

四川九龙县子杠坪铅锌矿床硫同位素地球化学特征

刘应冬^{1,2,3}, 谢海峰^{4,5}, 徐力^{1,2,3}, 倪志耀⁵, 吕丰强⁶, 谭洪旗^{1,2,3}

LIU Yingdong^{1,2,3}, XIE Haifeng^{4,5}, XU Li^{1,2,3}, NI Zhiyao⁵, LÜ Fengqiang⁶, TAN Hongqi^{1,2,3}

1. 中国地质科学院矿产综合利用研究所, 四川 成都 610041;
 2. 中国地质调查局稀土资源应用技术创新中心, 四川 成都 610041;
 3. 中国地质调查局金属矿产资源综合利用技术研究中心, 四川 成都 610041;
 4. 广东省水利电力勘测设计研究院, 广东 广州 510635;
 5. 成都理工大学地球科学学院, 四川 成都 610059;
 6. 四川省地质矿产勘查开发局川西北地质队, 四川 绵阳 621000
1. Institute of Multipurpose Utilization of Mineral Resources, CAGS, Chengdu 610041, Sichuan, China;
2. Technical Innovation Center of Rare Earth Resources, China Geological Survey, Chengdu 610041, Sichuan, China;
3. Research Center of Multipurpose Utilization of Metal Mineral Resources of China Geological Survey, Chengdu 610041, Sichuan, China;
4. Guangdong Hydropower Planning & Design Institute, Guangzhou 510635, Guangdong, China;
5. College of Earth Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China;
6. Northwest Sichuan Geological Party, Sichuan Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development, Mianyang 621000, Sichuan, China

摘要:子杠坪中型铅锌矿床地处松潘—甘孜造山带东南缘与扬子地块西缘交界地区。矿体呈似层状、透镜状等产于上二叠统大石包组含石榴斜长黑云石英片岩与含石榴钠长云母片岩夹石英片岩之间的层间带中。矿石矿物主要为闪锌矿、方铅矿、磁黄铁矿。对九龙子杠坪铅锌矿床中方铅矿、磁黄铁矿和闪锌矿,开展了硫同位素地球化学研究。结果表明,24件金属硫化物样品的 $\delta^{34}\text{S}$ 值为10.67‰~18.17‰(平均14.79‰),均为正值且较接近,以富集重硫为特征。硫表现出混染硫的特征,以热化学硫酸盐还原作用为主,来自于建造水并有深部热流体的混合特征。

关键词:硫同位素;地球化学;子杠坪铅锌矿床;九龙;子杠坪

中图分类号:P595;P618.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-2552(2020)12-2029-08

Liu Y D, Xie H F, Xu L, Ni Z Y, Lü F Q, Tan H Q. Sulfur isotopic geochemistry of the Zigangping Pb-Zn deposit, Jiulong County, Sichuan Province. *Geological Bulletin of China*, 2020, 39(12): 2029-2036

Abstract: The Zigangping Pb-Zn deposit lies on the southeastern margin of the Songpan-Garze orogenic belt and western Yangtze block. The orebodies are layered and lenticular in the interlayer fault zone between the garnet-bearing plagioclase biotite quartz schist and garnet-bearing paragonite schist intercalated with quartz schist. The ore minerals are mainly sphalerite, galena and pyrrhotite. The $\delta^{34}\text{S}$ analysis was carried out on ore-related sulfides from galena, pyrrhotite and sphalerite. The $\delta^{34}\text{S}$ values mainly vary between 10.67‰ and 18.17‰ (averaging 14.79‰), and are characterized by enrichment of heavy sulfur and mixed sulfur. The S isotopic data indicate that the sulfur may have experienced thermochemical sulfate reduction, with the characteristics of formation water and deep thermal fluids.

Key words: sulfur isotopes; geochemistry; Zigangping Pb-Zn deposit; Jiulong; Zigangping

收稿日期:2020-07-10;修订日期:2020-09-15

资助项目:国家自然科学基金项目《川西里伍岩群变质-热事件:年代学证据及构造意义》(批准号:41603034)和中国地质调查局项目《四川九龙-可尔因大型锂资源基地综合调查评价》(编号:DD20190185)

作者简介:刘应冬(1987-),男,硕士,从事地质找矿及矿山地质环境研究。E-mail:lyingdong@mail.cgs.gov.cn

通讯作者:谭洪旗(1984-),男,博士,高级工程师,从事基础地质调查研究。E-mail:hongqitan@163.com

S是铅锌硫化物矿床的主要成矿元素,可作为地球化学示踪剂约束自身的来源、形成机制及成矿环境演化过程,是研究成矿物质来源的重要依据之一^[1-5]。子杠坪铅锌矿床位于松潘-甘孜造山带东南缘,毗邻川滇黔铅锌多金属成矿区。自1961年甘孜州地质队发现子杠坪铅锌矿点后,先后有多家地勘单位开展了普查、详查和勘探工作。最新的勘探资料表明^①,子杠坪铅锌矿床为中型矿床规模。前人仅从野外地质观察、地球化学原生晕找矿等角度对该矿床进行了研究^[6],其余工作基本处于空白。自子杠坪铅锌矿床发现后,在九龙地区尚未发现同类型的铅锌矿床。本文在前人工作的基础上,通过对子杠坪铅锌矿床的主要矿石矿物开展硫同位素地球化学研究,系统总结子杠坪铅锌矿床硫同位素组成特征,探讨该矿床的成矿物质来源,为该区找矿勘查提供依据。

1 区域地质和矿床地质

子杠坪铅锌矿床位于川西松潘-甘孜造山带东

南缘九龙断块内(图1),北侧以秦岭造山带与华北地块相连,西侧沿金沙江缝合带毗邻青藏高原东北缘,东缘沿龙门山断裂带及锦屏山推覆带与扬子地块相连接,总体呈东西向延伸的狭长倒三角形^[7-8]。

研究区主要出露二叠系大石包组和三叠系西康群,夹持于鲜水河断裂、甘孜-理塘断裂内,以穹隆状构造(长枪、踏卡、江浪)和背向斜构造交替发育,为矿床形成和就位提供了赋存空间。区内出露以新火山^[9-14]、乌拉溪^[14-17]、桥棚子、滴痴山、羊房沟^[18-20]岩体为主的印支晚期-燕山早期酸性侵入岩体(210~150 Ma)和二叠纪基性火山岩^[14],为钨、铜、锌等矿产的形成提供了有效的形成环境及物质基础,代表性矿床如里伍式铜锌矿床^[21]、乌拉溪大牛场钨钼矿床^[14,22]。在上述岩浆作用影响下,围绕花岗岩体的三叠系围岩发育接触变质作用,以板岩和片岩为主,其变质作用时代为印支期-燕山早期^[14]。

子杠坪铅锌矿床铅金属量为 7.0×10^4 t,锌金属量

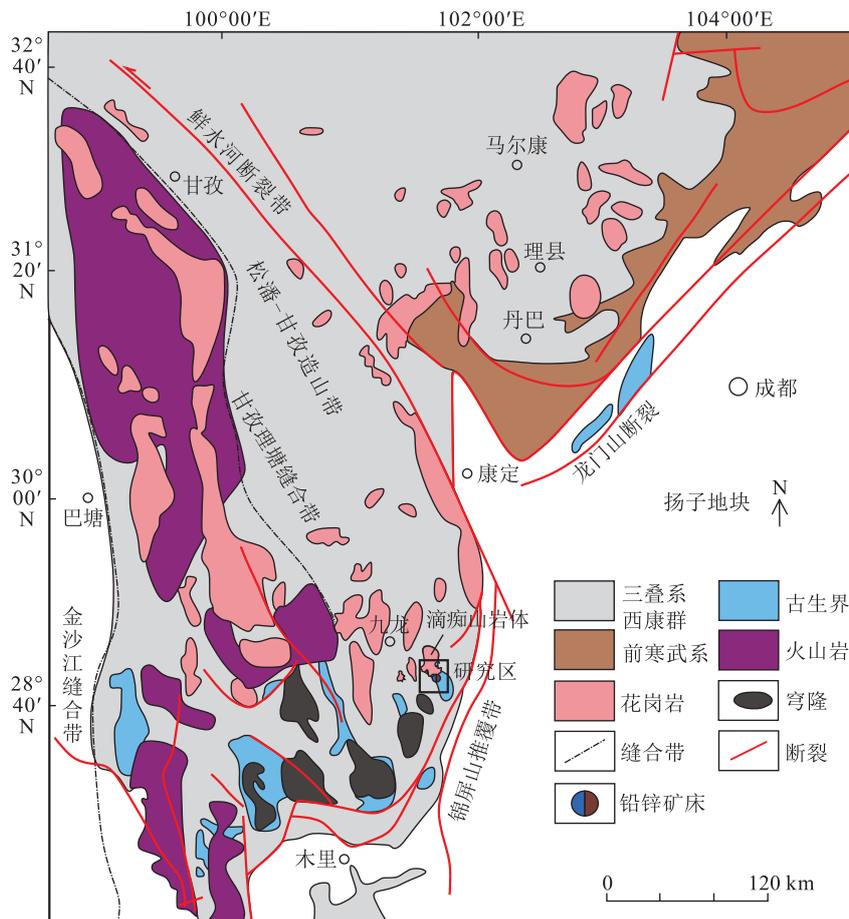


图1 松潘-甘孜地区地质略图^[7]

Fig. 1 Geological sketch map of Songpan-Garze area

为 20.5×10^4 t, 铅和锌矿石平均品位分别为 2.71% 和 8.01%; 矿石工业类型为单一的原生硫化物矿石^①。矿区围岩为上二叠统大石包组含石榴斜长黑云石英片岩与含石榴钠长二云石英片岩; 发育 2 条断层, 其中一条为层间断层, 呈北西—南东向, 铅锌矿体严格受该断层控制, 为导矿容矿构造(图 2)。矿区北侧约 1 km 为滴痴山二长花岗岩, 侵入三叠系西康群中, 为过铝质高分异花岗岩, 属钙碱性—碱性岩系列岩石, 锆石 U—Pb 年龄为 199.4 ± 2.2 Ma(未发表数据), 具有 A 型花岗岩特征^[14]。目前, 子杠坪铅锌矿床仅发现 1 条铅锌矿体, 以似层状和层状为主, 局部呈透镜状(图 3-a); 矿体倾向 $180^\circ \sim 240^\circ$, 倾角为 $40^\circ \sim 60^\circ$, 在平面及剖面上以波状产出; 矿体产状与围岩一致, 界线明显, 顺层间断裂产出(图 3-b), 仅在顶板围岩局部见较小交角。

矿石矿物主要为磁黄铁矿及闪锌矿, 其次为方铅矿、少量黄铜矿等; 脉石矿物主要为云母、石英、长石等。矿区围岩蚀变较发育, 一是构造—成矿热液形成的近矿蚀变作用, 主要表现为硅化、黑云母

化等; 二是与后期区域动力变质作用有关的退变质作用, 主要表现为绿泥石化、绢云母化及部分辉石蚀变成角闪石。

矿石构造以浸染状构造为主, 次为块状构造、条带状构造、脉状构造。通过野外观察和室内矿相学研究, 矿石的结构主要为他形中细粒粒状变晶结构, 部分为压碎角砾结构, 少量半自形—自形粒状结构; 按矿物之间的嵌布关系主要有交代结构、乳浊状结构、包裹结构等。子杠坪铅锌矿床的矿物具有如下特征: 方铅矿呈自形, 在光片下可见黑三角孔产出, 与闪锌矿共边, 磁黄铁矿、黄铜矿呈他形晶结构(图版 I-a); 磁黄铁矿裂隙间分布有黄铜矿, 但磁黄铁矿同时又交代黄铜矿, 沿闪锌矿解理充填有磁黄铁矿并在解理交汇处呈透镜状产出(图版 I-b~d); 黄铜矿沿闪锌矿裂隙及边缘分布并有交代现象(图版 I-c); 闪锌矿呈半自形—自形, 磁黄铁矿与黄铜矿共边交代闪锌矿(图版 I-d); 黄铁矿呈自形晶, 闪锌矿与围岩界线分明, 延伸较稳定(图版 I-f); 黄铜矿呈乳浊状分布于闪锌矿中; 磁黄铁矿呈网

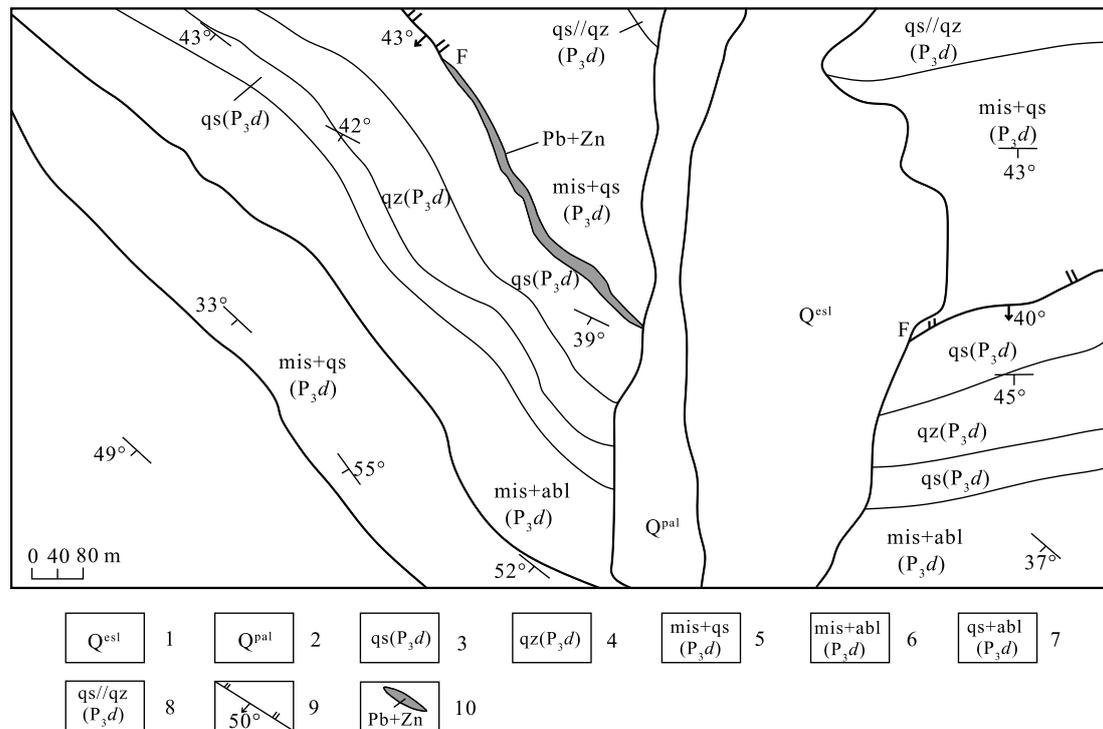


图 2 子杠坪铅锌矿床地质简图

Fig. 2 Geological sketch map of the Zigangping Pb-Zn deposit

1—第四系残坡积; 2—第四系冲洪积; 3—云母石英片岩; 4—石英岩; 5—云母片岩夹石英片岩; 6—云母片岩夹斜长角闪岩; 7—石英片岩夹斜长角闪岩; 8—石英片岩与石英岩互层; 9—逆断层; 10—矿体; P_{3d}—上二叠统大石包组

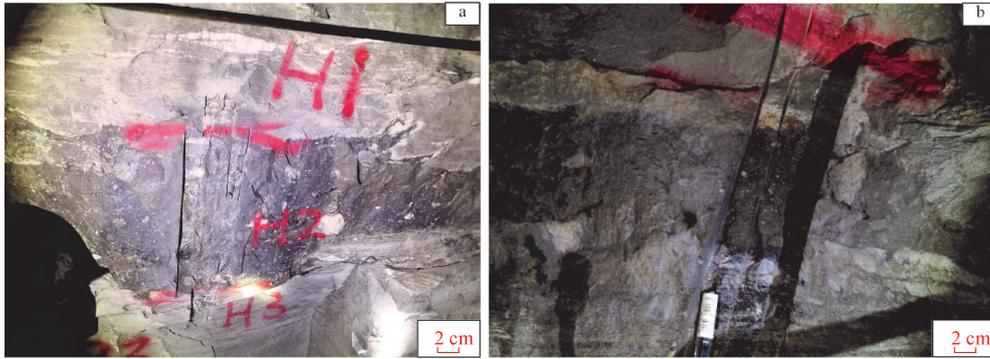
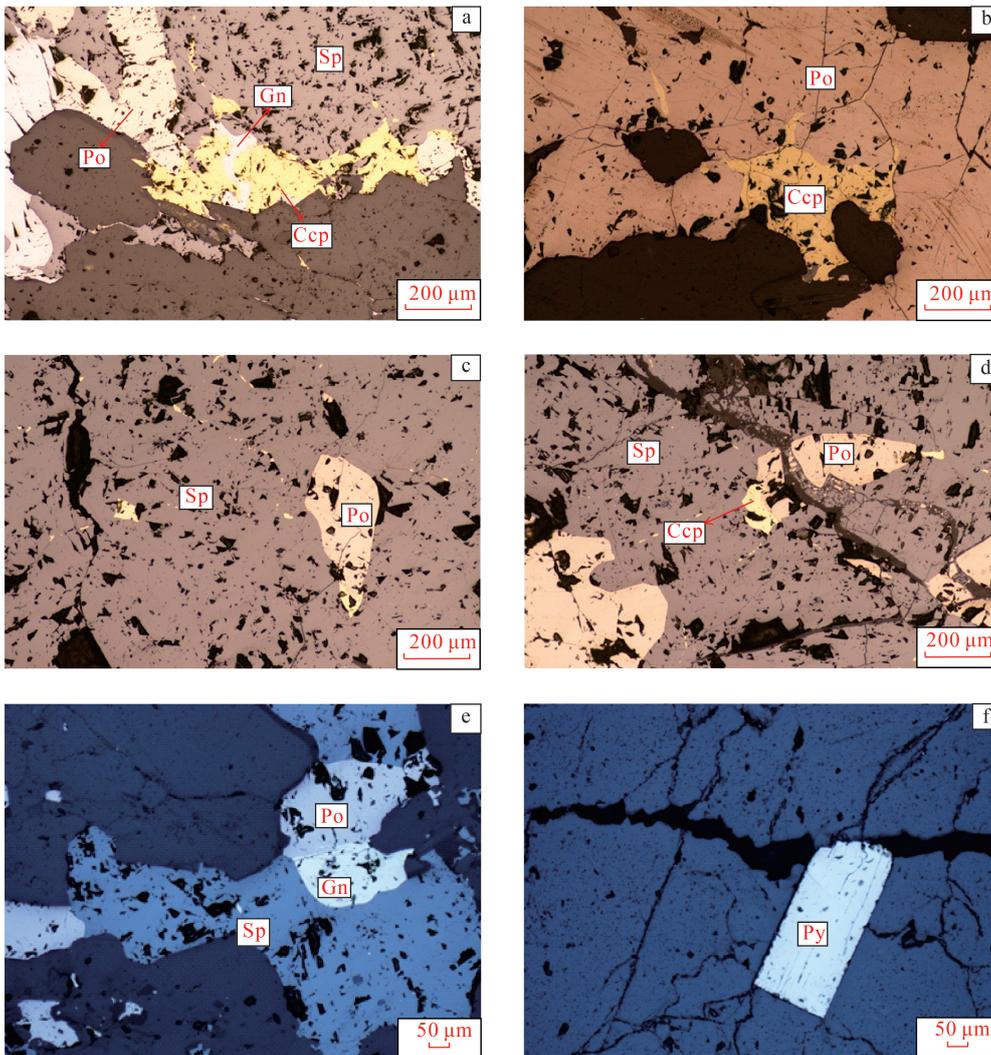


图3 子杠坪铅锌矿床矿石特征

Fig. 3 Ore characteristics of the Zigangping Pb-Zn deposit

a—铅锌矿体沿围岩裂隙贯入,局部膨胀,呈透镜状产出,延伸不远;b—矿体呈似层状,沿层间断裂产出,与围岩界线明显

图版 I Plate I



a.多金属矿物呈他形结构,光片(-);b.黄铜矿沿磁黄铁矿裂隙充填,光片(-);c.磁黄铁矿沿闪锌矿裂隙充填并在裂隙交汇处呈透镜体产出,光片(-);d.磁黄铁矿与黄铜矿共边交代闪锌矿,光片(-);e.磁黄铁矿、方铅矿及闪锌矿共边,呈团块状分布,光片(-);f.黄铁矿的自形晶,光片(-)。Po—磁黄铁矿;Sp—闪锌矿;Gn—方铅矿;Ccp—黄铜矿;Py—黄铁矿

脉状穿插闪锌矿,或呈乳浊状分布,磁黄铁矿、方铅矿及闪锌矿共边,呈团块状分布;地表发现铅钒、菱锌矿、褐铁矿等。

2 样品及分析方法

本次采集的 7 件样品均为原生硫化物矿石,采自矿体不同部位的块状、脉状和浸染状矿石。样品分析测试均在中国地质调查局武汉地质调查中心完成,实验方法采用气体质谱仪 MAT-251 完成。将矿石进行破碎,过筛至 40~60 目,在双目镜下挑选出纯度为 99% 的单矿物(磁黄铁矿、闪锌矿、方铅矿),将挑纯后的硫化物单矿物分别与氧化铜粉末混合并研磨至 200 目,在真空条件下加热生成二氧化硫,采用 MAT-251 对收集的二氧化硫气体进行 $\delta^{34}\text{S}_{\text{CDT}}$ 分析,测试精度为 0.2‰。

3 硫同位素组成特征

本文对 7 件矿石样品中的 24 件硫化物样品开展了硫同位素分析,其中方铅矿、闪锌矿及磁黄铁矿样品各 8 件,硫同位素分析结果及统计数据见表 1 和图 4。

从表 1 可以看出,子杠坪铅锌矿床中磁黄铁矿、闪锌矿及方铅矿 $\delta^{34}\text{S}$ 值均为正值且较接近,以富集重硫为特征,属重硫型矿物。24 件金属硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 分布于 10.67‰~18.17‰之间,极差为 7.5‰,平均值为 14.79‰,金属硫化物的硫同位素组成变化范围较小(图 4)。其中 8 件磁黄铁矿样品 $\delta^{34}\text{S}$ 值介于 10.67‰~18.17‰之间,极差为 7.5‰,平均值为

14.64‰。8 件闪锌矿样品 $\delta^{34}\text{S}$ 值介于 11.86‰~17.24‰之间,极差为 5.38‰,平均值为 15.48‰。8 件方铅矿样品 $\delta^{34}\text{S}$ 值介于 12.45‰~17.24‰之间,极差为 4.79‰,平均值为 14.25‰。

通过表 1 及硫同位素直方图(图 4)可以发现,同一矿石中闪锌矿和方铅矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值变化较小、较均一,且闪锌矿与方铅矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值具有相似的变化区间;磁黄铁矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值变化范围较大,磁黄铁矿、闪锌矿及方铅矿的变化范围多有重叠,塔式效应较明显,反映矿物形成过程中可能具有较一致的硫源。此外,不同硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 值组成呈现闪锌矿>磁

表 1 子杠坪铅锌矿床硫同位素组成
Table 1 Sulfur isotope composition of the Zigangping Pb-Zn deposit

序号	样号	矿物名称	$\delta^{34}\text{S}_{\text{CDT}}/\text{‰}$
1		方铅矿	12.65
2	ZGP-1	方铅矿	12.45
3		闪锌矿	13.58
4		磁黄铁矿	15.49
5		方铅矿	13.00
6	ZGP-2	闪锌矿	11.86
7		磁黄铁矿	12.06
8		方铅矿	16.04
9	ZGP-3	闪锌矿	15.77
10		磁黄铁矿	16.36
11		磁黄铁矿	16.25
12		方铅矿	17.24
13	ZGP-4	闪锌矿	17.24
14		磁黄铁矿	18.17
15		方铅矿	14.66
16	ZGP-5	闪锌矿	17.18
17		磁黄铁矿	15.83
18		方铅矿	14.26
19	ZGP-6	闪锌矿	16.77
20		闪锌矿	16.62
21		磁黄铁矿	12.32
22		方铅矿	13.67
23	ZGP-7	闪锌矿	14.84
24		磁黄铁矿	10.67

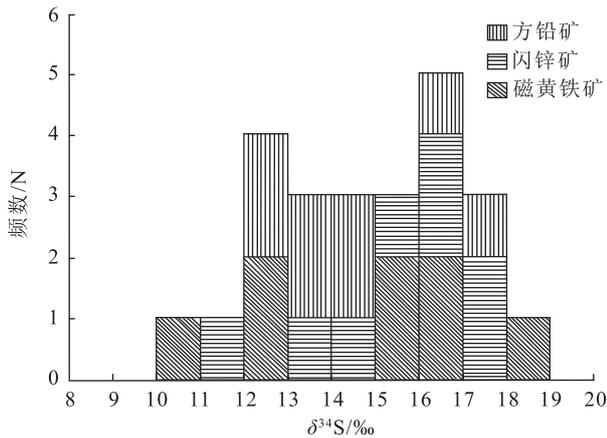


图 4 子杠坪铅锌矿床硫同位素直方图

Fig. 4 Sulfur isotope histograms of the Zigangping Pb-Zn deposit

黄铁矿>方铅矿的特征,符合硫同位素在达到分馏平衡时硫化物富 ^{34}S 顺序,即闪锌矿>磁黄铁矿>方铅矿的特征。除 ZGP-5 矿石样品中 ^{34}S 闪锌矿(17.18‰)> ^{34}S 方铅矿(14.66‰)> ^{34}S 磁黄铁矿(15.83‰)达到分馏平衡外,其余样品中硫同位素可能未达到分馏平衡或这些硫同位素本身是混合的,还需要其他证据加以佐证。根据矿物生成先后关系分析,方铅矿比闪锌矿形成晚,方铅矿交代了闪锌矿,实验所测闪锌矿比方铅矿更富硫的结果佐证了这一变质过程。因此,子杠坪铅锌矿床可能存在多期矿化分馏作用,具有多期叠加成矿的特征,这与光学显微镜下观察到的现象基本一致。

4 讨论

4.1 总硫同位素组成

硫同位素组成与成矿溶液中总硫同位素组成、氧逸度、pH 值、离子强度和温度有关^[23]。因此,应利用成矿热液总硫同位素组成($\delta^{34}\text{S}_{\text{SS}}$)指示成矿流体的来源,不能简单地采用硫化物 $\delta^{34}\text{S}$ 值直接指示成矿流体硫的来源^[5]。

前人研究表明,在氧逸度较低难以形成硫酸盐使矿区硫酸盐矿物成分较少且矿物组合较简单的前提下,总硫同位素组成可大致用硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 值代表^[23-25]。子杠坪铅锌矿床中少有硫酸盐矿物存在,含硫矿物以磁黄铁矿、方铅矿及闪锌矿为主,其余含硫矿物较少。因此,热液的总硫同位素组成可以用硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 值替代。子杠坪铅锌矿石中3种硫化物 $\delta^{34}\text{S}$ 值分布较集中,24件样品的硫同位素平均值为14.79‰。因此,子杠坪铅锌矿总硫同位素值应大致为14.79‰。

4.2 硫的来源

硫同位素是成矿物质来源、成矿流体迁移过程及矿床成因的灵敏指示剂^[23]。前人总结了金属硫化物矿床的硫源为以下4种^[26-28]:①地幔和深部地壳,硫同位素平均组成与陨石硫同位素组成接近,即 $\delta^{34}\text{S}_{\text{SS}}$ 值为-3‰~3‰;②海水硫酸盐,硫同位素组成为 $\delta^{34}\text{S}_{\text{SS}}=20\text{‰}$,其中海相硫酸盐岩 $\delta^{34}\text{S}$ 值能代表海水硫酸盐的硫同位素;③生物成因硫,由于生物作用强弱和 SO_4^{2-} 、 H_2S 开放或封闭体系不同, $\delta^{34}\text{S}_{\text{SS}}$ 值变化范围较大,通常表现出明显的负值特征;④混染硫, $\delta^{34}\text{S}_{\text{SS}}$ 值常介于第一种与第二种硫同位素之间,大部分位于5‰~15‰之间,为地幔硫、海

水硫酸盐等的混合来源。综上可知,子杠坪铅锌矿总硫同位素总值约为14.79‰,为混染硫源特征,且以海水硫酸盐还原为主。

上二叠统大石包组主要为阳起片岩、玄武质沉积灰岩、(绿泥)石英片岩,原岩恢复为基性火山岩、砂岩和泥质岩类为主,副变质岩物质源区主要为长英质火成物源区,少数为石英岩沉积物源区^[29]。子杠坪铅锌矿床的围岩中明显富集Zn、Cu、Pb元素且形成于氧化沉积环境^[29];矿石中表现为强正Eu异常及弱负Ce异常,且Zr、Hf、U/Th、Zn/(Zn+Pb)、 $\log(\delta\text{Ce})$ 指示与热水沉积作用有关,形成于还原环境^[29];矿石与围岩的稀土元素球粒陨石显示出右倾的配分模式^[29]。上述证据表明,矿石成矿物质来源于矿区围岩,子杠坪铅锌矿床成矿元素以继承围岩为主。因此,笔者推测,北侧滴痴山(图1)花岗岩浆热液流体极可能没有直接参与成矿作用,可能为铅锌矿床的形成提供了动力和热源。因此,硫源以海水硫酸盐还原为主,可能后期受岩浆热液的影响。

前人研究认为,海水硫酸盐的还原机制主要有细菌还原模式(BSR)和热化学还原模式(TSR)。细菌还原模式在低温条件下^[29-32],还原态硫的形成有限且需要较长时间,随还原程度的变化表现为不同的富集特征, $\delta^{34}\text{S}$ 值具有大幅度波动范围,形成的还原硫的 $\delta^{34}\text{S}$ 值比硫酸盐低(40‰±20‰)^[23],表现为明显富集轻硫特征, $\delta^{34}\text{S}$ 值一般为负值。热化学还原模式为相对高温环境,形成大量的硫,且还原硫与硫酸盐之间的同位素分馏很小甚至没有^[26,32-33]。子杠坪铅锌矿床24件金属硫化物样品的 $\delta^{34}\text{S}$ 值分布于10.67‰~18.17‰之间,硫值分布较集中且明显表现出富集重硫的特征。矿区的矿物组成上,没有发现石膏、重晶石等硫酸盐矿物及有机质参与。细菌还原模式的 $\delta^{34}\text{S}$ 值一般为负值,本文中 $\delta^{34}\text{S}$ 值为正值,排除细菌还原模式。因此,子杠坪铅锌矿床应形成于相对高温环境,其成矿流体以热化学还原海水硫酸盐的过程为主。

邻近矿区里伍铜锌矿的硫同位素研究成果^[14,34-36]显示,里伍铜锌矿床硫同位素集中分布于2.70‰~8.97‰之间,与子杠坪铅锌矿床硫同位素分布范围基本一致,均属于重硫型,但其总硫同位素值明显低于海水硫同位素组成(20‰),为幔源硫与海水硫的混合特征。宋鸿林等研究认为,里伍铜锌矿床中围岩矿物的 $\delta^{34}\text{S}$ 值与矿石中的 $\delta^{34}\text{S}$ 值极接

近,反映矿石和围岩中硫的来源是一致的,里伍铜锌矿床硫的主要来源于地幔硫,次为海水硫。与里伍铜矿对比,子杠坪铅锌矿床硫同位素组成与里伍铜矿床较一致,均表现出混染硫的特征。另外,笔者获得围岩中片岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄中存在一组热液年龄为 196 ± 2 Ma(未发表数据),该年龄与滴痴山二长花岗岩锆石 U-Pb 年龄(199 Ma)在误差范围内基本一致,同时也得到踏卡穹隆边部斜长角闪片岩中角闪石 $^{39}\text{Ar}-^{40}\text{Ar}$ 同位素年龄(197.09 ± 2.01 Ma)的支持^[14],暗示子杠坪铅锌矿可能遭受了燕山早期岩浆作用或变质作用的叠加改造,也与上述硫源特征基本一致。因此,子杠坪铅锌矿床的硫源主要为海水硫,后期可能受变质作用或岩浆作用,为铅锌矿床富集提供了部分硫源,使硫同位素组成呈现出混染硫的特点。

5 结 论

(1)四川九龙县子杠坪铅锌矿床中矿石矿物为闪锌矿、方铅矿和磁黄铁矿。这些矿物的 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 $10.67\text{‰} \sim 18.17\text{‰}$ (平均 14.79‰),大致代表成矿流体中总硫同位素组成。

(2)子杠坪铅锌矿床的硫源主要为海水硫酸盐经过热化学还原作用模式形成的,后期受变质作用或岩浆作用改造富集,使硫同位素组成表现为混染硫的特点。

致谢:中国地质科学院矿产综合利用研究所朱志敏研究员,胡军亮、耿海涛硕士等参加了野外地质调查工作,周雄副研究员对本文初稿提出了修改建议,论文审稿过程中审稿专家提出建设性的意见,对此一并表示感谢。

参 考 文 献

- [1] 谈树成,周家喜,罗开,等.云南毛坪大型铅锌矿床成矿物质来源:原位 S 和 Pb 同位素制约[J].岩石学报,2019,35(11): 3461-3476.
- [2] 杨俊杰,张志欣,杨富全,等.新疆阿尔泰巴特巴克布拉克铁矿床硫同位素和稀土元素地球化学特征及其意义[J].矿床地质,2020,39(1): 63-79.
- [3] 李振焕,李文昌,刘学龙,等.滇西保山地块金厂河铁铜铅锌多金属矿床硫同位素特征与成矿物质来源示踪[J].地质通报,2020,39(4): 552-562.
- [4] 王文元,高建国,依阳霞,等.云南禄劝鲁鲁铅锌矿床铷-锶同位素年代学与硫、铅同位素地球化学特征[J].地质通报,2017,36(7): 1294-1304.
- [5] 谭洪旗,罗丽萍,徐刚,等.四川乌依铅矿床成矿物质来源:硫、铅同位素和方铅矿稀土元素地球化学制约[J].地质与勘探,2017,53(6): 1051-1060.
- [6] 周磊.四川九龙县子杠坪铅锌矿床地质特征及深部找矿预测[D].成都理工大学硕士学位论文,2017.
- [7] 朱玉娣,代堰镔,王丽丽,等.松潘-甘孜造山带南缘二叠系变质玄武岩的成因与构造意义[J].地学前缘,2017,24(6): 98-109.
- [8] 许志琴,王宗秀,侯立玮.松潘-甘孜造山带构造研究新进展[J].中国地质,1991,(12): 14-16.
- [9] 马国桃,姚鹏,马东方,等.四川九龙新火山花岗岩体单颗粒锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年及其地质意义[J].沉积与特提斯地质,2012,32(4): 70-75.
- [10] 周家云,谭洪旗,龚大兴,等.川西江浪穹窿核部新火山花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年和 Hf 同位素研究[J].矿物岩石,2013,33(4): 42-52.
- [11] 朱玉娣,代堰镔,王丽丽,等.松潘-甘孜造山带南缘江浪穹窿文家坪花岗岩成因及地质意义[J].现代地质,2018,32(1): 16-27.
- [12] Zhou Q, Li W C, Zhang H H, et al. Post-magmatic hydrothermal origin of late Jurassic Liwu copper polymetallic deposits, western China: direct chalcopyrite Re-Os dating and Pb-B isotopic constraints[J].Ore Geology Reviews,2017,89: 526-543.
- [13] Dai Y P, Zhu Y D, Li T Z, et al. A crustal source for ca.165 Ma post-collisional granites related to mineralization in the Jianglang dome of the Songpan-Ganzi Orogen, eastern Tietban Plateau[J].Geochemistry,2017,77(4): 573-586.
- [14] 谭洪旗.松潘-甘孜地块东南缘穹隆体物质组成、变形-变质特征及成矿响应[D].成都理工大学博士学位论文,2019.
- [15] Wallis S, Tsujimori T, Aoya M, et al. Cenozoic and Mesozoic metamorphism in the Longmenshan orogeny: Implication for geodynamic model of eastern Tibet[J].Geology,2003,31(9): 745-758.
- [16] 周家云,谭洪旗,龚大兴,等.乌拉溪铝质 A 型花岗岩:松潘-甘孜造山带早燕山期热隆伸展的岩石记录[J].地质论评,2014,60(2): 348-362.
- [17] 李同柱,代堰镔,马国桃,等.扬子陆块西缘乌拉溪花岗岩体 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年及地质意义[J].矿物岩石地球化学通报,2016,35(4): 743-749.
- [18] 张博,殷聃,成欣怡,等.松潘-甘孜造山带南东段羊房沟石英闪长岩时代、成因及地质意义[J].矿产勘查,2019,10(10): 2475-2485.
- [19] 胡军亮.川西九龙打枪沟锂铍矿床地质-地球化学、年代学及资源前景[D].成都理工大学硕士学位论文,2020.
- [20] 万传辉,袁静,李芬香,等.松潘-甘孜造山带南段晚三叠世兰尼巴和羊房沟花岗岩岩石学、地球化学特征及成因[J].岩石矿物学杂志,2011,30(2): 185-198.
- [21] 李同柱,周清,张惠华,等.四川西部里伍式富铜矿床黄铜矿 Re-Os 定年及其成矿意义[J].地质学报,2017,91(12): 2727-2738.
- [22] 谭洪旗,周家云,朱志敏,等.四川九龙乌拉溪白钨矿床地质背景及找矿方向[J].矿床地质,2012,31(s1): 1213.
- [23] Ohmoto H. Systematics of sulfur and carbon isotopes in hydrothermal ore deposits[J].Econ. Geol.,1972,67: 551-579.
- [24] 金灿海,李坤,黄林,等.黔西北纳雍枝铅锌矿床硫同位素组成特征及成矿物质来源[J].矿物岩石,2015,35(3): 81-88.

- [25] 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.
- [26] Jochen Hoefs. Stable isotope geochemistry[M]. Springer International Publishing AG part of Springer Nature, 1997.
- [27] 郑永飞, 傅斌, 龚冰. 大别造山带超高压变质岩稳定同位素地球化学[J]. 安徽地质, 2000, (3): 161-165.
- [28] 周堂波. 罗布真铅锌矿床矿石矿物特征及矿床成因探讨[D]. 东华理工大学硕士学位论文, 2018.
- [29] 谢海峰. 四川九龙子杠坪铅锌矿床地球化学特征及矿床成因[D]. 成都理工大学硕士学位论文, 2019.
- [30] Jørgensen B B, Isaksen M F, Jannasch H W. Bacterial Sulfate Reduction Above 100°C in Deep-Sea Hydrothermal Vent Sediments [J]. Science (New York, N.Y.), 1992, 258: 1756-1757.
- [31] Seal R R, II. Sulfur Isotope Geochemistry of Sulfide Minerals [J]. Reviews in Mineralogy & Geochemistry, 2006, 61(1): 633-677.
- [32] Zhou J X, Huang Z L, Zhou M F, et al. Constraints of C-O-S-Pb isotope compositions and Rb-Sr isotopic age on the origin of the Tianqiao carbonate-hosted Pb-Zn deposit, SW China [J]. Ore Geology Reviews, 2013, 53: 77-92.
- [33] Zhou J X, Huang Z L, Yan Z F. The origin of the Maozu carbonate-hosted Pb-Zn deposit, southwest China: Constrained by C-O-S-Pb isotopic compositions and Sm-Nd isotopic age [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2013, 73: 39-47.
- [34] 吴小艳. 四川九龙县里伍铜矿床稳定同位素地球化学特征研究[D]. 成都理工大学硕士学位论文, 2016.
- [35] 姚鹏, 汪名杰, 李建忠, 等. 里伍式富铜矿床同位素示踪及其成矿地质意义[J]. 地球学报, 2008, 29(6): 691-696.
- [36] 陈敏华, 丁俊, 陈道前. 四川省九龙县里伍铜田成矿物质来源探讨[J]. 沉积与特提斯地质, 2011, 31(1): 89-93.
- ①四川省地质矿产勘查开发局化探队. 四川省九龙县子杠坪铅锌矿资源储量核实及延伸勘探报告. 2017.
- ②中国地质大学(北京). 扬子地台西缘江浪变质核杂岩体变形变质作用及里伍式铜矿成矿模式-地矿部“八五”科技攻关项目第85-01-005-01项. 1995.