

文章编号: 1000-4734(2018) 04-0443-06

滇西北羊拉铜矿床低 $\delta^{34}\text{S}$ 黄铁矿的 成因与地质意义

林贵生¹, 黄智龙², 李波^{2, 3*}, 杜丽娟², 邹国富⁴, 唐果⁴, 刘月东⁴

(1. 贵州省有色金属和核工业地质勘查局 地质矿产勘查院, 贵州 贵阳 550005; 2. 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 550002; 3. 昆明理工大学 国土资源工程学院/有色金属矿产地质
调查中心 西南地质调查所, 云南 昆明 650093; 4. 云南铜业(集团)有限公司, 云南 昆明 650051)

摘 要: 滇西北羊拉铜矿床是“三江”成矿带金沙江成矿亚带内目前探明规模最大的铜矿床。前人分析该矿床硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 集中在 -4.20‰ ~ $+2.60\text{‰}$ 之间, 塔式效应明显, 指示成矿流体中的硫来自地幔或深部地壳。本文在成矿晚期的石英-方解石-硫化物脉型矿石中, 获得一批黄铁矿的硫同位素组成, 其 $\delta^{34}\text{S}$ 明显低于前人的分析结果, 在 -40.38‰ ~ -7.25‰ 之间, 非塔式分布。笔者认为这种低 $\delta^{34}\text{S}$ 黄铁矿的形成与成矿作用密切相关, 为成矿晚期生物还原硫酸盐作用形成的富³²S 流体加入成矿流体, 流体混合作用促使产物硫化物沉淀。本区低 $\delta^{34}\text{S}$ 黄铁矿指示成矿作用晚期有有机流体加入, 流体混合作用是成矿晚期石英-方解石-硫化物脉型矿石形成的重要机制。

关键词: 低 $\delta^{34}\text{S}$ 黄铁矿; 成矿流体; 羊拉铜矿床; 滇西北

中图分类号: P579; P597; P618.41 文献标识码: A doi: 10.16461/j.cnki.1000-4734.2018.38.213

作者简介: 林贵生, 男, 1964 年生, 高级工程师, 主要从事地质矿产勘查工作。E-mail: 984201670@qq.com

Genesis and geological significance of the low $\delta^{34}\text{S}$ pyrite in Yangla Cu Deposit , Yunnan Province , SW China

LIN Gui-sheng¹, HUANG Zhi-long², LI Bo^{2, 3*}, DU Li-juan², ZOU Guo-fu⁴,
TANG Guo⁴, LIU Yue-dong⁴

(1. Academy of Geology and Mineral Exploration , Guizhou Nonferrous Metal and Nuclear Industry
Geological Exploration Bureau , Guiyang 550005 , China; 2. State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry ,
Institute of Geochemistry , Chinese Academy of Sciences , Guiyang 550002 , China; 3. South-West Institute of
Geological Survey , Geological Survey Centre for Nonferrous Metals Resources , College of Land Resources
Engineering , Kunming University of Science and Technology , Kunming 650093 , China; 4. Yunnan Copper
Industry (Group) Co Ltd. , Kunming 650051 , China)

Abstract: The Yangla deposit in the northwestern Yunnan is the largest Cu deposit in the Jinshajiang subzone of the Sanjiang metallogenic belt at present. Previous works have shown that the $\delta^{34}\text{S}$ -values of sulfides are mainly concentrated in a range from -4.20‰ to $+2.60\text{‰}$, indicating the sulfur of the ore-forming fluid of the Yangla deposit could be derived from mantle or deep crust. However, this study has obtained a batch of $\delta^{34}\text{S}$ values, ranging from -40.38‰ to -7.25‰ , of pyrites from the quartz-calcite-sulfide vein type ores formed in the late-ore stage. These $\delta^{34}\text{S}$ S values are obviously lower than those of sulfides reported by previous studies. It is believed that these low- $\delta^{34}\text{S}$ pyrites are closely associated with the mineralization in the late-ore stage, and they were precipitated in the ore-

收稿日期: 2017-10-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(批准号: 41402072); 矿床地球化学国家重点实验室开放基金(编号: 201407); 昆明理工大学重点学科建设(编号: 14078384)

*通讯作者, E-mail: libo8105@qq.com

forming fluid probably mixed with the ^{32}S enriched fluid due to biological reduction of sulfate. The existence of low $\delta^{34}\text{S}$ S pyrites shows that the organic-bearing fluid has been involved in the ore-forming fluid in the late-ore stage of the Yangla deposit. Therefore, we propose that the fluid mixing might be responsible for the formation of quartz-calcite-sulfide vein type orebodies in the late-ore stage of the Yangla Cu deposit.

Keywords: low- $\delta^{34}\text{S}$ pyrite; ore-forming fluid; Yangla Cu deposit; SW China

滇西北羊拉铜矿床是“三江”成矿带金沙江成矿亚带内目前探明规模最大的铜矿床,远景储量为 $130 \times 10^7 \sim 150 \times 10^7 \text{ kg}^{[1]}$ 。该矿床为矽卡岩型矿床 $^{[1-4]}$,与矿区或区域印支期(230 Ma \pm)花岗质岩浆活动密切相关。前人的分析结果显示,矿床黄铜矿、黄铁矿、闪锌矿等矿石矿物的 $\delta^{34}\text{S}$ 集中在 $-4.20\% \sim +2.60\%$ 之间,塔式分布明显 $^{[1,5-10]}$ 暗示成矿流体中的硫来自地幔或深部地壳。笔者也对该矿床进行了系统的硫同位素研究,获得矿石矿物的 $\delta^{34}\text{S}$ 大部分在前人的分析结果范围之内,同时发现部分黄铁矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 明显偏离幔源硫同位素组成,变化范围在 $-40.38\% \sim -7.25\%$ 之间,本文称之为低 $\delta^{34}\text{S}$ 黄铁矿。其实,在前人的分析结果中也有个别低 $\delta^{34}\text{S}$ 硫值的黄铁矿样品 $^{[7-10]}$ 除 Yang 等 $^{[9]}$ 认为这种类低 $\delta^{34}\text{S}$ 的黄铁矿为成矿晚期产物外,其他学者未对其成因及成矿指示意义进行深入探讨。本文主要探讨羊拉铜矿床低 $\delta^{34}\text{S}$ 黄铁矿的成因及其地质意义。

1 矿床地质概况

羊拉铜矿床大地构造位置位于古特提斯构造域东部的金沙江构造带中部,夹持于 SN 向金沙江断裂和羊拉断裂之间(图 1)。矿床自北向南由 7 个规模不等的矿段组成(图 1),其中里农矿段规模最大,约占矿床 90% 的资源储量 $^{[5]}$ 。矿区主要出露泥盆系浅变质岩地层,赋矿地层主要为江边组 3 段(D_{1j}^3) 和里农组 1 段(D_{2+3}^1) (图 2)。 D_{1j}^3 为大理岩夹变质石英砂岩和绢云砂质板岩,顶、底部为矽卡岩; D_{2+3}^1 主要为角岩化变质石英砂岩、绢云砂质板岩夹透辉石-石榴石矽卡岩和大理岩。矿区构造活动强烈,除区域性金沙江断裂和羊拉断裂外,还发育斜穿里农、路农矿段的北东向断层以及大量次级构造裂隙和层间破碎带(图 1)。矿区侵入岩广泛分布,出露贝吾、江边、里农、路农等多个花岗质岩体(图 1),岩石的锆石 U-Pb 年龄为 230 Ma 附近 $^{[11-14]}$ 。

矿体主要产于围岩与花岗质岩体的接触带,少量产于远离岩体的层间断裂内,产状多为层状、

似层状及透镜体状(图 2)。矿石类型主要为矽卡岩型,同时见少量石英-方解石-硫化物脉型、大理岩型和构造角砾岩型等矿石。矿石的金属矿物主要为黄铜矿、斑铜矿和黄铁矿,脉石矿物常见绢云母、石英、方解石及矽卡岩矿物。矿石结构以粒状结构、交代结构和填隙结构为主,构造主要为块状构造、浸染状构造和网脉状构造。矿床围岩蚀变类型众多、且分带明显,从岩体到围岩,出现绢云母-绿泥石化 \rightarrow 绢云母-碳酸盐化 \rightarrow 钾化-硅化 \rightarrow 矽卡岩化 \rightarrow 石英-绢云母化 \rightarrow 青磐岩化的分带现象。矿床辉钼矿 Re-Os 等时线年龄为 230 Ma 左右 $^{[1,15]}$,与矿区花岗质岩石成岩年龄(锆石 U-Pb 年龄近 230 Ma $^{[11-14]}$) 一致。

2 样品与分析方法

本文分析的低 $\delta^{34}\text{S}$ 黄铁矿均采自羊拉铜矿床石英-方解石-硫化物脉型矿石(图 3),前人多认为该类型矿石为本区成矿晚期的产物 $^{[1,4,8-9]}$ 。这种脉状矿体主要沿矿体的节理、裂隙及层理分布,在赋矿围岩及断裂带中也有少量分布,延续性较好,脉宽多小于 20 cm。矿石主要由石英、方解石和硫化物组成,硫化物主要为黄铁矿,偶见黄铜矿、闪锌矿和方铅矿,其中黄铁矿主要呈立方体和五角十二面体集合体和零星状分布于石英和方解石中(图 3)。

首先将样品在室内除去表面风化层,然后粉碎至 40~60 目后,在双目镜下挑选出黄铁矿,纯度达 99% 以上。将挑选的黄铁矿用超纯水超声波清洗,除去矿物表面可能吸附的杂质,置于烘箱中烘干后磨至 200 目。按黄铁矿: $\text{CuO} = 1 : 8$ 置于马弗炉内,真空 1000 $^\circ\text{C}$ 反应 15 min,将 S 氧化成 SO_2 。硫同位素组成测定仪器为 MAT-253 型质谱仪,相对误差 $< 0.2\%$ 。

3 分析结果

表 1 为本文获得的羊拉铜矿床低 $\delta^{34}\text{S}$ 黄铁矿硫同位素组成,表中同时列出前人分析的本区低 $\delta^{34}\text{S}$ 黄铁矿 S 同位素组成 $^{[7-9]}$ 。可见羊拉铜矿

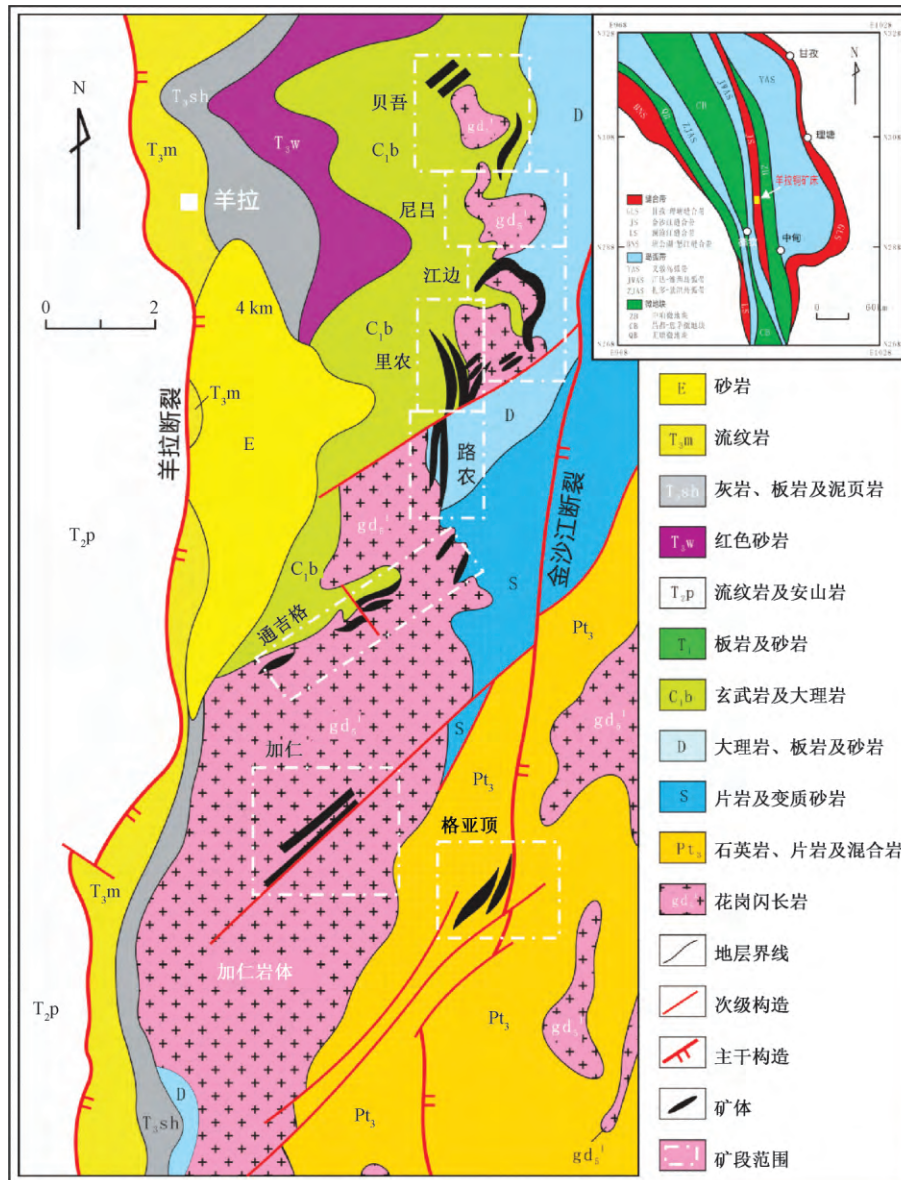


图 1 羊拉铜矿床地质简图(据 Zhu 等^[13] 略修改)

Fig.1. Geologic sketch map for the Yangla Cu deposit (modified from Zhu et al. , 2011^[13]).

床低 $\delta^{34}\text{S}$ 黄铁矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 变化范围很宽,在 $-40.38\text{‰} \sim -7.25\text{‰}$ 之间、极差为 33.13‰ ,在硫同位素组成直方图上非塔式分布(图 4 A)。该特征明显不同于矿床其他硫化物(黄铜矿、辉铜矿、黄铁矿、磁黄铁矿、闪锌矿、方铅矿、辉钼矿等),后者的 $\delta^{34}\text{S}$ 变化范围很窄,在 $-4.20\text{‰} \sim +2.60\text{‰}$ 之间、极差为 6.80‰ ^[1,5-10] 塔式分布明显(图 4B)。

4 讨论

4.1 低 $\delta^{34}\text{S}$ 黄铁矿的成因

羊拉铜矿床低 $\delta^{34}\text{S}$ 黄铁矿的硫同位素组成明显不同于其他硫化物(表 1、图 4),对其成因前

人未进行深入分析^[7-9]。本文认为有 3 种机制可能形成本区贫 ^{34}S 的黄铁矿: 1) 成矿期后热液活动; 2) 成矿流体演化; 3) 成矿晚期流体混合。

4.1.1 成矿期后热液活动

矿区碳酸盐岩地层广泛分布(图 1),构造活动强烈,地层中断层、节理裂隙发育,成矿期后各种流体,如大气降水、地层建造水、岩浆流体等,流经并淋滤碳酸盐岩地层,可形成方解石脉。矿区广泛分布的成矿期后方解石脉可能是这种热液活动的产物,如果热液活动过程中有 S、Fe 等元素加入,方解石脉中也可能出现黄铁矿,如果有有机质参与、在相对还原条件,有可能形成低 $\delta^{34}\text{S}$ 值的黄铁矿。

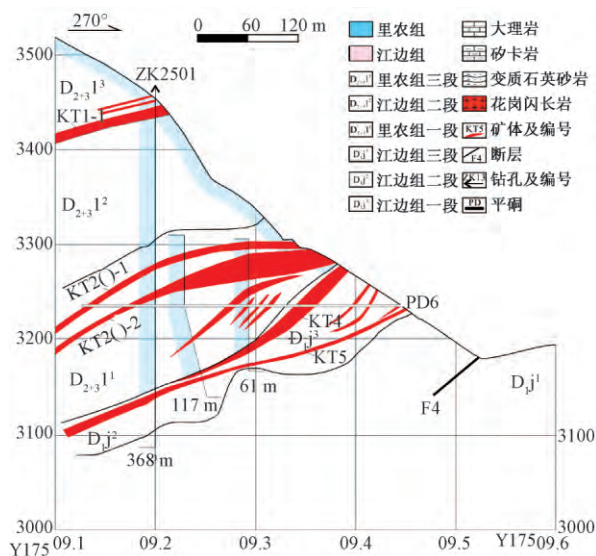


图 2 羊拉铜矿床里农矿段 25 号勘探线剖面图 (据 Du 等^[4] 略修改)

Fig.2. Geological cross-section of the No. 25 exploration line in the Linong ore block of the Yangla Cu deposit (modified from Du et al., 2017^[4]).

这种机制形成的方解石脉与成矿作用无关, 其中的 CO₂ 由矿区碳酸盐岩地层提供, S、Fe 等元素部分可能来源于先成矿体的氧化淋滤。本区低 δ³⁴S 黄铁矿方解石脉的 C、O 同位素组成^[4] 不支持这种观点, 其 δ¹³C_{PDB} 和 δ¹⁸O_{SMOW} 分别为 -4.89‰~-2.33‰和 14.5‰~19.4‰, 明显不同于矿区碳酸盐岩及其中方解石脉的 C、O 同位素组成, δ¹³C_{PDB}: -0.3‰~4.8‰, δ¹⁸O_{SMOW}: 10.1‰~23.9‰, 而与成矿晚期方解石 C、O 同位素组成相近, δ¹³C_{PDB}: -2.3‰~-4.5‰, δ¹⁸O_{SMOW}: 10.7‰~19.4‰; 图 5 也显示, 虽然本区石英-方解石-硫化物脉型矿石中的低 δ³⁴S 黄铁矿与其他矿石类型中的黄铁矿的硫同位素组成存在明显差别, 但其方解石的 C、O 同位素组成与其他矿石类型中的方解石相互重叠。这些特征均表明, 矿区含低 δ³⁴S 值的黄铁矿的方解石脉与成矿作用密切相关。前人也认为该区含低 δ³⁴S 黄铁矿的石英-方解石-硫化物脉型矿石为成矿晚期的产物, 而不是成矿期后热液活动的结果^[1, 4, 8-9]。

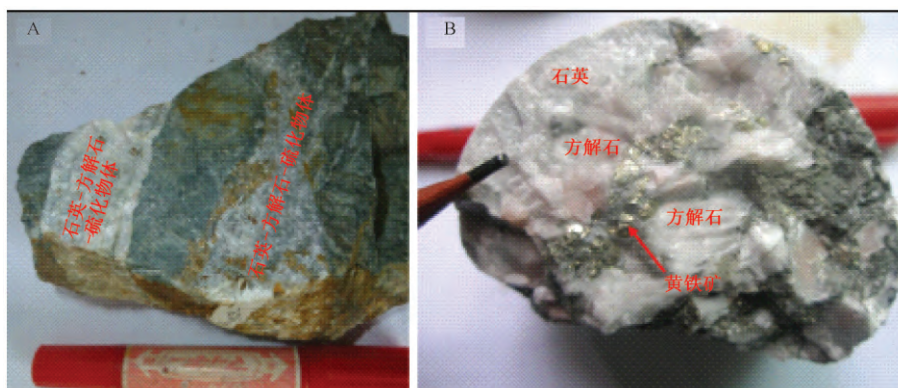


图 3 羊拉铜矿床石英-方解石-硫化物脉型矿石 (A-手标本, B-岩芯横切面)
Fig.3. The quartz-calcite-sulfide vein type ore from the Yangla Cu deposit (A is a hand specimen, B is a cross section of core).

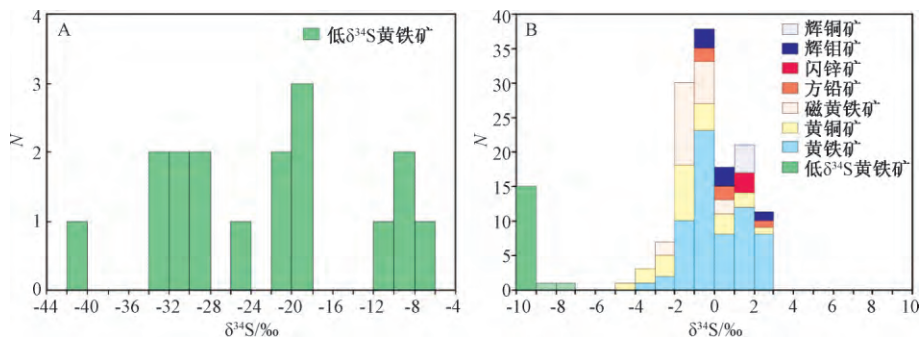


图 4 羊拉铜矿床低 δ³⁴S 黄铁矿 (A) 和其他硫化物 (B) S 同位素组成直方图 (低 δ³⁴S 黄铁矿原始数据据表 1 其他硫化物原始数据文献^[1, 5-10] 和作者未发表资料)

Fig. 4. Histograms plot for S isotopic compositions of the low δ³⁴S pyrites (A) and other sulfides (B) from the Yangla Cu deposit.

表 1 羊拉铜矿床低 $\delta^{34}\text{S}$ 黄铁矿硫同位素组成

Table 1. S isotopic compositions of low $\delta^{34}\text{S}$ pyrites from the Yangla Cu deposit

样品号	采样位置	测试矿物	$\delta^{34}\text{S}_{\text{CDT}}/\text{‰}$	2σ	资料来源
LN-31	路农矿段 ,3590 m 中段	黄铁矿	-7.25	0.04	本文
3250KT2-7	里农矿段 ,3250 中段 KT2 矿体	黄铁矿	-31.91	0.18	本文
3250KT2-15-2	里农矿段 ,3250 中段 KT2 矿体	黄铁矿	-40.38	2.16	本文
3250KT2-19	里农矿段 ,3250 中段 KT2 矿体	黄铁矿	-31.03	0.06	本文
YK016-1	里农矿段 ,3175 m 中段 5-3 采场	黄铁矿	-19.32	1.58	本文
YK017-1	里农矿段 ,3075 m 中段 45 采场	黄铁矿	-8.40	0.10	本文
YK018-1	里农矿段 ,3075 m 中段 55-2 采场	黄铁矿	-21.85	1.07	本文
YK021-2	里农矿段 ,3075 m 中段 42-2 采场	黄铁矿	-21.11	0.15	本文
YL-12-14	里农矿段 ,3075 中段 5 号矿体	黄铁矿	-19.72	0.09	本文
YL-12-17	里农矿段 ,3075 中段 5 号矿体	黄铁矿	-32.32	0.03	本文
3075-1-2	里农矿段 ,3075 中段	黄铁矿	-28.00	0.55	本文
YL-12-9-2	里农矿段 岩芯	黄铁矿	-18.38	0.65	本文
CK 上-1-5	里农矿段 钻孔 CK 上-1	黄铁矿	-33.90	0.43	本文
CK 上-1-13	里农矿段 钻孔 CK 上-1	黄铁矿	-10.40	0.38	本文
S4	里农矿段 ,KT2 矿体	黄铁矿	-28.9		李石磊等, 2008
YL-56	里农矿段 ,成矿晚期	黄铁矿	-9.8		Yang 等, 2012
Y-2	里农矿段 ,3075 方解石脉状矿	黄铁矿	-24.73		赵江南, 2012

注: 本文样品由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分析。

4.1.2 成矿流体演化

硫化物的硫同位素组成具有储库效应,郑永飞^[16]对硫酸盐和硫化物沉淀的储库效应进行了理论模拟。结果显示:硫酸盐矿物在以 SO_4^{2-} 为主、少量 H_2S 的热液中沉淀时,从早到晚,其 $\delta^{34}\text{S}$ 值从大于初始溶液 $\delta^{34}\text{S}$ 值逐渐降低到显著低于初始溶液的 $\delta^{34}\text{S}$ 值;相反,硫化物矿物从以 H_2S 为主、少量 SO_4^{2-} 的热液中沉淀时,从早到晚,其 $\delta^{34}\text{S}$ 从近于初始溶液 $\delta^{34}\text{S}$ 值逐渐增加到显著大于初始溶液的 $\delta^{34}\text{S}$ 值。羊拉铜矿床原生矿石中含硫矿物主要为黄铜矿、黄铁矿、磁黄铁矿、方铅矿、闪锌矿和辉钼矿等,表明成矿流体中的硫以 H_2S 为主,从早期成矿阶段到晚期成矿阶段,沉淀硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 值应逐渐增加。因此,本区石英-方解石-硫化物脉中的低 $\delta^{34}\text{S}$ 值的黄铁矿不可能是晚期成矿流体储库效应的产物。

4.1.3 成矿晚期流体混合

前已述及,羊拉铜矿床石英-方解石-硫化物

脉型矿石为成矿晚期产物,但成矿流体演化不可能形成沉淀本区低 $\delta^{34}\text{S}$ 黄铁矿的富 ^{32}S 流体。这种流体只可能为成矿晚期流体与外来富 ^{32}S 流体的混合,外来富 ^{32}S 流体的形成可能与低温条件下生物还原硫酸盐有关。

自然条件下,2 个过程可能引起硫同位素的明显分馏^[17]:一是硫酸盐无机还原为硫化物;二是生物作用引起的硫酸盐还原形成有机硫、硫化物和 H_2S 。硫酸盐无机还原为硫化物需要较高的活化能,只有在 $250\text{ }^\circ\text{C}$ 以上才能进行,因而多发生在 $250\text{ }^\circ\text{C}$ 以上的热液体系或地壳深部环境。该过程形成的硫化物相对富 ^{34}S ,即 $\delta^{34}\text{S}$ 值较正。

生物还原硫酸盐是最重要的硫同位素动力学分馏过程。低温条件下,硫酸盐经厌氧细菌异化而还原, SO_4^{2-} 还原形成有机硫、硫化物和 H_2S ,由于还原过程中对重硫同位素的歧视效应,形成硫化物和 H_2S 的硫同位素将显著地亏损 ^{34}S 。该过程硫同位素分馏程度取决于还原细菌的种类、还

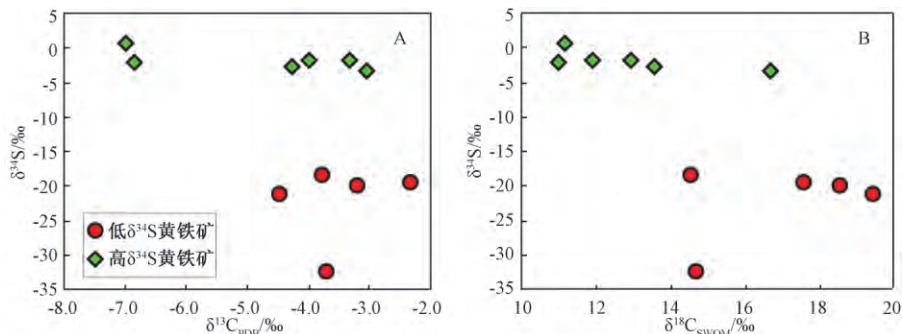


图 5 羊拉铜矿床石英-方解石-硫化物脉型矿石 S 与 C、O 同位素相关图 (S 同位素组成据本文, C、O 同位素组成据文献 [4])

Fig.5. Plots for $\delta^{34}\text{S}$ vs $\delta^{13}\text{C}$ (A) and $\delta^{34}\text{S}$ vs $\delta^{18}\text{O}$ (B) of the quartz-calcite-sulfides vein type ores from the Yangla Cu deposit.

原反应速率及反应体系的封闭性^[18]。Rees 等^[19]对该过程进行了数学模拟,认为硫同位素分馏在 $-3‰\sim-46‰$ 之间;Canfield 等^[20-21]指出,这种生物参与的还原反应在较长时间内是不可逆的,随着生物硫循环过程反复进行,可以造成自然界中最大的硫同位素分馏。

4.2 低 $\delta^{34}\text{S}$ 黄铁矿的地质意义

羊拉铜矿床与矿化空间密切共生的花岗质岩石的成矿年龄为 230 Ma 左右^[11-14],成矿年龄也接近 230 Ma^[1,15],两者一致。近年来的研究结果表明,该矿床为与矿区或区域花岗质岩浆活动密切相关的矽卡岩矿床^[1-4]。矿床不同矿石类型硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 集中在 $-4.20‰\sim 2.60‰$ 之间^[1,5-10],塔式分布明显(图 4B),指示成矿流体中的硫主要来自地幔或深部地壳。

本文获得成矿晚期石英-方解石-硫化物脉型矿石中黄铁矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 在 $-40.38‰\sim-7.25‰$ 之间,明显低于矿床其他矿石类型中硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ (集中在 $-4.20‰\sim+2.60‰$ 之间^[1,5-10])。前已述及,这种低 $\delta^{34}\text{S}$ 值黄铁矿的形成与成矿作用密切相关,为成矿晚期生物还原硫酸盐作用形成的富³²S 流体加入成矿流体、流体混合作用促使硫化物沉淀的产物。因此,羊拉铜矿床低 $\delta^{34}\text{S}$ 值的黄铁矿指示成矿作用晚期有富有机质的流体加入,流体混合作用是成矿晚期石英-方解石-硫化物脉型矿石形成的重要机制。

5 结 论

1) 在羊拉铜矿床获得一批低 $\delta^{34}\text{S}$ 值的黄铁矿,其 $\delta^{34}\text{S}$ 在 $-40.38‰\sim-7.25‰$ 之间,呈非塔式分布;明显不同于矽卡岩化阶段硫化物的硫同位素组成,其 $\delta^{34}\text{S}$ 在 $-4.20‰\sim+2.60‰$ 之间,呈塔式分布。

2) 低 $\delta^{34}\text{S}$ 值的黄铁矿产于石英-方解石-硫化物脉型矿石之中,形成于成矿晚期,除去深部来源的硫之外还有大量的细菌硫酸盐还原作用产生的硫加入成矿流体。

3) 羊拉铜矿床低 $\delta^{34}\text{S}$ 值的黄铁矿出现指示成矿晚期存在富有机质的流体加入,成矿晚期石英-方解石-硫化物脉型矿石是混合成矿流体的产物。

参 考 文 献:

[1] Zhu J J, Hu R Z, Richards J P, et al. Genesis and magmatic-hydrothermal evolution of the Yangla skarn Cu deposit, Southwest China [J]. *Economic Geology*, 2015, 110(3): 631-652.

[2] 路远发,陈开旭,战明国. 羊拉地区含矽卡岩成因的地球化学证据[J]. *地球科学*, 1999, 24(3): 298-303.

[3] 孟旭阳. 滇西地区羊拉铜矿矽卡岩成因与岩浆来源[D]. 北京: 中国地质大学(北京)(硕士论文), 2016.

[4] Du L J, Li B, Huang Z L, et al. Carbon-oxygen isotopic geochemistry of the Yangla Cu skarn deposit, SW China: Implications for the source and evolution of hydrothermal fluids [J]. *Ore Geology Reviews*, 2017, 88: 809-821.

[5] 战明国,路远发,陈式房,等. 滇西德钦羊拉铜矿[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1999.

[6] 潘家永,张乾,马东升,等. 滇西羊拉铜矿床稳定同位素地球化学研究[J]. *矿物学报*, 2000, 20(4): 385-389.

[7] 李石磊,苏昌学,燕永锋,等. 羊拉铜矿床地质特征与成矿规律的研究[J]. *矿业快报*, 2008(12): 27-30.

[8] 赵江南. 滇西羊拉铜矿床地质地球化学特征及深部找矿预测[D]. 武汉: 中国地质大学(博士论文), 2012.

[9] Yang X A, Liu J J, Han S Y, et al. S and Pb isotopic constraints on the relationship between the Linong granodiorite and the Yangla copper deposit, Yunnan, China [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2012, 86(6): 1488-1499.

[10] 陈思尧,顾雪祥,程文斌,等. 滇西北羊拉铜矿床稳定同位素特征及其地质意义[J]. *岩石学报*, 2013, 29(4): 1290-1300.

[11] 高睿,肖龙,何琦,等. 滇西维西-德钦-带花岗岩年代学、地球化学和岩石成因[J]. *地球科学(中国地质大学学报)*, 2010, 35(2): 186-200.

[12] 王彦斌,韩娟,曾普胜,等. 云南德钦羊拉大型铜矿区花岗闪长岩的锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素特征及其地质意义[J]. *岩石学报*, 2010, 26(6): 1833-1844.

[13] Zhu J J, Hu R Z, Bi X W, et al. Zircon U-Pb ages, Hf-O isotopes and whole-rock Sr-Nd-Pb isotopic geochemistry of granitoids in the Jinshajiang suture zone, SW China: Constraints on petrogenesis and tectonic evolution of the Paleoproterozoic Tethys Ocean [J]. *Lithos*, 2011, 126(3-4): 248-264.

[14] Yang X A, Liu J J, Li D P, et al. Zircon U-Pb dating and geochemistry of the Linong granitoid and its relationship to Cu mineralization in the Yangla copper deposit, Yunnan, China [J]. *Resource Geology*, 2013, 63(2): 224-238.

[15] Yang X A, Liu J J, Yang L B, et al. Fluid inclusion and isotope geochemistry of the Yangla copper deposit, Yunnan, China [J]. *Mineralogy and Petrology*, 2014, 108(2): 303-315.

[16] 郑永飞. 稳定同位素体系理论模式及其矿床地球化学应用[J]. *矿床地质*, 2001, 20(1): 57-70, 85.

[17] 张伟,刘丛强,梁小兵. 硫同位素分馏中的生物作用及其环境效应[J]. *地球与环境*, 2007, 35(3): 223-227.

[18] 郑永飞,陈江峰. 稳定同位素地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 2000.

[19] Rees C E. A steady-state model for sulphur isotope fractionation in bacterial reduction processes [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1973, 37(5): 1141-1162.

[20] Canfield D E, Teske A. Late Proterozoic rise in atmospheric oxygen concentration inferred from phylogenetic and sulphur-isotope studies [J]. *Nature*, 1996, 382(6587): 127-132.

[21] Canfield D E, Thamdrup B. The production of ^{34}S -depleted sulfide during bacterial disproportionation of elemental sulfur [J]. *Science*, 1994, 266(5193): 1973-1975.