黄铁矿为研究对象，在野外地质现场考察、室内手标本观察和薄片鉴定的基础上，通过扫描电镜观测其矿物微形貌结构特征，并利用电子探针分析其化学成分，为认识该类矿物成因及其与成矿作用关系提供矿物学依据。

### 1 地质概况

都龙锡锌多金属矿床地处华南褶皱系西端与哀牢山褶皱系、印支地块的交汇部位，区域性断裂主要有红河断裂、弥勒断裂、南盘江断裂，个旧断裂、文一麻断裂等（图1）。

整个矿区自北而南由铜街、曼家寨、金石坡、辣子寨、南当厂等5个矿段组成（图2）。矿区内出露的地层主要为新元古界-下寒武统新寨岩组片岩、大理岩，中寒武统田蓬组片岩或千枚岩、大理岩，以及矿区东南部的元古界猛洞岩群片岩、片麻岩。岩浆岩主要有矿区北部的燕山期老君山花岗岩，以及东部的遭受了印支期变形-变质改造的加里东期南温河花岗岩。

矿体主要以层状、似层状产于新寨岩组中-上部，少量赋存于新寨岩组顶部及田蓬组下部，受地层控制较明显，其产状与地层基本一致（图2）。主要成矿元素为锌、锡、钨，共生伴生铜、钨、铅、银、镉、钼、铋等多种元素。矿石的金属矿物主要有铁闪锌矿、磁黄铁矿、黄铁矿、黄铜矿、方铅矿、毒砂、锡石等，非金属矿物主要有石英、方解石、绿泥石、阳起石、石榴石、辉石等。经钻探揭露，矿区铜街至辣子寨一线深部有隐伏产出的燕山期花岗岩。随与隐伏花岗岩距离增加，矿化呈现出 Sn-Fe-W→Sn-Cu→Sn-Zn→Pb-Zn-Ag 的分带特征<sup>[13]</sup>。鲕状黄铁矿主要分布于离老君山岩体较远的辣子寨矿段和曼家寨矿段南部，而在靠近老君山岩体的铜街矿段，多被后期矿物交代形成交代残余假象。据云南华联矿产勘探有限责任公司编制的《云南省马关县田房铜钨矿详查报告》，都龙矿区以北约 12 km 的南捞田房一带，赋存于新寨岩组的钨铜矿体中也发现了该类矿物。老君山地区的新寨岩组中-下部，常有透镜状产出的碳、磷、硫含量较高的夹层，其中的黄铁矿粒度细小，集合体多呈散点状、草莓状、结核状顺层分布，亦具有较明显的沉积特征。

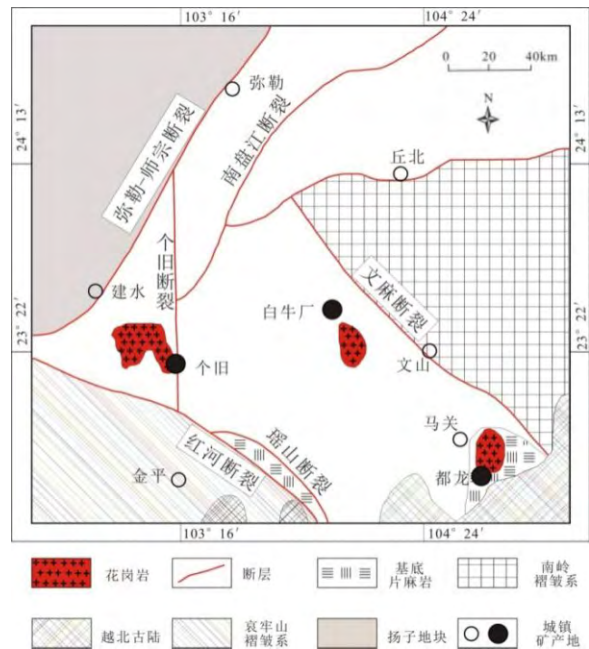


图1 滇东南地质简图（据文献[12] 修改）  
Fig. 1. Geological sketch map of southeastern Yunnan Province, China.

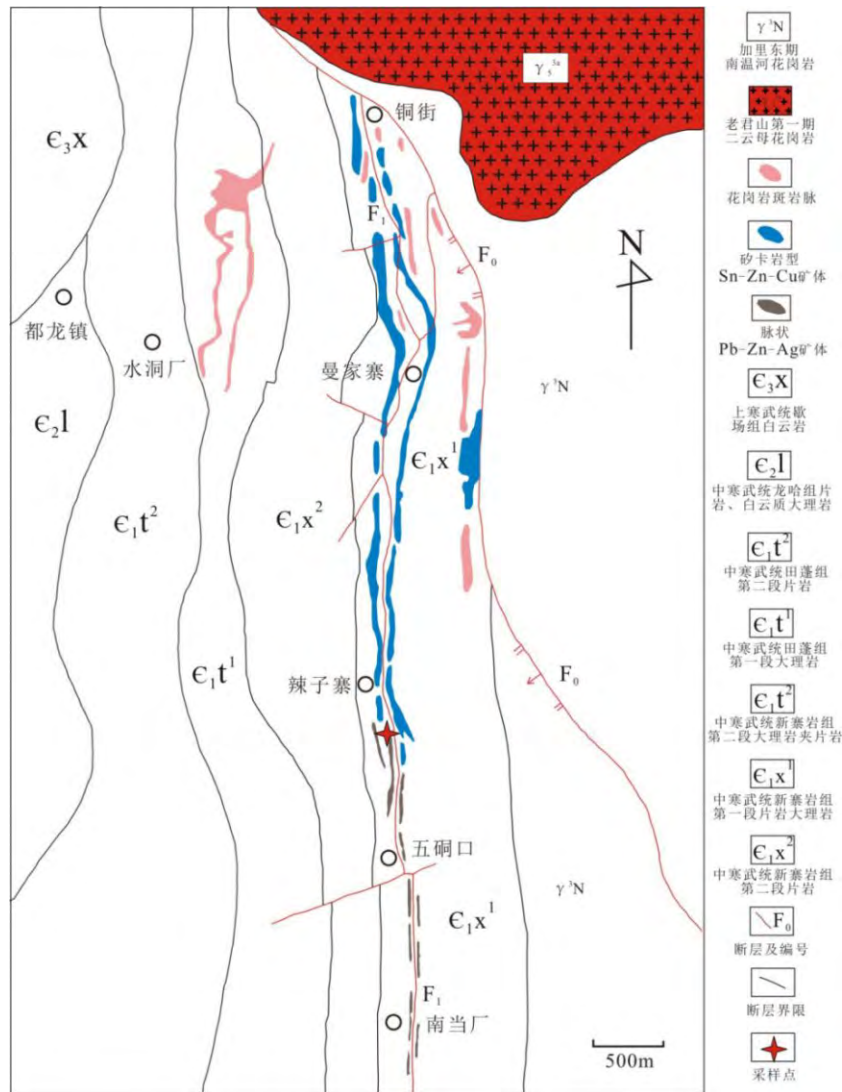


图2 都龙砂卡岩型锡锌多金属矿床地质简图(据文献[12]修改)

Fig. 2. Geological sketch map of Dulong Sn-Zn deposit.

## 2 样品采集与分析方法

本文所研究的样品采于受后期叠加改造影响较弱的辣子寨矿段(如图2所示),其含矿地层为新寨岩组中下部,矿体呈似层状、透镜状赋存于大理岩与云母石英片岩之间的顺层韧-脆性剪切带附近。样品为绿泥石化-阳起石化片岩型锡锌矿石,金属矿物主要为黄铁矿(包括鲕状黄铁矿和后期形成的结晶黄铁矿)、铁闪锌矿、磁黄铁矿、黄铜矿、锡石、白铁矿等;脉石矿物主要为绿泥石、石英、黑云母、阳起石等。手标本为灰-灰黑色,块状、条带状、细脉状构造(图3A)。在手标本上,借助10倍放大镜可观察到鲕状黄铁矿。选取手标本上鲕状黄铁矿发育密集且无污染的区域切制光薄片,用于岩矿鉴定、扫描电镜及电子探针分析。扫描电镜(SEM)和电子探针分析分别在中科院地球化学研究所矿床室扫

描电镜实验室和电子探针实验室完成。其中,扫描电镜仪器型号为JEM1800F,其测试条件为工作电压为15 kV,电流为110 nA。电子探针仪器为日本产EPMA-1600型,其测试条件为加速电压15 kV,电子束流 $1.0 \times 10^{-8}$  A,电子束斑为5  $\mu\text{m}$ ;分析过程中S、Fe采用黄铁矿作为标样,Co、Ni、As标样为方钴矿,Se、Bi标样为铋硒化物,Te标样为碲化铋,Ga标样为砷化镓,Zn标样为闪锌矿,Cu标样为赤铜矿,Pb标样为方铅矿。

## 3 分析结果

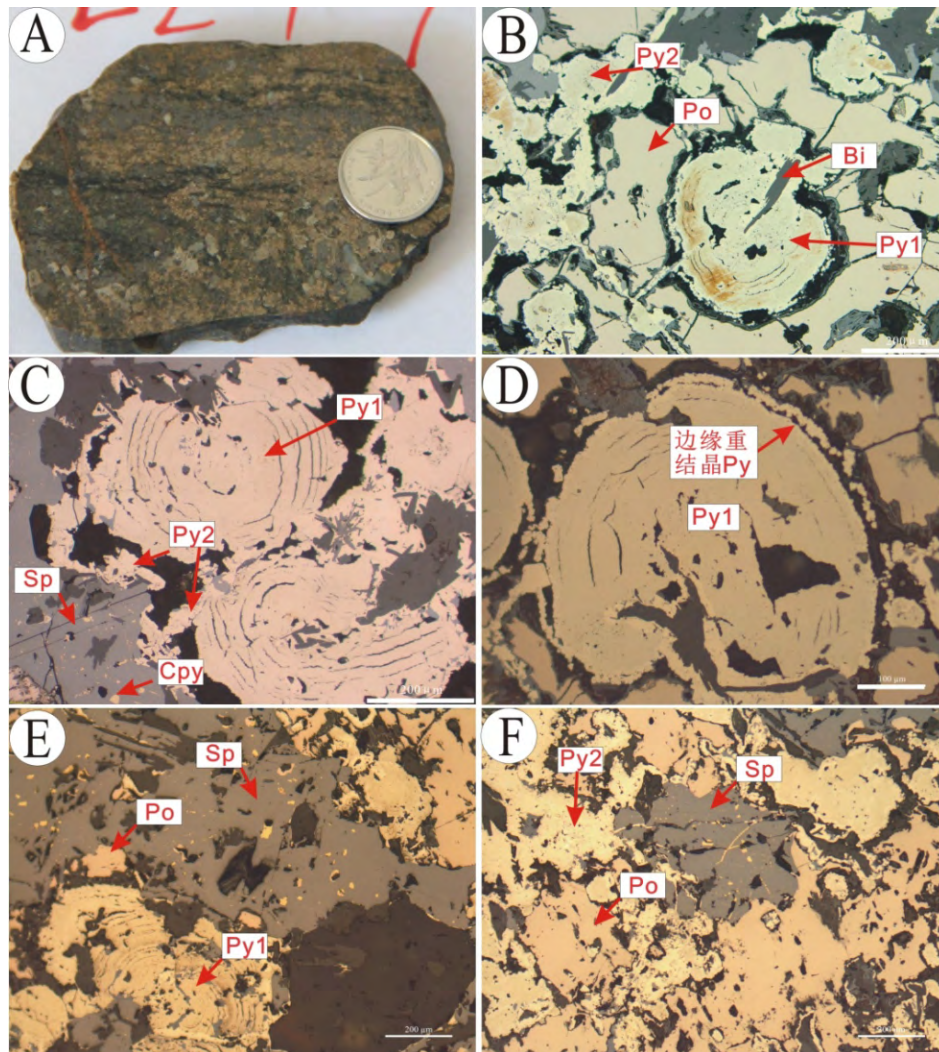
### 3.1 矿相学

矿相研究表明,鲕状黄铁矿矿石中矿物以交代结构和出溶结构为主,鲕粒直径变化范围一般为0.2~5.5 mm,主要集中在0.4~2 mm,鲕粒总体形

态保存较好, 主要有正常鲕、复合鲕、偏心鲕等类型(图3)。鲕状黄铁矿颗粒(Py1)多由核心和外壳(同心层)两部分构成, 核心和外壳均由黄铁矿组成(图3B-D)。部分鲕粒破碎后被铁闪锌矿、磁黄铁矿、重结晶细脉状黄铁矿(Py2)及区域动力变质期形成的黑云母等后期矿物穿切、交代, 显示鲕状黄铁矿为样品中最早形成的金属矿物(图3B)。部分黄铁矿鲕粒受后期热液交代改造, 在边部形成了重结晶黄铁矿细脉(图3D); 磁黄铁矿为块状, 穿插交代了早期形成的鲕状黄铁矿(Py1)并被后期的脉状黄铁矿(Py2)穿插交代(图3B), 说明磁黄铁矿形成晚于鲕状黄铁矿, 但早于脉状黄铁矿;

早期的鲕状黄铁矿(Py1)也被后期铁闪锌矿穿插, 同时铁闪锌矿也交代了磁黄铁矿(图3E), 说明铁闪锌矿形成于磁黄铁矿之后; 从图3F中可看出脉状黄铁矿(Py2)为最后期形成的矿物, 它穿插交代了早期形成的闪锌矿和磁黄铁矿, 闪锌矿中有黄铜矿“病毒”的出溶。

根据上述, 鲕状黄铁矿矿石中的黄铁矿分为2期, 第一期 of 鲕状黄铁矿(Py1), 具典型鲕状结构, 第二期 of 脉状黄铁矿(Py2), 呈脉状产出; 矿石中主要特征金属矿物的生成顺序为: 鲕状黄铁矿(Py1)→磁黄铁矿→铁闪锌矿+黄铜矿→细脉状黄铁矿(Py2)。



A-鲕状黄铁矿手标本照片, 样品为灰黑色, 具条带状、脉状、块状构造, 主要矿物为黄铁矿、磁黄铁矿、铁闪锌矿等; B-鲕状黄铁矿(Py1)常被后期的黄铁矿(Py2)、磁黄铁矿等交代充填, 鲕粒破碎严重; C-鲕状黄铁矿(Py1)常被后期的黄铁矿(Py2)、闪锌矿等交代充填; D-鲕状黄铁矿边部由重结晶作用形成黄铁矿细脉; E-铁闪锌矿交代早期鲕状黄铁矿和磁黄铁矿; F-脉状黄铁矿交代磁黄铁矿和铁闪锌矿

图3 都龙矿床中鲕状黄铁矿手标本、显微照片(反射光, 单偏光)

Fig. 3. Hand specimen and microphoto of oolitic pyrite from Dulong deposit (reflected light, plane-polarized light).

### 3.2 扫描电镜 (SEM)

SEM 分析显示, 鲕状黄铁矿的鲕粒由黄铁矿微晶集合体构成 (如图 4B), 其中发育大量类似于微生物成因的显微结构。这类显微结构主要分布于鲕环之间的纹层处内壁的孔洞和微裂隙中 (如图 4A、D、G、I、K 红框处的位置), 其形态各异, 包括丝状 (图 4C、F、J)、杆状 (图 4E)、球状 (图 4H、J) 等, 现将其特征描述如下;

#### 3.2.1 丝状体

丝状体为分布最广的显微结构, 其形态特征可细分为以下 2 类:

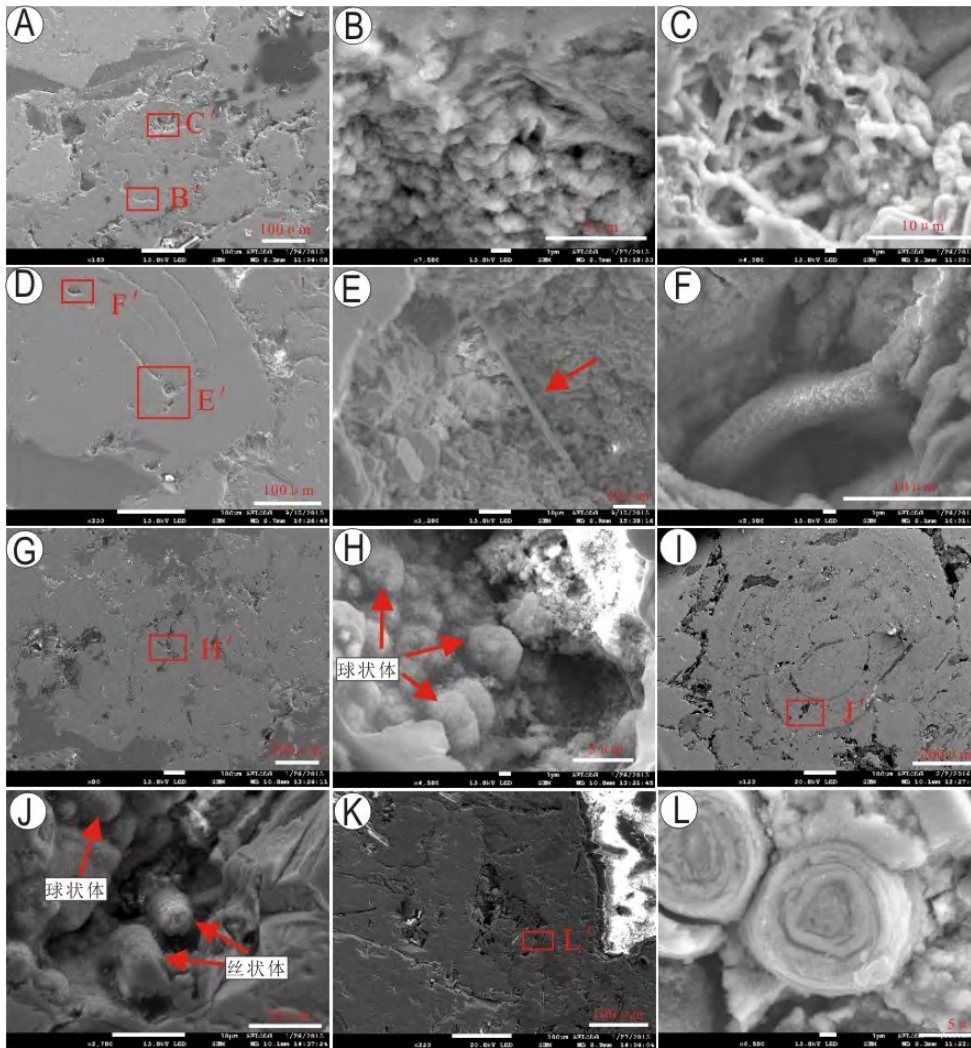
类型 I (图 4C): 由若干丝状体以不同方向和

角度交织而成, 交织结构。单体直径 1  $\mu\text{m}$  左右, 长度超过 30  $\mu\text{m}$ , 交织席厚度超过 2  $\mu\text{m}$ 。形态扭曲, 数量大, 分布密集, 表面粗糙, 局部有瘤状突起;

类型 II (图 4F、J): 呈自然蜷曲状 (图 4F), 直径在 5  $\mu\text{m}$  左右, 长度超过 10  $\mu\text{m}$ 。图 4J 中显示 2~3 个个体共生, 表面较为光滑并与球状体共生。从图 4F 中还可看出此类型丝状体具有中空结构, 中空部分后被后生矿物充填。

#### 3.2.1 杆状体

单体呈笔直圆杆状出现, 直径较丝状体大 (2  $\mu\text{m}$  左右), 粗细均匀, 长度超过 40  $\mu\text{m}$  (图 4E), 有少量细颗粒物粘附于表面。



红框及其编号: 红框为放大区域, 编号对应图号, 如图 A 中红框 B' 对应放大效果为图 B  
 A. 图 B、C 在鲕粒中的位置; C. 类型 I 丝状体, 具交织状结构; D. 图 E、F 在鲕粒中的位置;  
 E. 杆状体; F. 类型 II 丝状体; G. 图 H 在鲕粒中的位置; H. 球状体连生; I. 图 J 在鲕粒中的  
 位置; J. 类型 II 丝状体与球状体连生; K. 图 L 在鲕粒中的位置; L. 横切面

图 4 SEM 下黄铁矿鲕粒中丝状体、杆状体、球状体及黄铁矿微晶形态特征

Fig. 4. SEM micrograph for filaments, rods, spheroid and microcrystal pyrites in the pyrite ooids.

杆状体与丝状体的区别为前者呈笔直状, 后者卷曲或略微弯曲, 其重力结构、交织结构等表明其矿化之前柔软的特性。

### 3.2.3 球状体

球状体单体具明显球状结构, 常见多个个体共生 (图 4H), 且可与类型 II 丝状体伴生 (图 4J), 粒径 5 μm 左右, 表面略微粗糙 (图 4H)。

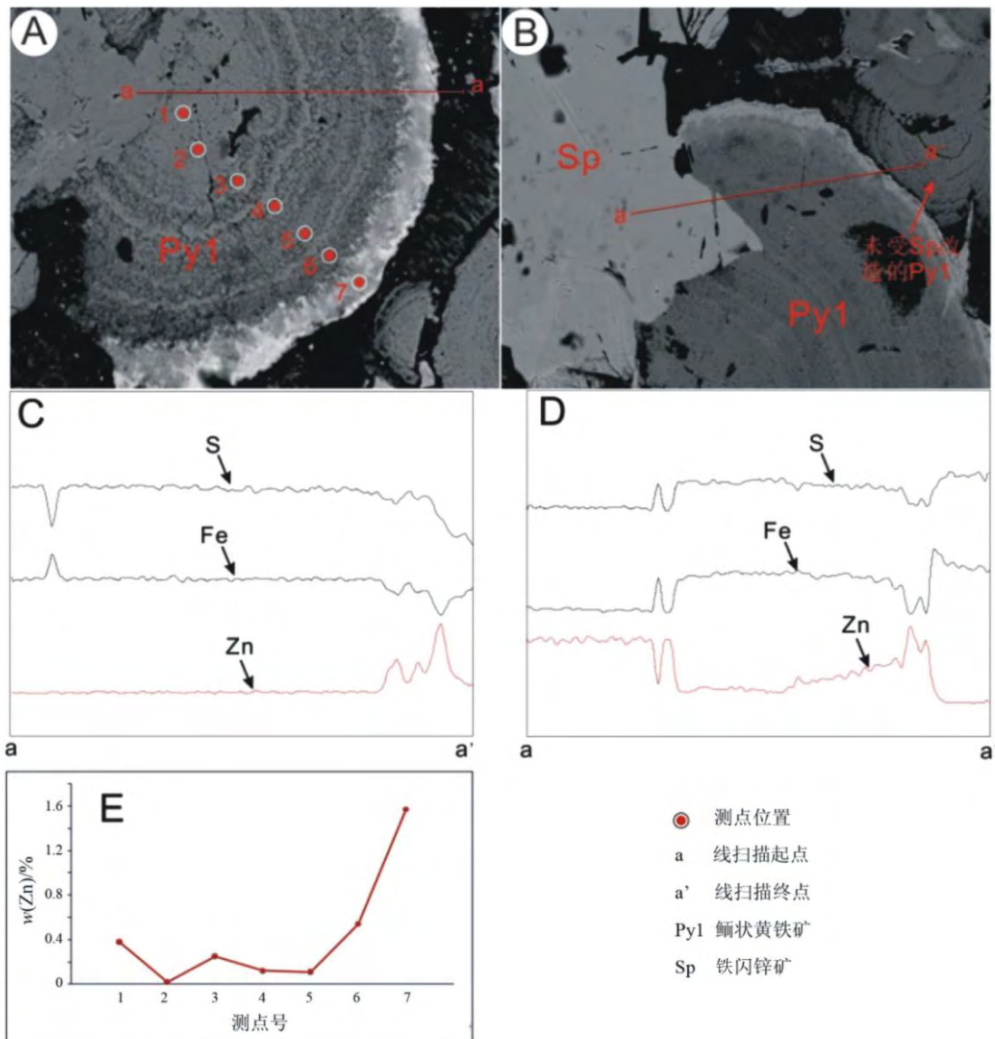
图 4L 是扫描发现的 2 个连生的圆形横切面, 粒径 7 μm 左右, 具 3~4 层的皮壳排列呈玫瑰花状, 皮壳之间界线明显。根据此切面的特征, 推测为球状体或类型 II 丝状体的横切面。

### 3.3 电子探针分析

在电子探针背散射条件下, 发现部分黄铁矿鲕粒沿其环外边缘分布的宽窄不等的黄铁矿细边, 其

相对鲕状黄铁矿明显较亮, 从鲕粒中心向外, 亮度逐渐增加, 而未受闪锌矿穿插交代的黄铁矿鲕粒则未出现此类细边 (图 5A,B)。线扫描分析表明, 边部具重结晶细脉的黄铁矿鲕粒, 其 Zn 含量由外到内呈逐渐降低的趋势 (图 5C,D)。在块状铁闪锌矿和细脉状铁闪锌矿与鲕状黄铁矿接触边界, 并未出现这种特征的富 Zn 黄铁矿细边。

对重结晶弱、鲕型保存较好的鲕状黄铁矿以及后期热液交代形成的磁黄铁矿进行了电子探针波谱定量分析, 结果见表 1。鲕状黄铁矿其核心主要成分仍为黄铁矿微晶 (表 1 中测点 1); 除一个测点外, 大部分测点的 Zn 含量均大于 0.1%, 最大值达 1.57%, 平均值为 0.43%, 此分析结果同样表明其边缘到核心 Zn 含量的递减趋势 (如图 5E)。磁黄铁矿中除 2 个测点外 (Zn 含量均为 0.04%), 大部分测点的 Zn 含量均未达到检出限。



A—B. 背散射图; C—D. 分别为图 A—B 的 X 射线分析图; E. 鲕状黄铁矿核心到边缘 Zn 含量变化图

图 5 都龙矿床鲕状黄铁矿电子探针分析图

Fig. 5. Analysis results for oolitic pyrite from Dulong deposit by using electron probe.

表 1 都龙矿床曼家寨矿段鲕状黄铁矿电子探针成分分析 ( $w_B/\%$ )

Table 1. Composition of oolitic pyrite from Dulong deposit Manjiazhai ore block and pyrrhotite analysis with electron probe

类型	测点	S	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	As	Sn	Ga	Pb	total
鲕状黄铁矿	1	53.29	46.12	0	0	0	0.38	0.58	0	0	0	100.34
	2	53.39	46	0	0	0	0.02	0.61	0	0	0	100.01
	3	53.45	46.01	0.01	0	0	0.25	0.54	0	0	0	100.25
	4	53.37	46.15	0	0.02	0	0.12	0.47	0	0	0	100.14
	5	53.29	46.09	0	0	0	0.11	0.61	0	0	0	100.11
	6	54.12	45.28	0	0.03	0	0.54	0.59	0	0	0	100.56
	7	54.5	44.96	0	0	0	1.57	0.54	0	0	0	101.67
磁黄铁矿		S	Fe	Se	Ni	Cu	Zn	As	Te	Ga	Pb	total
	1	38.73	60.36	0.02	0.02	0.05	0	0.79	0.04	0	0	100
	2	39.96	59.11	0.01	0.02	0.03	0.04	0.88	0	0	0	100.05
	3	39.82	59.82	0	0.02	0.03	0.04	1.01	0.03	0	0	100.76
	4	40.12	59.91	0	0.01	0	0	0.85	0.018	0	0	100.91
5	39.88	58.71	0	0	0	0	0.86	0	0	0	99.44	

## 4 结 语

### 4.1 微生物成因

地球系统中微生物是物质、能量交换储存的纽带。其分布范围广, 生存条件较宽。在诸多沉积成因岩石中已有微生物的记录<sup>[14-16]</sup>, 在温泉系统和海底热液系统及其喷流沉积成因的硫化物矿物中, 也有各类丝状、杆状、球状微生物化石的发现<sup>[17-23]</sup>。已有的研究表明, 根据矿物微形态特征, 如体积大小与分布、形态产出、特定的生物迹象(如生物侵蚀穴)等可指示微生物化石的存在<sup>[24-27]</sup>, 而无机作用形成的丝状体就不具一致的直径<sup>[28]</sup>。此外, 微生物赋存的孔洞内壁光滑, 这可能是微生物侵蚀作用造成的结果<sup>[24]</sup>, 而丝状微生物在生长的过程中, 其方向受重力、水流的影响, 重力覆盖所致的丝状体联结表现出交织席状结构, 表明了丝状体在矿化前是柔软的<sup>[28-29]</sup>。丝状微生物化石在形成过程中表面会形成矿物包壳, 当其所包裹的有机体被分解后可形成中空结构<sup>[23]</sup>。

本研究中, 扫描电镜(SEM)观测到的各类型丝状体、杆状体、球状体等, 均分布于鲕状黄铁矿鲕环之间的纹层处内壁光滑的孔洞和微裂隙中, 在其他矿物的表面和裂隙中未见类似微结构的出现, 表明了都龙矿床各类型丝状体、杆状体、球状体等微结构的原生性, 它们应是鲕状黄铁矿形成时的同期产物。其中类型 I 丝状体(图 4C)呈交织席状产出, 各弯曲的丝状体缠绕在一起, 说明此类丝状体在矿化前柔软的特性, 这与太平洋热液喷口中交织状的丝状体在直径和形态上皆具有相似特征<sup>[19]</sup>。此外, 在印度洋中脊热液羽状流和冲绳海槽的黑烟囱

中, 也有类似的结构出现<sup>[29-30]</sup>。类型 II 丝状微生物化石(图 4F、J), 具中空结构, 微生物形态特征明显, 在古热液系统中, 也报道了类似特征的丝状体出现, 其特征为直径 2  $\mu\text{m}$  左右的自然卷曲状硅化丝状体<sup>[31]</sup>, 同时, 在冲绳海槽的海底黑烟囱中, 也存在有具中空结构、直径约 5  $\mu\text{m}$  的丝状体出现<sup>[29]</sup>。本研究所观测到的杆状体(图 4E), 呈笔直杆状, 直径 2  $\mu\text{m}$  左右, 与前人研究的海底热液系统中杆状微生物化石<sup>[30]</sup>, 以及喷流热液成因的硫化物中的杆状微生物化石<sup>[18]</sup>具有相似特征。都龙矿床中球状体(图 4H、J), 与喷流热液系统<sup>[30]</sup>中的球状微生物化石和沉积成因的黄铁矿中极其丰富的球状构造<sup>[21]</sup>也具有相似特征。

综上所述, 扫描电镜(SEM)观测到的都龙矿床中各类型丝状体、杆状体、球状体等(如图 4C、E、F、J、H、L)是鲕状黄铁矿形成时的同期产物, 其体积大小一致, 以单种成群或两种共生的方式分布于鲕状黄铁矿鲕环之间的纹层处孔隙中, 形态等特征上与微生物极为相似而与无机成因的矿物有明显区别。此外, 所发现的丝状体、杆状体、球状体与海底热液喷口、热泉及古代喷流沉积硫化物矿物中的微生物化石具有相似的形态特征。可见, 该矿床黄铁矿鲕粒中丝状、杆状及球状体的出现是微生物被矿化的结果, 这些微生物的生活环境可能为热液环境。

### 4.2 鲕状黄铁矿的形成环境

鲕状黄铁矿和热液成因的胶状黄铁矿, 都以其明显的同心纹层结构为特征, 但热液无机成因的胶状黄铁矿, 是由于热液快速冷却减压收缩而形成

同心圆结构,但这种胶状黄铁矿其纹层之间界线往往不清楚<sup>[32]</sup>,而沉积成因的鲕状黄铁矿,形成于海底热液喷口或“烟囱”附近等动荡环境,由以铁和硫为主的金属硫化物胶体沉淀,外加微生物作用的参与而形成,此成因的黄铁矿鲕粒可与草莓状黄铁矿相类比<sup>[33-34]</sup>。已有研究表明,微生物会直接或间接影响矿物质的沉淀,对热液区矿物的形成具有重要意义<sup>[23,35-37]</sup>,如硫酸盐还原菌的产物 $H_2S$ 就可与 $Fe^{2+}$ 结合形成黄铁矿<sup>[38]</sup>。而近年来的研究更是肯定了生物作用在鲕状结构矿物形成过程中的重要作用<sup>[39]</sup>。

都龙锡锌多金属矿床中的黄铁矿鲕粒虽然经受了后期改造作用,但其圈层结构依然清晰,同时有复鲕、偏心鲕的出现,其鲕粒主要由粒径 $1\sim 2\ \mu m$ 的黄铁矿微晶组成(图4B)。已有研究表明,都龙矿床鲕状黄铁矿的发现,可能反映存在早期的热水沉积成矿作用<sup>[5]</sup>。其中大量微生物化石结构的存在,更进一步表明黄铁矿鲕粒的形成可能有微生物的参与而非由无机热液作用形成。其形成过程可能如下:在中寒武世时期,都龙地区处于大陆边缘坳拉槽中心地带,由于拉张断裂的持续作用,在中心地带出现了热水沉积作用<sup>[40]</sup>,微生物通过还原海水中硫酸盐形成黄铁矿鲕粒提供硫源,而在发生热液脉动作用后,早期沉积而又未固结的沉积物悬浮在海水中,成为鲕粒的结核,同时,微生物在结核表面生长并粘结黄铁矿微晶,如此长期热水喷流沉积作用便形成鲕状黄铁矿层。

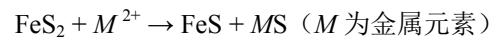
### 4.3 鲕状黄铁矿与成矿作用间关系

有研究认为,成矿元素可富集于生物体内<sup>[41]</sup>,早期形成黄铁矿可为后期成矿提供物质来源<sup>[34,42]</sup>。本矿床中的鲕状黄铁矿 Zn 含量较高,平均值为0.43%,而磁黄铁矿中 Zn 含量较低,说明寒武纪热水沉积作用发生时都龙地区 Zn 等成矿物质已形成了一定富集,可能为都龙锡锌多金属矿床的形成提供了部分成矿物质,如 Zn 等。这一过程,按鲕状黄铁矿分布面积 $1\ km^2$ 、平均厚度 $2\ m$ 、析出 Zn 质

量占比0.40%、富集成矿率10%估算,仅可以提供约0.4万吨 Zn。相对于该矿床千万吨级的 Zn 金属资源储量,占比微乎其微。

此外,受闪锌矿穿插交代的鲕状黄铁矿鲕粒其边缘有富 Zn 亮边,可能是鲕状黄铁矿在遭受后期较强烈的富 Zn 热液交代作用时边部重结晶所致。图5D中可看出从鲕粒边缘向内,Zn 含量呈递减趋势,暗示此交代作用甚至可使 Zn 渗透到黄铁矿鲕粒之中,早期形成的黄铁矿鲕粒不可能为后期的大规模 Zn 矿化作用提供物质来源。

但早期形成的鲕状黄铁矿中的 S 在后期金属硫化物的形成过程中可作为矿化剂,结合金属元素沉淀形成金属硫化物,其反应式简化如下:



依据上述假设,析出硫为 $2.327 \times 10^6$ 吨,按富集成矿率为10%,与 Zn 结合形成闪锌矿可富集 Zn 达65.41万吨。可见,其可能为后期成矿作用硫的来源之一。

综上,都龙锡锌多金属矿床中,鲕粒黄铁矿主要由黄铁矿微晶组成,在鲕粒纹层孔隙中发育丝状、杆状、球状等形态的微生物成因组构,指示其为热液环境下的微生物被矿化的结果,进一步说明都龙锡锌多金属矿床形成过程中可能存在热水沉积作用。微生物可为黄铁矿鲕粒的形成提供硫源,并起到吸附成矿元素、粘结黄铁矿微晶的作用,最后在热液脉动作用下形成鲕状黄铁矿层。

本研究表明,鲕状黄铁矿中 Zn 元素含量较高,具一定重结晶的鲕状黄铁矿从鲕粒边缘到中心 Zn 含量逐渐递减,鲕粒边缘有富 Zn 亮边存在。以鲕状黄铁矿为代表的热水沉积产物可能为后期成矿的提供了部分 S、Fe 及少量的 Zn。

**致谢:**扫描电镜观测和电子探针分析分别在中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室扫描电镜实验室和电子探针实验室完成,扫描电镜观测得到董少花高级工程师的帮助,电子探针分析得到郑文勤高级工程师的帮助,在此一并深表感谢。

### 参 考 文 献:

- [1] 忻建刚,袁奎荣. 云南都龙隐伏花岗岩的特征及其成矿作用[J]. 桂林冶金地质学院学报, 1993, 13(2): 122-129.
- [2] 张洪培,刘继顺,李晓波,等. 滇东南花岗岩与锡、银、铜、铅、锌多金属矿床的成因关系[J]. 地质找矿论丛, 2006, 21(2): 87-90.
- [3] 李进文,裴荣富,王永磊. 云南都龙锡锌矿区同位素年代学研究[J]. 矿床地质, 2013, 32(4): 767-782.
- [4] 周建平,徐克勤,华仁民,等. 滇东南喷流沉积块状硫化物特征与矿床成因[J]. 矿物学报, 1998, 18(2): 158-168.
- [5] 刘玉平,李朝阳,廖震,等. 都龙锡锌超大型多金属矿床矿石组构学与年代学[J]. 矿床地质, 2010, 29(S1): 479-480.
- [6] 贾福聚. 云南老君山成矿区成矿系列及成矿规律研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2010.
- [7] 周建平,徐克勤,华仁民. 滇东南锡多金属矿床成因商榷[J]. 云南地质, 1997, 16(4): 309-349.



- [8] 王小娟. 云南都龙锡锌多金属矿床找矿矿物学与成矿年代学[D]. 贵阳: 中国科学院地球化学研究所, 2013.
- [9] 刘玉平. 一个受后期改造和热液叠加的块状硫化物矿床—都龙超大型锡锌多金属矿床[J]. 矿物岩石地球化学通报, 1998, 17(1): 22-24.
- [10] 刘玉平, 李朝阳, 刘家军. 都龙矿床含矿层状夕卡岩成因的地质地球化学证据[J]. 矿物学报, 2000, 20(4): 378-384.
- [11] 谢巧勤, 陈天虎, 范子良, 等. 铜陵新桥硫铁矿床中胶状黄铁矿微尺度观察及其成因意义[J]. 中国科学: 地球科学, 2014, 44(12): 2665-2674.
- [12] 宋焕斌, 金世昌. 滇东南都龙锡矿的控矿因素及区域找矿方向[J]. 云南地质, 1987, 6(4): 298-304.
- [13] 鲍谈. 云南都龙砂卡岩型锡锌多金属矿床成矿流体及成矿机制研究[D]. 贵阳: 中国科学院地球化学研究所, 2013.
- [14] 钱迈平, 袁训来, 阎永奎, 等. 苏皖北部新元古代微生物化石[J]. 微体古生物学报, 2002, 19(4): 363-381.
- [15] 姜红霞, 吴亚生, 蔡春芳. 重庆老龙洞二叠系-三叠系界线地层中的管状蓝细菌化石及其意义[J]. 科学通报, 2008, 53(7): 807-814.
- [16] 常玉光, 百万备, 齐永安, 等. 豫西寒武纪叠层石微生物化石组合及其沉积环境[J]. 地球科学进展, 2014, 29(4): 456-463.
- [17] 王风平, 周悦恒, 张新旭, 等. 深海微生物多样性[J]. 生物多样性, 2013, 21(4): 445-455.
- [18] 夏学惠. 冀东高板河锌、硫铁矿床中的微生物席与矿床成因[J]. 矿床地质, 1996, 15(2): 165-170.
- [19] Juniper S K, Fouquet Y. Filamentous iron-silica deposits from modern and ancient hydrothermal sites[J]. Canadian Mineralogist, 1988, 26: 859-869.
- [20] Li J H, Kusky T M. World's largest known Precambrian fossil black smoker chimneys and associated microbial vent communities, North China: Implications for early life[J]. Gondwana Research, 2007, 12: 84-100.
- [21] Schieber J. Sedimentary pyrite: A window into the microbial past[J]. Geology, 2002, 30(6): 531-534.
- [22] Zierenberg R A, Schiffman P. Microbial control of silver mineralization at a sea-floor hydrothermal site on the northern[J]. Nature, 1990, 348(6297): 155-157.
- [23] Parenteau M N, Cady S L. Microbial biosignatures in iron-mineralized phototrophic mats at chocolate pots hot springs, Yellowstone national park, United States[J]. Palaios, 2010, 25(2): 97-111.
- [24] 冯军, 李江海, 牛向龙. 热泉微生物化石的识别研究及其科学意义[J]. 微体古生物学报, 2005, 22(2): 136-142.
- [25] Hofmann B A, Farmer J D. Filamentous fabrics in low-temperature mineral assemblages: are they fossil biomarkers? Implications for the search for a subsurface fossil record on the early Earth and Mars [J]. Planetary and Space Science, 2000, 48: 1077-1086.
- [26] Izawa M R M, Banerjee N R, Flemming R L, et al. Preservation of microbial ichnofossils in basaltic glass by titanite mineralization[J]. The Canadian Mineralogist, 2010, 48(5): 1255-1265.
- [27] Westall F, de Wit M J, Dann J, et al. Early Archean fossil bacteria and biofilms in hydrothermally-influenced sediments from the Barberton greenstone belt, South Africa[J]. Precambrian Research, 2001, 106(1): 93-116.
- [28] Banfield J F, Welch S A, Zhang H Z, et al. Aggregation-based crystal growth and microstructure development in natural iron oxyhydroxide biomineralization products[J]. Science, 2000, 298(5480): 751-754.
- [29] 冯军, 李江海, 初凤友. 冲绳海槽海底黑烟囱中微生物化石的发现及其意义[J]. 微体古生物学报, 2006, 23(1): 57-61.
- [30] 雷吉江, 初凤友, 李小虎, 等. 西南印度洋中脊热液羽状流中微生物化石的发现及意义[J]. 微体古生物学报, 2009, 26(1): 39-47.
- [31] Drake D D, Campbell K A, Rowland J V, et al. Evolution of a dynamic paleo-hydrothermal system at Mangatete, Taupo Volcanic Zone, New Zealand[J]. Volcanology and Geothermal Research, 2014, 282: 19-35.
- [32] 任云生, 刘连登. 铜陵地区热液成因胶状黄铁矿及其成矿意义[J]. 矿床地质, 2006, 25(S1): 95-98.
- [33] Koski R A, Lonsdale P F, Shanks W C, et al. Mineralogy and geochemistry of a sediment-hosted hydrothermal sulfide deposit from the southern trough of Guaymas Basin, Gulf of California[J]. Journal of Geophysical Research, 1985, 90(B8): 6695-6707.
- [34] 初凤友, 陈丽蓉. 大洋中脊胶状黄铁矿的特征及其成因[J]. 海洋与湖沼, 1995, 26(4): 350-354.
- [35] 殷鸿福, 谢树成, 张修高. 微生物成矿作用研究的新进展和新动向[J]. 地学前缘, 1994, 1(3/4): 148-156.
- [36] 尤继元, 周鼎武, 朱晓辉. 热液喷口生物体对成矿作用的影响[J]. 地学前缘, 2011, 18(5): 319-330.
- [37] 夏学惠, 李钟模. 鲕状黄铁矿的热液沉积与微生物成矿作用[J]. 沉积学报, 1999, 17(S1): 712-717.
- [38] Xie S C, Yang H, Luo G M, et al. Geomicrobial functional groups: A window on the interaction between life and environments[J]. Chinese Science Bulletin, 2012, 57(1): 2-19.
- [39] 梅冥相. 鲕粒成因研究的新进展[J]. 沉积学报, 2012, 30(1): 20-32.
- [40] 林知法. 云南马关都龙超大型矿床构造控矿特征及矿床成因研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2010.
- [41] 戴永定, 刘铁兵, 沈继英. 生物成矿作用与生物矿化作用[J]. 古生物学报, 1994, 33(5): 575-594.
- [42] 张欢, 高振敏, 马德云, 等. 个旧锡矿区鲕状黄铁矿和胶状结构黄铁矿中锡的分布及其成因意义[J]. 矿物学报, 2004, 24(1): 87-91.