

· 专题 13: 成矿作用过程、成矿末端效应及找矿预测 ·

滇西北羊拉铜矿床低  $\delta^{34}\text{S}$  黄铁矿成因及指示意义杜丽娟<sup>1,2</sup>, 黄智龙<sup>1\*</sup>, 李波<sup>3</sup>, 周家喜<sup>1</sup>, 邹国富<sup>4</sup>, 严再飞<sup>1</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, 贵阳 550081;

2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 昆明理工大学, 昆明 650093;

4. 中国有色金属工业昆明勘察设计研究院, 昆明 650051

滇西北羊拉铜矿床位于西南“三江”地区金沙江 Cu、Pb、Zn 成矿带中部, 远景储量超过 150 万吨, 为目前该带发现的最大且最具代表性的铜矿床。羊拉铜矿床自北向南由贝吾、尼吕、江边、里农、路农、通吉格、加仁等 7 个矿段组成。矿区出露地层主要为泥盆系大理岩、变质石英砂岩及砂质板岩, 赋矿地层主要为泥盆系江边组上段 ( $D_{1j}$ ) 及里农组下段 ( $D_{2+3l}$ )。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 (F4) 以及大量次级构造裂隙和层间破碎带, 为成矿流体运移和矿质沉淀提供了通道和就位空间。矿区内岩浆活动强烈, 侵入岩体分布广泛, 由北向南依次分布有贝吾、江边、里农和路农岩体, 岩性主要为花岗闪长岩、石英闪长岩、(黑云母)二长花岗岩等, 岩石成因类型多认为是 I 型花岗岩, 具有“壳幔”混合来源, 成岩年龄限定于印支期 ( $\pm 230$  Ma) (Zhu *et al.*, 2011), 与矿床辉钼矿 Re-Os 同位素年龄 ( $\pm 232$  Ma) (Zhu *et al.*, 2015) 基本一致, 暗示其与羊拉铜矿化之间的成因联系。矿体主要呈层状、似层状及透镜状分布于花岗闪长岩体与围岩的外接触带及远离岩体的层间破碎带和滑脱带内, 并且, 矿体的分布与矽卡岩化带密切相关。矿石类型以矽卡岩型为主, 其次为角岩化变质石英砂岩型、绢云砂质板岩型、大理岩型等; 矿石矿物主要有黄铜矿、黄铁矿、斑铜矿、磁黄铁矿、白铁矿、毒砂、磁铁矿等, 其次为方铅矿、闪锌矿、辉钼矿等; 脉石矿物有钙铁榴石、透辉石、钙铁辉石、阳起石、绿帘石、绢云母、绿泥石、透闪石、铁闪石、石英、方解石等。羊拉铜矿床的形成划分为成矿前期、成矿期和表生期, 其中成矿期

又划分为早期成矿阶段和晚期成矿阶段。

硫同位素研究是探讨成矿物质来源最有效的手段之一。众多研究成果表明, 热液矿床硫的来源可能有 4 种: 一种是来自地幔和深部地壳, 这种硫同位素平均组成与陨石硫同位素组成接近,  $\delta^{34}\text{S}$  约为 0 附近, 且变化范围小、塔式效应明显; 第 2 种来自海水硫酸盐,  $\delta^{34}\text{S}$  一般大于 15‰; 第 3 种是还原 (沉积) 硫或生物成因硫, 由于生物作用强弱和  $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{H}_2\text{S}$  开放或封闭体系不同,  $\delta^{34}\text{S}$  变化范围较大, 并常显示硫同位素非平衡效应; 第 4 种是混染硫,  $\delta^{34}\text{S}$  介于第 1 种与第 2 种硫同位素之间。前人对羊拉铜矿床主要硫化物 (黄铜矿、黄铁矿、磁黄铁矿、辉钼矿、辉铜矿、方铅矿和闪锌矿) 进行硫同位素分析, 结果显示, 羊拉铜矿床不同类型硫化物的  $\delta^{34}\text{S}$  主要集中在  $-3.20\text{‰} \sim 2.60\text{‰}$ , 具有明显的塔式效应, 表明成矿流体中的硫来自地幔或深部地壳。李石磊 (2008)、杨喜安 (2012) 和赵江南 (2012) 分别报道了具有低  $\delta^{34}\text{S}$  特征的黄铁矿 ( $-28.9\text{‰}$ 、 $-9.8\text{‰}$  和  $-24.73\text{‰}$ ), 除杨喜安等 (2012) 认为该类黄铁矿为成矿晚期产物外, 其他学者均未对其成因及成矿指示意义进行深入探讨。

黄铁矿的形成贯穿了羊拉铜矿床的整个形成过程 (表生作用除外), 从成矿过程早期到晚期均有生成, 具有多个形成世代。低  $\delta^{34}\text{S}$  黄铁矿产于石英-方解石-硫化物脉中, 多呈浅黄色-浅白色, 晶形较好, 主要为立方体和五角十二面体, 粒径较大, 一般大于 2 mm, 最大超过 10 mm, 是成矿晚期阶段的产物。低  $\delta^{34}\text{S}$  黄铁矿  $\delta^{34}\text{S}$  在  $-40.40\text{‰} \sim -7.20\text{‰}$  之间, 集中在  $-40.40\text{‰} \sim -18.40\text{‰}$  之间, 与其共生的方解石

基金项目: 矿床地球化学国家重点实验室十二五规划项目 (SKLOGD-ZY125-02); 国家自然科学基金项目 (41402072); 中国博士后科学基金项目 (2012M510214); 昆明理工大学重点学科建设 (14078384); 矿床地球化学国家重点实验室开放基金项目 (201407)

第一作者简介: 杜丽娟 (1989-), 女, 博士研究生, 研究方向: 矿床学和矿床地球化学. E-mail: dulijuan891107@163.com.

\* 通讯作者简介: 黄智龙 (1967-), 男, 研究员, 博士生导师, 研究方向: 大陆动力学与成矿和基性-超基性岩及成矿作用. E-mail: huangzhilong@vip.gyig.ac.cn.

的  $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$  和  $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$  分别为  $-2.3\text{‰} \sim -4.5\text{‰}$  和  $10.7\text{‰} \sim 19.4\text{‰}$ , 与成矿晚期方解石相互重叠, 同样表明羊拉矿床含低  $\delta^{34}\text{S}$  黄铁矿的方解石脉与成矿作用密切相关, 为成矿晚期阶段产物。

本文认为这种流体可能为成矿晚期流体与外来富  $^{32}\text{S}$  流体的混合流体, 外来富  $^{32}\text{S}$  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 个过程可引起明显的硫同位素分馏 (张伟等, 2007): 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  $\text{H}_2\text{S}$ 。硫酸盐无机还原为硫化物的同位素动力学分馏效应比较明显, 但有实际意义的反应多发生在约  $250^\circ\text{C}$  以上的热液体系或地壳深部环境且形成的硫化物的  $\delta^{34}\text{S}$  为明显正值。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, 溶解

态硫酸盐经厌氧细菌异化还原作用, 使硫酸盐  $\text{SO}_4^{2-}$  还原形成有机硫、硫化物和  $\text{H}_2\text{S}$ , 由于还原过程中对重硫同位素的歧视效应, 形成硫化物和  $\text{H}_2\text{S}$  的硫同位素将显著地亏损  $^{34}\text{S}$ 。该过程硫同位素分馏程度取决于还原细菌的种类、还原反应速率及反应体系的封闭性 (郑永飞和陈江峰, 2000), Rees *et al.* (1973) 采用稳态模型对此过程进行了数学处理, 认为硫同位素总分馏在  $-3\text{‰} \sim -46\text{‰}$ ; Canfield *et al.* (1994, 1996) 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, 造成自然界中最大的硫同位素分馏。此外, 与低  $\delta^{34}\text{S}$  黄铁矿共生的方解石的碳、氧同位素模拟计算也指示在成矿晚期有流体加入。因此, 羊拉矿区  $\delta^{34}\text{S}$  黄铁矿可能是成矿晚期阶段有机流体混合沉淀形成。