

doi: 10.12097/gbc.2022.04.048

桂西北箭猪坡铅-锌-锑多金属矿床成因：来自闪锌矿微量、稀土元素及氢氧同位素的证据

何光武^{1,2}, 蔡明海^{1*}, 胡鹏飞³, 肖俊杰¹, 甘能俭⁴, 朱敏杰¹, 吕堂安¹

HE Guangwu^{1,2}, CAI Minghai^{1*}, HU Pengfei³, XIAO Junjie¹, GAN Nengjian⁴, ZHU Minjie¹, LYU Tang'an¹

1. 广西大学资源环境与材料学院, 广西南宁 530004;
2. 广西壮族自治区二七二地质队, 广西南宁 530033;
3. 中冶武勘工程技术有限公司, 湖北武汉 430080;
4. 广西金土矿业评估咨询有限公司, 广西南宁 530029

1. College of Resources, Environment and Materials, Guangxi University, Nanning 530004, Guangxi, China;
2. No.272 Geological Team of Guangxi Zhuang Autonomous Region, Nanning 530033, Guangxi, China;
3. WSGRI Engineering & Surveying Incorporation Limited, Wuhan 430080, Hubei, China;
4. Guangxi Jintu Mining Industry Evaluation Consulting Co., Ltd., Nanning 530029, Guangxi, China

摘要: 位于广西右江盆地北东侧的丹池成矿带是中国南方重要的有色金属矿集区, 箭猪坡矿床是其南段五圩矿田中规模最大、成矿特征最具代表性的大型铅-锌-锑多金属矿床, 由长期开采的脉状铅-锌-锑矿体和新发现的似层状锡多金属矿体组成。通过闪锌矿的微量、稀土元素和氢-氧同位素分析, 对比研究 2 类矿体成矿特征的差异, 进一步探讨成矿流体来源及矿床成因类型。分析结果显示: 箭猪坡矿床不同类型矿体中闪锌矿均相对富集 Fe、Cu、Pb、Sn、Sb, 亏损 Ga、Ge、Co、Ni, 与典型的岩浆热液型矿床相似。同时, 似层状矿体中稀土元素总量 ($\Sigma\text{REE}=12.80\times 10^{-6}\sim 44.31\times 10^{-6}$) 高于脉状矿体 ($\Sigma\text{REE}=3.34\times 10^{-6}$), 具有明显的轻、重稀土元素分馏和 Eu 亏损。闪锌矿氢-氧同位素分析结果中, 脉状矿体 $\delta\text{D}=-81.8\text{‰}\sim -69.2\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}=2.1\text{‰}\sim 5.2\text{‰}$; 似层状矿体 $\delta\text{D}=-109.4\text{‰}\sim -75.2\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}=-4.0\text{‰}\sim -4.0\text{‰}$, 指示 2 类矿体的成矿流体为岩浆热液与大气降水不同比例的混合流体。以上特征表明, 箭猪坡矿床属于岩浆热液型铅锌矿床, 脉状矿体和似层状矿体成矿物质(流体)主要来源于岩浆热液。

关键词: 箭猪坡矿床; 闪锌矿; 微量元素; 稀土元素; 氢-氧同位素; 矿床成因; 广西

中图分类号: P618.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-2552(2024)02/03-0246-12

He G W, Cai M H, Hu P F, Xiao J J, Gan N J, Zhu M J, Lyu T A. The genesis of the Jianzhupo Pb-Zn-Sb polymetallic deposit in northwestern Guangxi: Evidence from the characteristics of trace elements, rare earth elements, and hydrogen and oxygen isotopes of sphalerite. *Geological Bulletin of China*, 2024, 43(2/3): 246-257

Abstract: The Danchi metallogenic belt, located in the northeast of the Youjiang basin, is an important non-ferrous metal ore concentration area in southern China, and the Jianzhupo deposit, the largest and most representative large-scale Pb-Zn-Sb polymetallic deposit in the Wuxu ore field in the southern section of the deposit, consisting of vein Pb-Zn-Sb orebody and newly discovered stratified Sn polymetallic orebody. In this paper, through the analysis of trace elements, rare earth elements, and H-O isotopes of sphalerite, the differences in metallogenic characteristics of the two types of ore bodies are compared and studied, and the source of ore-

收稿日期: 2022-04-29; 修订日期: 2024-01-15

资助项目: 广西自然科学基金项目《广西大厂锡多金属矿成矿物质来源及成因研究》(编号: 桂科计字 [2020]159 号)

作者简介: 何光武(1997-), 男, 硕士, 助理工程师, 从事资源勘查工作。E-mail: 738518375@qq.com

* 通信作者: 蔡明海(1965-), 男, 博士, 研究员, 从事矿床地质与构造地质研究。E-mail: gxdxcmh@163.com

forming fluids and the genesis of deposits are further discussed. The results show that sphalerite in different types of ore bodies in the Jianzhupo deposit is relatively enriched in Fe, Cu, Pb, Sn and Sb, and depleted in Ga, Ge, Co and Ni, which is similar to typical magmatic hydrothermal deposits. Meanwhile, the total amount of rare earth in the stratified ore body ($\Sigma\text{REE}=12.80\times 10^{-6}\sim 44.31\times 10^{-6}$) is higher than that in the vein ore body ($\Sigma\text{REE}=3.34\times 10^{-6}$), with obvious LREE and HREE fractionation and Eu depletion. The results of H-O isotope analysis of sphalerite show that $\delta\text{D}=-81.8\text{‰}\sim -69.2\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}=2.1\text{‰}\sim 5.2\text{‰}$ (vein orebody); $\delta\text{D}=-109.4\text{‰}\sim -75.2\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}=-4.0\text{‰}\sim -4.0\text{‰}$ (stratified orebody), indicating that the ore-forming fluids of the two types of ore bodies are mixed fluids with different proportions of magmatic hydrothermal and atmospheric precipitation. The above characteristics show that the Jianzhupo deposit belongs to magmatic hydrothermal Pb-Zn deposit, and the ore-forming materials (fluids) of vein ore bodies and stratified ore bodies are mainly derived from magmatic hydrothermal fluid.

Key words: Jianzhupo deposit; sphalerite; trace elements; rare earth elements; hydrogen and oxygen isotopes; genesis of deposit; Guangxi

桂西北丹池成矿带是中国南方重要的有色金属成矿带,由芒场、大厂和五圩 3 个主要矿田组成。箭猪坡铅-锌-锡多金属矿床是丹池成矿带南段五圩矿田中规模最大、成矿特征最具代表性的大型矿床,长期以来,矿山勘查和开采的主体为一系列脉状铅-锌-锡矿体,近年在矿区边部新发现似层状锡多金属矿体(万庆等, 2016; 李晔, 2021)。前人对该矿床脉状矿体的成矿特征(蔡建明等, 1995a; 王东明, 2012)、地球化学特征(胡乔帆等, 2017; 刘涛涛等, 2020; 刘伟等, 2020)、流体包裹体(蔡建明等, 1995b; 陈玲等, 2015; Zhang et al., 2018)、控矿构造(蔡明海等, 2012)等开展研究,提出了岩浆热液成因(王东明, 2012; Zhang et al., 2018; 张健等, 2018; 刘涛涛等, 2020)和盆地热卤水、变质水成矿等不同认识(蔡建明等, 1995a; 陈玲等, 2015)。相较而言,新发现的似层状矿体仅有少量文献对其特征进行了初步报道(万庆等, 2016; 李晔, 2021),矿山技术人员对其成因提出了岩浆热液和海底喷流沉积 2 种认识。在丹池成矿带中部大厂矿田中,铜坑矿床以“上脉下层”的模式产出有超大型锡多金属矿体,而箭猪坡矿床与前者的构造特征相似(蔡明海等, 2012),但目前勘查的成矿规模远不及前者,因此,查明似层状矿体的成矿来源与控制因素,对下一步勘查工作具有重要意义。

闪锌矿是铅锌矿床中重要的金属矿物,因其微量、稀土元素蕴含有丰富的地球化学信息,常作为研究铅锌矿床成因类型的重要载体矿物(Cook et al., 2009; Ye et al., 2011; 刘艳荣等, 2023)。本文通过箭猪坡矿床不同类型矿体(脉状铅-锌-锡矿体、似层状锡多金属矿体)中闪锌矿的微量、稀土元素和氢-氧同位素分析,进一步探讨 2 类矿体成矿物质、成矿流体来源及矿床成因。

1 矿区地质背景及矿床特征

五圩矿田位于桂西北丹池成矿带南段,右江盆地北东侧、江南古陆西南缘(图 1-b)。矿田出露地层为泥盆系—中三叠统($\text{D}_1\text{-T}_2$)一套海相碎屑岩-碳酸盐岩-硅质岩,泥盆系为区内铅-锌-锡多金属矿的主要赋矿层位。矿田内发育的主要构造为 NNW 向五圩背斜和 NNW 向断裂。五圩背斜长约 35 km,宽约 4 km,与丹池成矿带上的芒场背斜、龙箱盖背斜等共同组成丹池大背斜。NNW 向断裂自西向东由水落、三排洞、箭猪坡等地发育的多组同向断裂带组成,控制了区内主要矿床的产出。矿田范围内无岩浆岩出露,但前人据航磁、物探资料显示的磁力和重力异常推断,区域存在隐伏岩体(孙德梅等, 1994; 赵毅等, 2020)。

矿田主要发育铅-锌-锡-银-汞-砷等一套中—低温组合的矿化,矿化主要分布在五圩背斜轴部及西翼,具有明显的成矿分带特征(赵京等, 2016):以箭猪坡为中心的内成矿带主要成矿元素为 Pb-Zn-Sb-Ag,代表性矿床有箭猪坡铅-锌-锡多金属矿床和三排洞铅-锌-锡多金属矿床;外成矿带主要成矿元素为 Hg-As,代表性矿床有九瓦、水落、红沙一带发育的汞、砷矿床(图 1-c)。近年的勘查工作,在矿田西侧石炭系—二叠系(C—P)界面新发现拔旺锡-锌多金属矿床(广西区域地质调查研究院, 2018)。

箭猪坡铅-锌-锡多金属矿床位于五圩矿田中部、五圩背斜枢纽处(图 2-a),出露地层为中泥盆统罗富组(D_2I)和下泥盆统塘丁组(D_1I)。罗富组出露在箭猪坡北东侧,岩性为泥灰岩、炭质泥岩、页岩。塘丁组出露在背斜核部,与上部罗富组整合接触,是区内矿体的主要赋矿层位。塘丁组自上而下分为 4 段($\text{D}_1\text{I}^1\sim \text{D}_1\text{I}^4$),岩性主要为钙质泥岩、炭质泥岩和粉砂质泥

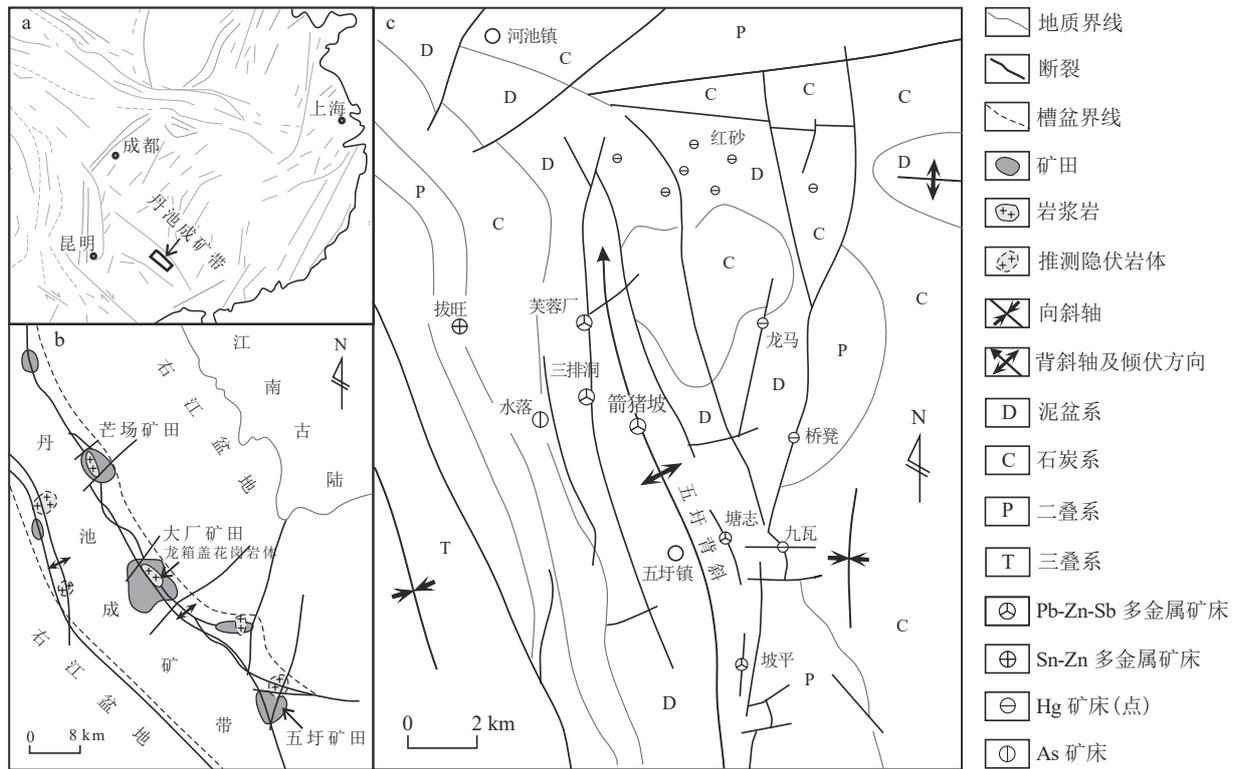


图 1 五圩矿田构造地质简图(据蔡建明等, 1995a; 蔡明海等, 2012 修改)

Fig. 1 Structural geological maps of Wuxu ore field

a—研究区位置; b—区域构造简图; c—矿田地质简图

岩。矿区主干构造为 NNW 向五圩背斜和 NNW 向断裂。箭猪坡矿区内五圩背斜枢纽向北倾伏, 轴面倾向 NE, 东翼略缓(倾角 $25^{\circ}\sim 45^{\circ}$)、西翼较陡(倾角 $30^{\circ}\sim 50^{\circ}$, 局部大于 50°), 两翼均发育顺层滑动破碎带; 在矿区中部五圩背斜轴向转为 NW 向, 呈“S”形。NNW 向断裂成群平行分布在背斜两翼和轴部, 总体走向约 350° , 断裂面向东倾, 倾角多大于 60° 。

矿床由脉状铅-锌-锑矿体和新发现的似层状锡多金属矿体组成。脉状矿体充填于 NNW 向断裂和裂隙中, 矿体产状陡立(走向约 350° , 倾角 $60^{\circ}\sim 80^{\circ}$) 并切割地层产出(图 2-b、图版 I-a), 赋矿围岩为下泥盆统塘丁组第一段(D_1t^1)和第二段(D_1t^2)泥质岩石。目前已发现脉状矿体 80 余条, 探明金属量 Pb 8.4×10^4 t、Zn 22.4×10^4 t、Sb 13.6×10^4 t、Ag 500 t, 平均品位为 Pb 0.89%、Zn 2.80%、Sb 1.60%、Ag 50g/t(张健等, 2018), 其中部分矿脉延深未完全控制, 在近年开展的深部钻探中发现锡矿化(刘伟等, 2020)。矿体中矿石矿物主要有黄铁矿、闪锌矿、脆硫锑铅矿、辉锑矿和极少量的锡石, 脉石矿物主要有

铁白云石、石英和方解石(图版 I-c)。矿石结构有自形—半自形粒状、他形粒状、放射状、碎裂状等, 构造主要为块状、浸染状、网状和条带状。矿区内围岩蚀变较弱, 其中硅化、黄铁矿化和碳酸盐化与成矿关系较密切, 此外还发育少量绢云母化和叶蜡石化。

新发现的似层状锡多金属矿体产于下泥盆统塘丁组第二段(D_1t^2)钙质泥岩中, 矿体厚 0.5~7.0 m, 以层状、细脉状产出(图版 I-b)。矿石矿物主要有黄铁矿、闪锌矿、脆硫锑铅矿和锡石, 脉石矿物主要有石英和方解石(图版 I-d), 矿体平均品位为 Sn 0.15%、Pb 2.25%、Zn 11.16%、Sb 10.27%、Ag 253 g/t。似层状矿体中含锡矿物为锡石, 粒径 0.02~0.10 mm, 以自形—半自形粒状产在石英中(图版 I-e), 部分锡石被闪锌矿、脆硫锑铅矿包裹, 在正交偏光下具有高级干涉色(图版 I-f)。似层状矿体受顺层滑动破碎带控制, 产状($247^{\circ}\angle 14^{\circ}$)与地层产状总体一致, 围岩有较强的硅化。在 247 中段 303 线附近坑道中见到似层状矿体被脉状矿体切割。取样分析发现, 该处似层状矿体中 Sn 含量(0.14%)高于脉状矿

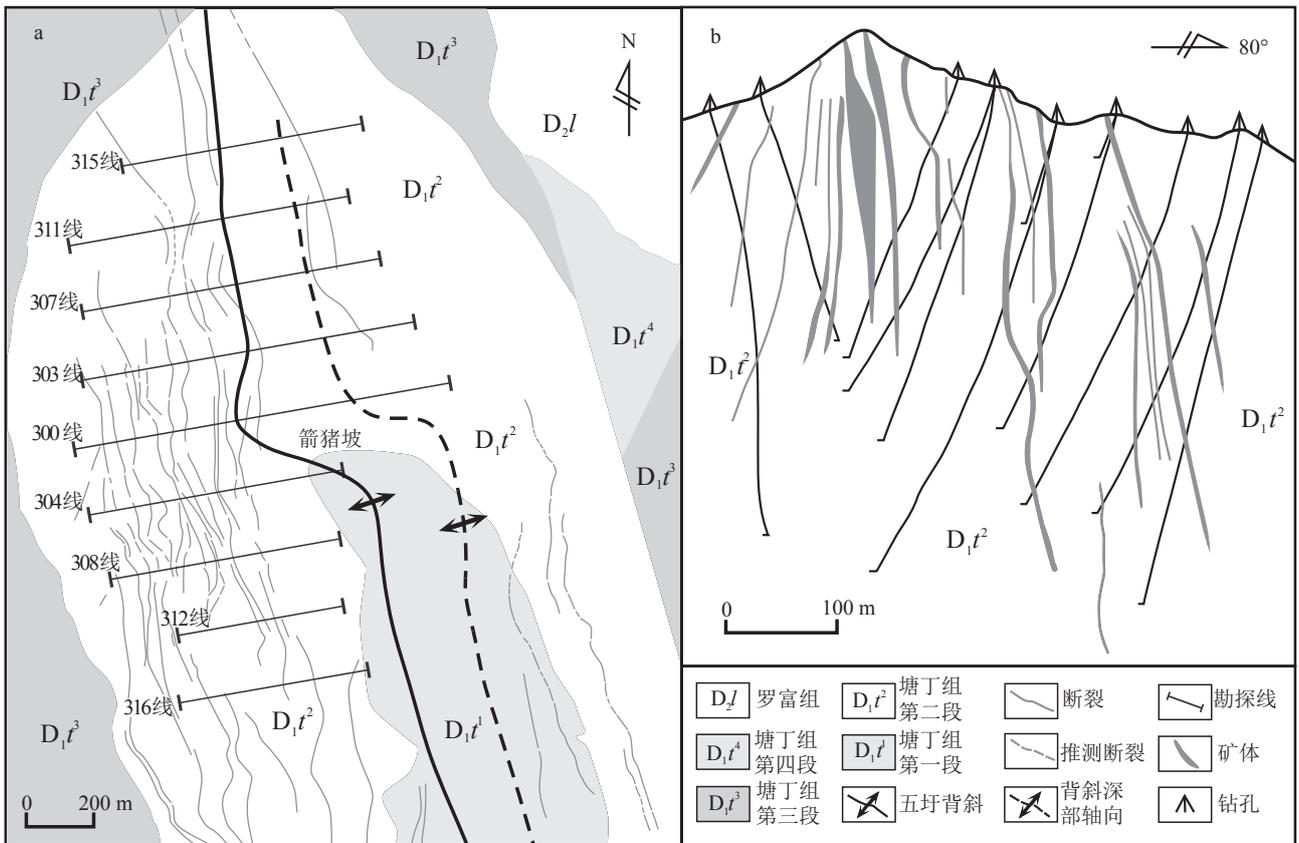


图 2 箭猪坡矿区地质(a, 据李晔, 2021 修改)及 300 线剖面图(b, 据矿山资料修改)

Fig. 2 Geological map (a) and cross-section along No.300 exploration line (b) of the Jianzhupo deposit

体中 Sn 含量(0.006%~0.080%)(李晔, 2021)。此外, 似层状矿体局部矿化较强(Pb+Zn+Sb 品位大于 20%), 脉石矿物含量较少, 与脉状矿体中大量发育的碳酸盐类矿物有明显区别。

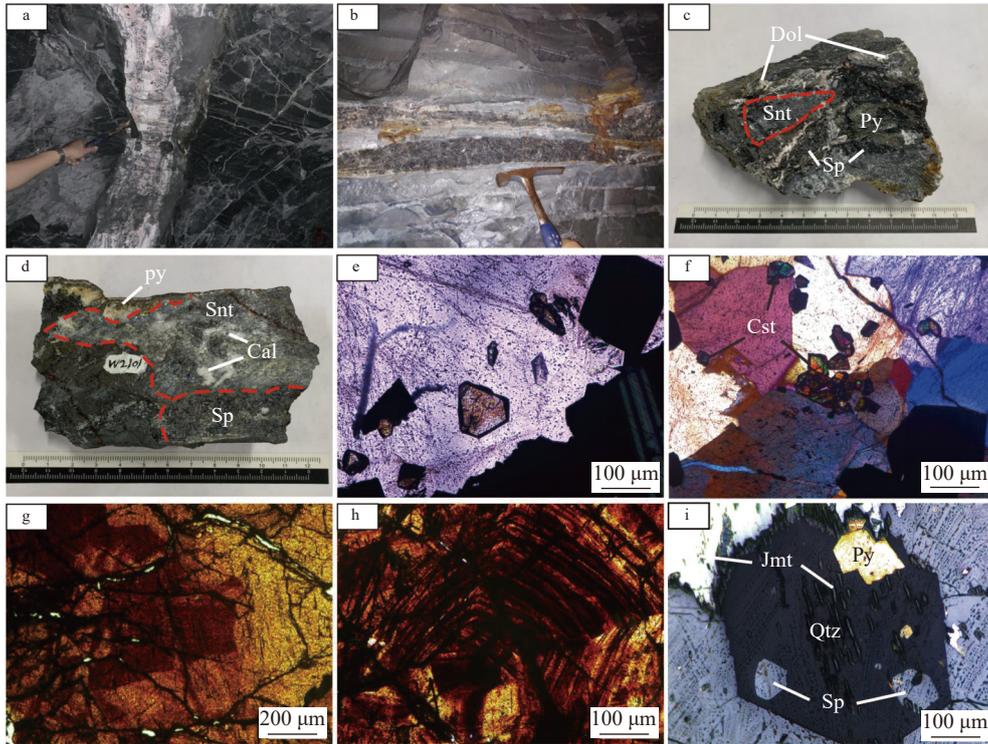
2 样品采集及测试方法

闪锌矿是箭猪坡矿床中的贯通性矿物, 据矿物组合特征和矿相学鉴定, 可划分为 2 期。早期闪锌矿颜色较浅, 为淡黄色, 呈半自形—他形粒状, 粒径 0.1~2 mm, 共生矿物主要为黄铁矿和石英。晚期闪锌矿为浅褐色—深褐色, 多呈半自形—他形粒状集合体产出, 粒径较大, 为 0.2~8 mm, 共生矿物主要为脆硫铅矿、辉锑矿、黄铁矿和石英。晚期闪锌矿发育较多的裂隙(图版 I -g), 常见生长环带(图版 I -h)。本次测试样品中的闪锌矿均属于晚期闪锌矿, 具体取样位置及样品特征见表 1。

采集的样品经蒸馏水清洗后干燥, 破碎至 40~60 目, 将石英等脉石矿物分离, 再用研钵研磨至 200 目, 最后在双目显微镜下挑选纯度大于 99% 的

闪锌矿单矿物进行分析测试。微量和稀土元素测试在自然资源部中南矿产资源监督检测中心完成, 测试方法为 ICP-MS 混酸消解法, 测定温度为 20℃, 湿度为 30%, 测试标准分别参照《硅酸盐岩石化学分析方法 第 30 部分: 44 个元素量测定》(GB/T 14506.30—2010)和《区域地球化学样品分析方法 第 32 部分: 镧、铈等 15 个稀土元素量测定 封闭酸溶—电感耦合等离子体质谱法》(DZ/T 0279.32—2016), 分析仪器型号为 ICP-MS X Series 2, 微量元素分析精度优于 15%, 稀土元素分析精度优于 5%。氢-氧同位素测试在核工业北京地质研究院分析测试研究中心完成, 测试对象为闪锌矿, 采用爆裂法打开闪锌矿中的原生包裹体, 通过金属 Zn 和 BrF₃ 制备 H₂、CO₂, 再将 H₂、CO₂ 通入 MAT-253 气体同位素质谱计进行氢-氧同位素测试, 测试标准参照《水中氢同位素锌还原法测定》和《硅酸盐及氧化物矿物中氧同位素组成的五氟化溴法测定》。氢、氧同位素以 SMOW 为标准, 氢同位素分析精度为±0.5‰, 氧同位素分析精度为±0.2‰。

图版 I Plate I



a.陡倾斜脉状铅-锌-锡矿体; b.似层状锡多金属矿体; c.脉状矿石手标本; d.似层状矿石手标本; e.似层状矿体中无色—淡黄色自形粒状锡石,产于石英中,透射光 $10 \times 10(-)$; f.似层状矿体中锡石粒状集合体及高级干涉色,透射光 $10 \times 10(+)$; g.似层状矿体中浅褐色—深褐色闪锌矿,发育有较多裂隙,透射光 $5 \times 10(-)$; h.脉状矿体中闪锌矿环带结构,透射光 $10 \times 10(-)$; i.似层状矿体中闪锌矿交代石英形成骸晶结构,反射光 $10 \times 10(-)$ 。Cal—方解石; Cst—锡石; Dol—白云石; Jmt—脆硫锑铅矿; Py—黄铁矿; Qtz—石英; Snt—辉锑矿; Sp—闪锌矿

表 1 箭猪坡铅锌矿床 2 类矿体采样位置及矿物组合

Table 1 Sampling location and mineral combination of the two types of ore bodies of the Jianzhupo Pb-Zn deposit

矿体类型	样品编号	采样位置	矿物组合
似层状矿体	J201	247中段305线	闪锌矿-黄铁矿-辉锑矿-脆硫锑铅矿
	J202	247中段305线	闪锌矿-脆硫锑铅矿-辉锑矿-黄铁矿
	J204	220中段307线	闪锌矿-脆硫锑铅矿-辉锑矿-黄铁矿
	J205	220中段307线	闪锌矿-脆硫锑铅矿-黄铁矿
	J215	220中段305线	黄铁矿-闪锌矿-辉锑矿-石英
脉状矿体	J208	190中段305线	闪锌矿-脆硫锑铅矿-黄铁矿-石英
	J209	190中段305线	闪锌矿-脆硫锑铅矿-黄铁矿-石英
	J211	160中段309线	闪锌矿-脆硫锑铅矿-黄铁矿
	J213	220中段307线	闪锌矿-脆硫锑铅矿-黄铁矿-白云石
	J214	220中段307线	闪锌矿-脆硫锑铅矿-黄铁矿-白云石

3 分析结果

3.1 闪锌矿微量元素

箭猪坡矿床中闪锌矿微量元素分析结果见表 2。

脉状矿体和似层状矿体中闪锌矿微量元素主要表现为以下特征。

(1)富集 Fe 且含量最高:脉状矿体中闪锌矿 Fe 含量为 1.87%~6.64%,平均 5.32%;似层状矿体中闪锌矿 Fe 含量为 6.02%~6.68%,平均 6.39%,略高于前者。2 类矿体中闪锌矿 Fe 含量高于层控型铅锌矿床闪锌矿的 Fe 含量(层控型 $Fe < 5\%$ (李徽, 1986),如 MVT 型长登坡、大梁子、老厂坪矿床 Fe 含量平均值分别为 0.56%、1.03%、3.08%(吴越等, 2019; 王皓宇等, 2021; 张沛等, 2021)),处于岩浆热液型矿床闪锌矿 Fe 含量的范围内($Fe > 5\%$ (李徽, 1986),如藏南扎西康矿床 Fe 含量为 3.73%~8.92%,平均 7.11%(张政等, 2016),甘肃花牛山矿床 Fe 含量为 5.69%~11.08%,平均 7.46%(康凯等, 2020))。

(2)富集 Cu:脉状矿体中闪锌矿 Cu 含量变化较大,为 470×10^{-6} ~ 5040×10^{-6} ,平均 2147.60×10^{-6} ;似层状矿体中闪锌矿 Cu 含量较高,为 1410×10^{-6} ~ 3790×10^{-6} ,平均 2770×10^{-6} 。二者与岩浆热液型(如藏南扎西康矿床、豫西骆驼山矿床 Cu 均值分别为 1416.74×10^{-6} 、 1695.75×10^{-6} (裴秋明等, 2015; 张政等, 2016))和矽卡

表 2 箭猪坡矿床 2 类矿体中闪锌矿微量元素分析结果

Table 2 Analysis results of trace elements of sphalerite in the two types of ore bodies of the Jianzhupo deposit

矿体类型元素	似层状矿体					脉状矿体				
	J201	J202	J204	J205	J215	J208	J209	J211	J213	J214
Fe	66800	65800	64400	60200	62300	57800	58800	64300	66400	18700
Co	0.28	0.16	0.20	0.18	1.13	0.16	0.12	0.05	0.03	0.47
Ni	2.03	1.76	4.45	1.22	2.95	2.54	1.14	1.29	1.03	2.80
Cu	3090	1410	3290	3790	2270	4140	5040	590	470	498
Pb	12600	2100	20200	24500	3230	39200	32700	1090	172	1880
Sb	11600	1880	13000	14200	3450	18800	16900	1130	121	978
Ag	266	51.60	55.70	95.60	239	58	65.60	22	5.85	10.90
As	149	19.10	67.10	56.50	10.40	66.70	47.20	19.30	7.43	11.90
Sn	788	751.61	3100	2619.70	644.61	3962.57	4890.69	332.18	209.71	462.30
Ga	7.26	7.06	6.87	6.71	6.98	5.90	5.52	6.46	8.56	3.81
Ge	2.74	1.63	0.80	3.09	2.48	1.35	0.55	0.15	0.14	0.71
In	6.87	6.31	14	8.23	13.20	11.90	14.50	102	133	3.77
In/Ga	0.95	0.89	2.04	1.23	1.89	2.02	2.63	15.79	15.54	0.99
In/Ge	2.51	3.87	17.50	2.66	5.32	8.81	26.36	680	950	5.31
Ga/In	1.06	1.12	0.49	0.82	0.53	0.50	0.38	0.06	0.06	1.01
Ge/In	0.40	0.26	0.06	0.38	0.19	0.11	0.04	0.0015	0.0011	0.19

注: 微量元素含量单位为 10^{-6}

岩型矿床中闪锌矿 Cu 含量(如湘南宝山矿床 Cu 含量均值为 2711×10^{-6} (张天栋等, 2021))相似。

(3)富集 Sn 且含量变化范围大: 脉状矿体中闪锌矿 Sn 含量为 $209.71 \times 10^{-6} \sim 4890.69 \times 10^{-6}$, 平均 1971.49×10^{-6} , 似层状矿体 Sn 含量较低, 为 $644.61 \times 10^{-6} \sim 3100 \times 10^{-6}$, 平均 1580.78×10^{-6} 。2 类闪锌矿 Sn 含量远高于贫 Sn 的层控型铅锌矿床(Sn 含量为 $28.7 \times 10^{-6} \sim 101 \times 10^{-6}$ (李徽, 1986)), 如 MVT 型长登坡、大梁子、老厂坪矿床闪锌矿 Sn 含量平均值分别为 1.07×10^{-6} 、 1.13×10^{-6} 、 1.35×10^{-6} (吴越等, 2019; 王皓宇等, 2021; 张沛等, 2021), SEDEX 型陕西铅矾山铅锌矿、二里河铅锌矿闪锌矿 Sn 含量平均值分别为 27.40×10^{-6} 和 1.94×10^{-6} (李厚民等, 2009), 处于岩浆热液型矿床闪锌矿范围内(Sn 含量为 $779 \times 10^{-6} \sim 3245 \times 10^{-6}$ (李徽, 1986))。其中脉状矿体 J208、J209 和似层状矿体 J204、J205 中 Sn 含量明显高于其他样品, 样品中 Sn 含量差异大可能与闪锌矿中存在锡石的包裹体有关。

(4)Ag 含量有差异: 脉状矿体 Ag 含量为 $5.85 \times 10^{-6} \sim 65.60 \times 10^{-6}$, 平均 32.47×10^{-6} ; 似层状矿体闪锌矿 Ag 含量相对较高, 为 $51.60 \times 10^{-6} \sim 266 \times 10^{-6}$, 平均 141.58×10^{-6} 。2 类闪锌矿分别处于层控型($Ag <$

100×10^{-6})和岩浆热液、火山热液型闪锌矿($Ag > 100 \times 10^{-6}$)范围内(韩照信, 1994)。

(5)In 含量低: 脉状矿体中闪锌矿 In 含量变化较大, 为 $3.77 \times 10^{-6} \sim 133 \times 10^{-6}$, 平均 53.03×10^{-6} ; In 含量在岩浆热液型和火山热液型区间内($In > 30 \times 10^{-6}$, 韩照信, 1994)。似层状矿体闪锌矿 In 含量低于前者且较稳定, 为 $6.31 \times 10^{-6} \sim 14 \times 10^{-6}$, 平均 9.72×10^{-6} , 在层控型铅锌矿床闪锌矿 In 含量($In < 20 \times 10^{-6}$, 韩照信, 1994)范围内。

(6)亏损 Ga、Ge: 脉状矿体中闪锌矿 Ga 含量为 $3.81 \times 10^{-6} \sim 8.56 \times 10^{-6}$, 平均 6.05×10^{-6} ; Ge 含量为 $0.14 \times 10^{-6} \sim 1.35 \times 10^{-6}$, 平均 0.58×10^{-6} 。似层状矿体闪锌矿 Ga 含量为 $6.71 \times 10^{-6} \sim 7.26 \times 10^{-6}$, 平均 6.98×10^{-6} ; Ge 含量为 $0.80 \times 10^{-6} \sim 3.09 \times 10^{-6}$, 平均 2.15×10^{-6} 。两者均低于层控型铅锌矿床闪锌矿 Ga、Ge 含量($Ga > 30 \times 10^{-6}$ 、 $Ge > 10 \times 10^{-6}$), 处于岩浆热液型和火山热液型闪锌矿范围内($Ga < 40 \times 10^{-6}$ 、 $Ge < 3 \times 10^{-6}$, 韩照信, 1994)。

此外, 本次测试中 2 类闪锌矿还富集 Pb、Sb, 亏损 Co、Ni(表 2)。总体而言, 2 类矿体中闪锌矿微量元素处于同一数量级, 均富集 Fe、Cu、Pb、Sn、Sb, 亏损 Ga、Ge、Co、Ni。但脉状矿体 Cu、Pb、Sb 含量变

化较大,而似层状矿体中 Fe、Cu、Ag 含量略高,Sn、In 含量较低。

3.2 闪锌矿稀土元素

箭猪坡矿床中闪锌矿稀土元素分析结果见表 3。由于部分稀土元素低于检测限,因此稀土元素特征只统计数据完整的样品。脉状矿体闪锌矿样品中(J213)稀土元素总量 ΣREE 为 3.34×10^{-6} ;轻、重稀土元素比值 LREE/HREE 为 14.80,轻稀土元素相对富集; La_N/Yb_N 值为 34.27,轻、重稀土元素具有一定程度分馏; δEu 值为 0.43,存在较强的负 Eu 异常; δCe 值为 0.70,表现为弱负 Ce 异常。

似层状矿体闪锌矿样品中(J201、J202 和 J215),稀土元素总量 ΣREE 为 $12.80 \times 10^{-6} \sim 44.31 \times 10^{-6}$,平均值为 23.65×10^{-6} ;轻、重稀土元素比值 LREE/HREE 为 21.19~34.19,平均 28.47,轻稀土元素较富集; La_N/Yb_N 值为 90.86~246.84,平均 167.73,轻、重

稀土元素分馏程度较高; δEu 值为 0.28~0.61,平均 0.41,存在较强的负 Eu 异常; δCe 值为 0.80~0.85,平均 0.83,表现为弱负 Ce 异常。

3.3 闪锌矿氢-氧同位素

箭猪坡矿床中闪锌矿氢-氧同位素分析结果见表 4。脉状矿体中 $\delta\text{D}_{\text{V-SMOW}}$ 值为 $-81.8\% \sim -69.2\%$,平均 -75.7% ,极差为 12.6% , $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ 值为 $2.1\% \sim 5.2\%$,平均为 4.1% ,极差为 3.1% 。似层状矿体 $\delta\text{D}_{\text{V-SMOW}}$ 值为 $-109.4\% \sim -75.2\%$,平均 -90.5% ,极差为 34.2% , $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ 值为 $-4.0\% \sim 4.0\%$,平均 -0.04% ,极差为 8.0% 。

4 讨论

4.1 成矿温度指示

成矿温度对矿床成因认识具有重要意义,Fe、Mg、Gd、In 等多种元素能以类质同象等方式进入闪

表 3 箭猪坡矿床 2 类矿体中闪锌矿稀土元素分析结果

Table 3 Analysis of rare earth elements of sphalerite in the two types of ore bodies of the Jianzhupo deposit

元素	似层状矿体					脉状矿体				
	J201	J202	J204	J205	J215	J208	J209	J211	J213	J214
La	11.70	3.23	2.55	2.29	3.80	2.40	1.83	0.05	0.86	0.17
Ce	19	5.28	1.67	0.89	5.76	0.14	<0.0050	<0.0050	1.19	<0.0050
Pr	2.28	0.67	0.21	0.11	0.70	0.0037	<0.0005	<0.0005	0.18	0.02
Nd	8.58	2.65	0.78	0.47	2.50	0.12	<0.0005	<0.0005	0.73	0.17
Sm	1.32	0.48	0.12	0.06	0.42	0.02	<0.0020	<0.0020	0.15	0.24
Eu	0.17	0.08	0.01	0.01	0.04	0.0049	<0.0020	0.0048	0.02	0.09
Gd	0.85	0.28	0.06	0.03	0.33	<0.0020	<0.0020	<0.0020	0.08	0.47
Tb	0.08	0.03	0.01	0.01	0.04	0.0021	0.0020	0.01	0.02	0.11
Dy	0.20	0.06	0.02	0.02	0.14	0.0026	0.01	0.03	0.05	0.66
Ho	0.02	0.0046	<0.0010	<0.0010	0.02	<0.001	<0.0010	0.01	0.01	0.12
Er	0.07	0.02	0.01	0.01	0.06	0.0026	0.01	0.02	0.03	0.28
Tm	0.0044	0.0014	0.0014	0.0015	0.01	<0.001	0.0030	0.0035	0.0032	0.04
Yb	0.03	0.01	<0.0020	0.02	0.03	0.0021	0.01	0.03	0.02	0.26
Lu	0.0038	0.0014	<0.0010	<0.0010	0.0017	<0.001	<0.0010	0.0035	0.0032	0.03
Y	0.49	0.15	<0.01	0.03	0.43	<0.01	0.03	0.13	0.23	3.19
ΣREE	44.31	12.80	/	/	13.84	/	/	/	3.34	/
LREE	43.05	12.39	5.34	3.82	13.22	2.73	/	/	3.13	/
HREE	1.26	0.41	/	/	0.62	/	/	/	0.21	1.97
LREE/HREE	34.19	30.04	/	/	21.19	/	/	/	14.80	/
La_N/Yb_N	246.84	165.49	/	102.66	90.86	819.77	164.08	1.28	34.27	0.47
δEu	0.46	0.61	0.25	0.45	0.28	/	/	/	0.43	0.83
δCe	0.85	0.83	0.42	0.27	0.80	0.04	/	/	0.70	/

注:稀土元素含量单位为 10^{-6}

表 4 箭猪坡矿床 2 类矿体中闪锌矿氢-氧同位素组成

Table 4 H-O isotope composition of sphalerite in the two types of ore bodies of the Jianzhupo deposit

矿体类型	样品编号	$\delta D_{V-SMOW}/\text{‰}$	$\delta^{18}O_{V-SMOW}/\text{‰}$
似层状矿体	J201	-109.4	-3.7
	J202	-96.1	-4.0
	J204	-77.7	1.7
	J205	-75.2	4.0
	J215	-94.3	1.8
脉状矿体	J208	-75.6	5.0
	J209	-69.2	5.2
	J211	-75.3	2.1
	J213	-81.8	4.6
	J214	-76.7	3.7

锌矿中, 记录成矿温度信息(Cook et al., 2009; Ye et al., 2011)。叶霖等(2016)研究认为, 高温下形成的闪锌矿相对富集 Fe、Mg、In、Sn、Te, 低温下形成的闪锌矿相对富集 Gd、Ga 和 Ge。本文统计了不同成矿温度和成因类型的矿床中闪锌矿微量元素含量和比值(表 5), 对比发现, 成矿温度由低到高, 闪锌矿中 Fe、In 总体趋向富集, Ga、Ge 则趋向亏损, 如中低温成矿的渝东南老厂坪铅锌矿床 Fe、In 含量平均为 3.08×10^{-2} 、 5.86×10^{-6} , Ga、Ge 含量平均为 62.10×10^{-6} 、

72.70×10^{-6} (王皓宇等, 2021); 中高温成矿的甘肃花牛山铅锌矿床 Fe、In 含量平均为 7.46×10^{-2} 、 355.61×10^{-6} , Ga、Ge 含量平均为 5.57×10^{-6} 、 0.38×10^{-6} (康凯等, 2020)。

前人统计表明, 中温环境(200~300°C)下形成的闪锌矿 In 含量集中于 11×10^{-6} ~ 240×10^{-6} , Ga 含量集中于 1.10×10^{-6} ~ 32×10^{-6} , 且成矿温度与闪锌矿 In/Ga 值总体呈正相关(刘英俊, 1984; 韩照信, 1994)。箭猪坡矿床中脉状矿体相对富集 Fe、In(平均分别为 5.32×10^{-2} 、 53.03×10^{-6}), 贫 Ga、Ge(平均分别为 6.05×10^{-6} 、 0.58×10^{-6}), In/Ga 平均值为 7.39; Fe 含量低于中高温铅锌矿床(如藏南扎西康铅锌矿床 Fe 含量平均为 7.11×10^{-2} (张政等, 2016), 甘肃花牛山铅锌矿床 Fe 含量平均为 7.46×10^{-2} (康凯等, 2020)), In、Ga 含量与中温闪锌矿特征一致, In/Ga 值高于中低温成矿的铅锌矿床(如四川大梁子铅锌矿床 In/Ga 值为 0.65(吴越等, 2019)), 同时均低于统计的中高温铅锌矿床(如豫西骆驼山硫镉多金属矿床 In/Ga 值为 55.59(裴秋明等, 2015))(表 5), 说明脉状矿体主要形成于中温环境。似层状矿体相对富 Fe(平均 6.39×10^{-2}), 贫 Ga、Ge(平均为 6.98×10^{-6} 和 2.15×10^{-6}), In 含量相对低(平均 9.72×10^{-6}), In/Ga 值为 1.40, 总体上也处于中温范围内。以上分

表 5 不同类型铅锌矿床中闪锌矿微量元素对比

Table 5 Contrast of trace elements of sphalerite in different types of Pb-Zn deposits

矿床	温度/类型	平均值							来源
		Fe	Cu	Sn	Ga	Ge	In	In/Ga	
陕西铅硐山铅锌矿(n=11)	SEDEX型	/	/	27.40	32.96	/	0.51	/	李厚民等, 2009
陕西二里河铅锌矿(n=9)	SEDEX型	/	/	1.94	33.81	/	0.20	/	
湖南长登坡铅锌矿床(n=4)	低温MVT型	0.56	43.07	1.07	6.17	31.59	0.03	0.08	张沛等, 2021
四川大梁子铅锌矿(n=20)	中低温MVT型	1.03	185.65	1.13	2.40	22.79	5.52	0.65	吴越等, 2019
渝东南老厂坪铅锌矿床(n=3)	中低温MVT型	3.08	289.78	1.35	62.10	72.70	5.86	0.12	王皓宇等, 2021
粤西庙山铜多金属矿床(n=10)	中高温矽卡岩型	3.96	32357	19.47	7.77	0.79	477.60	64.21	邢波等, 2016
湘南宝山铜铅锌多金属矿床(n=5)	中高温矽卡岩型	3.15	2711	217.62	33.78	8.94	120.67	631.73	张天栋等, 2021
湖南栗山铅锌铜多金属矿床(n=5)	中低温岩浆热液型	1.17	311.52	2.82	47.22	1.54	1.45	0.02	郭飞等, 2020
藏南扎西康铅锌矿床(n=7)	中高温岩浆热液型	7.11	1416.74	313.59	3.27	0.05	46.31	17.22	张政等, 2016
甘肃花牛山铅锌矿床(n=11)	中高温岩浆热液型	7.46	881.82	10.03	5.57	0.38	355.61	263.95	康凯等, 2020
豫西骆驼山硫镉多金属矿床(n=8)	中高温岩浆热液型	/	1695.75	/	10.19	/	513.5	55.59	裴秋明等, 2015
箭猪坡铅锌镉多金属矿床(n=19)		5.06	2558.14	103.09	5.87	/	296.66	61.75	刘涛涛等, 2020
箭猪坡矿床脉状矿体(n=5)		5.32	2147.60	1971.49	6.05	0.58	53.03	7.39	本文
箭猪坡矿床似层状矿体(n=5)		6.39	2770	1580.78	6.98	2.15	9.72	1.40	本文

注: 微量元素Fe含量单位为 10^{-2} , 其余含量单位分数为 10^{-6} , “/”为该元素未测试。箭猪坡矿床中主要含铅矿物为脆硫镉铅矿, 其他类型铅锌矿床中主要含铅矿物为方铅矿。刘涛涛等(2020)获得的箭猪坡矿床数据是针对脉状矿体中闪锌矿的分析结果

析表明,箭猪坡矿床中似层状矿体成矿温度与脉状矿体接近,两者均形成于中温环境。已有对脉状矿体流体包裹体测温结果集中在 220~320℃ 之间(蔡建明, 1995b; 陈玲等, 2015; Zhang et al., 2018; 张健等, 2018),与本次认识相符。

4.2 成矿物质(流体)来源

稀土元素被广泛应用于成矿流体的示踪和演化研究(王中刚, 1989)。由于稀土元素难以通过类质同象的方式选择性地进入硫化物的矿物晶格中,因此硫化物中的稀土元素主要取决于矿物结晶时成矿流体的稀土元素特征和物理化学条件(Wood, 2006)。稀土元素测试分析显示,似层状矿体闪锌矿中稀土元素总量较高($12.80 \times 10^{-6} \sim 44.31 \times 10^{-6}$),以轻稀土元素相对富集,较强的轻、重稀土元素分馏和 Eu、Ce 负异常为特征;稀土元素配分模式为右倾曲线, Eu 具有明显的“V”字形(图 3)。脉状矿体闪锌矿中稀土元素总量较低($\Sigma\text{REE}=3.34 \times 10^{-6}$),具有不明显的轻、重稀土元素分馏和负 Eu 异常。2 类矿体稀土元素配分模式相似,说明二者可能有相同的成矿来源,但脉状矿体中 J214 表现为轻稀土元素相对亏损,说明闪锌矿结晶时流体的稀土元素或物理化学条件发生了显著变化。因此,下文主要以似层状矿体稀土元素的分析结果探讨成矿物质(流体)来源。

稀土元素 Y 和 Ho 具有相似的性质,在地质作用中 Y、Ho 相对稳定而不易变化, Y/Ho 可用于示踪成矿物质来源(Bau et al., 1999)。箭猪坡矿床中似层状矿体闪锌矿 Y/Ho 值为 21.30~32.61(平均 26.40,

$n=3$),与围岩略有差异(Y/Ho=29.04~34.20, 平均 31.80, $n=2$ (李晔, 2021)),更接近邻近的大厂矿田龙箱盖花岗岩体 Y/Ho 值(21.54~31.58, 平均 26.58, $n=11$ (蔡明海等, 2014))。通常,花岗岩具有较强的负 Eu 异常,如龙箱盖花岗岩体 δEu 值为 0.16~0.45(平均 0.28, $n=11$ (蔡明海等, 2014)),箭猪坡矿床中似层状矿体闪锌矿的 δEu 值为 0.28~0.61, 负 Eu 异常程度小于龙箱盖花岗岩体。Eu 作为稀土元素中变价元素之一,在还原环境中会以 Eu^{2+} 与其他 REE³⁺ 分离导致正异常(王中刚, 1989)。箭猪坡矿床中大量发育的硫化物和矿体中发育的锡石表明,成矿流体具有还原性。但本次测试中闪锌矿稀土元素均具有负 Eu 异常,可能为闪锌矿继承了流体中稀土元素负 Eu 异常的特征,成矿流体在运移过程中物理化学条件(温度、压力、pH 和 Eh 值)的变化导致了 Eu 异常程度的改变。

氢-氧稳定同位素是示踪成矿流体来源的有效方法之一(张理刚, 1985; 郑永飞等, 2000)。闪锌矿是不含氧且不含羟基的矿物,其包裹体中的水无法与寄主矿物发生氢-氧同位素交换,因此闪锌矿的氢-氧同位素直接反映了成矿热液的氢-氧同位素组成(郑永飞等, 2000)。本次测试结果中,脉状矿体 δD 值为 $-81.8\text{‰} \sim -69.2\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}$ 值为 2.1‰~5.2‰; 似层状矿体 δD 值为 $-109.4\text{‰} \sim -75.2\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}$ 值为 $-4.0\text{‰} \sim 4.0\text{‰}$ 。在 $\delta\text{D}-\delta^{18}\text{O}$ 解(图 4)中,2 类矿体投影点均落于原生岩浆水和雨水线之间,接近原生岩浆水区域,但似层状矿体投影点更离散,表明二者可能有相同的成矿流体来源(以岩浆热液为主的混合热液)和不同的演化趋势。

箭猪坡矿床地处右江盆地边缘丹池褶断带中,区内 NW 向基底断裂发育,其影响深度达中下地壳或上地幔(孙德梅等, 1994),是大气降水向深处渗透的良好通道。因此,本文参照龙箱盖花岗岩体(距箭猪坡矿区最近的岩体,图 1-b)和研究区中生代大气降水的氢、氧同位素组成,计算区域大气降水和岩浆水在不同比例混合时(以 W/R 值为表征)混合流体的氢-氧同位素变化趋势(图 4)。结果表明,2 类闪锌矿氢-氧同位素投影点分布与同位素演化趋势基本符合,表明箭猪坡矿床中成矿流体的同位素组成受水-岩交换作用制约。似层状矿体投影点对应的水/岩值 W/R 为 0.02~0.5,脉状矿体投影点对应的水/岩值 W/R 为 0.01~0.05,说明似层状矿体的成矿流体中大气降水混入比例高于脉状矿体。

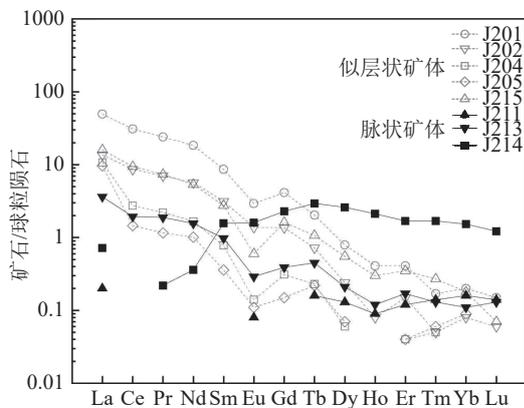


图 3 箭猪坡矿床 2 类矿体稀土元素配分模式图(标准化数据据 Sun et al., 1989)

Fig. 3 Rare earth elements distribution patterns of the two types of orebodies in the Jianzhupo deposit

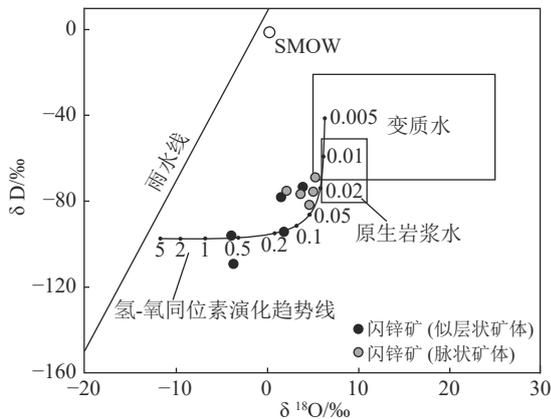


图 4 箭猪坡矿床氢-氧同位素图解(底图据 Sheppard et al., 1974; 氢-氧同位素演化趋势计算方法参考陈振胜等, 1989; 龙盖盖岩体 $\delta^{18}\text{O}$ 平均为 11.37‰, δD 平均为 70.5‰(梁婷等, 2012), 区域中生代大气降水取 $\delta^{18}\text{O}=-13.5\text{‰}$, $\delta\text{D}=-98\text{‰}$ (张理刚, 1985; 郑永飞等, 2000); 计算温度取箭猪坡矿床包裹体测温均值 270°C(张健等, 2018); 演化趋势线上的数值为水/岩比值(W/R 值))

Fig. 4 H-O isotope diagram of the Jianzhupo deposit

4.3 矿床成因类型

Ye et al.(2011)对中国南部不同类型铅锌矿床中闪锌矿的研究认为, 岩浆热液型矿床富集 Fe、Mn、In、Sn、Co, 而贫 Cd、Ga、Ge。前文统计中与岩浆有关的矿床, 在不同形成温度下 Fe 含量有一定的差异, 但多以 Fe、Cu、In、Sn 富集, Ga 和 Ge 贫化为特征, 与 MVT 型和 SEDEX 型(喷流沉积型)铅锌矿床相区别(表 5)。箭猪坡矿床中脉状矿体和似层状矿体均相对富集 Fe、Cu、Pb、Sn、Sb, 亏损 Ga、Ge、Co、Ni。在闪锌矿微量元素关系(图 5)中, 2 类矿体投影区域与岩浆热液型和矽卡岩型铅锌矿床相近, 明显区别于 MVT 型和 SEDEX 型铅锌矿床。

研究表明, Ga、Ge 和 In 均能以类质同象等方式进入闪锌矿中, Ga、Ge 倾向于在低温的非岩浆流体中富集(Bauer et al., 2019), In 多在岩浆演化后期残留于岩浆热液中而富集(Witt-Eickschen et al., 2009); 岩浆热液成因的闪锌矿, $\text{Ga}/\text{In}<1$ 且 $\text{Ge}<3\times 10^{-6}$ (周卫

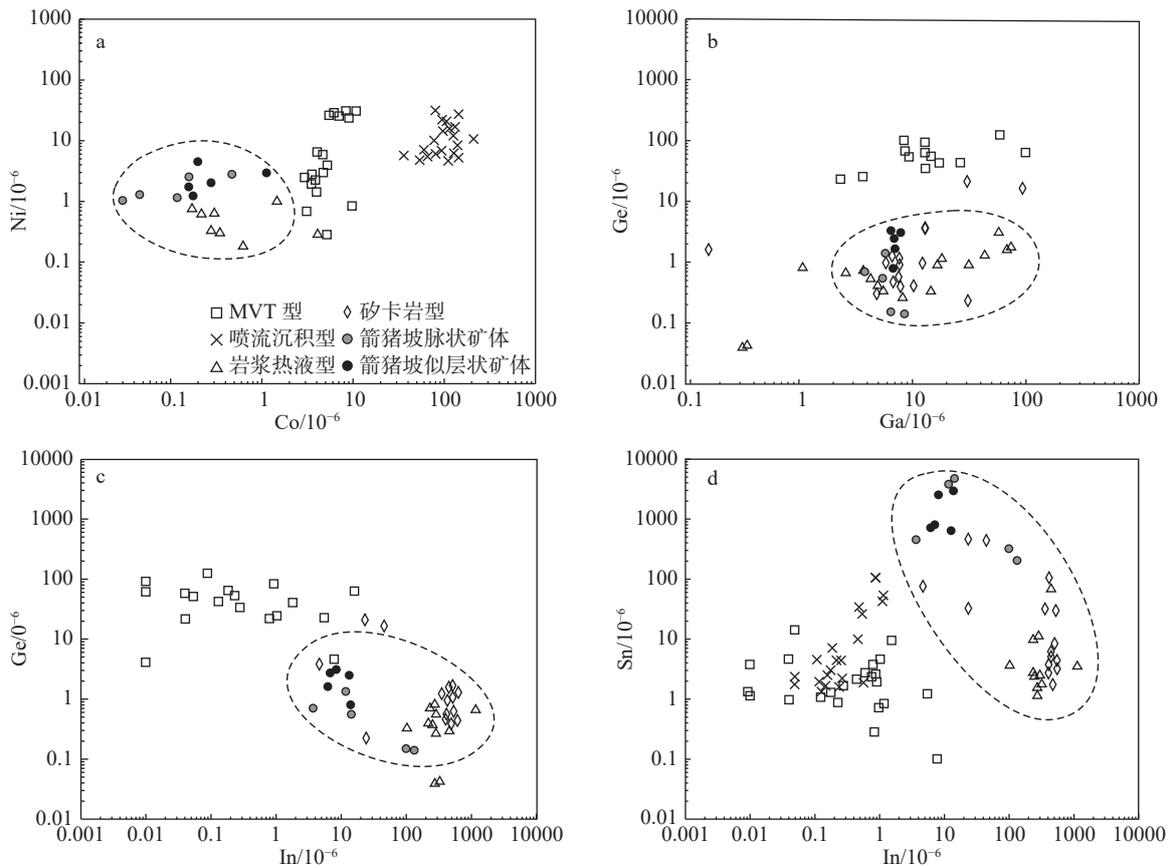


图 5 箭猪坡及其他铅锌矿床闪锌矿 Co-Ni(a)、Ga-Ge(b)、In-Ge(c)、In-Sn(d)关系图(岩浆热液型铅锌矿床数据据裴秋明等, 2015; 张政等, 2016; 康凯等, 2020; 矽卡岩型铅锌矿床数据据邢波等, 2016; 张天栋等, 2021; 喷流沉积型铅锌矿床数据据李厚民等, 2009; MVT 型铅锌矿床数据据李厚民等, 2009; 袁波等, 2014; 叶霖等, 2016; 吴越等, 2019; 张沛等, 2021)

Fig. 5 Diagram of Co-Ni (a), Ga-Ge (b), In-Ge (c), In-Sn (d) in sphalerite from the Jianzhupo and other Pb-Zn deposits

宁等, 1989)。箭猪坡矿床中脉状矿体闪锌矿 Ga/In 值为 0.06~1.01(平均 0.40), Ge 含量为 0.14×10^{-6} ~ 1.35×10^{-6} , 平均 0.58×10^{-6} ; 似层状矿体闪锌矿 Ga/In 值为 0.49~1.12(平均 0.80), Ge 含量为 0.80×10^{-6} ~ 3.09×10^{-6} , 平均 2.15×10^{-6} , 2 类闪锌矿的元素含量均处于岩浆热液成因范围内。将本次及刘涛涛等(2020)对箭猪坡矿床脉状矿体的闪锌矿测试数据投入 $\ln(\text{In})$ - $\ln(\text{Ga})$ 图解(图 6)中, 箭猪坡矿床绝大部分数据投影于岩浆热液区域, 其中本文测试的脉状矿体和似层状矿体集中于岩浆热液型和火山热液型矿床重叠区, 说明箭猪坡不同产状的矿体主要来源于岩浆热液。

箭猪坡矿床矿体产于围岩蚀变较弱的泥岩中, 成矿温度以中温为主; 其中脉状铅-锌-镉矿体充填于 NNW 向断裂和裂隙中, 与围岩界线清晰, 具有明显的构造控矿特征; 似层状锡多金属矿体以层状、细网脉状交代-充填于层间滑动破碎带, 围岩有较强的硅化, 以上地质特征均与层控型矿床(MVT 型、喷流沉积型)和矽卡岩型矿床相区别。Xiao et al.(2022)对箭猪坡矿床中锡石 LA-ICP-MS U-Pb 定年获得的成矿年龄为 90.2 ± 3.1 Ma, 该结果与丹池成矿带大厂矿田龙箱盖岩体的成岩年龄(96~91 Ma)和大厂铜坑矿床的成矿年龄(95~90 Ma)总体一致(蔡明海等, 2014; Guo et al., 2018)。箭猪坡矿床成矿年龄晚于印支期褶皱作用, 在燕山晚期的成矿作用过程中, 区内的构造作用以拉张-剪切为主(蔡明海等, 2014)。矿床上部由于上覆岩层压力较小, 处于相对开放体系,

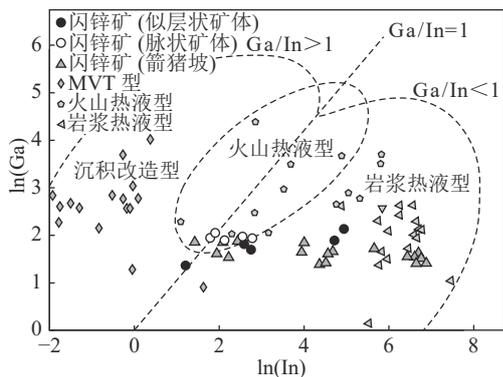


图 6 箭猪坡矿床闪锌矿 $\ln(\text{In})$ - $\ln(\text{Ga})$ 图解(底图据 Zhang et al., 1987; 岩浆热液型铅锌矿床数据据裴秋明等, 2015; 康凯等, 2020; 火山热液型铅锌矿床数据据 Zhang et al., 1987; Ye et al., 2011; MVT 型铅锌矿床数据据李厚民等, 2009; Ye et al., 2011; 袁波等, 2014; 吴越等, 2019)

Fig. 6 $\ln(\text{In})$ - $\ln(\text{Ga})$ diagram of sphalerite of the Jianzhupo deposit

因此, 成矿期的构造叠加变形多为张性和张扭性裂开, 裂隙的规模相对较大, 控制了脉状铅-锌-镉矿体的产出。矿床中下部由于有上覆岩层的压力作用, 同时地层岩性的软硬差异性较大, 在伸展剪切的构造作用下, 产生了一系列层间滑动和微裂隙组合构造, 控制了似层状锡多金属矿体的定位。

结合矿床地质特征和本次闪锌矿元素地球化学及氢-氧同位素分析, 笔者认为箭猪坡矿床属于岩浆热液型铅锌矿床, 脉状与似层状矿体为热液充填(交代)形成。

5 结 论

(1) 箭猪坡矿床脉状矿体中闪锌矿以 Fe、Cu、Sn 富集, Ga、Ge 亏损和相对高的 In 含量为特征; 似层状矿体中闪锌矿以 Fe、Cu、Sn 富集, Ga、Ge 亏损和较高的 Ag 含量为特征。2 类矿体的闪锌矿微量元素特征与岩浆热液型矿床相似, 明显区别于 MVT 型和喷流沉积型铅锌矿床。

(2) 稀土元素分析结果表明, 似层状矿体中稀土元素总量高于脉状矿体, 具有更明显的轻、重稀土元素分馏和 Eu 亏损。稀土元素配分模式的异同暗示两者可能有相同的成矿来源, 但脉状矿体经历了独特的成矿演化。Y/Ho 和 δEu 值则支持似层状矿体来源于岩浆热液的观点。

(3) 同位素分析结果指示, 箭猪坡矿床 2 类矿体的成矿流体主要来源于岩浆热液, 同时有大气降水混入, 且似层状矿体的成矿流体中大气降水混入的比例高于脉状矿体。

(4) 箭猪坡矿床属于中温环境下成矿的岩浆热液型铅锌矿床。

参 考 文 献

- Bau M, Dulski P. 1999. Comparing yttrium and rare earths in hydrothermal fluids from the Mid-Atlantic Ridge: Implications for Y and REE behaviour during near-vent mixing and for the Y/Ho ratio of Proterozoic seawater[J]. *Chemical Geology*, 155(1/2): 77-90.
- Bauer M E, Burisch M, Ostendorf J, et al. 2019. Trace element geochemistry of sphalerite in contrasting hydrothermal fluid systems of the Freiberg district, Germany: insights from LA-ICP-MS analysis, near-infrared light microthermometry of sphalerite-hosted fluid inclusions, and sulfur isotope geochemistry[J]. *Mineralium Deposita*, 54(2): 237-262.
- Cook N J, Ciobanu C L, Pring A, et al. 2009. Trace and minor elements in sphalerite: A LA-ICPMS study[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 73: 4761-4791.
- Guo J, Zhang R Q, Sun W D, et al. 2018. Genesis of tin-dominant

- polymetallic deposits in the Dachang district, South China: Insights from cassiterite U-Pb ages and trace element compositions[J]. *Ore Geology Reviews*, 95: 863–879.
- Sheppard S M F, Taylor H P. 1974. Hydrogen and oxygen isotope evidence for the origins of water in the Boulder batholith and the Butte ore deposits, Montana[J]. *Economic Geology*, 16(1): 926–946.
- Sun S S, McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes[J]. *Geological Society*, 42: 313–345.
- Witt-Eickchen G, Palme H, O'Neill H S C, et al. 2009. The geochemistry of the volatile trace elements As, Cd, Ga, In and Sn in the Earth's mantle: New evidence from in situ analyses of mantle xenoliths[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 6: 1755–1778.
- Wood S A. 2006. Rare earth element systematics of acidic geothermal waters from the Taupo volcanic zone, New Zealand[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 89(1/3): 424–427.
- Xiao C H, Chen Z L, Liu X C, et al. 2022. Structural analysis, mineralogy, and cassiterite U-Pb ages of the Wuxu Sb-Zn-polymetallic district, Danchi Fold-and-Thrust belt, South China[J]. *Ore Geology Reviews*, 150: 105150.
- Ye L, Cook N J, Ciobanu C L, et al. 2011. Trace and minor elements in sphalerite from base metal deposits in South China: A LA-ICPMS study[J]. *Ore Geology Reviews*, 39: 188–217.
- Zhang J, Huang W T, Liang H Y, et al. 2018. Genesis of the Jianzhupo Sb-Pb-Zn-Ag deposit and formation of an ore shoot in the Wuxu ore field, Guangxi, South China[J]. *Ore Geology Reviews*, 102: 654–665.
- Zhang Q. 1987. Trace elements in galena and sphalerite and their geochemical significance in distinguishing the genetic types of Pb-Zn ore deposits[J]. *Geochemistry*, 6(2): 177–130.
- 蔡建明, 徐新煌, 刘文周. 1995a. 广西五圩矿田多金属矿床的成矿特征及物质来源[J]. *矿物岩石*, (3): 63–68.
- 蔡建明, 徐新煌, 李保华. 1995b. 五圩多金属矿田包裹体地球化学特征研究[J]. *成都理工学院学报*, (1): 69–77.
- 蔡明海, 梁婷, 彭振安, 等. 2014. 大厂锡多金属矿田地质与成矿[M]. 北京: 地质出版社: 20–21.
- 蔡明海, 赵广春, 郑阳, 等. 2012. 桂西北丹池成矿带控矿构造样式[J]. *地质与勘探*, 48(1): 68–75.
- 陈玲, 黄文婷, 伍静, 等. 2015. 广西五圩矿田成矿温度变化及找矿方向分析[J]. *地球化学*, 44(6): 546–555.
- 陈振胜, 张理刚. 1989. 水/岩交换作用及其找矿[J]. *地质与勘探*, (2): 7–11.
- 广西区域地质调查研究院. 2018. 广西河池市金城江区拔旺矿区铅锌矿普查报告[R].
- 郭飞, 王智琳, 许德如, 等. 2020. 湖南栗山铅锌铜多金属矿床闪锌矿微量元素特征及成矿指示意义[J]. *地学前缘*, 27(4): 66–81.
- 韩照信. 1994. 秦岭泥盆系铅锌成矿带中闪锌矿的标型特征[J]. *西安地质学院学报*, 16(1): 12–17.
- 胡乔帆, 刘伟, 安玉伟, 等. 2017. 广西河池箭猪坡铅锌锡多金属矿床地球化学特征及矿床成因[J]. *地质论评*, 63(S1): 47–48.
- 康凯, 杜泽忠, 于晓飞, 等. 2020. 甘肃花牛山铅锌矿床闪锌矿 LA-ICP-MS 微量元素组成及其地质意义[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 50(5): 1418–1432.
- 李厚民, 王登红, 张长青, 等. 2009. 陕西几类重要铅锌矿床的矿物微量元素和稀土元素特征[J]. *矿床地质*, 28(4): 434–448.
- 李徽. 1986. 闪锌矿中杂质元素的特征及地质意义[J]. *地质与勘探*, (10): 42–46.
- 李晔. 2021. 桂西北箭猪坡矿床似层状 Sn-Pb-Zn-Sb 多金属矿成矿流体特征及控矿因素探讨[D]. 广西大学硕士学位论文.
- 梁婷, 蔡明海, 王登红, 等. 2012. 广西铜坑锡矿床总结研究报告[R].
- 刘艳荣, 关强兵, 张海东, 等. 2023. 大兴安岭西坡二道河子铅锌矿床硫化物 Rb-Sr、锆石 U-Pb 年龄及其对构造背景的制约[J]. *地质通报*, 42(11): 1843–1853.
- 刘涛涛, 朱传威, 王大鹏, 等. 2020. 广西五圩矿田箭猪坡 Pb-Zn-Sb 多金属矿床成因研究: 来自硫同位素和闪锌矿微量元素的制约[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 39(3): 646–662.
- 刘伟, 周守余, 丁汝福, 等. 2020. 广西箭猪坡矿床首次发现的石英脉型锡矿体特征及锡石微量元素地球化学意义[J]. *有色金属工程*, 10(9): 122–133.
- 刘英俊. 1984. 元素地球化学[M]. 北京: 科学出版社.
- 裴秋明, 张寿庭, 曹华文, 等. 2015. 豫西栾川县骆驼山硫锌多金属矿床闪锌矿微量元素地球化学特征及其地质意义[J]. *岩石矿物学杂志*, 34(5): 741–754.
- 孙德梅, 刘心铸, 彭聪, 等. 1994. 应用重磁资料研究广西芒场-大厂成矿带的地质构造及隐伏岩体预测[C]//中国地质科学院矿床地质研究所文集(27): 125–143.
- 万庆, 杨立功, 黄光琼, 等. 2016. 广西五圩箭猪坡铅锌锡矿床“西脉东层”找矿潜力分析[J]. *矿产与地质*, 30(2): 175–180.
- 王东明. 2012. 广西丹池成矿带锡矿成矿特征及成因探讨[D]. 长安大学硕士学位论文.
- 王皓宇, 叶霖, 胡宇思, 等. 2021. 渝东南老厂坪铅锌矿床闪锌矿微量元素组成特征[J]. *矿物学报*, 41(6): 623–634.
- 王中刚. 1989. 稀土元素地球化学[M]. 北京: 科学出版社.
- 吴越, 孔志岗, 陈懋弘, 等. 2019. 扬子板块周缘 MVT 型铅锌矿床闪锌矿微量元素组成特征与指示意义: LA-ICPMS 研究[J]. *岩石学报*, 35(11): 3443–3460.
- 邢波, 郑伟, 欧阳志侠, 等. 2016. 粤西庙山铜多金属矿床硫化物原位微区分析及 S 同位素对矿床成因的制约[J]. *地质学报*, 90(5): 971–986.
- 叶霖, 李珍立, 胡宇思, 等. 2016. 四川天宝山铅锌矿床硫化物微量元素组成: LA-ICPMS 研究[J]. *岩石学报*, 32(11): 3377–3393.
- 袁波, 毛景文, 闫兴虎, 等. 2014. 四川大梁子铅锌成矿物质来源与成矿机制: 硫、碳、氢、氧、锶同位素及闪锌矿微量元素制约[J]. *岩石学报*, 30(1): 209–220.
- 张健, 黄文婷, 伍静, 等. 2018. 广西五圩矿田箭猪坡铅锌锡多金属矿床成矿流体特征及特富矿体形成分析[J]. *地球化学*, 47(3): 257–267.
- 张理刚. 1985. 稳定同位素在地质科学中的应用[M]. 西安: 陕西科学技术出版社.
- 张沛, 吴越, 段登飞, 等. 2021. 湖南花垣矿区长登坡铅锌矿床闪锌矿微量元素组成与指示意义[J]. *资源环境与工程*, 35(2): 269–276.
- 张天栋, 刘忠法, 邸洪飞, 等. 2021. 湘南宝山铜铅锌多金属矿床闪锌矿元素地球化学特征及其对成矿的制约[J]. *矿产勘查*, 12(8): 1716–1726.
- 张政, 唐菊兴, 林彬, 等. 2016. 藏南扎西康矿床闪锌矿微量元素地球化学特征及地质意义[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 35(6): 1203–1216, 1289.
- 赵京, 蔡明海, 胡家刚, 等. 2016. 广西五圩矿田成矿分带特征及其地质意义[J]. *地质与勘探*, 52(1): 60–69.
- 赵毅, 黄理善, 唐艳萍, 等. 2020. 广西五圩锡多金属矿田深部隐伏岩体探索与找矿预测[J]. *矿产与地质*, 34(1): 109–114.
- 郑永飞, 陈江峰. 2000. 稳定同位素地球化学[M]. 北京: 科学出版社.
- 周卫宁, 傅金宝, 李达明. 1989. 广西大厂矿田铜坑-长坡矿区闪锌矿的标型特征研究[J]. *矿物岩石*, 9(2): 65–72.