

https://doi.org/10.3799/dqkx.2018.395



相山西部牛头山铅锌矿化体成矿物质来源:原位硫同位素的制约

刘 斌¹, 陈卫锋¹, 方启春², 唐湘生², 毛玉锋²,
孙立强¹, 高 爽¹, 严永杰², 魏 欣², 凌洪飞^{1*}

1. 南京大学地球科学与工程学院, 内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室, 江苏南京 210023
2. 核工业 270 研究所, 江西南昌 330200

摘 要: 近年来, 在相山铀矿田的西部牛头山地区深部发现了铅锌矿化体, 其成因机制不明. 为探讨牛头山铅锌矿化体物质来源, 开展了硫化物原位硫同位素分析研究. 根据硫化物矿物之间的充填和包裹关系判断, 铅锌矿化体金属硫化物形成的先后顺序是: 黄铁矿形成最早, 方铅矿和闪锌矿次之, 细脉状黄铜矿形成最晚. 利用 LA-MC-ICP-MS 技术对矿化体中几种金属硫化物分别进行了系统的原位硫同位素分析. 结果显示: 黄铁矿、闪锌矿、方铅矿、细脉状黄铜矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值介于 -4.8% ~ $+5.4\%$ 之间, 各硫化物矿物之间硫同位素未达到完全平衡分馏, 利用黄铁矿 $\delta^{34}\text{S}$ 值得到的矿化流体 $\delta^{34}\text{S}_{\text{SS}}$ 值(总硫同位素组成)近似为 $+3.7\%$, 与共生矿物对(闪锌矿-方铅矿)图解法得到的闪锌矿和方铅矿沉淀时矿化流体的 $\delta^{34}\text{S}_{\text{SS}}$ 值($+3.2\%$)相近, 表明形成牛头山铅锌矿化体的矿化流体 $\delta^{34}\text{S}_{\text{SS}}$ 值大约为 $+3.7\%$, 为岩浆硫. 结合前人的岩浆岩年龄数据, 我们判断该铅锌矿化体金属硫化物的硫可能主要来自次火山岩相花岗岩斑岩岩浆热液. 同一薄片中共生闪锌矿 $\delta^{34}\text{S}$ 值高于共生的方铅矿, 表明两者硫同位素基本平衡, 利用共生矿物对(闪锌矿-方铅矿)硫同位素温度计计算得出平衡温度为 $197\sim 476\text{ }^\circ\text{C}$, 与前人通过脉石矿物流体包裹体得到的铅锌矿化流体温度基本一致. 相山火山盆地与相邻的北武夷黄岗山、梨子坑等产铅锌矿的火山盆地具有相似的成矿条件及成矿物质来源, 使相山火山盆地具有良好的铅锌多金属找矿前景.

关键词: 铅锌矿化体; LA-MC-ICP-MS; 硫同位素; 成矿物质来源; 地球化学.

中图分类号: P611

文章编号: 1000-2383(2020)02-389-11

收稿日期: 2018-12-25

Study on In-Situ Sulfur Isotope Compositions of Sulfides: Implication for the Source of Pb-Zn Mineralized Body of Niutoushan in the Xiangshan Area

Liu Bin¹, Chen Weifeng¹, Fang Qichun², Tang Xiangsheng², Mao Yufeng²,
Sun Liqiang¹, Gao Shuang¹, Yan Yongjie², Wei Xin², Ling Hongfei^{1*}

1. State Key Laboratory for Mineral Deposit, School of Earth science and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210023, China
2. Research Institute No.270, CNNC, Nanchang 330200, China

Abstract: In recent years, the Pb-Zn mineralization was discovered in the Niutoushan area in the west part of the Xiangshan volcanic basin. The genetic mechanism of Pb-Zn mineralization is still unclear. In order to reveal the source of the Pb-Zn mineralization, in-situ sulfur isotope analysis using laser altered-inductively coupled plasma spectra (LA-MC-ICP-MS) of sulfides is carried out. Paragenetic and crosscutting relationship between sulfide minerals formed by the hydrothermal fluids suggest that the

基金项目: 国家重点研发计划项目“深地资源勘查开采”专项(No. 2017YFC0602601);核工业地质局科研项目(No. 201631).

作者简介: 刘斌(1991-),男,硕士生,主要从事铀矿床地球化学方面的研究. ORCID:0000-0003-4574-724X. E-mail: 13951651882@163.com

* **通讯作者:** 凌洪飞, ORCID:0000-0002-1090-6215. E-mail: hfling@nju.edu.cn

引用格式: 刘斌,陈卫锋,方启春,等,2020.相山西部牛头山铅锌矿化体成矿物质来源:原位硫同位素的制约.地球科学,45(2):389-399.

earliest precipitated mineral was pyrite, followed by galena and sphalerite, and the chalcopyrite in fine vein shape was formed at the latest stage of the hydrothermal fluids. The analytical results of this study indicate that the $\delta^{34}\text{S}$ values of metal sulfide minerals (pyrite, sphalerite, galena and fine-vein chalcopyrite) range from $-4.8\text{‰} \sim +5.4\text{‰}$. In term of sulfur isotopes, not all the sulfide minerals are in completely isotope equilibrium. The $\delta^{34}\text{S}_{\text{SS}}$ (total sulfur isotope) value of the mineralized fluid calculated from the $\delta^{34}\text{S}$ values of pyrite at its formation temperature is $+3.7\text{‰}$, which is basically consistent with hydrothermal $\delta^{34}\text{S}_{\text{SS}}$ value obtained from the $\delta^{34}\text{S}$ values of the paragenetic mineral pair (sphalerite-galena). Therefore, the $\delta^{34}\text{S}_{\text{SS}}$ value of the mineralization fluid ($+3.7\text{‰}$) in the Niutoushan Pb-Zn mineralization indicates that the mineralization fluid was magmatic in origin. Combined with the published dating data of the magmatic rocks of the Xiangshan volcanic basin, the sulfur isotope data of this study suggest that hydrothermal fluid of the Pb-Zn mineralization may have been mainly derived from the subvolcanic magma of the granitic porphyry. The sulfur isotope values of the sphalerite minerals were higher than those of the paragenetic galena in the mineralized bodies, indicating sulfur isotope equilibrium between these two minerals. The temperatures calculated by using the sulfur isotopic compositions of these two minerals are between $197\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $476\text{ }^{\circ}\text{C}$, which is consistent with the published temperatures from fluid inclusions. The metallogenic conditions and sources of ore-forming materials of the Niutoushan Pb-Zn mineralization in the Xiangshan volcanic basin are similar to those of Pb-Zn ore deposits in the Huanggangshan and Lizikeng volcanic basins in Northern Wuyi area, which hints promising prospects for Pb-Zn deposit prospecting in the Xiangshan volcanic basin.

Key words: Pb-Zn mineralization; LA-MC-ICP-MS; sulfur isotope; ore-forming material sources; geochemistry.

0 引言

相山铀矿田位于江西省境内的相山火山盆地中,是我国具有重要经济价值的火山岩型铀矿产地,近几年随着超深钻的实施,在矿田西部牛头山地区深部发现了铅锌矿化体.前人相继对牛头山铅锌矿化体的构造地质特征(吴志坚和胡志华,2014;张万良和邹茂卿,2014)、围岩地球化学特征(杨庆坤等,2015)、成矿物质(流体)来源(杨庆坤等,2015,2017;王健等,2016;刘军港等,2017)等方面开展了相关的研究工作,为了解牛头山深部铅锌矿化体的富集规律提供了资料.然而对于成矿物质中硫的来源,不同学者通过分析矿石中的金属硫化物硫同位素所获得的认识不同.王健等(2016)认为成矿过程中的硫主要来自基底变质沉积岩,存在少量地幔硫的参与;杨庆坤等(2015)和刘军港等(2017)认为成矿物质硫的主要来自深部地幔岩浆硫,只有少量地层硫(基底变质沉积岩)的混入.前人对该地区金属硫化物硫同位素分析是利用单矿物粉末法进行测定的,但一种硫化物中常含有其他硫化物矿物(如镜下观察到闪锌矿中存在乳滴状黄铜矿及细脉状黄铜矿),挑选出的矿物颗粒无法完全保证为纯净的单一矿物,导致获得的 $\delta^{34}\text{S}$ 值无法精确代表单一硫化物矿物的真实值,进而对硫的来源示踪判别造成影响.因此,为能够真实反映单矿物的 $\delta^{34}\text{S}$ 值,精确示踪硫的来源变化,本文利用激光剥蚀-多接收电感耦合等离子质谱(LA-MC-ICP-MS)技术,对牛头山铅锌矿化体中的金属硫化物(黄铁矿、

闪锌矿、方铅矿、黄铜矿)分别进行微区硫同位素测定,同时结合前人的岩浆岩年龄数据,对牛头山铅锌矿化体的成矿物质来源进行探讨,为其成因提供依据.

1 区域地质背景

相山塌陷式火山盆地的大地构造位置位于扬子板块与华夏板块结合部位的西南端,该盆地东西长约26 km,南北宽约16 km,面积约316 km²(图1).盆地主体由变质基底和火山-侵入杂岩组成.变质基底为中元古代-震旦纪变质岩系,由低绿片岩相-低角闪岩相的各类片岩、变粒岩夹斜长角闪岩组成;对火山-侵入杂岩,前人研究表明,相山火山活动具有明显两个旋回(夏林圻等,1992;吴仁贵,1999).第一旋回呈裂隙式喷发,形成打鼓顶组(K₁d)中酸性晶玻屑凝灰岩、流纹英安岩及熔结凝灰岩,形成年龄范围为140~137 Ma;第二旋回呈中心式喷发,形成鹅湖岭组(K₁e)晶屑凝灰岩及碎斑熔岩,形成年龄范围为135~130 Ma(杨水源等,2010,2012;Yang *et al.*, 2011;陈正乐等,2013).

在大量岩浆侵出后,火山口随即发生塌陷,形成一系列环状断裂,稍晚阶段的次火山岩浆沿环状断裂侵入.次火山岩主要为花岗斑岩和似斑状花岗岩,主要分布于盆地的东北部,西部出露较少.盆地内构造断裂发育,主要为一系列北北东向及北西向断裂.在盆地西北侧,由于区域性伸展拉张作用,形成晚白垩世红盆(Zhou and Li, 2000).相山火山盆

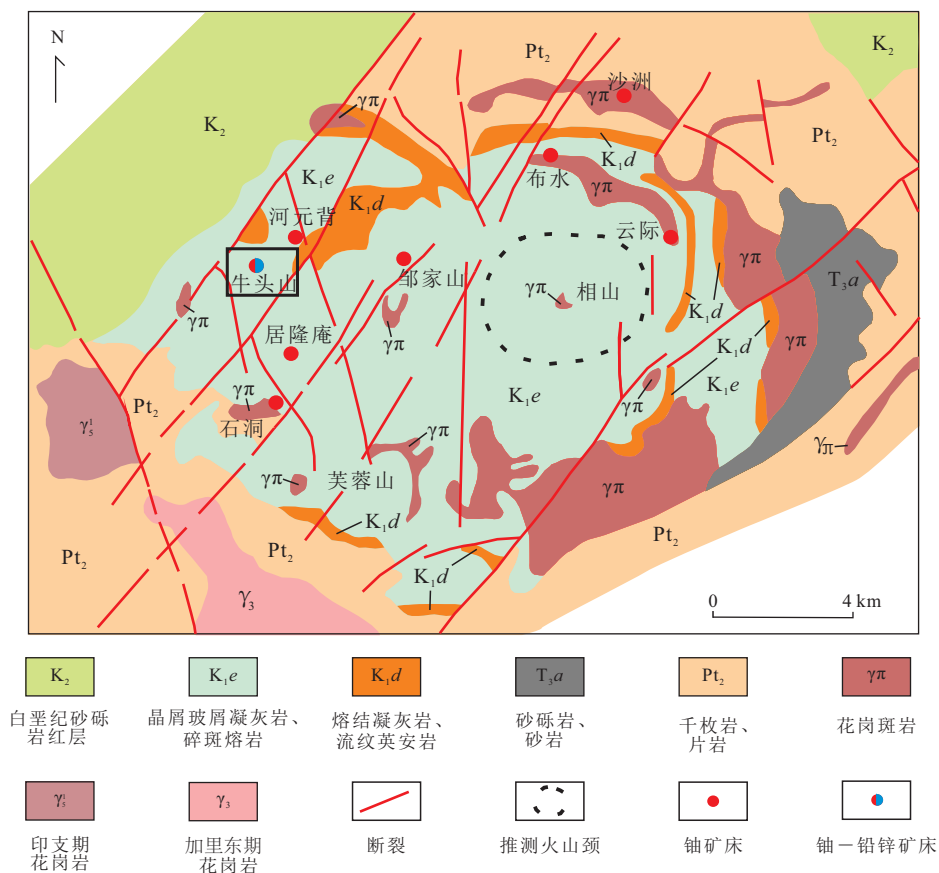


图 1 相山铀矿田地质简图(据谢国发等,2014修改)

Fig.1 Simplified geologic map of the Xiangshan uranium ore field

图中方框为钻探剖面(图2)所在区

地内发育铀矿化和铅锌矿化,其中铀矿化主要分布于矿田的西部和北部,铅锌矿化发育于矿田西部牛头山深部,位于铀矿体之下(吴志坚和胡志华,2014;图2).

2 牛头山铅锌矿化体地质特征

牛头山铅锌矿化体位于河元背铀矿床的西南部.矿化区内火山岩地层出露简单,以早白垩世打鼓顶组流纹英安岩和鹅湖岭组碎斑熔岩为主.断裂构造发育,其中北北东向的河元背一小段断裂控制着铅锌矿化体的产出.矿化体主要以细脉状分布于断裂两侧的流纹英安岩及碎斑熔岩中,总体产状大致与河元背一小段断裂平行(图2).在铅锌矿化体周围发育有绢云母化、碳酸盐化及硅化等蚀变,与围岩界线明显.

3 矿石结构构造特征

对所采集的样品(见后述)磨制的探针片,进行

了显微镜观察和不同矿物的电子探针鉴定.构成铅锌矿化体的金属硫化物矿物主要包括黄铁矿、闪锌矿、方铅矿、黄铜矿等;脉石矿物主要为石英、方解石及菱铁矿等.矿石构造主要为细脉状构造和块状构造等(图3a~3c);矿石结构有自形一半自形粒状结构(图3e, 3i)和“固溶体”出溶结构(图3d).本研究在手标本中未发现不同硫化物之间明显的穿插关系,但据矿石光片反射光显微镜观察发现,各金属硫化物矿物之间具有一定的充填或包裹关系.黄铁矿为自形一半自形粒状结构(图3i),被闪锌矿、方铅矿充填穿插(图3g, 3h);闪锌矿以中细粒为主,与方铅矿紧密共生(图3f),闪锌矿中可见以星散乳滴状分布的黄铜矿,构成“固溶体”出溶结构,说明闪锌矿与乳滴状黄铜矿同时形成(图3d);方铅矿多为他形粒状结构,充填穿插黄铁矿(图3h).黄铜矿分布不均匀,局部富集程度较高,以两种产出方式存在:第一种为乳滴状分布在闪锌矿中的固溶体出溶物,粒径较小(3d);第二种为细脉状,充填穿插闪锌矿(图3d, 3e)或包裹方铅矿(图3i).

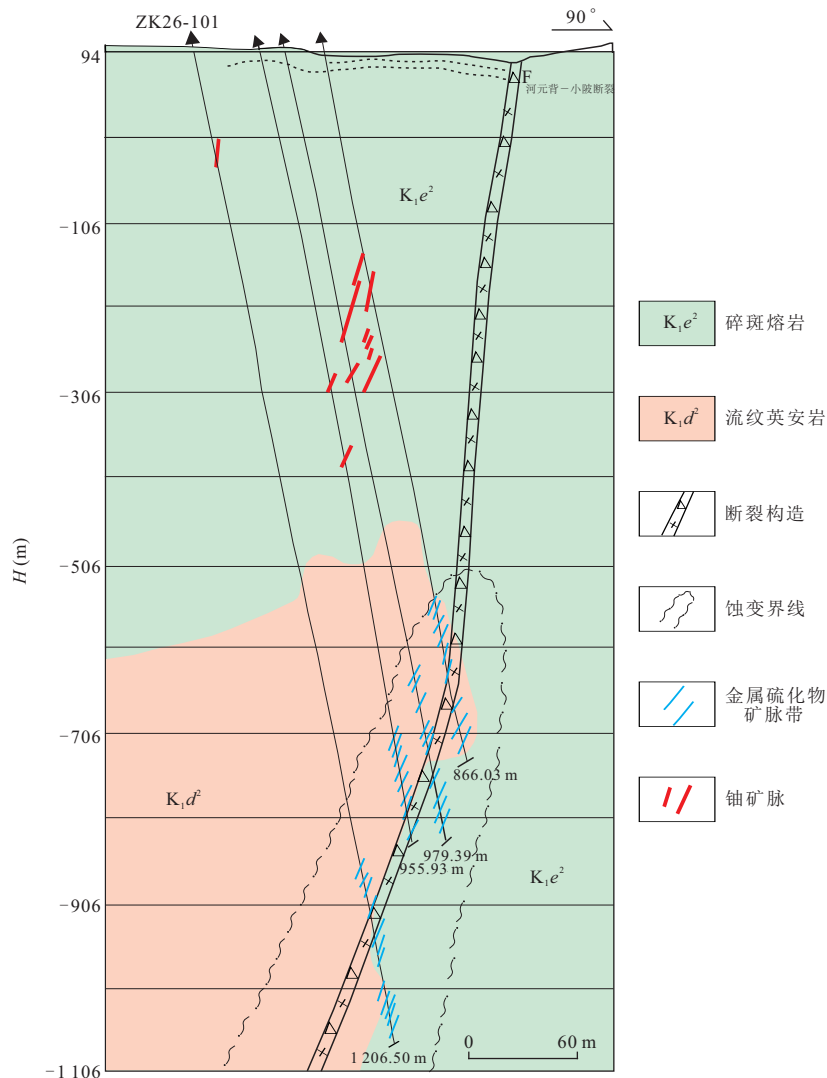


图2 牛头山26线矿体剖面图(据吴志坚和胡志华,2014修改)

Fig. 2 Cross-section of ore body found in exploration line No.26 in Niutoushan Pb-Zn mineralization

根据光片显微镜观察到的矿物组合特征及矿物间充填或包裹关系,得到牛头山铅锌矿化体硫化物形成的先后顺序是:黄铁矿最先形成,闪锌矿(乳滴状黄铜矿)与方铅矿同时形成,细脉状黄铜矿最晚形成。

4 样品采集和实验方法

本次研究在牛头山铅锌矿化体的不同深度(地表以下-1045~-1080 m)共采集金属硫化物样品6件,具体采样钻孔号及位置见表1。将采集的样品磨片制成探针片,在显微镜和电子探针下鉴定不同硫化物(在南京大学内生金属成矿机制研究国家重点实验室完成),根据各硫化物间的充填或包裹关系划分矿物形成先后顺序(见上节)。在此基础上,

采用激光剥蚀-多接收电感耦合等离子质谱(LA-MC-ICP-MS)方法对光片中不同的金属硫化物(闪锌矿、黄铁矿、方铅矿、黄铜矿)进行微区原位硫同位素测定。测试在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室完成,其激光剥蚀系统为Resolution S-155,MC-ICP-MS为Nu Plasma II,激光剥蚀过程中采用氦气作载气、氩气为补偿气以调节灵敏度,两者在进入ICP之前通过一个T型接头混合,激光的波长193 nm、束斑大小33 μm 、脉冲频率10 Hz、能量密度3~5 mJ/cm^2 ,测试过程中首先进行30 s空白采集,然后进行样品连续40 s剥蚀采集。采用标样-样品交叉法进行样品 $\delta^{34}\text{S}$ 值测定和校正,采用的标样为美国地调局标准样品NBS-127闪锌矿和实验室内部黄铁矿标样WS-1,分析精度为 $\pm 0.5\%$ 。具体分析及测试流程见Liu *et al.*(2018)。

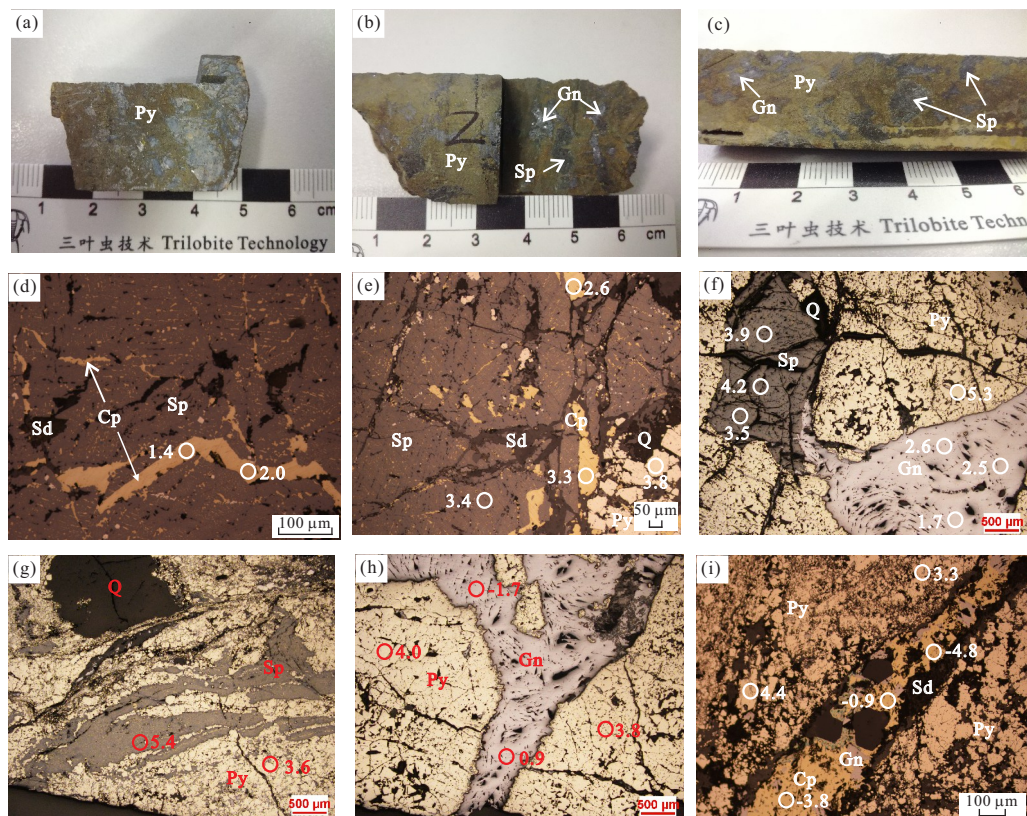


图 3 牛头山铅锌矿化体中主要金属硫化物的分布和结构关系(手标本 a-c、显微镜照片 d-i)

Fig.3 Distribution and structure of sulfide minerals from the Niutoushan Pb-Zn mineralization

图中圆圈代表原位硫同位素测点位置;a. 黄铁矿;b. 块状矿石;c. 块状矿石;d. 乳滴状黄铜矿与闪锌矿呈“固溶体”出溶结构;e. 细脉状黄铜矿充填闪锌矿解理面中;f. 方铅矿与闪锌矿紧密共生;;g. 闪锌矿交代黄铁矿;h. 方铅矿充填交代黄铁矿;i. 黄铜矿包裹方铅矿;Py. 黄铁矿;Gn. 方铅矿;Sp. 闪锌矿;Cp. 黄铜矿;Apy. 毒砂;Sd. 菱铁矿;Q. 石英.

5 硫同位素组成特征

本文共分析了 6 件牛头山铅锌矿化体样品中的金属硫化物(黄铁矿、黄铜矿、闪锌矿、方铅矿)的硫同位素组成,分析结果列于表 1 中.

牛头山铅锌矿化体中金属硫化物(黄铁矿、方铅矿、闪锌矿、细脉状黄铜矿)的硫同位素组成变化范围较大(图 5). 这些金属硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 值分布于 $-4.8\text{‰} \sim +5.4\text{‰}$ 之间,峰值为 $+3.0\text{‰} \sim +5.0\text{‰}$. 其中黄铁矿 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 $+3.3\text{‰} \sim +5.3\text{‰}$,均值为 $+3.9\text{‰}$ ($n=16$);闪锌矿 $\delta^{34}\text{S}$ 值在 $+3.5\text{‰} \sim +5.4\text{‰}$ 之间,均值为 $+3.9\text{‰}$ ($n=8$);方铅矿 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 $-1.7\text{‰} \sim +2.6\text{‰}$,均值为 $+0.8\text{‰}$ ($n=7$);乳滴状黄铜矿由于粒径太小,未能测试;细脉状黄铜矿 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 $-4.8\text{‰} \sim +3.3\text{‰}$,均值为 $+0.2\text{‰}$ ($n=8$) (表 1).

6 讨论

6.1 总硫同位素组成

前人利用单矿物颗粒粉末法测得牛头山铅锌矿化体金属硫化物矿物 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 $+2\text{‰} \sim +6\text{‰}$,变化范围较小,均为正值(王健等,2016;刘军港等,2017). 本文采用微区原位测试方法获得的金属硫化物 $\delta^{34}\text{S}$ 值变化于 $-4.8\text{‰} \sim +5.4\text{‰}$ 之间,与单矿物颗粒粉末法测定值相比,具有更宽的变化范围. 由于激光微区原位测试法能更有效地对单个硫化物矿物 ^{34}S 值进行测定,可避免粉末法存在不同硫化物之间相互掺杂混合而得到硫同位素混合值的可能性,因而能更准确地获得硫化物矿物的 ^{34}S 值,从而更有效地示踪成矿物质硫的来源.

硫同位素组成对成矿流体的演化及硫的来源具有良好的判别意义,当矿床共生矿物组合简单,且未发现硫酸盐时,可以判断成矿热液中 S 元素主要以 S^{2-} 和 HS^- 形式存在 (Ohmoto, 1972; Ohmoto

表 1 牛头山铅锌矿化体金属硫化物硫同位素组成(‰)

Table 1 The sulfur isotope compositions of sulfide minerals from the Pb-Zn mineralization (‰)

| 序号 | 样品编号 | 采样位置(m) | 样品类型 | 测试矿物 | $\delta^{34}\text{S}(\text{‰})$ |
|----|-----------------|---------|-------|--------|---------------------------------|
| 1 | ZK26-101-2-1 | -1 045 | 细脉状矿石 | 黄铁矿 | +5.3 |
| 2 | ZK26-101-2-1 | -1 045 | 细脉状矿石 | 闪锌矿 | +3.5 |
| 3 | ZK26-101-2-2 | -1 045 | 细脉状矿石 | 方铅矿 | -0.2 |
| 4 | ZK26-101-2-4 | -1 045 | 细脉状矿石 | 黄铁矿 | +3.6 |
| 5 | ZK26-101-2-5 | -1 045 | 细脉状矿石 | 闪锌矿 | +3.8 |
| 6 | ZK26-101-2-5 | -1 045 | 细脉状矿石 | 方铅矿 | +1.7 |
| 7 | ZK26-101-4-1 | -1 051 | 细脉状矿石 | 黄铁矿 | +4.0 |
| 8 | ZK26-101-4-1 | -1 051 | 细脉状矿石 | 方铅矿 | -1.7 |
| 9 | ZK26-101-4-2 | -1 051 | 细脉状矿石 | 黄铁矿 | +5.3 |
| 10 | ZK26-101-4-3 | -1 051 | 细脉状矿石 | 黄铁矿 | +4.5 |
| 11 | ZK26-101-4-4 | -1 051 | 细脉状矿石 | 闪锌矿 | +4.0 |
| 12 | ZK26-101-12-1-A | -1 074 | 块状矿石 | 黄铁矿 | +4.0 |
| 13 | ZK26-101-12-1-B | -1 074 | 块状矿石 | 黄铁矿 | +3.7 |
| 14 | ZK26-101-12-2 | -1 074 | 块状矿石 | 黄铁矿 | +3.9 |
| 15 | ZK26-101-12-3 | -1 074 | 块状矿石 | 黄铁矿 | +4.0 |
| 17 | ZK26-101-12-5 | -1 074 | 块状矿石 | 黄铁矿 | +3.8 |
| 18 | ZK26-101-14-1 | -1 077 | 块状矿石 | 方铅矿 | +3.9 |
| 19 | ZK26-101-14-1 | -1 077 | 块状矿石 | 细脉状黄铜矿 | -4.8 |
| 20 | ZK26-101-14-2 | -1 077 | 块状矿石 | 闪锌矿 | +3.9 |
| 21 | ZK26-101-14-2 | -1 077 | 块状矿石 | 方铅矿 | +2.6 |
| 22 | ZK26-101-14-2 | -1 077 | 块状矿石 | 细脉状黄铜矿 | -0.9 |
| 23 | ZK26-101-14-2 | -1 077 | 块状矿石 | 闪锌矿 | +5.4 |
| 24 | ZK26-101-14-3 | -1 077 | 块状矿石 | 黄铁矿 | +3.3 |
| 25 | ZK26-101-14-3 | -1 077 | 块状矿石 | 细脉状黄铜矿 | -3.8 |
| 26 | ZK26-101-14-4 | -1 077 | 块状矿石 | 细脉状黄铜矿 | +1.9 |
| 27 | ZK26-101-14-4 | -1 077 | 块状矿石 | 闪锌矿 | +3.5 |
| 28 | ZK26-101-14-4 | -1 077 | 块状矿石 | 方铅矿 | +2.5 |
| 29 | ZK26-101-15-1 | -1 078 | 块状矿石 | 黄铁矿 | +3.6 |
| 30 | ZK26-101-15-2 | -1 078 | 块状矿石 | 黄铁矿 | +3.7 |
| 31 | ZK26-101-15-2 | -1 078 | 块状矿石 | 方铅矿 | +0.1 |
| 32 | ZK26-101-15-3 | -1 078 | 块状矿石 | 闪锌矿 | +3.4 |
| 33 | ZK26-101-15-3 | -1 078 | 块状矿石 | 细脉状黄铜矿 | +1.4 |
| 34 | ZK26-101-15-4 | -1 078 | 块状矿石 | 闪锌矿 | +3.7 |
| 35 | ZK26-101-15-4 | -1 078 | 块状矿石 | 细脉状黄铜矿 | +2.6 |
| 36 | ZK26-101-15-5 | -1 078 | 块状矿石 | 黄铁矿 | +3.6 |
| 37 | ZK26-101-17-1 | -1 080 | 块状矿石 | 黄铁矿 | +4.4 |
| 38 | ZK26-101-17-2 | -1 080 | 块状矿石 | 细脉状黄铜矿 | +2.0 |
| 39 | ZK26-101-17-3 | -1 080 | 块状矿石 | 方铅矿 | +0.9 |
| 40 | ZK26-101-17-3 | -1 080 | 块状矿石 | 闪锌矿 | +4.2 |
| 41 | ZK26-101-17-4 | -1 080 | 块状矿石 | 细脉状黄铜矿 | +3.3 |

and Rye, 1979; Ohmoto and Goldhaber, 1997). 通过手标本和光薄片显微镜及电子显微镜等综合鉴定,牛头山铅锌矿化体中金属硫化物主要包括闪锌矿、乳滴状黄铜矿、细脉状黄铜矿、黄铁矿、方铅矿等矿物,矿物组合比较简单,在矿化体及火山岩地

层中未发现有石膏及重晶石等硫酸盐存在,说明其成矿热液中硫主要以 S^{2-} 和 HS^- 为主. 本文样品数据显示,硫化物矿物的硫同位素值大小关系为: $\delta^{34}\text{S}_{\text{黄铁矿}} \approx \delta^{34}\text{S}_{\text{闪锌矿}} > \delta^{34}\text{S}_{\text{方铅矿}} > \delta^{34}\text{S}_{\text{细脉状黄铜矿}}$ (图 5), 与 Donald *et al.* (1969) 热力学平衡分馏原理实验得到

的共生硫化物 $\delta^{34}\text{S}$ 值变化顺序 $\delta^{34}\text{S}_{\text{黄铁矿}} > \delta^{34}\text{S}_{\text{闪锌矿}} > \delta^{34}\text{S}_{\text{方铅矿}}$ 不完全一致,意味着牛头山铅锌矿化体的硫化物矿物之间硫同位素分馏未达到完全平衡. 前述镜下观察发现,部分硫化物之间存在充填穿插和包裹关系,说明这些硫化物并不是完全同时形成的,而是有先后形成关系. 例如,牛头山铅锌矿化体中金属硫化物矿物组合中黄铁矿、闪锌矿、方铅矿和细脉状黄铜矿在宏观整体而言虽为共生矿物,相互形成时间差可能不大,但是,从微观尺度而言,它们之间形成在时间上还是有一定差别的:黄铁矿生成稍早于闪锌矿和方铅矿,后两者密切共生,细脉状黄铜矿形成稍晚(图3). 这种微观尺度揭示的矿物形成时间上的差异造成了黄铁矿与闪锌矿和方铅矿之间硫同位素分馏存在不平衡. 可见,该铅锌矿化体金属硫化物 $\delta^{34}\text{S}$ 平均值不能近似代表矿化流体的 $\delta^{34}\text{S}_{\text{SS}}$ (总硫同位素组成)值. 前已叙及,黄铁矿最早从矿化流体中沉淀出来,利用黄铁矿 $\delta^{34}\text{S}$ 值和它沉淀时温度以及此温度下黄铁矿与流体之间的分馏系数可以较准确地计算出初始成矿流体的 $\delta^{34}\text{S}_{\text{SS}}$ 值. 由于黄铁矿沉淀温度无法获得,而黄铁矿与闪锌矿、方铅矿均形成于同一矿化阶段,相对较早的黄铁矿的沉淀温度应该仅稍高于闪锌矿和方铅矿沉淀温度,因而,可以利用黄铁矿 $\delta^{34}\text{S}$ 平均值及闪锌矿和方铅矿沉淀时的最高温度(见下文)获取矿化流体 $\delta^{34}\text{S}_{\text{SS}}$ 的近似值. 根据公式 $1000 \ln \alpha_{\text{py-H}_2\text{S}} = \frac{40000}{T^2}$ (T 为摄氏温度, $200 \sim 700 \text{ }^\circ\text{C}$), $\alpha_{\text{py-H}_2\text{S}} = 1.00043$, Ohmoto and Rye, 1979; Seal *et al.*, 2006) 计算得到矿化流体 $\delta^{34}\text{S}_{\text{SS}}$ 近似值为 $+3.7\text{‰}$. 此外,在同一个样品中,闪锌矿与方铅矿硫同位素分馏达到了平衡. Pinckney and Rafter (1972) 提出:在一定温度范围内,若从成矿流体中同时沉淀出两个共生含硫热液矿物之间及其与剩余成矿流体之间均处于硫同位素分馏的平衡状态,那么这两个共生硫化物矿物在 $1000 \ln \alpha_{\text{A-B}}$ 与 $\delta^{34}\text{S}_{\text{A}}$ 或 $\delta^{34}\text{S}_{\text{B}}$ 关系图上应分别构成一条直线,该直线在 $\delta^{34}\text{S}$ 轴上的截距即为沉淀出这两个共生硫化物矿物的成矿流体的 $\delta^{34}\text{S}_{\text{SS}}$ 值,其中 $1000 \ln \alpha_{\text{A-B}} \approx \delta^{34}\text{S}_{\text{A}} - \delta^{34}\text{S}_{\text{B}}$. 据此,本文利用共生矿物对(闪锌矿-方铅矿) Pinckney 法,得到该铅锌矿化体中闪锌矿和方铅矿沉淀时矿化流体的 $\delta^{34}\text{S}_{\text{SS}}$ 值大约为 $+3.2\text{‰}$ (图4),与利用黄铁矿 $\delta^{34}\text{S}$ 值计算获得的矿化流体 $\delta^{34}\text{S}_{\text{SS}}$ 近似值 ($+3.7\text{‰}$) 接近,表明该铅锌矿化体矿化流体 $\delta^{34}\text{S}_{\text{SS}}$ 值大约为 $+3.7\text{‰}$.

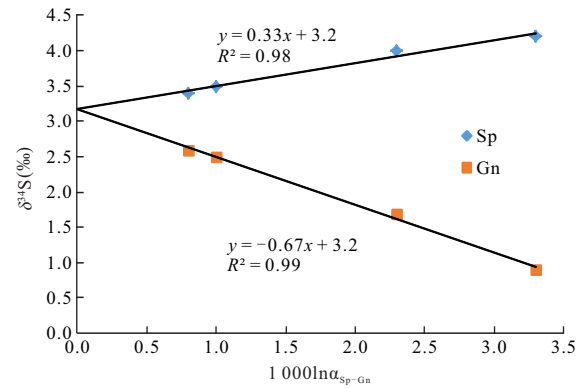


图4 牛头山铅锌矿化体 $\delta^{34}\text{S}_{\text{SS}}$ Pinckney 法图解

Fig.4 The Pinckney method of $\delta^{34}\text{S}_{\text{SS}}$ from the Niutoushan Pb-Zn mineralization

Sp, 闪锌矿, Gn, 方铅矿

6.2 硫同位素矿化温度

地质体中共生矿物对之间的同位素平衡分馏大小与温度的平方成反比,在已有前人确立了共生矿物对之间同位素平衡分馏方程的条件下,可根据达到平衡的共生矿物对之间的同位素分馏值计算矿物的形成温度(Ohmoto and Goldhaber, 1997; Seal *et al.*, 2006). 如前所述,牛头山铅锌矿化体样品中闪锌矿与方铅矿同时形成,并且 $\delta^{34}\text{S}_{\text{闪锌矿}} > \delta^{34}\text{S}_{\text{方铅矿}}$,说明闪锌矿与方铅矿之间硫同位素达到平衡分馏状态. 所以,从闪锌矿-方铅矿之间硫同位素平衡分馏方程,可得: $T(^{\circ}\text{C}) = \sqrt{\frac{0.73 \times 10^6}{\Delta\text{Sp} - \text{Gn}}}$ - 273.15 (T 为摄氏温度; Seal *et al.*, 2006), 利用本文测得的闪锌矿-方铅矿矿物对的 $\delta^{34}\text{S}_{\text{闪锌矿}}$ 和 $\delta^{34}\text{S}_{\text{方铅矿}}$ 值,计算得出矿化温度为 $197 \sim 476 \text{ }^\circ\text{C}$ (表2). 该温度范围整体上稍高于杨庆坤等(2017)测得牛头山铅锌矿化体中石英及方解石流体包裹体均一温度范围 ($120 \sim 430 \text{ }^\circ\text{C}$). 考虑到流体包裹体均一温度指示成矿流体温度的下限,与其被捕获时的流体温度之间存在一定差值(张文准和陈紫英, 1993). 因此,闪锌矿-方铅矿硫同位素热力学平衡温度基本反映了该研究区铅锌矿化体的矿化温度,而较早形成的黄铁矿的温度可能更稍高些(见前述). 总之,该研究区铅锌矿化体矿化流体为中高温.

6.3 硫的来源

Ohmoto and Rye (1979) 提出由上地幔或者地壳物质部分熔融产生的酸性岩浆熔体的 $\delta^{34}\text{S}$ 值大致为 $-3\text{‰} \sim +3\text{‰}$, 而从酸性岩浆熔体中分离出来的热液的 $\delta^{34}\text{S}$ 值在 $-3\text{‰} \sim +7\text{‰}$ 之间. 牛头山铅锌矿

表 2 牛头山铅锌矿化体硫同位素地质温度

Table 2 Sulfur isotope geo-thermometer of sulfide from the Niutoushan Pb-Zn mineralization

| 样品编号 | 岩性 | Sp (‰) | Gn (‰) | Δ Sp- Gn | 平衡温度 (°C) |
|----------------|-------|-----------|-----------|--------------------|--------------|
| ZK26-101-2-5 | 细脉状矿石 | 3.8 | 1.7 | 2.1 | 316 |
| ZK-26-101-14-2 | 块状矿石 | 3.9 | 2.6 | 1.3 | 476 |
| ZK-26-101-14-2 | 块状矿石 | 5.4 | 2.5 | 2.9 | 229 |
| ZK-26-101-17-3 | 块状矿石 | 4.2 | 0.9 | 3.3 | 197 |

化体中矿化流体 $\delta^{34}\text{S}_{\text{SS}}$ 大约为 $+3.7\text{‰}$, 主要落在上述变化区间, 暗示牛头山铅锌矿化体中金属硫化物的硫的来源与岩浆热液有关。

牛头山铅锌矿化体矿化年龄为 $121 \pm 8 \text{ Ma}$ (闪锌矿 Rb-Sr 定年, 与刘军港交流), 与围岩碎斑熔岩和流纹英安岩 (130~140 Ma, 杨水源等, 2010) 存在 10 Ma 左右的时差。近几年钻孔揭露, 矿田西部地区深部存在次火山岩相脉状花岗斑岩穿插打鼓顶组流纹英安岩及鹅湖岭组碎斑熔岩 (王勇剑, 2015), 其形成时代可能与矿田西北部的次火山岩相脉状花岗斑岩 ($125.4 \pm 1 \text{ Ma}$) 基本同期。综上可以得出牛头山铅锌矿化体的形成时代与次火山岩相脉状花岗斑岩相近。目前虽然尚没有花岗斑岩的硫同位素资料, 但根据前人 Sr-Nd 同位素组成得出次火山岩相花岗斑岩与碎斑熔岩是同源的 (范洪海等, 2001; Yang *et al.*, 2011), 而碎斑熔岩硫同位素组成成为 $+1.9\text{‰} \sim +4.1\text{‰}$, 形成牛头山铅锌矿化体的矿化流体的 $\delta^{34}\text{S}_{\text{SS}}$ 值 ($+3.7\text{‰}$) 与之基本一致, 由此可以推断, 牛头山铅锌矿化体的硫很可能来自次火山岩相花岗斑岩岩浆热液。

6.4 与北武夷地区矿床对比研究

在区域上, 相山火山盆地东南侧北武夷山地区在中生代发育一系列 NNE 走向断陷火山盆地 (天华山、黄岗山、梨子坑等)。盆地内发育与相山火山盆地相似的火山岩地层, 分别为打鼓顶组和鹅湖岭组, 这些盆地发育众多与晚中生代岩浆活动有关的中一大型铅锌矿床 (罗平等, 2009; 毛景文等, 2011; 张家箐等, 2012; 徐庆胜等, 2014; Hu *et al.*, 2017), 代表性铅锌矿床有黄岗山盆地的生米坑铅锌矿床、梨子坑盆地的蔡家坪铅锌矿等。本文对这些火山盆地 (包括相山火山盆地) 内的铅锌矿床 (矿化体) 的成矿时代、与成矿相关的岩石基本特征、成矿温度及成矿物质来源进行对比如表 3 所示。燕山早期, 古太平洋板块向欧亚板块俯冲, 燕山中期晚阶段 (早

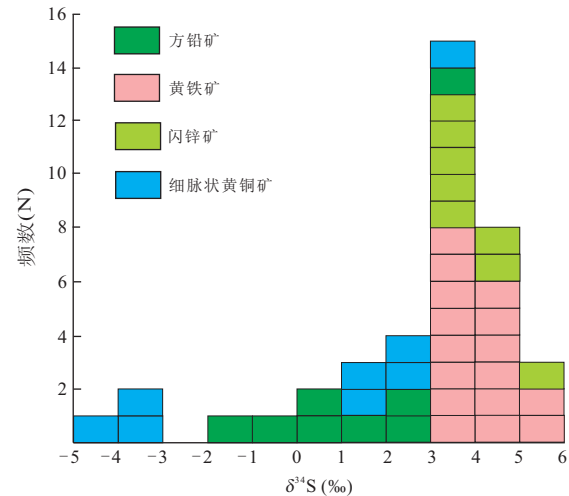


图 5 牛头山铅锌矿化体硫同位素组成直方图

Fig.5 Histogram of the $\delta^{34}\text{S}$ values of sulfide minerals from the Niutoushan Pb-Zn mineralization

白垩世), 相山及北武夷山地区在拉张构造背景下, 玄武岩浆底侵, 导致地壳物质部分熔融, 中酸性—酸性岩浆上涌形成赋矿岩体 (毛景文等, 2004)。所以, 相山火山盆地铅锌矿化体与北武夷黄岗山及梨子坑矿区铅锌矿表现出相似的成矿特征, 均以中酸性—酸性岩浆的超浅成—喷出相岩为围岩。相山火山盆地牛头山铅锌矿化温度与北武夷地区火山盆地内铅锌矿床成矿温度基本一致, 为中高温。相山火山盆地内铅锌矿化体的矿石矿物的硫同位素组成特征与武夷多金属成矿带中火山盆地内的铅锌矿床的相似 (表 3), 暗示相山铅锌矿化体的成矿物质来源与武夷成矿带中的铅锌矿床类似, 也来自岩浆热液。因此, 综合对比分析可知, 相山西部牛头山深部的铅锌矿化, 现虽仅有零星发现, 但与相邻北武夷地区具有相同的区域地质背景, 相近的成岩成矿条件及相似的成矿物质来源, 暗示相山火山盆地可能具有类似于黄岗山及梨子坑等火山盆地所表现出的良好的铅锌矿化找矿前景。

7 总结和结论

(1) 通过对显微镜下矿物结构关系观察, 发现相山铀矿田西部牛头山多金属矿化体的金属硫化物形成存在一定的先后顺序: 黄铁矿形成最早, 闪锌矿和方铅矿近乎同时形成, 细脉状黄铜矿形成最晚。

(2) 硫同位素研究结果表明, 相山牛头山铅锌矿化体中金属硫化物的硫主要来自次火山岩相花

表3 牛头山、生米坑及蔡家坪铅锌矿床基本特征

Table 3 Typical characteristics of Niutoushan, Lengshuikeng and shengminkeng Pb-Zn deposits

| 矿床 | 牛头山 | 生米坑 | 蔡家坪 |
|--------------|-----------------------|------------|------------|
| 岩性 | 流纹英安岩 | 粗面斑岩 | 流纹斑岩 |
| 岩石类型 | S型 | | |
| 稀土模式 | 轻重稀土分异明显,轻稀土富集, Eu负异常 | | |
| 成岩年龄 | 135 Ma | 138 Ma | 137 Ma |
| 成矿年龄 | 121 Ma | 135 Ma | 135 Ma |
| 成矿温度 | 197~476 °C | 302~558 °C | 292~490 °C |
| 成矿物质来源(S同位素) | 岩浆热液 | 岩浆热液 | 岩浆热液 |

注:牛头山成岩成矿数据引自:杨水源等(2010);成矿年龄数据与刘军港讨论获得;生米坑数据引自:罗平等(2009),张家箐等(2012);蔡家坪数据引自:代堰铭等(2011),徐庆胜等(2014).

岗斑岩岩浆热液.

(3)根据共生矿物对闪锌矿—方铅矿硫同位素温度计计算得出的牛头山铅锌矿化体形成温度为197~476 °C,为中高温.

(4)通过对成岩成矿基本特征、成矿物质来源及区域地质背景对比,认为相山火山盆地具有与北武夷地区黄岗山、梨子坑火山盆地相似的成矿条件,相山火山盆地可能也具有较好的铅锌矿找矿背景.

致谢:野外工作得到了江西省核工业261大队的大力帮助,硫同位素实验测定得到了中国地质大学(武汉)李前师兄的帮助,在论文写作过程中还得到了李坤师兄和魏文芳的热情帮助,在此一并表示衷心的感谢.

References

Chen, Z. L., Wang, Y., Zhou, Y. G., et al., 2013. SHIMPR U-Pb Dating of Zircons from Volcanic-Intrusive Complexes in the Xiangshan Uranium Ore Field, Jiangxi Province, and Its Geological Implications. *Geology in China*, 40(1): 217—231 (in Chinese with English abstract).

Donald, J. B., 1969. Bond Strength and Sulfur Isotopic Fractionation in Coexisting Sulfides: A Reply. *Economic Geology*, 64(8): 56—65. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.64.8.936>

Dai, Y. P., Yu, X. Q., Wu, G. G., et al., 2011. Characteristics of Sulfide Minerals, Genetic Type and Metallogenic Epoch of the Caijiaping Lead-Zinc Deposit, North Wuyi Area, Jiangxi Province. *Earth Science Frontiers*, 18(2): 321—338(in Chinese with English abstract).

Fan, H. H., Ling, H. F., Shen, W. Z., et al., 2001. Nd-Sr-Pb Isotope Geochemistry of the Volcanic-Intrusive Complex at Xiangshan, Jiangxi Province. *Acta Petrologica*

Sinica, 17(3): 395—402(in Chinese with English abstract).

Hu, R. Z., Chen, W. T., Xu, D. R., et al., 2017. Reviews and New Metallogenic Models of Mineral Deposits in South China: An Introduction. *Journal of Asian Earth Sciences*, 137: 1—8.

Luo, P., Wu, G. G., Zhang, D., et al., 2009. Geochemistry and Genesis of Shengminkeng Lead-Zinc Deposit in Northern Wuyi, Eastern China. *Journal of Geomechanics*, 15(4):349—362(in Chinese with English abstract).

Liu, J. G., Li, Z. Y., Nie, J. T., 2017. The sulfur Isotope Geochemical Characteristics and Its Geological Implications of Lead-Zinc Polymetallic Mineralization in Xiangshan Ore Field, Jiangxi Province. *Geological Review*, 63 (Suppl.):237—238(in Chinese with English abstract).

Liu, G. Q., Zhao, K. D., Jiang, S. Y., et al., 2018. In-Situ Sulfur Isotope and Trace Element Analysis of Pyrite from the Xiwang Uranium Ore Deposit in South China: Implication for Ore Genesis. *Journal of Geochemical Exploration*, 195: 49—65.

Mao, J. W., Xie, G. Q., Li, X. F., et al., 2004. Mesozoic large scale mineralization and multiple lithospheric extensions in South China. *Earth Science Frontiers*, 11(1): 45—55(in Chinese with English abstract).

Mao, J. W., Chen, M. H., Yuan, S. D., et al., 2011. Geological Characteristics of the Qinhang (or Shihang) South China and Spatial-Temporal Distribution Metallogenic Belt in Regularity of Mineral Deposits. *Acta Geologica Sinica*, 85(5): 636—658(in Chinese with English abstract).

Ohmoto, H., 1972. Systematics of Sulfur and Carbon Isotopes in Hydrothermal Ore Deposits. *Economic Geology*, 67(5): 551—578. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.67.5.551>

Ohmoto, H., Rye, R. O., 1979. Isotope of Sulfur and Car-

- bon. In: Barnes, H.L., ed., *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits*. John Wiley and Sons, New York, 509—567.
- Ohmoto, H., Goldhaber, M. B., 1997. Sulfur and Carbon Isotopes. In: Barnes, H.L., ed., *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits*, Third Edition. John Wiley and Sons, New York, 509—567.
- Pinckney, D. M., Rafter, T. A., 1972. Fractionation of Sulfur Isotopes during Ore Deposition in the Upper Mississippi Valley Zinc - Lead District. *Economic Geology*, 67(3): 315 - 328. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.67.3.315>
- Seal, R. R., 2006. Sulfur Isotope Geochemistry of Sulfide Minerals. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 61 (1): 633 - 677. <https://doi.org/10.2138/rmg.2006.61.12>
- Wu, Z. J., Hu, Z. H., 2014. Uranium-Polymetallic Metallogenic Characteristics and Prospecting Direction of Niutoushan Uranium Deposit in Xiangshan Ore-Field. *World Nuclear Geoscience*, 31(2):89—94(in Chinese with English abstract).
- Wu, R. G., 1999. The Features of Volcanic Formation in Ruyiting Profile of Xiangshan. *Journal of East China Geological Institute*, 22(3): 201—208 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Y. J., 2015. Characteristics of Granite Porphyry and Intermediate-Basic Dykes and Their Relationship with Uranium Mineralization in the Xiangshan(Dissertation). *Beijing Research Institute of Uranium Geology, Beijing (in Chinese with English abstract)*.
- Wang, J., Nie, J. T., Guo, J., et al., 2016. Characteristics of Deep Polymetallic Mineralization in the Xiangshan Uranium Ore Field of Jiangxi Province. *Geology and Exploration*, 52(1): 47—59 (in Chinese with English abstract).
- Xia, L. Q., Xia, Z. C., Zhang, C., et al., 1992. Differentiation Mechanism and Evolution of High Level Magma Reservoir from Xiangshan, China. *Acta Petrologica Sinica*, 8 (3): 205—221(in Chinese with English abstract).
- Xie, G. F., Yao, Y. J., Hu, Z. H., et al., 2014. Distribution Feature of Uranium Deposit in the West of Xiangshan Volcanic Basin. *Uranium Geology*, 6:328—334 (in Chinese with English abstract).
- Xu, Q. S., Wei, Y. W., Huang, A. J., et al., 2014. Geochemical Features, Zircon U-Pb Ages and Relationship to Pb-Zn Mineralization of the Subvolcanic Rocks in Lizikeng Volcanic Basin, Shangrao, Jiangxi. *Geological Review*, 60(4):933—944(in Chinese with English abstract).
- Yang, S. Y., Jiang, S. Y., Jiang, Y. H., et al., 2010. Zircon U-Pb Geochronology, Hf Isotopic Composition and Geological Implications of the Rhyodacite and Rhyodacitic Porphyry in the Xiangshan Uranium Ore Field, Jiangxi Province, China. *Science China Earth Sciences*, 53 (10): 1411—1426(in Chinese with English abstract).
- Yang, S. Y., Jiang, S. Y., Jiang, Y. H., et al., 2011. Geochemical, Zircon U-Pb Dating and Sr-Nd-Hf Isotopic Constraints on the Age and Petrogenesis of an Early Cretaceous Volcanic - Intrusive Complex at Xiangshan, Southeast China. *Mineralogy and Petrology*, 101(1/2): 21 - 48(in Chinese with English abstract).
- Yang, S. Y., Jiang, S. Y., Zhao, K. D., et al., 2012. Zircon U-Pb Geochronology, Geochemistry and Sr-Nd-Hf Isotopic Compositions of the Rhyolite Porphyry from the Zhoujiashan Deposit in Xiangshan Uranium Ore Field, Jiangxi Province, SE China. *Acta Petrologica Sinica*, 28(12): 3915—3928(in Chinese with English abstract).
- Yang, Q. K., Huang, Q. T., Sun, Q. Z., 2015. Geological Characteristics of Sulfur and Lead Isotope in the Xiangshan Ore Field. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 34(4): 756—762 (in Chinese with English abstract).
- Yang, Q. K., Huang, Q. T., Luo, Y., H., et al., 2017. The Characteristics of Metallogenic Fluid Evolution of Lead-Zinc Polymetallic in Xiangshan Ore Field, Jiangxi Province. *Science Technology and Engineering*, 17(2): 1671—1815 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, W.H., Chen, Z.Y., 1993. Fluid Inclusions. China University of Geosciences Press, Wuhan, 24—126(in Chinese with English abstract).
- Zhou, X. M., Li, W. X., 2000. Origin of Late Mesozoic Igneous Rocks in Southeastern China: Implications for Lithosphere Subduction and Underplating of Mafic Magmas. *Tectonophysics*, 326(3/4): 269—287. [https://doi.org/10.1016/s0040-1951\(00\)00120-7](https://doi.org/10.1016/s0040-1951(00)00120-7)
- Zhang, J. Q., Wang, D. H., Liu, S. B., et al., 2012. Geochronology and Isotopic Compositions of the Huangbi Lead-Zinc Deposits, Jiangxi, China. *Acta Petrologica Sinica*, 28(10): 3325—3333(in Chinese with English abstract).
- Zhang, W. L., Zou, M. Q., 2014. Analysis on Uranium - Polymetallic Mineralization Conditions of Xiangshan Ore Field. *Uranium Geology*, 30(3): 172—179(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈正乐,王永,周永贵,等,2013. 江西相山火山侵入杂岩体锆石 SHRIMP 定年及其地质意义. *中国地质*, 40(1): 217—231.
- 代堰镔,余心起,吴淦国,等,2011. 北武夷蔡家坪铅锌矿床硫化物特征、矿床成因类型及成矿时代. *地学前缘*, 18

- (2):321-338.
- 范洪海,凌洪飞,沈渭洲,等,2001.相山火山—侵入杂岩Nd-Sr-Pb同位素地球化学特征.岩石学报,17(3):395-402.
- 罗平,吴淦国,张达,等,2009.北武夷生米坑铅锌矿床地质地球化学特征与成因探讨.地质力学学报,15(4):349-362.
- 刘军港,李子颖,聂江涛,2017.相山深部铅锌多金属矿化S同位素特征及其地质意义.地质论评,63(增刊):237-238.
- 毛景文,谢桂青,李晓峰,等,2004.华南地区中生代大规模成矿作用与岩石圈多阶段伸展.地学前缘,11(1):45-55.
- 毛景文,谢桂青,袁顺达,等,2011.华南地区钦杭成矿带地质特征和矿床时空分布规律.地质学报,85(5):636-658.
- 吴仁贵,1999.相山地区如意亭剖面火山建造特征.华东地质学院学报,22(3):201-208.
- 吴志坚,胡志华,2014.相山矿田牛头山铀矿床铀—多金属成矿地质特征及找矿方向.世界核地质科学,31(2):89-94.
- 王勇剑,2015.相山花岗斑岩和中基性脉岩特征及其与铀成矿关系(硕士学位论文).北京:核工业北京地质研究院.
- 王健,聂江涛,郭建,等,2016.江西相山矿田深部多金属矿化特征.地质与勘探,52(1):47-59.
- 夏林圻,夏祖春,张诚,等,1992.相山高位岩浆房分异机制和演化.岩石学报,8(3):205-221.
- 谢国发,姚亦军,胡志华,等,2014.相山火山盆地西部铀矿床分布特征.铀矿地质,30(6):329-334.
- 徐庆胜,魏英文,黄安杰,等,2014.江西上饶梨子坑火山盆地潜火山岩地球化学特征、锆石U-Pb年龄及其与铅锌矿成矿关系.地质论评,60(4):933-944.
- 杨水源,蒋少涌,姜耀辉,等,2010.江西相山流纹英安岩和流纹英安斑岩锆石U-Pb年代学和Hf同位素组成及其地质意义.中国科学:地球科学,40(8):953-969.
- 杨水源,蒋少涌,赵葵东,等,2012.江西相山铀矿田邹家山矿床中流纹斑岩的锆石U-Pb年代学、岩石地球化学与Sr-Nd-Hf同位素组成.岩石学报,28(12):3915-3928.
- 杨庆坤,黄强太,孙清钟,2015.江西相山矿田硫铅同位素地球化学特征.矿物岩石地球化学通报,34(4):756-762.
- 杨庆坤,黄强太,罗勇,等,2017.江西相山铀矿田深部铅锌矿成矿流体演化特征.科学技术与工程,17(5):132-141.
- 张文淮,陈紫英,1993.流体包裹体地质学.武汉:中国地质大学出版社,24-126.
- 张家菁,王登红,刘善宝,等,2012.江西省铅山县篁碧铅锌矿区同位素年代学和稳定同位素组成.岩石学报,28(10):3325-3333.
- 张万良,邹茂卿,2014.相山矿田铀多金属成矿条件分析.铀矿地质,30(3):172-179.