

doi:10.3969/j.issn.1007-3701.2018.01.008

硫同位素地质特征及其 在湖南省铜矿床成矿物质来源示踪中的应用

李振红^{1,2}, 赵亚辉^{1,3}, 周厚祥^{1,3}

LI Zhen-Hong^{1,2}, ZHAO Ya-Hui^{1,3}, ZHOU Hou-Xiang^{1,3}

(1. 湖南科技大学, 湖南湘潭 411100; 2. 湖南省核工业地质局三一一大队, 长沙 410001; 3. 湖南省国土资源规划院, 长沙 410007)

(1. Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201; 2. No. 311 Brigade of Hunan Nuclear Geology, Changsha 410001;

3. Hunan Planning Institute of Land and Resources, Changsha 410007)

摘要: 硫是铜矿床的重要成矿物质, 硫同位素特征可用于示踪含硫矿物或流体来源, 从而为矿床成因和成矿预测研究提供支持。本文简述了硫同位素特征在地质勘查中的应用进展, 并将湖南省以铜为主要矿种的铜矿床分为岩浆热液型和砂页岩型两大类, 对矿床的基本地质特征和硫同位素特征进行了分析, 总结了硫同位素的分布特征: 矽卡岩型铜矿床矿石矿物中硫化物 $\delta^{34}\text{S}$ 分布较为集中, 峰值通常位于 3~5‰ 之间, 热液交代型铜矿床含硫矿物中 $\delta^{34}\text{S}$ 的分布范围和峰值与矽卡岩型铜矿床有明显区别; 砂岩型铜矿床中 $\delta^{34}\text{S}$ 分布范围一般较广, 峰值通常为较大的负值。硫同位素特征在湖南省铜矿床成矿作用研究中可以发挥更大的作用。

关键词: 铜多金属矿床; 硫同位素; 成矿流体来源; 岩浆热液型矿床; 砂页岩型矿床

中图分类号: P597+.2;

文献标志码: A

文章编号: 1007-3701(2018)01-072-06

Li Z H, Zhao Y H and Zhou H X. Sulfur Isotopic Characteristics of Copper Deposits in Hunan Province. *Geology and Mineral Resources of South China*, 2018, 34(1):72-77.

Abstract: Sulfur is an important ore-forming material of copper desposits, so the characteristics of sulfur isotopes can be used to trace the source of sulfur minerals or fluids, thus providing support for the study of ore genesis and metallogenic prognosis. The development in the application of sulfur isotope characteristics in geological exploration was briefly described in this paper. Copper deposits in Hunan province were divided into magmatic hydrothermal type and sandstone-shale type to discuss the sulfur isotope characteristics. The distribution of $\delta^{34}\text{S}$ of sulfur minerals in the skarn type copper deposit is relatively concentrated, and the peak value is usually between 3‰ and 5‰. The distribution range and peak of $\delta^{34}\text{S}$ of sulfur minerals in the hydrothermal metasomatic copper deposit are obviously different from that of the skarn type copper deposit. In the sandstone type copper deposit, the distribution range of $\delta^{34}\text{S}$ are generally wide and the peak is usually negative. The sulfur isotope characteristics can play a more important role in the study of mineralization of copper deposits in Hunan province.

Key words: copper-polymetallic deposit; sulfur isotope; ore-forming fluid; magmatic hydrothermal deposit; sandstone-shale type deposit

收稿日期: 2017-12-19; 修回日期: 2018-3-6

基金项目: 湖南省级财政科研项目《衡阳盆地及其周缘铜铅锌多金属矿床深部地质背景、成矿规律及找矿方向研究》。

第一作者: 李振红, (1989—), 女, 地质工程师, 硕士, 研究方向为矿床学, E-mail: zhx418@163.com.

《全国矿产资源规划(2016~2020年)》将铜列为我国24种战略性矿产之一,湖南安化-怀化是铜矿资源重点勘查区之一。铜矿石中常见的黄铜矿、斑铜矿、辉铜矿等矿物均为硫化物,分析矿石和围岩中硫同位素的特征,可以用于确定成矿物质来源和研究成矿过程。本文对文献中湖南省铜矿床硫同位素特征进行了分析整理,以期对铜矿勘查和相关科研工作提供参考。

1 硫同位素地质特征及其在成矿物质来源示踪中的应用

1.1 硫同位素效应与分析方法

硫在自然界中以 ^{32}S 、 ^{33}S 、 ^{34}S 和 ^{36}S 四种同位素存在,它们的相对丰度依次为94.93%、0.76%、4.29%、0.02%^[1]。大部分金属矿均为硫化物,在其形成过程中,硫同位素会因同位素间质量的差别而发生分馏。多数同位素分馏由热力学平衡引起,平衡条件下较重的硫同位素倾向于富集在具有较强硫键的化合物中;键强度上的差别也能导致动力学分馏,较轻的 ^{32}S 通常优先富集于反应产物中。

一般情况下,硫化物中 ^{33}S 、 ^{34}S 和 ^{36}S 之间存在固定的比例关系,因而通常只测量相对丰度较高的 ^{34}S 和 ^{32}S 的比值关系(记为 $\delta^{34}\text{S}$),所用标准通常为CDT(Canyon Diablo Trolite),或校准至CDT的相对值。目前,矿床中硫同位素的分析主要依据行业标准DZ/T0184.14-1997《硫化物中硫同位素组成的测定》和DZ/T0184.15-1997《硫酸盐中硫同位素组成的测定》,将硫化物或硫酸盐转化为 SO_2 进行测定,本文所引用的湖南省铜矿床硫同位素组成数据均采用该方法获得。若以 SF_6 作为工作气体进行硫同位素测定,分析精度将明显提高,可以获得各硫同位素间的比值关系。目前,已经在陨石、太古代沉积物、南极冰芯等地质材料中发现了 ^{33}S 、 ^{34}S 和 ^{36}S 比值关系的变化,即非质量硫同位素效应,其主要与气相光化学氧化作用相关^[2],矿床中硫同位素组成分析时很少关注这一效应。近年来,热电离质谱(TIMS)^[3]、多接收电感耦合等离子体质谱(MC-ICP-MS)^[4]等仪器分析方法发展较快,但其在硫同位素组成分析中的应用仍不普遍,湖南省铜矿床硫同位素研究中暂未见采用。

1.2 硫同位素示踪矿床成矿流体来源

矿床的成因不同,在硫同位素组成上会有所体

现。一般认为,成矿流体中 $\delta^{34}\text{S}$ 有3种不同的来源^[5]:(1)地幔硫, $\delta^{34}\text{S}$ 接近于0‰,变化范围为 $0\pm 3\text{‰}$;(2)现代海水硫, $\delta^{34}\text{S}$ 约为+20‰,但变化范围较大;(3)还原(沉积)硫,或称生物硫,以负值 $\delta^{34}\text{S}$ 为特征。对于已成矿的矿床,硫同位素组成可示踪成矿物质或流体的来源;对于矿化阶段的地球化学异常,硫同位素组成也可用于判断其成因^[6]。但是,研究人员测定的一般是矿体或围岩中金属硫化物矿物的 $\delta^{34}\text{S}$,其与成矿流体的 $\delta^{34}\text{S}$ 可能不一致,特别是矿床中存在多种含硫矿物时。Ohmoto等^[7]的研究表明,成矿流体的温度、氧逸度、酸碱度等都可能影响矿物沉淀时的硫同位素组成。因此,体系的开放与否也会影响含硫矿物的 $\delta^{34}\text{S}$ 分布。

硫同位素示踪成矿流体的来源有一定的复杂性,变质岩、沉积岩的 $\delta^{34}\text{S}$ 变化范围很大,生物硫和海水硫酸盐的 $\delta^{34}\text{S}$ 虽分别呈较大的负值和正值,但其变化范围也较大。仅根据个别含硫矿物的 $\delta^{34}\text{S}$,很难确定成矿物质的来源或成因类型。但是,通过分段采集并测得的大量样品的 $\delta^{34}\text{S}$ 分布范围,可以初步判断硫同位素是否为多个来源。再结合矿床的基本地质特征,则可以初步判断成矿流体的来源。若要获得更准确的成矿流体来源,则需要根据矿床成矿期次和矿物的共生关系、生成顺序、交代关系等信息综合判断。

通过含硫矿物获取成矿流体的 $\delta^{34}\text{S}$ 需要满足硫同位素达到平衡的条件^[8]。判断硫同位素平衡的方法中,等温线法和 $\delta-\delta(\delta-\Delta)$ 图解法需要存在多组 $\delta^{34}\text{S}$ 不同的共生矿物对,因而相对简单的共生顺序差别法最为常用。硫同位素达到平衡时,由高价到低价,不同价态的含硫矿物 $\delta^{34}\text{S}$ 依次降低,其中各种常见硫化物富 ^{34}S 的顺序大致如下^[9]:辉钼矿>黄铁矿>闪锌矿>磁黄铁矿>硫化氢>黄铜矿>斑铜矿>HS->铜蓝>方铅矿>辰砂>辉铜矿>辉铋矿>辉银矿>辉铊矿。

2 湖南省铜矿床基本特征

湖南地跨扬子和华夏古陆块,华南、扬子两个板块在雪峰山一带碰撞拼贴,形成了西部以沉积型铜矿床为主的成矿区和东部以岩浆热液型铜矿床为主的成矿区^[10]。湖南省铜矿床数量较多,以中小型规模为主,无大型铜矿床。省内以铜为单一矿产

的矿床少,共伴生铜矿床占比大,铜常与铅锌、钴、钨、锡等形成多金属矿床。

2.1 岩浆热液型铜矿床

铜矿床有多种分类法,其中的大多数以成矿物质来源或成矿作用为基础。王之田^[11]、黄崇轲^[12]、应立娟^[13]等先后对我国铜矿床的成因类型和成矿时期进行过较为全面的分类整理。在这些矿床类型中,斑岩型和矽卡岩型最为重要,二者均属岩浆热液型。湖南省铜矿床也以岩浆热液型为主,主要为矽卡岩型,斑岩型铜矿床少见。湖南省目前铜资源量达到中型规模的4个矿床中,3个就属矽卡岩型^[14]。以铜为主要矿种的热液型矿床中,除七宝山、宝山、铜山岭、野鸡尾等矽卡岩型矿床外,也有井冲、谭子山等热液交代型矿床。

在地质构造上,湖南省内隆起和坳陷相间出现,深大断裂发育,纵横交错,以北东向为主。湖南省热液型铜矿床受断裂制约明显,主要沿北东向发育。下面就典型铜矿床的基本地质特征作简要介绍。

湘东北地区的七宝山铜多金属矿床是湖南省铜资源量最大的矿床。矿区断裂构造发育,古港—横山断裂从矿区中部穿过。矿区岩浆活动较为强烈,以七宝山岩体规模最大,主要岩性为石英斑岩和花岗斑岩。矿区的主要赋矿围岩是冷家溪群浅变质碎屑岩、石炭系中上统碳酸盐岩及蚀变花岗斑岩,主要矿石矿物为黄铁矿、黄铜矿、磁铁矿和铁闪锌矿^[15]。同属湘东北的井冲矿床位于长平深大断裂带上,区内岩浆活动频繁,主要为连云山花岗岩体。矿体赋存于矿化带下部硅质构造角砾岩、绿泥石化硅质岩中,呈透镜状和似层状、脉状产出,主要矿石矿物有黄铁矿、黄铜矿、辉钴矿等^[16]。

南岭中段的宝山多金属矿床铜资源储量超过20万吨,位于骑田岭花岗岩体西北侧,矿区岩浆岩较为发育,以花岗闪长斑岩为主。矿床受宝岭倒转背斜控制,铜矿体分布在倒转背斜顶部,矿石矿物以黄铜矿为主,呈浸染状分布于与花岗闪长斑岩接触的钙质矽卡岩中^[17]。铜山岭铜多金属矿床是湘南少有的以铜为主的金属矿床,矿区岩浆岩主要为铜山岭岩体,北北东向断裂纵贯矿区,是区内主要的导矿构造。矽卡岩型矿体产于花岗闪长岩与泥盆系、石炭系地层接触带深部,主要呈似层状产出,主要金属矿物为黄铜矿、方铅矿、闪锌矿等^[18]。野鸡尾

多金属矿床位于东坡矿床与柿竹园矿床之间,铜金属储量达6.6万吨,矿区内断裂构造非常发育,常相互交切、穿插成网状。铜主要赋存于矽卡岩型铜矿体中,黄铜矿占铜矿物的95%以上,呈浸染状零星分布于矿石中^[19]。

2.2 砂页岩型铜矿床

湖南省沅麻盆地和衡阳盆地在国内知名的砂页岩型铜矿床成矿区。前者以麻阳九曲湾铜矿床为代表,后者以车江铜矿床为代表。麻阳九曲湾铜矿床产于沅麻盆地中段,为陆相沉积型矿床。矿床中主要矿石矿物为自然铜,其次为辉铜矿,自然铜主要以胶结物形式产出,交代结晶方解石。矿体主要赋存于砂砾岩、含砾中-粗砂岩或含砾细砂岩中^[20]。车江铜矿则形成于红色砂泥岩中,矿物以辉铜矿为主。衡阳盆地的柏坊铜矿床为经地下水淋滤改造的砂页岩型铜矿,主要矿石矿物为辉铜矿和斑铜矿。沉积砂岩型矿体中的辉铜矿一般呈星点状、豆状,矿体主要赋存于灰白色长石石英砂岩中;地下水淋滤再造型矿体主要为致密块状,矿体外部形态较为复杂^[21]。

3 湖南省铜矿床硫同位素地球化学特征的规律及成矿物质来源

陈民扬^[22]曾按照铜镍硫化物矿床、斑岩型铜矿、矽卡岩型铜矿、海底火山岩型铜矿、砂岩型铜矿和变质岩型铜矿等六个主要类型,对我国铜矿床的 $\delta^{34}\text{S}$ 分布特征进行分析。崔银亮^[23]也对我国南方砂页岩铜矿床硫同位素进行过分析整理。但是,二者文中均未涉及湖南省铜矿床。本文对目前湖南省以铜为主要矿种的矿床的硫同位素特征进行了梳理,并按岩浆热液型和砂页岩型进行分类讨论。

3.1 岩浆热液型铜矿床

湖南省主要岩浆热液型铜矿床矿石矿物中的硫同位素组成见图1。这些矿床的基本特征见2.1节,矿床中均未见重晶石,所分析的含硫矿物均为硫化物。硫化物矿物对的 $\delta^{34}\text{S}$ 表明硫同位素达到平衡或接近平衡。

图1中七宝山、宝山、铜山岭、野鸡尾矿床均为矽卡岩型矿床,它们的硫同位素组成分布较为类似, $\delta^{34}\text{S}$ 分布较为集中,大部分位于2‰~5‰范围内,在频率直方图上呈塔式分布。七宝山、宝山、铜山岭含硫矿物 $\delta^{34}\text{S}$ 峰值均在3‰~4‰之间,

野鸡尾矿床样品相对较少,含硫矿物 $\delta^{34}\text{S}$ 峰值略高于 4‰。

Ohmoto^[24]指出,成矿热液中硫同位素主要以 HS^- 和 S^{2-} 存在时,成矿热液的硫同位素组成与含硫矿物相近。胡俊良等^[25]测得七宝山矿床矿化的石英斑岩中 $\delta^{34}\text{S}$ 位于 2.2~3.9‰ 之间,岩体与矿石的 $\delta^{34}\text{S}$ 基本一致。丁腾^[17]等分析得到宝山矿床花岗闪长斑岩中黄铁矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 位于 1.5~3.5‰ 之间,与矿石中基本一致。蔡应雄等^[18]测得铜山岭 2 个贫矿石硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 为 3.4‰ 和 3.9‰,岩体与矿石硫同位素组成也相当。由此表明,可以用这些矿床含硫矿物的 $\delta^{34}\text{S}$ 峰值近似代替成矿热液的 $\delta^{34}\text{S}$ 。

通常认为幔源 $\delta^{34}\text{S}$ 为 $0 \pm 3\text{‰}$,湖南省矽卡岩型铜矿床含硫矿物的 $\delta^{34}\text{S}$ 集中分布且峰值略微超过 3‰,可以判断硫主要来源于岩浆,但不能排除壳源硫混入,如岩浆上升过或结晶过程中地壳物质混染的影响。李蘅等^[26]将国内矽卡岩型铜矿床的硫同位素特征分为两类,一类矿床硫同位素组成变化范围较大(5‰~10‰),有较大正值出现,这类矿床围岩中常出现高盐层;另一类矿床硫同位素组成变化小,一般不超过 5‰。湖南省矽卡岩型铜矿床均属于后者。

图 1 中井冲矿床含硫矿物的 $\delta^{34}\text{S}$ 分布也较为集中,峰值接近于 0‰,与岩浆岩的硫同位素组成范围相一致,可以判断其成矿物质主要来源于岩浆。井冲矿床为热液交代型矿床,其硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 峰值为负值,与图 1 中矽卡岩型铜矿床有明显区别,反映出这两类矿床不同的成矿作用。

开展 $\delta^{34}\text{S}$ 值测试的样品数量也反映了矿床研究的深度。从图 1 中可以看出,七宝山矿床测定的 $\delta^{34}\text{S}$ 值最多,体现了其作为湖南省最大铜矿床的重要性。图 1 中的 $\delta^{34}\text{S}$ 值来源于不同深度和类型的大量样品,但相应文章中并未根据成矿期次等因素对样品中硫同位素组成进一步分类讨论,胡树起等^[27]指出,硫同位素组成可用于鉴别矿化蚀变分带,相关研究工作仍值得深入。

除图 1 中所列矿床外,湖南省内其他以铜作为主要矿种的岩浆热液型矿床开展硫同位素组成研究的极少,仅有大义山的新生铜多金属矿床开展过 2 组硫化物矿物对(共 4 个样品)的 $\delta^{34}\text{S}$ 值^[28],因样品较少, $\delta^{34}\text{S}$ 值仅能作为成矿物质来源判断的参考信息。

3.2 砂页岩型铜矿床

麻阳九曲湾铜矿床开采历史悠久,但地球化学研究工作较少^[37],硫同位素组成研究工作更少,目前未见发表的硫同位素组成相关研究报告。车江铜矿床硫同位素组成则有报道,钟建华等^[38]测得该矿床 $\delta^{34}\text{S}$ 介于 -19.02‰~-39.31‰ 之间,平均为 -29.86‰,这种分布范围较大的负值通常与沉积作用有关,说明有部分硫来源于生物硫。较大的 $\delta^{34}\text{S}$ 分布范围,表明矿床形成过程较为复杂,但这种分布特征对于成矿作用的分析,如沉积与改造具体过程所属类型的判断等作用有限,仅能判断有沉积或生物作用过程发生。因此,此类矿床硫同位素特征的分析较少受到关注。

柏坊铜矿床则相对较为复杂,该矿床既有夹于砂岩中的层状矿体,又有产于石灰岩中的脉状、透镜状、柱状、囊状矿体^[39]。宛克勇^[40]测得该矿床辉铜矿 $\delta^{34}\text{S}$ 介于 -31.8‰~-8.4‰ 之间,而柳智等测定的该矿床深部中段辉铜矿样品的 $\delta^{34}\text{S}$ 介于 1.85‰~3.66‰ 之间。二者差别较大,主要源于样品的位置来源不同。不同的 $\delta^{34}\text{S}$ 分布范围也反映了不同的成

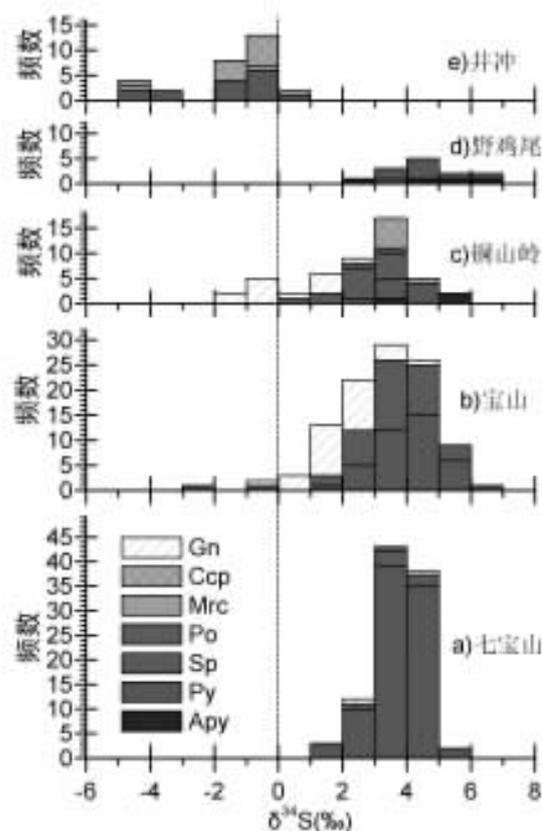


Fig. 1 Sulfur isotopic composition histogram of magmatic-hydrothermal type copper deposits in Hunan province

矿物质来源与矿床成因特征。对于这种多因复成的铜矿床,硫同位素分布特征对于矿床成因研究具有重要的参考价值。

4 结论

硫同位素示踪铜矿床成矿流体的来源有一定的复杂性,分段采集的大量样品的 $\delta^{34}\text{S}$ 分布特征可以初步判断成矿流体的来源。通过对湖南省铜矿床基本特征及硫同位素特征的分析讨论,得到如下结论:

(1)湖南省铜矿床以矽卡岩型为主,矿物中通常不含硫酸盐,硫化物 $\delta^{34}\text{S}$ 分布较为集中,峰值通常位于 3‰~5‰之间,成矿热液主要来源于岩浆;热液交代型铜矿床的硫同位素组成研究相对较少,含硫矿物中 $\delta^{34}\text{S}$ 的分布范围和峰值与矽卡岩型铜矿床有明显区别。

(2)湖南省砂页岩型铜矿床中硫同位素组成研究相对较少,此类矿床含硫矿物中 $\delta^{34}\text{S}$ 分布范围一般较广,峰值通常为较大的负值;对于多因复成的沉积型铜矿床,硫同位素特征对不同的成矿阶段有较好的指示作用。

(3)湖南省铜矿床硫同位素特征的研究和应用还有待深入,在区分成矿期次、鉴别矿化蚀变分带等方面,硫同位素特征还可以发挥更大的作用。

参考文献:

- [1] Rosman K J R, Taylor P D P. Isotopic compositions of the elements 1997 (Technical Report)[J]. Pure and Applied Chemistry, 1998,70(1):217-238.
- [2] 马红梅,李院生,姜苏,安春雷. 非质量硫同位素分馏效应研究进展 [J]. 地球科学与环境学报, 2010,32 (2):176-182.
- [3] 张苗云,王世杰,洪冰,邱勇军. 硫同位素的热电离质谱(TIMS)测定方法[J]. 质谱学报, 2007,28(2):101-105.
- [4] 卞霄鹏,刘晨晖,朱志勇,杨涛. 硫酸盐硫同位素的MC-ICP-MS测定方法研究 [J]. 矿物岩石地球化学通报, 2016,35(3):465-472.
- [5] 陕亮,郑有业,许荣科,曹亮,张雨莲,连永牢,李闰华. 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.
- [6] 席明杰,马生明,朱立新,弓秋丽. 硫同位素在地球化学异常成因研究中的应用[J]. 地质学报, 2009,83(5):705-718.
- [7] Ohmoto H, Rye R. Isotopes of sulfur and carbon [M]// Barnes H L. Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits. New York: Wiley, 1979:505-567.
- [8] 郑永飞,陈江峰. 稳定同位素地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- [9] 王云峰,杨红梅. 金属硫化物矿床的成矿热液硫同位素示踪[J]. 地球科学进展, 2016,31(6):595-602.
- [10] 付胜云,唐分配,李大江,黄革非. 湖南省铜矿成矿规律[J]. 有色金属(矿山部分), 2015,67(6):36-43.
- [11] 王之田,秦克章. 中国铜矿床类型、成矿环境及其时空分布特点[J]. 地质学报, 1988,62(3):257-267.
- [12] 黄崇轲,白冶,朱裕生,王惠章,尚修治. 中国铜矿床[M]. 北京: 地质出版社, 2001.
- [13] 应立娟,陈毓川,王登红,唐菊兴,陈郑辉,王成辉. 中国铜矿成矿规律概要[J]. 地质学报, 2014,88(12):2216-2226.
- [14] 吴盛,梁军,汤亚平. 湖南省铜矿资源现状和低品位、共伴生铜矿利用前景分析[J]. 价值工程, 2013,(26):34-36.
- [15] 杨荣,符巩固,陈必河,陈剑锋,司程山,刘邦定,郑正福. 湖南七宝山铜多金属矿床地质特征与找矿方向[J]. 华南地质与矿产, 2015,(3):246-252.
- [16] 易祖水,罗小亚,周东红,肖朝阳. 浏阳市井冲钴铜多金属矿床地质特征及成因浅析[J]. 华南地质与矿产, 2010,(3):12-18.
- [17] 丁腾,马东升,陆建军,章荣清,谢银财. 湖南宝山矿床花岗岩类硫-铅同位素和流体包裹体研究及其成因意义[J]. 矿床地质, 2016,35(4):663-676.
- [18] 蔡应雄,谭娟娟,杨红梅,卢山松,段瑞春,邱啸飞,程顺波,杨小莉. 湘南铜山岭铜多金属矿床成矿物质来源的S、Pb、C同位素约束 [J]. 地质学报, 2015,89 (10):1792-1803.
- [19] 苏咏梅. 湖南郴县野鸡尾锡多金属矿床地质特征及成矿规律[J]. 四川地质学报, 2008,28(1):18-23.
- [20] 黄满湘. 湖南麻阳铜矿成矿机制探讨[J]. 大地构造与成矿学, 1999,23(1):42-49.
- [21] 邓湘伟,戴雪灵,黄满湘. 柏坊铜矿成矿规律及成矿模式探讨[J]. 华南地质与矿产, 2008,(4):22-25.
- [22] 陈民扬. 我国主要类型铜矿的硫同位素分布特征[J]. 地质与勘探, 1979,(6):6-17.
- [23] 崔银亮. 中国南方砂(页)岩铜矿床硫同位素地球化学研究[J]. 地质地球化学, 1997,(2):25-30.
- [24] Ohmoto H. Systematics of Sulfur and Carbon Isotopes in Hydrothermal Ore Deposits [J]. Economic Geology, 1972,67(5):551-578.
- [25] 胡俊良,陈娇霞,徐德明,吴昌雄,张鲲,刘劲松,刘阿睢,刘重芄. 湘东北七宝山铜多金属矿床成矿时代及成矿物质来源——石英脉Rb-Sr定年和S-Pb同位素组成

- [J]. 地质通报, 2017,36(5):857-866.
- [26] 李 衡, 徐文炘, 陈民扬, 丁汝福. 接触交代型铜矿床硫同位素地球化学研究[J]. 矿产与地质, 2016,30(6):940-943.
- [27] 胡树起, 刘崇民, 马生明. 铅硫同位素在地球化学勘查中的应用[J]. 物探与化探, 2015,39(2):366-370.
- [28] 费利东. 湖南省新生铜多金属矿床地质地球化学特征及成因研究[D]. 中南大学, 2012.
- [29] 陆玉梅, 殷浩然, 沈瑞锦. 七宝山多金属矿床成因模式[J]. 矿床地质, 1984,3(4):53-60.
- [30] 姚军明, 华仁民, 林锦富. 湘南宝山矿床REE、Pb-S同位素地球化学及黄铁矿Rb-Sr同位素定年 [J]. 地质学报, 2006,80(7):1045-1054.
- [31] 陈泽锋. 湘南宝山铅锌矿床的板内构造环境与矿床成因研究[D]. 中南大学, 2013.
- [32] 鲍 谈, 叶 霖, 杨玉龙, 李珍立. 湖南宝山Pb-Zn多金属矿床硫同位素地球化学特征及其地质意义 [J]. 矿物学报, 2014,34(2):261-266.
- [33] 谢银财, 陆建军, 杨平, 马东升, 徐兆文, 章荣清, 蔡 杨, 丁 腾. 湘南宝山铅锌矿床硫、铅、碳、氧同位素特征及成矿物质来源[J]. 矿床地质, 2015,34(2):333-351.
- [34] 吴守福. 铜山岭多金属矿田的若干地球化学特征[J]. 地质与勘探, 1983,(4):28-33.
- [35] 刘悟辉, 徐文炘, 戴塔根, 李衡. 湖南柿竹园钨锡多金属矿田野鸡尾矿床同位素地球化学研究 [J]. 岩石学报, 2006,22(10):2517-2524.
- [36] Wang Z L, Xu D R, Chi G X, Shao Y J, Lai J Q, Deng T, Guo F, Wang Z, Dong G J, Ning J T, Zou S H. Mineralogical and isotopic constraints on the genesis of the Jingchong Co - Cu polymetallic ore deposit in northeastern Hunan Province, South China [J]. Ore Geology Reviews, 2017,88:638-654.
- [37] 王大鹏, 张乾, 郭国林, 蔡 伊. 湖南麻阳砂岩自然铜矿床元素地球化学及其成因意义[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2014,44(4):1177-1187.
- [38] 钟建华, 李自安. 湖南车江铜矿的成因及成矿模式[J]. 矿床地质, 1997,16(3):52-59.
- [39] 柳 智, 黄满湘, 马德成, 王银茹. 湖南衡阳柏坊铜矿矿体地质特征及矿床成因探讨[J]. 南方金属, 2011,(5):16-18.
- [40] 宛克勇. 湖南柏坊铜矿床稳定同位素地球化学初步研究[J]. 矿产与地质, 2008,22(6):541-542.