

Characteristics of Sulfur Isotopes in Polymentallic Deposits in Lanping Basin

Yuanchao Liu, Teng Liu, Shulu Cao

College of Geosciences, East China University of Technology, Nanchang Jiangxi
Email: 964519908@qq.com

Received: Jan. 28th, 2016; accepted: Feb. 16th, 2016; published: Feb. 19th, 2016

Copyright © 2016 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

Jinding lead-zinc deposit, Baiyangping silver-copper polymetallic deposit and the vein-type Cu-polymetallic deposits on the western border of the Lanping Basin are located in Lanping basin. In order to trace source of ore-fluiding, the data of sulfur isotope of different mineral in these deposits were selected to analyze. The characteristic of sulphide in Jinding lead-zinc deposit and the eastern ore-belt of Baiyangping silver-copper polymetallic deposit show that sulfur source is from bacterial sulphate reduction and partly thermochemical sulphate reduction. The characteristic of sulphide in the eastern ore-belt of Baiyangping silver-copper polymetallic deposit and the vein-type Cu-polymetallic deposits on the western border of the Lanping Basi show that sulfur source is from thermochemical sulphate reduction.

Keywords

Lanping Basin, Polymentallic Deposits, Sulfur Isotope

兰坪盆地多金属矿床硫同位素特征及意义

刘远超, 刘 腾, 曹淑璐

东华理工大学地球科学学院, 江西 南昌
Email: 964519908@qq.com

收稿日期: 2016年1月28日; 录用日期: 2016年2月16日; 发布日期: 2016年2月19日

摘要

兰坪盆地内产有金顶铅锌矿、白秧坪银铜多金属矿床、盆地西缘脉状铜多金属矿床，为查明成矿流体的来源，对这些矿床中不同矿物中的硫同位素数据进行了分析和对比研究。金顶铅锌矿和白秧坪银铜多金属矿西矿带中硫化物的特征显示硫源为细菌还原硫酸盐及部分的有机热化学还原作用将成矿热液中的硫酸盐转化而来；白秧坪银铜多金属矿东矿带和盆地西缘脉状铜矿主要为有机热化学还原作用将热液中的硫酸盐转化为还原性硫。

关键词

兰坪盆地，多金属矿床，硫同位素

1. 引言

兰坪中生代陆相盆地地处三江构造带的中段，是在原特提斯和古特提斯的基础上发展形成的，濒临特提斯构造域与太平洋构造域交接部位[1] [2]。盆地呈近南北向展布，向南与思茅盆地相接，向北趋于尖灭。盆地内矿产资源丰富，盛产铅、锌、铜、银、锑、钴等矿产资源，其中尤以金顶超大型铅锌矿床最为引人注目，另外较著名的还有白洋厂银铜多金属矿床、金满铜矿床、白秧坪铜-银-钴矿床等。本文通过归纳总结了前人对这些多金属矿床硫同位素的相关研究研究，对其进行对比分析，探讨这些矿床中硫的来源。

2. 成矿地质背景

滇西兰坪盆地是由中生代沉积充填而成的构造沉积盆地，夹持于金沙江-哀牢山断裂带和澜沧江断裂带之间。盆地形成于晚二叠世-早三叠世晚华力西期。盆地形成后依次经历了印支期的裂谷(断陷)作用、燕山期的拗陷作用和喜马拉雅期的走滑拉分三个不同演化阶段，发育了巨厚的中生界沉积岩系。区域地球化学研究表明，区内不同时代地层中 Cu、Pb、Zn、Ag、As、Sb 等成矿元素均相对富集甚至强富集，说明区内具有多金属富集成矿的地球化学背景[3]。云南兰坪盆地中的众多金属矿床呈脉状或透镜状产出，明显晚于盆地中沉积物的沉积时间，成矿物质的来源往往比较复杂，形成与新生代地质流体作用有关的铅锌、银、铜、银、金、锑、砷成矿系列[4]。该成矿系列比较复杂，所涵括的矿床类型比较多，如金顶式的综合性超大型矿床、白秧坪式的银铅锌多金属矿床、金满式的脉状铜矿等。盆地内主要出露中生代陆相沉积地层，沉积建造包括海陆相的碳酸盐岩、火山岩和红色碎屑岩等。矿床的容矿围岩多种多样但以中生代地层为主，各种流体在活动过程中淋滤地层中的成矿物质，并在有利部位尤其是推覆构造的前锋扩张部位成矿。盆地内多金属矿床的主成矿时代为 56 Ma± 和 30 Ma±，分别同印度板块和欧亚板块开始碰撞的时间及后续强烈挤压阶段的时间相一致，反映盆地内多金属矿床的形成受印度板块与欧亚板块碰撞的区域地球动力学背景制约[3]。

金顶超大型铅锌矿、白秧坪铜钴银多金属矿及盆地西缘以金满铜多金属矿为代表的脉状铜矿的地质特征，前人已进行了详细的论述，现将其基本地质特征列于表 1。

3. 硫同位素特征及意义

3.1. 硫同位研究现状

硫元素可以有效示踪成矿物质来源、成矿流体搬运及成矿机制、矿床成因等。自然界硫同位素组成

Table 1. Geological characteristics of polymetallic deposits in the Lanping basin

表 1. 兰坪盆地主要多金属矿床地质特征

矿床	金顶铅锌矿多金属矿床	白秧坪铜钴银多金属矿床	金满铜多金属矿床
赋矿岩系	白垩纪景星组钙质细砂岩、古近纪云龙组含灰岩角砾砂岩、晚三叠世灰岩角砾岩内	侏罗纪花开佐组灰岩、泥灰岩、泥岩、砂岩内，白垩纪景星组钙质砂岩，三叠纪三合洞组灰岩	侏罗纪花开佐组红色泥岩、粉砂岩、砂岩
控矿构造	矿体边界以逆冲断裂为界，但矿化与逆冲推覆引起的盐底辟构造密切相关	西矿带的矿床，矿体呈脉状赋存在逆冲断裂伴生的次级断裂；东矿带的矿床，矿化主要受热液溶洞构造控制	分布在澜沧江断裂带附近，逆冲早期的褶皱变形导致的劈理/断裂是其容矿构造
矿石类型	一是在石英砂岩和含灰岩角砾砂岩内，呈浸染状出现在砂岩的钙质胶结物中；二是在灰岩角砾岩中，胶状结构	西矿带呈胶结围岩角砾状、块状；东矿带的原生矿石呈块状	呈脉状
矿体产状	板状、脉状、透镜状、似层状	似层状、大脉状	脉状为主，少量层纹状、似层状
主要金属硫化物	闪锌矿、方铅矿、黄铁矿白铁矿	黝铜矿、黄铜矿、黄铁矿、闪锌矿、方铅矿、辉砷钴矿	黝铜矿、黄铜矿、斑铜矿、黄铁矿
主要脉石矿物	方解石、天青石、重晶石	方解石、菱铁矿	石英、方解石
主成矿阶段矿物组合	天青石 - 闪锌矿 - 方铅矿 - 黄铁矿 - 方解石	方解石 - 黝铜矿 - 黄铜矿 - 辉砷钴矿 或方解石 - 黝铜矿 - 闪锌矿 - 方铅矿	石英 - 黄铜矿 - 斑铜矿 - 黝铜矿 - 闪锌矿 - 方解石

范围大， $\delta^{34}\text{S}$ 变化达 180‰ 以上，主要与硫的同位素质量差较大和硫的化学性质有关。自然界中硫同位素的分馏机制主要有两种：一种是热力学平衡分馏，同一流体相中沉淀出硫元素不同存在形式的含硫矿物，硫元素会在这些含硫矿物间进行分配并达到平衡，共生矿物间的硫同位素组成则明显不同；另一种是动力学分馏，即硫化物的无机氧化还原作用和生物的硫动力学分馏。低温下厌氧细菌对硫酸盐的还原作用能产生明显的动力同位素分馏。前人在研究浅海、半咸水的沉积环境中的硫化物的同位素组成特征发现，这种环境中硫酸盐还原速率 $\gg \text{SO}_4^{2-}$ 供应速率，为的封闭系统，其硫化物以相对富 ^{34}S 为特征，即 $\delta^{34}\text{S}$ 值的分布偏向正值方向，矿物的硫同位素组成比海水硫酸盐的 $\delta^{34}\text{S}$ 值小 25‰。

在大本模式中，高氧逸度条件下通常出现重晶石和硫化物的矿物共生组合，重晶石的 $\delta^{34}\text{S}$ 值大致相当或略大于成矿溶液的总硫同位素组成，而硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 值明显低于成矿溶液的总硫同位素组成。一般认为，热液矿床中的 $\delta^{34}\text{S}_{\Sigma\text{S}}$ 有三种不同的来源：1) 地幔硫，其 $\delta^{34}\text{S}_{\Sigma\text{S}}$ 的值接近 0，变化范围为 $0 \pm 3\%$ ；2) 大洋水和海水蒸发盐岩，其 $\delta^{34}\text{S}_{\Sigma\text{S}}$ 约为 +20‰ 左右；3) 有机(生物)还原硫，以较大负值为特征。

考虑硫的来源，还要考虑金属在流体中的迁移特点。对于 Pb-Zn 矿床而言，在较低温度($<200\text{ }^\circ\text{C}$)高盐度的条件下 Pb、Zn 和氯形成络合物进行迁移需要较高的氧逸度，也就是说迁移 Pb、Zn 的流体中还原硫相对氧化硫的含量较低，从而保证金属不被沉淀而迁移至成矿部位，那么形成硫化物的还原硫的来源为迁移金属溶液中的硫酸根在成矿部位被还原，或者为成矿部位提供还原硫[2]。较低温度($<250\sim 150\text{ }^\circ\text{C}$)时，低盐度条件下，Cu 能够和硫氢根形成络合物进行迁移。

3.2. 金顶铅锌矿区硫同位素分布特征及意义

通过对前人[5]-[10]数据的整理分析发现(图 1)，金顶铅锌矿中热液沉淀的硫化物矿物 $\delta^{34}\text{S}$ 变化范围为 -30% ~ 1.1% ，平均为 -13.7% ，多数集中在 -22% ~ -12% 和 -6% ~ 1% 两个区间内。其中闪锌矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 变化范围为 -16.2% ~ 1.1% ，平均约为 -8.2% ；方铅矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 变化范围为 -30% ~ 0.6% ，平均为 -13.41% ，集中分布于 -22% ~ -14% 和 -8% ~ 0% 两个区间；黄铁矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 变化范围为 -28.9% ~ -3.4% ，平均为 -15.62% ；总体来看金顶矿区中硫化物相对富集轻硫。其中方铅矿 $\delta^{34}\text{S}$ 表现出的 -8% ~ 0% 富集重硫峰值为成矿期晚阶段与天青石、沥青共生的方铅矿。热液天青石的 $\delta^{34}\text{S}$ 为 $+3.3\%$ ~ $+18.79\%$ ，地层中的石膏集中在 $+15\%$

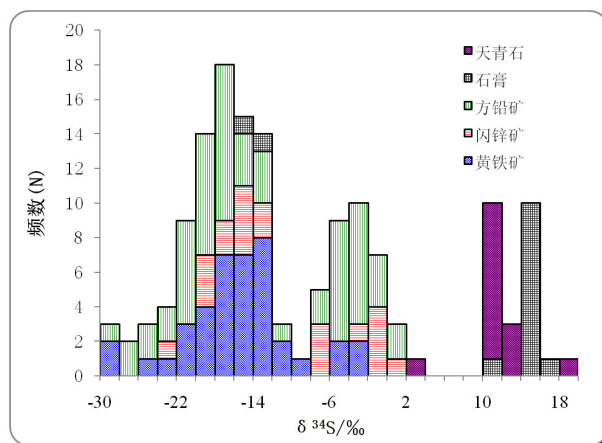


Figure 1. The distribution chart of sulfur isotope of the Jinding lead-zinc polymetallic deposit

图 1. 金顶铅锌多金属矿硫同位素组成分布图

左右，而硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 集中在 $-22\text{‰} \sim -12\text{‰}$ 和 $-6\text{‰} \sim -1\text{‰}$ 两个区间内，且变化范围较大存在 -30‰ 的样品，因而需要有细菌还原硫酸盐造成较大范围硫同位素动力学分馏的存在，因为只有细菌还原硫酸盐形成的硫化物才会形成 $2\text{‰} \sim 42\text{‰}$ 的硫同位素分馏，而有机和无机还原硫酸盐使硫酸盐和硫化物之间的分馏在 $<0 \sim 15\text{‰}$ 和 $10\text{‰} \sim 25\text{‰}$ [2]。

前人研究发现在黄铁矿颗粒的边缘分布有白铁矿，而白铁矿多生成于富含富硫化物、 $\text{PH} < 5$ 的流体环境中，这表明成矿流体在沉淀早期富含富硫化物、 PH 较低；演化至晚期方解石大量生成，表明成矿流体此时为中性 - 碱性[9]。硫化物与石膏、硬石膏呈反相关关系，且发现有方解石交代石膏形成假晶，这都暗示矿化过程会消耗硫酸盐矿物[11]。整体上金顶矿区受膏泥底辟影响以及云龙组地层中石膏层发育的特点，存在有大量的硫酸盐矿物，为细菌还原硫酸盐转化为金属矿物沉淀所需的还原性硫提供了物质基础。

在金顶铅锌矿区，前人[1] [12]研究发现成矿流体的温度、盐度、组分、C-O 同位素特点显示成矿流体有外来的以低温高盐度为特点的盆地卤水，为迁移铅锌成矿元素的流体；同时也有“原地的”来自古油气藏富油气的流体，为硫酸盐的有机热化学还原提供还原剂，这两种流体的混合是导致成矿物质沉淀的主要因素。

3.3. 白秧坪银铜多金属多金属矿集区硫同位素分布特征及意义

通过对前人[13]-[16]的资料整理分析，可知白秧坪银铜多金属矿集区东矿带热液沉淀的硫化物矿物 $\delta^{34}\text{S}$ 变化范围为 $-2.6\text{‰} \sim -6.8\text{‰}$ ，平均为 -4.6‰ ，多数集中在 $-5\text{‰} \sim -3\text{‰}$ 区间内。其中闪锌矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 变化范围为 $-6.1\text{‰} \sim -2.6\text{‰}$ ，平均约为 -4.1‰ ；方铅矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 变化范围为 $-6.8\text{‰} \sim -4.1\text{‰}$ ，平均为 -4.1‰ 。总体来看东矿带硫化物中相对富集轻硫，且未出现重晶石与硫化物的共生矿物组合，但是硫化物中相对富集轻硫可能指示有机质参与的热化学还原和硫酸盐的细菌还原作用。该区成矿流体显示低温(主体 $< 200\text{℃}$)、高盐度(主体 $> 20\%$)，反映成矿流体为盆地卤水来源。矿区膏盐层发育，其 $\delta^{34}\text{S}$ 变化范围为 $13.7\text{‰} \sim 16.3\text{‰}$ ，平均为 14.44‰ 。含矿围岩中含有机质，通过有机质参与的热化学还原和硫酸盐的细菌还原作用且以硫酸盐的细菌还原作用为主，将成矿热液中的硫酸盐转化为还原性硫为矿床的形成提供了主要的硫源[15]。

白秧坪银铜多金属矿集区西矿带热液沉淀的硫化物矿物 $\delta^{34}\text{S}$ 变化范围为 $-5.6\text{‰} \sim 11.2\text{‰}$ ，平均为 5.5‰ ，多数集中在 $5\text{‰} \sim 7\text{‰}$ 区间内(图 2)。其中闪锌矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 变化范围为 $3.8\text{‰} \sim 11.2\text{‰}$ ，平均为 6.1‰ ；黝铜矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 变化范围为 $0.8\text{‰} \sim 9.3\text{‰}$ ，平均为 6.1‰ ；黄铜矿 $\delta^{34}\text{S}$ 变化范围为 $-3.8\text{‰} \sim 7.4\text{‰}$ ，平均为 2.8‰ ；方铅矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 变化范围为 $-5.6\text{‰} \sim 5.7\text{‰}$ ，平均为 3.34‰ ；辉锑矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 变化范围为 $2.1\text{‰} \sim 5.8\text{‰}$ ，平均为 4.0‰ ；

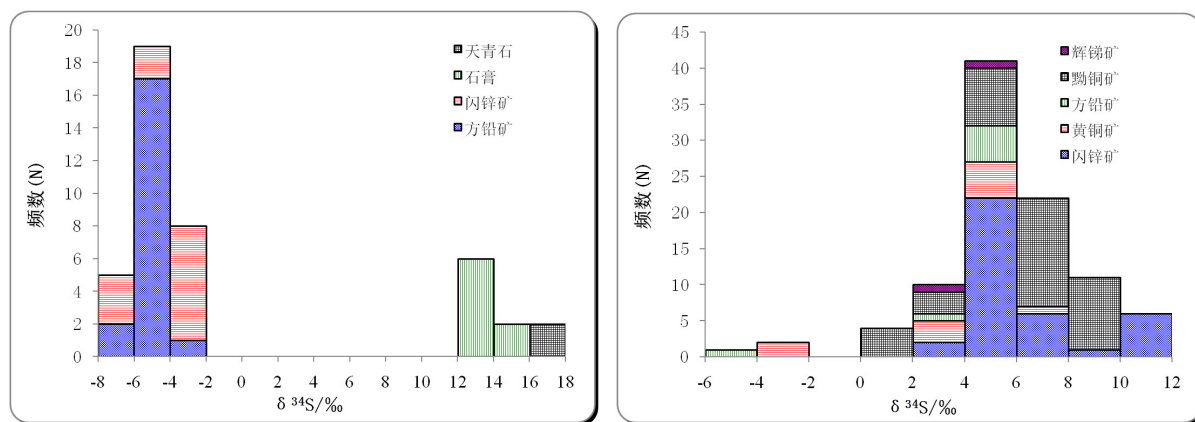


Figure 2. The distribution chart of sulfur isotope of the Baiyangping silver-copper polymetallic ore-concentration area
图 2. 白秧坪银铜多金属矿集区硫同位素组成分布图

硫酸盐(重晶石)的 $\delta^{34}\text{S}$ 变化范围为 12.6‰~13.5‰, 平均为 12.88‰。整体来看西矿带硫化物中相对富集重硫, 且呈塔式分布(图 2)。根据西矿带矿物共生组合(重晶石、砷黝铜矿), 且前人对该矿集区的研究表明成矿流体具有较高的氧逸度和较高的 pH 值[17]。在此条件下, 根据 Ohmoto 模式, 热液的 $\delta^{34}\text{S}$ 值, 应等于或略小于重晶石的 $\delta^{34}\text{S}$ 值, 而明显高于硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 值, 因此可确定西矿带成矿流体的 $\delta^{34}\text{S}_{\text{SS}}$ 值应在 +11.2‰~+13.5‰ 之间。此 $\delta^{34}\text{S}_{\text{SS}}$ 值处于地幔硫和海洋沉积硫之间, 表明该矿带的成矿流体的硫源相对复杂, 既有可能为深源硫和海洋沉积硫酸盐的混合, 又有可能为还原有机质形成的 HS 和硫酸盐的热化学还原形成的还原性硫的混合。前人通过对该区流体包裹体的相关研究发现成矿流体显示低温、中-高盐度特征, 有盆地卤水的参与, 结合成矿热液的硫同位素特征可知硫化物中的硫应为迁移金属溶液中的硫酸根在成矿部位被有机质热化学还原形成的。

结合该矿集区中硫化物和硫酸盐的硫同位素组成特征、矿床地质特征、矿物共生组合和成矿溶液物理化学条件等多方面综合考虑, 认为该矿集区东、西矿带的硫源存在明显差异: 东矿带的硫主要来源于沉积地层中的硫酸盐岩, 以有机质参与的热化学还原和硫酸盐的细菌还原作用且以硫酸盐的细菌还原作用为主, 将成矿热液中的硫酸盐转化为硫化物沉淀所需的还原性硫; 西矿带的硫可能为沉积地层中的硫酸盐岩、有机硫的混合, 以有机质热化学还原作用将成矿热液中的硫酸盐转化为硫化物沉淀所需的还原性硫。

3.4. 西缘脉状铜多金属矿床硫同位素分布特征及意义

本次研究主要收集了金满、水泄、连城三个矿区的相关硫化物和硫酸盐的硫同位素[7] [19] [20]。热液沉淀的硫化物矿物 $\delta^{34}\text{S}$ 总体变化范围为 -17.9‰~16.3‰, 平均为 -3.43‰, 多数集中在 -10‰~6‰ 区间内。其中黄铁矿的变化范围为 -10‰~5.7‰, 平均为 -0.03‰; 辉钨矿的变化范围为 -8.6‰~-5.8‰, 平均为 -7.8‰; 黄铜矿的变化范围为 -10.6‰~6‰, 平均为 -3‰; 斑铜矿的变化范围为 -17.9‰~12.1‰, 平均为 -4.6‰; 辉铜矿的变化范围为 -16.4‰~5.9‰, 平均为 -4.9‰; 黝铜矿的变化范围为 -8.9‰~16.3‰, 平均为 -1.6‰。由图 3 可知硫化物同位素的分布并不呈正态分布形式, 而是呈现单曲线的分布, 主要集中在 -10‰~0‰, 但是在 0‰~6‰ 也较高, 总体呈现富集重硫的特征。

虽然在金满和连城矿床中都有重晶石与硫化物共生现象存在的现象, 但是由于重晶石的颗粒较小没有获得有关重晶石的硫同位素数据[18], 只在见有大量重晶石出露的水泄矿床获得有重晶石中硫同位素的数据, 分布于 19.4‰~19.8‰, 平均为 19.6‰, 相对盆地蒸发岩中的石膏 $\delta^{34}\text{S}$ (15‰左右) 较大。前人[7] [20] 对水泄矿床、金满矿床和连城铜钼多金属矿床的矿物流体包裹体成分的研究发现成矿流体具有较高的氧

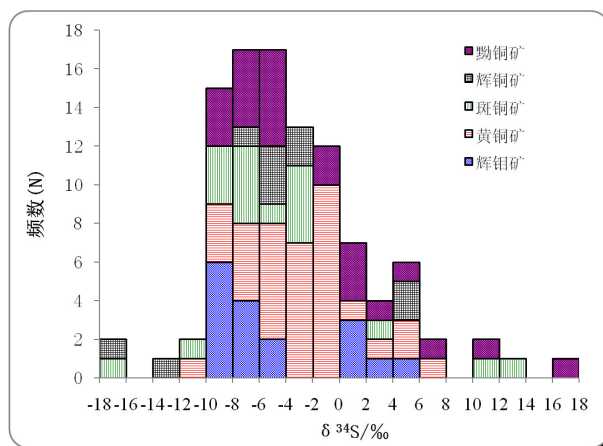


Figure 3. The distribution chart of sulfur isotope of copper deposits on the western border of the Lanping Basin
图 3. 兰坪盆地西缘脉状铜矿硫同位素组成分布图

逸度和 pH 值。在此条件下, 根据大本模式, 成矿热液来源的总硫同位素应小于或略等于重晶石 $\delta^{34}\text{S}$ 值, 而硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 值明显低于热液的 $\delta^{34}\text{S}$ 值[21]。据此, 推测迁移成矿元素的热液中还原硫相对氧化硫的含量较低, 形成硫化物的还原硫的来源为迁移金属溶液中的硫酸根在成矿部位被还原。前人对金满矿区的矿石研究发现矿石的有机碳含量非常高且存在着由黄铁矿、黄铜矿和斑铜矿组成的木质结构, 同时结合有机和无机还原硫酸盐使硫酸盐和硫化物之间的分馏在 $<0\text{‰}\sim 15\text{‰}$ 和 $10\text{‰}\sim 25\text{‰}$ [2], 及该区硫化物硫同位素主要集中在 $-10\text{‰}\sim 0\text{‰}$ 可知该区的热液中是硫主要来自盆地热卤水萃取地层蒸发岩中的硫酸盐, 并通过有机质和无机热分解反应还原为低价硫分馏得到。

4. 结论

由金顶铅锌矿、白秧坪银铜多金属矿和盆地西缘脉状铜矿床中硫同位素的分布特征及其对硫源的指示意义可知兰坪盆地中新生代以热卤水成矿作用为主, 盆地中大面积出露的膏盐地层为热卤水的形成提供了大量的硫酸盐, 同时地层中大量存在的有机质又为硫酸盐通过细菌还原作用、有机(无机)热化学还原作用转化为还原性硫提供了条件, 但是在不同的矿床中硫酸盐转化为还原性硫的方式是不同的。金顶铅锌矿主要为细菌还原硫酸盐及部分的有机热化学还原作用将成矿热液中的硫酸盐转化为还原性硫; 盆地西缘脉状铜矿主要为有机热化学还原作用将热液中的硫酸盐转化为还原性硫; 白秧坪银铜多金属矿西矿带的还原性硫主要为有机质参与的热化学还原和硫酸盐的细菌还原作用且以硫酸盐的细菌还原作用为主, 将成矿热液中的硫酸盐转化为还原性硫; 白秧坪银铜多金属矿东矿带硫化物中的硫应为迁移金属溶液中的硫酸根在成矿部位被有机质热化学还原形成的。

参考文献 (References)

- [1] 薛春纪, 陈毓川, 杨建民, 等. 金顶铅锌矿床地质 - 地球化学[J]. 矿床地质, 2002, 21(3): 270-277.
- [2] 宋玉财, 侯增谦, 杨天南, 等. “三江”喜马拉雅期沉积岩容矿贱金属矿床基本特征与成因类型[J]. 岩石矿物学杂志, 2011, 30(3): 355-380.
- [3] 李志明, 刘家军, 秦建中, 等. 滇西兰坪盆地多金属矿床碳、氧、氢同位素组成及其地质意义[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2004, 34(3): 360-367.
- [4] 王登红, 陈毓川, 徐珏, 等. 中国新生代成矿作用[M]. 北京: 地质出版社, 2005: 236-238.
- [5] 叶庆同, 胡云中, 杨岳清. 三江地区区域地球化学背景和金银铅锌成矿作用[M]. 北京: 地质出版社, 1992: 21-26.

- [6] 周维全, 周全立. 兰坪铅锌矿床铅和硫同位素组成研究[J]. 地球化学, 1992(2): 141-148.
- [7] 赵海滨. 滇西兰坪盆地中北部铜多金属矿床成矿地质特征及地质条件[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国地质大学, 2006.
- [8] 邓海峰, 郭福生, 朱志军, 等. 云南金顶铅锌矿碳、氧、硫同位素地球化学特征及其地质意义[J]. 2012, 33(4): 218-224.
- [9] 王哲. 云南金顶铅锌矿床成矿流体与矿化机制研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国地质大学, 2013.
- [10] 杨雁波. 兰坪盆地中新生代成矿流体特征、来源与演化研究[D]: [硕士学位论文]. 昆明: 昆明理工大学, 2013.
- [11] 覃功炯, 朱上庆. 金顶铅锌矿床成因模式及找矿预测[J]. 云南地质, 1991, 10(2): 145-189.
- [12] 高永宝, 薛春纪, 曾荣. 兰坪金顶铅锌硫化物成矿中硫化氢成因[J]. 地球科学与环境学报, 2008, 30(4): 367-372.
- [13] 冯彩霞, 毕献武, 胡瑞忠, 等. 兰坪盆地白秧坪 Cu-Pb-Zn-Ag 多金属矿集区元素共生分异机制及物质来源[J]. 2011, 27(9): 2609-2624.
- [14] 王晓虎, 宋玉财, 侯增谦, 等. 滇西兰坪盆地富隆厂一带铅锌多金属矿床中闪锌矿的微量元素、S-Pb 同位素特征及意义[J]. 岩石矿物学杂志, 2011, 30(1): 45-59.
- [15] 邹志超, 胡瑞忠, 毕献武, 等. 云南白秧坪银铜多金属矿集区成矿流体的稳定同位素地球化学研究[J]. 2012, 41(6): 515-529.
- [16] 薛伟, 薛春纪, 李洪军, 等. 滇西北兰坪盆地白秧坪多金属矿床成矿物质来源: C、H、O、S 和 Pb 同位素制约[J]. 现代地质, 2012, 26(4): 663-672.
- [17] 刘家军, 翟德高, 李志明, 等. 兰坪盆地白秧坪银铜多金属矿集区中银、钴、铋、镍的赋存状态与成因意义[J]. 岩石学报, 2010, 26(6): 1646-1660.
- [18] 张锦让, 温汉捷. 云南兰坪盆地西缘脉状铜多金属矿床硫、铅同位素组成及成矿示踪[J]. 地球化学, 2012, 41(2): 166-180.
- [19] 张锦让, 温汉捷, 秦朝建, 等. 兰坪盆地连城 Cu-Mo 多金属矿床流体包裹体和稳定同位素地球化学研究[J]. 岩石学报, 2012, 28(5): 1373-1386.
- [20] 李峰, 甫为民. 滇西红层铜矿地质[M]. 昆明: 云南大学出版社, 2000: 16-60.
- [21] 陕亮, 郑有业, 许荣科, 等. 硫同位素示踪与热液成矿作用研究[J]. 地质与资源, 2009, 18(3): 197-203.