

广西武宣县盘龙铅锌矿矿床成矿地球化学特征

薛 静^{1,2}, 戴塔根^{1,2}, 付松武^{1,2}

- (1. 中南大学 有色金属成矿预测教育部重点实验室, 长沙 410083;
2. 中南大学 地球科学与信息物理学院, 长沙 410083)

摘 要: 盘龙铅锌矿是桂中地区典型的大型铅锌矿床, 它位于广西大瑶山西侧铅锌多金属成矿带南段。为了确定该矿床成矿流体性质和成矿金属来源, 作者系统研究了矿床的稀土元素、硫铅同位素和流体包裹体特征。研究结果表明: 矿石和围岩的 ΣREE 较低, LREE 富集、具有显著的 Eu 正异常和弱 Ce 负异常; 矿石的硫同位素除了 3 件黄铁矿样品 $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$ 为 -17.90×10^{-3} 、 -21.00×10^{-3} 和 -20.60×10^{-3} , 其它硫化物的 $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$ 均落在 -7.10×10^{-3} ~ 7.70×10^{-3} 之间, 而重晶石样品的 $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$ 较高, 达 17.3×10^{-3} ~ 29.2×10^{-3} , 硫同位素分析结果暗示成矿物质来源于深源岩浆和泥盆纪海水的共同作用; 矿石的铅同位素 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 和 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 的变化范围分别为 18.376~18.438、15.763~15.852 和 38.763~39.060, 相似的铅同位素特征表明矿石的来源和成因是均一的、相同的, 并且具有壳源的特征。喷流成矿期成矿流体均一温度属中-低温($166\sim 289\text{ }^{\circ}\text{C}$)、低盐度($4.01\%\sim 14.07\%$)、低密度($0.804\sim 0.955\text{ g/cm}^3$), 成矿流体属于 $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}$ 体系。综合矿床地质和地球化学特征可知, 盘龙铅锌矿床显著区别于 MVT 型铅锌矿, 应属于海底喷流-沉积型铅锌矿。

关键词: 喷流-沉积; 稀土元素; 硫铅同位素; 铅同位素; 成矿流体; 大瑶山铅锌多金属成矿带

中图分类号: P618.42; P618.43

文献标志码: A

Metallogenic geochemistry characteristics of Panlong lead-zinc deposit in Wuxuan County, Guangxi Province

XUE Jing^{1,2}, DAI Ta-gen^{1,2}, FU Song-wu^{1,2}

- (1. Key Laboratory of Metallogenic Prediction of Nonferrous Metals, Ministry of Education, Central South University, Changsha 410083, China;
2. School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: The Panlong lead-zinc deposit in the central region of Guangxi Province is a typical giant lead-zinc deposit, lying in the southwestern side of the Dayaoshan lead-zinc mupltimetall zone in China. The REE, S isotope, Pb isotope and fluid inclusion geochemistry were discussed for understanding the source of the ore metal and the characters of ore-fluids in Panlong lead-zinc deposit. The results show that the low ΣREE and enriched LREE of the ore and wall rock pronounce the positive Eu anomaly and weak negative Ce anomaly. Most of sulfide $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$ values range from -7.1×10^{-3} to 7.7×10^{-3} , except for those of three pyrite samples with 17.9×10^{-3} , -21×10^{-3} and -20.6×10^{-3} , and those of barite samples range from 17.3×10^{-3} to 29.2×10^{-3} , which indicates that the sulfur of ore is mainly derived from the mantle and the sea water. The Pb isotope analyses reveal that the $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ and $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ ratios of the ore lead are 18.376~18.438, 15.763~15.852 and 38.763~39.060, respectively, which indicates that they have homogeneous, same source and geneses of Pb, and the lead shows characteristics of the upper crust lead. In sedimentary exhalative stage the ore-forming fluid is an $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}$ system, with medium to low temperature ($166\sim 289\text{ }^{\circ}\text{C}$), low salinity ($4.01\%\sim 14.07\%$) and low density ($0.804\sim 0.955\text{ g/cm}^3$). The geological and geochemical characteristics of the deposit lead to a conclusion that the Panlong lead-zinc deposit belongs to SEDEX deposit and is notably different from MVT deposit.

Key words: exhalative-sedimentation; rare earth element; S isotope; Pb isotope; ore-forming fluid; Dayaoshan lead-zinc mupltimetall zone

广西大瑶山西侧铅锌多金属成矿带是广西地区最为重要的成矿带,是重要的铅锌金属产地。近年来,在泥盆纪地层中相继发现了盘龙大型铅锌矿床、朋村中型铅锌矿床、古立中型铅锌矿床、乐梅铅锌矿床和风岩中型铅锌矿床等一系列大中型铅锌多金属矿床以及众多的小型矿床(矿点)^[1-3]。盘龙铅锌矿床就是该成矿带中一座受人瞩目大型铅锌多金属矿床,前人对盘龙铅锌矿床进行了研究,认为矿床成因为沉积-改造型铅锌矿^[4]。

盘龙铅锌矿床的地质特征和找矿勘查研究为许多国内矿床地质工作者所关注^[4-6],但矿床地球化学方面的研究十分薄弱,黄大放和黄庆武^[6]对盘龙铅锌矿床成矿流体的均一温度进行了探讨,李毅^[7]对矿床硫同位素来源进行了分析,但是对于成矿流体、成矿时代、矿床成因和成矿过程还缺乏研究。本文作者重点对盘龙铅锌矿床地质特征、成矿温度及流体成分、稀土元素特征、硫和铅同位素进行系统研究,探讨成矿物质来源及成矿作用,进而确定矿床成因。该项研究工作对于丰富大瑶山铅锌多金属成矿带金属矿床研究内容和指导铅锌矿找矿勘查工作具有重要的理论和实际意义。

1 成矿地质环境

盘龙铅锌矿床位于大瑶山西侧铅锌多金属成矿带南段,是桂中地区的重要铅锌多金属矿床之一。在大地构造位置上处于华南板块桂中凹陷带与大瑶山隆起的复合部位(见图1(a))。

矿区出露地层有寒武系、泥盆系及第四系(见图1(b))。寒武系地层出露为黄洞口组第一和第二段岩性段,主要为砂岩、粉砂岩、页岩及粉砂质页岩;泥盆系地层主要岩性为泥灰岩、灰岩、白云岩及泥岩,并夹有砂岩。下泥盆统分为7个组:莲花山组为一套紫红色砂岩;那高岭组以浅灰-灰色细砂岩为主,夹少量泥岩;郁江组为灰色-褐黄色泥岩;上伦组以白云岩为主,夹有白云质灰岩,局部夹有少量浅灰色-灰色硅质岩。该组地层上部白云岩呈中-粗晶结构,中厚层状,颜色以深灰色为主,局部具有白云石化和硅化现象。中-下部白云岩以微晶-细晶结构为主,薄-中厚层状,颜色比上部稍浅,靠近底部夹少量灰岩;二塘组以灰-深灰色灰岩与泥灰岩互层为主,夹杂泥质灰岩、钙质页岩和白云岩;官桥组为白云岩夹少量灰岩、生物碎屑灰岩和泥灰岩;大乐组为泥灰岩。其

中下泥盆统上伦组是区域铅锌多金属矿床的主要赋存地层,为矿区内分布最广和沉积厚度最大的地层单元,呈北东方向展布,整套岩层厚度为1 070.87 m。第四系为棕红色粘土层,富含铁锰质结核。

矿区处于大瑶山隆起带边缘,位于穹状背斜的西翼,在地层走向从南北转为北东东的部位,出现一系列平行不整合界面的断层和垂直于它们的横断层。前者有伸展拆离的特征,后者是拆离差异形成的正断层。它们切断矿体,均为成矿后断裂。在矿区内有3条断层 F_1 、 F_2 和 F_3 , F_1 和 F_2 为具有拆离性质的走向正断层, F_3 为横向正断层并形成于前两者之后。

区内并无岩浆岩分布,仅在其外围北北东向32 km处出露九贺花岗岩体和北东向19 km处出露东乡花岗岩体,其形成时代分别为燕山期和中-晚侏罗世。

2 矿床地质特征

2.1 矿体、矿化带产出特征

位于大瑶山西侧铅锌多金属成矿带南段的盘龙铅锌矿床,主要赋存于下泥盆统上伦组白云岩、重晶石岩及少量硅质岩中。矿体严格受到地层的控制,与地层整合产出,矿体厚度与白云岩发育程度成正比。地层产状为总体倾向 340° ,倾角 $75^\circ\sim 85^\circ$ 。地表发育重晶石和铁锰质堆积层,且重晶石已经达到大型矿床的规模。它们与铅锌矿体在空间上存在一定关系,由深部向浅部依次为白云岩→铅锌矿体→重晶石矿→铁锰堆积层。

盘龙铅锌矿床分为大岭矿段和翻山矿段,大岭矿段位于矿区的东部,呈北东向展布,地表矿化带长3 500 m,宽60~100 m。矿段由6个矿体构成,矿体由多层似层状、透镜状小矿体组成,个别呈现囊状,赋存于上伦组白云岩中的白云岩和少量重晶石岩中,由南西到北东由2、3、4、5、7、8号矿体组成,其中2号矿体为大岭矿段的主要矿体,长约830 m,平均厚度18.11 m,总体倾向 340° ,倾角 $75^\circ\sim 85^\circ$, $w(\text{Pb}+\text{Zn})=3\%\sim 15\%$ 。目前,2号矿体为盘龙铅锌矿的主要矿体,占整个矿床储量的95%。翻山矿段位于矿区的西部,呈北北西向展布,矿化带长2 500 m,宽50~80 m;矿段由8个矿(化)体构成,由多层似层状、透镜状小矿体组成,个别呈现囊状,矿体走向 $135^\circ\sim 85^\circ$,倾角 $70^\circ\sim 85^\circ$,主要赋存于官桥组白云岩或硅化白云岩中。该矿段均为零星小矿(化)体,规模较小,品位低,目前尚无开采价值。

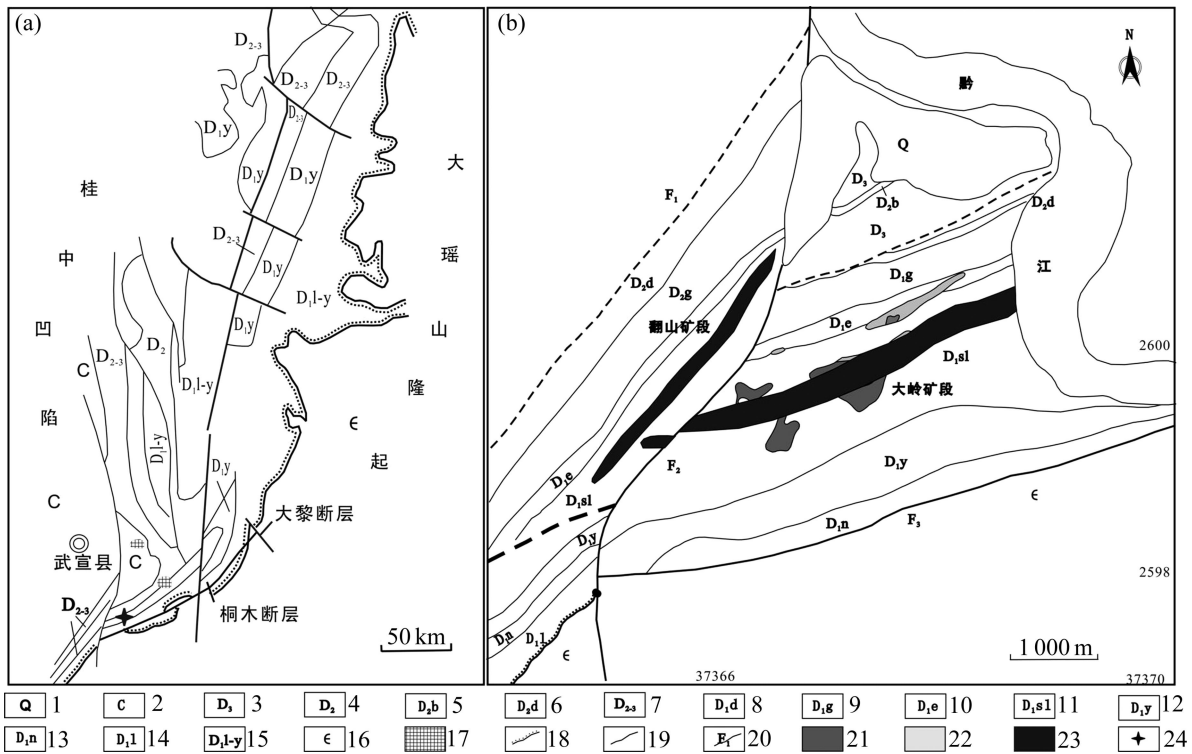


图 1 盘龙铅锌矿区域地质图(a)和矿区地质简图(b)(根据文献[5]修改)

1—第四系; 2—石炭系; 3—上泥盆统; 4—中泥盆统; 5—中泥盆统巴漆组; 6—中泥盆统东岗岭组; 7—泥盆系中统和上统; 8—下泥盆统大乐组; 9—下泥盆统官桥组; 10—下泥盆统二塘组; 11—下泥盆统上伦组; 12—下泥盆统郁江组; 13—下泥盆统那高岭组; 14—下泥盆统莲花山组; 15—下泥盆统莲花—郁江阶; 16—寒武系; 17—花岗岩体; 18—不整合界线; 19—地质界线; 20—断层及编号; 21—重晶石; 22—铁锰堆积层; 23—铅锌矿体; 24—矿区位置

Fig. 1 Simplified regional map(a) and ore-field geological map(b) of Panlong lead-zinc deposit (Modified from Ref. [5])

1—Quaternary; 2—Carboniferous; 3—Upper Devonian; 4—Middle Devonian; 5—Middle Devonian Baqi formation; 6—Middle Devonian Donggangling formation; 7—Middle and upper Devonian; 8—Lower Devonian Dale formation; 9—Lower Devonian Guanqiao formation; 10—Lower Devonian ertang formation; 11—Lower Devonian Shanglun formation; 12—Lower Devonian Yujiang formation; 13—Lower Devonian Nagaoling formation; 14—Lower Devonian Lianhuashan formation; 15—Lower Devonian Lianhua-Yujiang stage; 16—Cambrian; 17—Granit; 18—Unconformity boundary; 19—Geological boundary; 20—Default and it's number; 21—Barite; 22—Fe-Mn Accumulation layer; 23—Pb-Zn orebody; 24—Mining area location

2.2 矿石组成

矿石矿物组成比较简单, 主要的金属矿物有闪锌矿、黄铁矿和方铅矿, 次要金属矿物为白铁矿、毒砂、微量的磁黄铁矿等, 脉石矿物主要是重晶石、方解石、白云石和石英等。矿物粒度非常细小是矿石最显著的特点, 闪锌矿颜色主要为浅灰色、棕红色和淡黄色, 主要呈微细粒浸染状, 粒径为 0.05~0.15 mm, 环带结构简单。方铅矿多数呈它形粒状、不规则状、浸染状分布, 粒径为 0.02~0.40 mm, 与闪锌矿、黄铁矿或白云石交代溶蚀呈港湾状, 或呈细脉状穿插在重晶石的裂隙中。黄铁矿的粒度更为细小, 黄铁矿集合体粒径为 0.05~2 mm。重晶石为主要脉石矿物之一, 呈自形板柱状, 长达 2~10 mm, 杂乱排列, 集合体呈束状、

不规则脉状、团块状或脉状, 金属硫化物常充填于其晶体间。

2.3 矿石的结构构造

铅锌矿床矿石结构构造记录了成矿物质迁移和演化机制, 并反映成矿温度、压力和组份等特征, 具有重要的成因指示意义, 因此, 受到诸多学者的关注^[8]。与其它类型的矿床相比, 盘龙铅锌矿床具有典型的同生沉积特征, 主要的矿石结构构造有: 浸染状构造、块状构造、条带—条纹状构造、角砾状构造、胶状和草莓状构造等。

1) 浸染状—稠密浸染状构造。该类矿石在矿床中分布最广, 矿床中大多数低品位的矿石均为浸染状构

造,这一构造特征可能是当海底热水压力大于静水压力但小于静岩压力时,硫化物沉淀以交代作用为主,从而形成浸染状矿石。

2) 块状构造。这类矿石主要产在矿体富集中心,手标本上可见闪锌矿和方铅矿呈块状,与重晶石和黄铁矿共生。镜下观察表明,这些块状矿石是由无数颗粒细小的硫化物组成。这类矿石可能是海底热水沉淀的硫化物在海底凹地快速堆积的产物^[9]。

3) 条带-层纹状构造。矿石中具有条带状和层纹状构造,主要由重晶石、白云岩与闪锌矿、胶黄铁矿和方铅矿按照不同比例互层构成。这种构造是典型的海底热水沉积矿石构造,主要形成于海底热液活动相对较平静、海水较深的热泉或喷气孔附近^[10]。它可能是由于喷流作用形成的硫化物与正常的海底沉积物形成的互层。

4) 层间揉皱构造。矿床中普遍发育层间塑性变形构造,如层纹状重晶石-闪锌矿中的层间揉皱现象,在揉皱的转折端闪锌矿-黄铁矿纹层明显变厚,而揉皱的翼部纹层则被拉长变薄,甚至尖灭。

5) 胶状结构、草莓状构造。矿床中黄铁矿集合体普遍呈鲕粒状、胶状结构和草莓状结构。胶状结构比较普遍,它是胶状黄铁矿同心圈层状结构,圈层较厚,层数较少。草莓状黄铁矿的形成是海底热水脉动喷流与嗜热微生物共同作用的产物^[11],它是富硫化物的热液在海底喷流出后,在排气口或热泉口附近发生的一种胶体硫化物的沉淀作用形成的,它们常常被认为是还原性沉积环境的标志^[12]。

2.4 围岩蚀变

矿区含矿围岩蚀变比较简单,蚀变类型有重晶石化、白云石化、黄铁矿化和硅化等,均与成矿关系密切。重晶石化是本区围岩蚀变最显著的特点,重晶石化顺层发育,主要以透镜状、团块状及少量细脉状胶结或交代白云岩或白云岩角砾的形式出现。

3 矿床地球化学特征

本次研究用于稀土元素分析的样品主要采自大岭矿段坑道和钻孔岩心,样品的选择基于详细的岩芯观察以及岩石薄片显微结构鉴定。为了降低新鲜样品的污染程度,用 1.7 mol/L HCl 在 60 °C 以下对样品中细粒的碎屑物质进行溶解,样品采用等离子质谱分析,检测限: La 为 0.2×10^{-6} ,其他稀土元素为 0.1×10^{-6} ;分析精度: La 10%, Ce 14%,其他稀土元素 15 %。

用于硫、铅同位素分析的样品为采自于矿区-70 m 中段和-20 m 中段内的新鲜铅锌矿石。硫同位素测试工作是在中国地质科学院矿产资源研究所同位素实验室 MAT-253 质谱计上完成的,分析精度为 $\pm 0.2 \times 10^{-3}$ 。铅同位素测试工作在核工业北京地质研究院同位素实验室 ISOPROBE-T 热电质谱计上完成的,分析精度为 $\pm 0.2 \times 10^{-3}$ 。

3.1 稀土元素特征

本次研究选取了 20 件标本作为典型样品进行了稀土元素的测试、分析,其中浸染状铅锌矿石样品 6 件,块状铅锌矿石 6 件,远矿围岩 5 件和近矿围岩 3 件。样品中 REE 的浓度、元素比值、Ce 异常和 Eu 比值见表 1 和图 2,测试结果利用球粒陨石的稀土元素含量标准化。

1) 块状矿石(见图 2(a))。块状铅锌矿石 ΣREE 为 $6.32 \times 10^{-6} \sim 15.17 \times 10^{-6}$,较高的轻稀土/重稀土元素比值($\text{LREE}/\text{HREE}=4.11 \sim 12.22$),显示轻重稀土分馏程度较高;模式斜率($\text{La}/\text{Yb})_N=3.90 \sim 14.31$,轻稀土元素的分馏程度 [$(\text{La}/\text{Sm})_N=2.91 \sim 7.47$] 强于重稀土元素 [$(\text{Tb}/\text{Yb})_N=0.25 \sim 0.89$], Eu 正异常明显 ($\delta\text{Eu}=4.80 \sim 10.54$), Ce 为中等的负异常($\delta\text{Ce}=0.38 \sim 0.82$)。

2) 浸染状矿石(见图 2(b))。浸染状铅锌矿石 ΣREE 为 $6.13 \times 10^{-6} \sim 28.46 \times 10^{-6}$,较高的轻稀土/重稀土元素比值($\text{LREE}/\text{HREE}=6.39 \sim 8.99$),显示轻重稀土分馏程度较高;模式斜率($\text{La}/\text{Yb})_N=2.98 \sim 6.27$,轻稀土元素的分馏程度 [$(\text{La}/\text{Sm})_N=1.97 \sim 4.33$] 强于重稀土元素 [$(\text{Tb}/\text{Yb})_N=0.72 \sim 1.22$], Eu 正异常明显 ($\delta\text{Eu}=7.90 \sim 54.09$), Ce 为弱或不明显的负异常($\delta\text{Ce}=0.43 \sim 0.76$)。

3) 近矿围岩(见图 2(c))。这类白云岩 ΣREE 为 $4.43 \times 10^{-6} \sim 11.31 \times 10^{-6}$;较高的轻稀土/重稀土元素比值($\text{LREE}/\text{HREE}=9.19 \sim 15.41$),显示轻重稀土分馏程度较高;模式斜率($\text{La}/\text{Yb})_N=9.76 \sim 24.78$,稀土配分曲线向右倾,表明轻稀土相对富集;轻稀土元素的分馏程度 [$(\text{La}/\text{Sm})_N=4.68 \sim 5.59$] 强于重稀土元素 [$(\text{Tb}/\text{Yb})_N=1.18 \sim 1.43$], Eu 正异常明显($\delta\text{Eu}=1.40 \sim 4.13$), Ce 为弱或不明显的负异常($\delta\text{Ce}=0.91 \sim 0.94$)。

4) 远矿围岩(见图 2(d))。这类白云岩 ΣREE 为 $10.90 \times 10^{-6} \sim 20.46 \times 10^{-6}$;较高的轻稀土/重稀土元素比值($\text{LREE}/\text{HREE}=8.16 \sim 12.82$),显示轻重稀土分馏程度较高;模式斜率($\text{La}/\text{Yb})_N=8.74 \sim 14.06$,稀土配分曲线向右倾,表明轻稀土相对富集;轻稀土元素的分馏程度 [$(\text{La}/\text{Sm})_N=3.38 \sim 6.29$] 强于重稀土元素 [$(\text{Tb}/\text{Yb})_N=1.25 \sim 1.60$], Eu 正异常明显($\delta\text{Eu}=1.50 \sim 2.65$), Ce 为弱或不明显的负异常($\delta\text{Ce}=0.96 \sim 1.03$)。

两类围岩样品以稀土总量较低, 轻稀土富集、重稀土亏损, Ce 负异常, 显著的 Eu 正异常为主要特征。与矿石所具有的稀土元素特征较为相似, 反映了矿石中的稀土元素特征继承了原岩的特点。

表 1 盘龙铅锌矿白云岩和矿石稀土元素分析结果及有关参数

Table 1 REE and related parameters of samples in Panlong lead-zinc deposit

样号	样品名	Mass fraction/10 ⁻⁶																LREE/	La _N /	Tb _N /	La _N /	δEu	δCe
		La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y	ΣREE	HREE	Sm _N	Yb _N	Yb _N		
P315	浸染状 矿石	1.3	1.8	0.24	1.1	0.3	0.56	0.36	0.04	0.14	0.03	0.07	0.01	0.14	0.04	1.2	6.13	6.39	2.73	1.22	6.27	7.90	0.76
P281	浸染状 矿石	2.4	1.9	0.19	1.1	0.71	9.42	1.09	0.09	0.05	0.02	0.05	0.02	0.41	0.15	1	17.6	8.36	2.13	0.94	3.96	48.39	0.57
P282	浸染状 矿石	2.4	2.2	0.21	1	0.42	6.1	0.71	0.06	0.09	0.03	0.08	0.01	0.35	0.11	1.2	13.77	8.56	3.60	0.73	4.63	49.77	0.64
P249	浸染状 矿石	4.4	2.8	0.19	1.1	1.02	15.95	1.7	0.12	0.07	0.02	0.08	0.05	0.71	0.25	1.2	28.46	8.49	2.72	0.72	4.19	54.09	0.51
P251	浸染状 矿石	2.6	1.4	0.12	1	0.83	12.15	1.34	0.11	0.08	0.02	0.06	0.04	0.59	0.19	1	20.53	7.45	1.97	0.80	2.98	51.69	0.43
P252	浸染状 矿石	2.2	2.2	0.18	0.8	0.32	4.55	0.56	0.05	0.06	0.03	0.08	0.02	0.26	0.08	0.7	11.39	8.99	4.33	0.82	5.72	47.62	0.71
P302	块状铅 锌矿	3.6	4.8	0.48	1.5	0.31	0.31	0.29	0.02	0.18	0.04	0.14	0.02	0.17	0.04	1.3	11.9	12.22	7.31	0.50	14.31	4.85	0.82
P303	块状铅 锌矿	4.5	4.6	0.51	1.9	0.71	1.22	0.74	0.07	0.21	0.04	0.14	0.04	0.39	0.1	1.9	15.17	7.77	3.99	0.77	7.80	7.87	0.67
P304	块状铅 锌矿	3	1.4	0.12	1	0.65	1.85	1.02	0.07	0.05	0.02	0.06	0.04	0.52	0.17	1.6	9.97	4.11	2.91	0.58	3.90	10.24	0.38
P305	块状铅 锌矿	3.2	3.9	0.41	1.4	0.36	0.38	0.38	0.04	0.23	0.06	0.17	0.02	0.27	0.05	1.7	10.87	7.91	5.59	0.63	8.01	4.80	0.76
P307	块状铅 锌矿	1.9	2.3	0.24	0.8	0.16	0.28	0.17	0.01	0.13	0.02	0.1	0.01	0.17	0.03	0.9	6.32	8.88	7.47	0.25	7.55	7.93	0.76
P308	块状铅 锌矿	3.3	2.9	0.27	1.2	0.42	1.1	0.55	0.05	0.07	0.02	0.05	0.02	0.24	0.07	1.1	10.26	8.59	4.95	0.89	9.29	10.54	0.63
P310	近矿 围岩	1.6	2.7	0.28	1	0.18	0.05	0.14	0.02	0.12	0.02	0.07	0.03	0.06	0.01	0.7	6.28	12.36	5.59	1.43	18.02	1.48	0.94
P311	近矿 围岩	1.1	1.9	0.22	0.7	0.13	0.11	0.12	0.01	0.05	0.01	0.03	0.01	0.03	0.01	0.5	4.43	15.41	5.33	1.43	24.78	4.13	0.91
P312	近矿 围岩	2.6	4.7	0.55	1.9	0.35	0.1	0.32	0.05	0.28	0.06	0.16	0.03	0.18	0.03	1.5	11.31	9.19	4.68	1.19	9.76	1.40	0.93
P275	远矿 围岩	2.2	4.3	0.47	2.2	0.41	0.13	0.4	0.05	0.29	0.06	0.19	0.01	0.17	0.02	2.1	10.9	8.16	3.38	1.26	8.74	1.50	1.00
P285	远矿 围岩	4.6	8.2	0.73	2.7	0.52	0.3	0.54	0.07	0.31	0.07	0.21	0.03	0.24	0.03	2.1	18.55	11.37	5.57	1.25	12.95	2.65	1.03
P286	远矿 围岩	2.9	5	0.47	1.9	0.37	0.18	0.38	0.06	0.3	0.06	0.15	0.02	0.19	0.02	1.8	12	9.17	4.93	1.35	10.31	2.25	0.99
P287	远矿 围岩	3.5	6.2	0.66	2.4	0.43	0.18	0.51	0.09	0.38	0.08	0.24	0.02	0.24	0.03	2.1	14.96	8.41	5.12	1.60	9.85	1.78	0.96
P288	远矿 围岩	5.2	9.1	0.88	3.1	0.52	0.18	0.39	0.08	0.37	0.08	0.26	0.02	0.25	0.03	2.1	20.46	12.82	6.29	1.37	14.06	1.87	0.99

注: 样品测定工作由中南大学有色金属成矿预测教育部重点实验室完成。

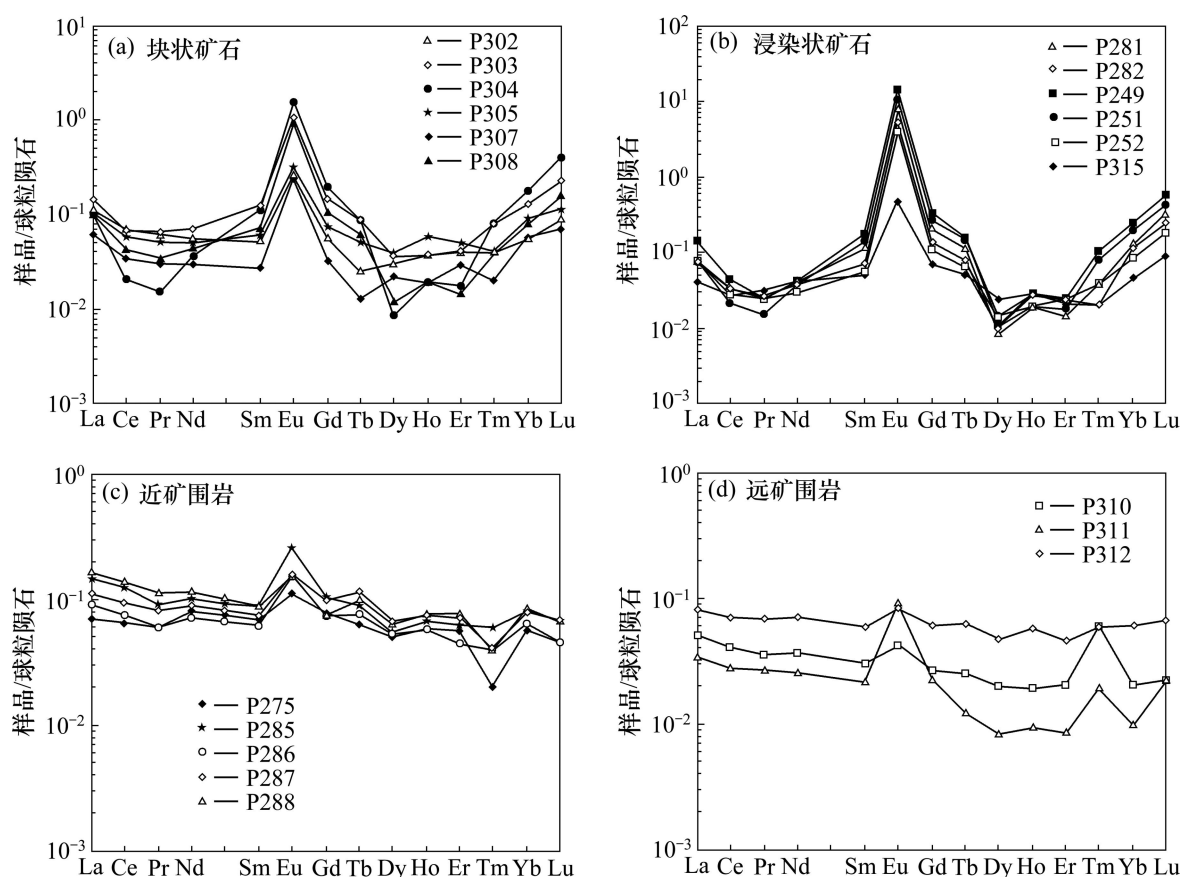


图2 盘龙铅锌矿矿石和围岩稀土元素配分图

Fig. 2 REE distribution patterns of mineralization ores and its host rocks from Panlong lead-zinc deposit

3.2 同位素特征

3.2.1 硫同位素特征

盘龙铅锌矿床中热液硫化物主要为黄铁矿、闪锌矿和方铅矿，硫酸盐矿物为重晶石。含矿地层中也含有少量的沉积-成岩黄铁矿。矿床的硫化物、硫酸盐样品的硫同位素组成结果见表2和图3。

1) 以闪锌矿和黄铁矿为主的硫化物 $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$ 的值分布范围较宽，主要集中在 $-21.00 \times 10^{-3} \sim 7.70 \times 10^{-3}$ 之间，众数值在 $-2.0 \times 10^{-3} \sim 4.0 \times 10^{-3}$ 范围内，峰值为 -1.0×10^{-3} ，平均值为 -0.96×10^{-3} ；除了3件样品，其它的黄铁矿样品的 $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$ 值都集中于 $-4.9 \times 10^{-3} \sim 4.9 \times 10^{-3}$ ，平均值为 0.69×10^{-3} ；闪锌矿 $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$ 值为 $-7.1 \times 10^{-3} \sim 7.7 \times 10^{-3}$ ，平均值为 1.71×10^{-3} ；方铅矿 $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$ 值为 $-7.2 \times 10^{-3} \sim 1.5 \times 10^{-3}$ ，平均值为 -4.9×10^{-3} 。从上述数据可以看出，黄铁矿、闪锌矿和方铅矿的 $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$ 值变化较大，这表明硫化物阶段物理化学条件变化较大。

在平衡条件下，热液硫化物富集 $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$ 的顺序为：黄铁矿 > 磁黄铁矿 > 闪锌矿 > 方铅矿，区内的样品不能满足这个条件，含矿流体硫同位素分馏未达平

衡，因此，不能利用硫化物矿物对计算同位素平衡温度和推断含矿溶液的总硫同位素组成。这种共生的硫化物之间同位素的不平衡关系在海底块状硫化物矿床中均十分常见，它可能是矿石在海底的生长过程中常发生频繁的破碎、机械迁移以及再沉积等作用造成的。大部分黄铁矿和闪锌矿样品硫同位素值比较集中，说明其来源于上地幔或深部地壳。3件黄铁矿样品(Sp6、P10和P11)及方铅矿样品的 $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$ 为负值，且变化范围较大，显示为明显的硫酸盐细菌还原特征，暗示当时海水硫酸盐的浓度至少在局部地区已达到 1 mmol/L 以上^[13]，同时也暗示当时为一种滞留、缺氧和分层的大洋环境^[14]，表明铅锌矿在成矿过程中有大量细菌参与成矿。

2) 硫酸盐重晶石 $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$ 值为 $17.3 \times 10^{-3} \sim 29.2 \times 10^{-3}$ ，主要集中在 $22 \times 10^{-3} \sim 26 \times 10^{-3}$ 。研究表明：新元古代和古生代时期具有海相特征的硫酸盐 $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$ 的值为 $12 \times 10^{-3} \sim 38 \times 10^{-3}$ ^[15]，又有学者认为泥盆系海水中硫酸盐 $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$ 的值为 $17.5 \times 10^{-3} \sim 25.0 \times 10^{-3}$ ^[16]，研究区重晶石的 $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$ 值为 $17.3 \times 10^{-3} \sim 29.2 \times 10^{-3}$ ，与泥盆纪海水硫酸盐的硫同位

表 2 盘龙铅锌矿硫化物和重晶石的硫同位素

Table 2 Sulfur isotope compositions of sulfides and barite in Panlong lead-zinc deposit

样品	位置	产状描述	$\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}/10^{-3}$				资料来源
			重晶石	闪锌矿	方铅矿	黄铁矿	
P73A	403 采场	乳白色条带状重晶石	28				本次研究
P121B	307 采场	乳白色条带状重晶石	27.7				
P501A	403 采场	乳白色块状重晶石	29.2				
P501B	403 采场	透明无色块状重晶石	17.6				
P125	307 采场	角砾状铅锌矿矿石		3.5		3.5	
P87	305 采场	角砾状铅锌矿矿石		1.6		-6.4	
P105	412 采场	条带状铅锌矿石		2.6		0.4	
P123	307 采场	致密块状矿石		2.7		3.1	文献[3]
Sp3	25 m 中段	块状铅锌矿石		1.1		-4.9	
Sp12	-20 m 中段	块状铅锌矿石		-0.2		-1.4	
Sp16	-20 m 中段	浸染状铅锌矿石					
Sp17	25 m 中段	胶状铅锌矿石				2.5	
Sp18	-20 m 中段	条带状铅锌矿石				-2	
Sp19	-20 m 中段	鲕状铅锌矿石				3	
Sp21	-20 m 中段	块状铅锌矿石			-1.5	2.8	
Sp22	-20 m 中段	块状铅锌矿石		0.8		-1.4	
Sp23	-20 m 中段	块状铅锌矿石		-1.1			
Sp5	25 m 中段	重晶石	26				
Sp6	25 m 中段	重晶石铅锌矿矿石	26.4			-17.9	
Sp14		重晶石铅锌矿矿石	23.8				
P1		块状铅锌矿石		5.8		4.9	文献[2]
P2		块状铅锌矿石		4.9			
P4		块状铅锌矿石			-6.1		
P5		块状铅锌矿石				2.7	
P6		块状铅锌矿石		7.3			
P7		块状铅锌矿石		7.7			
P12		块状铅锌矿石		-2.4			
P29		块状铅锌矿石		3.61			
P30		块状铅锌矿石		-0.8			
P31		块状铅锌矿石		2.7			
P32		块状铅锌矿石		-7.1			
P3		重晶石铅锌矿	17.3				
P8		重晶石铅锌矿	21.6		-7.2		
P9		重晶石铅锌矿	19.6				
P10		重晶石铅锌矿	24.2			-20.6	
P11		重晶石铅锌矿	22.1			-21	

注：样品测定工作由中国地质科学院矿产资源研究所稳定同位素实验室完成。

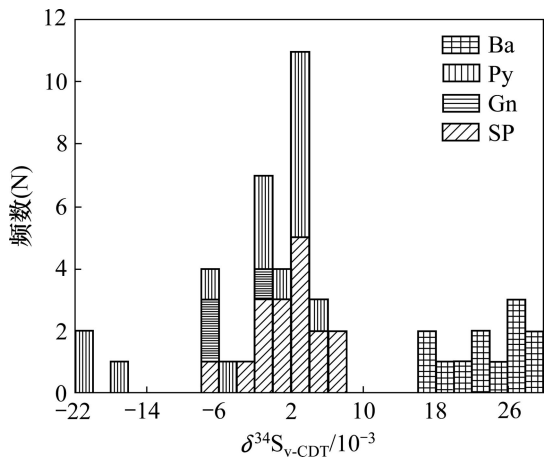


图3 盘龙铅锌矿矿石硫同位素频数直方图

Fig. 3 Frequency histogram of $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$ for ore from Panlong lead-zinc deposit

素相当,表明重晶石的形成与生物作用的关系不是很密切,与世界上一些典型的SEDEX矿床中重晶石的 $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$ 相近,如我国银洞子 $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$ 值为 $23.8\times 10^{-3}\sim 32.7\times 10^{-3}$ [17],德国Rammelsberg和Meggen的 $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$ 值分别为 $19.0\times 10^{-3}\sim 28.8\times 10^{-3}$ 、 $20.8\times 10^{-3}\sim 26.8\times 10^{-3}$ [18],因此,可以认为重晶石的硫直接来源于热液喷发地点的同时期海水。

3.2.2 铅同位素特征

本次测试的铅同位素数据见表3。从表3可以看出,采自盘龙铅锌矿区大岭矿段的6件硫化物矿石样品的铅同位素的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值为18.368~18.438(平均值为18.39),极差为0.070; $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值为15.774~15.852(平均值为15.79),极差为0.078; $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值为38.763~39.060(平均值为38.86),极差为0.297。上述铅同位素组成中,比值的极差均小于1,说明铅

来源比较稳定,大部分铅同位素组成均呈良好线性关系,表明成矿热液铅来源较为一致。

根据H-H单阶段铅演化模式计算,矿石铅的 $\mu=9.73\sim 9.96$,平均值为9.81,高于地幔铅的 μ 值(8.00~9.00),这种高的 μ 值暗示了成矿物质为上地壳来源。同时DOE [19]认为,当 μ 值小于9.58时,表示铅来自下地壳或上地幔;当 μ 值大于9.58时,表示这些铅可能来自岩浆,也可能来自原海底的幔源性沉积的物质。因此,可认为盘龙铅锌矿床的铅可能主要来源于上地壳,并受到岩浆作用的影响。矿石铅的 $\omega=34.08\sim 41.41$,平均值为39.12,显示铅源的物质成熟度较高。Th/U的比值在3.93~4.02,明显与地壳的Th/U值(约为4)比较接近,也显示了其物质的来源。

为了进一步确定盘龙铅锌矿床矿石铅源区的构造环境,查明铅来自何种地质构造单元,将铅同位素数据投影到Zartma铅构造模式图上(见图4),可以看出铅矿石样品基本呈线性分布,总体为单阶段演化的正常铅,表明铅源的铀-钍-铅体系没有发生分离或没有受到其它铀-钍-铅体系的强烈混染。在 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}^{2-206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 关系图中(见图4(a)),矿石铅投影点集中分布于上地壳演化曲线之外的狭小区域中,表明铅可能来源于上地壳;而在 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}-^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 关系图中(见图4(b)),样品都投影于上地壳演化线和下地壳演化线之间,主要集中于造山带铅演化曲线附近,表明铅的来源较为复杂,并且构造活动对铅同位素的混合作用产生了影响。在铅同位素 $\Delta\beta-\Delta\gamma$ 成因分类图 [20]中,矿石铅样品投影点位于上地壳与地幔混合俯冲铅源区及上地壳来源铅范围内(见图5),并且都明显靠近上地壳源铅、上地壳与地幔混合的俯冲铅源区的交界区域。这与前文推测其主要来源为壳源基本相符,当然在成矿过程中可能还受到深部幔源物质的影响。

表3 盘龙铅锌矿床矿石与围岩铅同位素结果表

Table 3 Lead isotope data for ores and wall rocks from Panlong lead-zinc deposit											模式
样品	位置	产状描述	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$\Delta\alpha$	$\Delta\beta$	$\Delta\gamma$	μ	ω	Th/U 年龄/Ma
P300	420 采场	块状矿石	18.377±0.001	15.774±0.001	38.802±0.003	71.06	29.37	42.54	9.81	39.89	3.94 399
P305	420 采场	块状矿石	18.368±0.001	15.763±0.001	38.763±0.003	70.54	28.65	41.49	9.79	39.67	3.92 392
P101	412 采场	浸染状矿石	18.438±0.002	15.852±0.002	39.06±0.005	74.62	34.46	49.47	9.96	41.41	4.02 445
P102	412 采场	浸染状矿石	18.401±0.003	15.808±0.003	38.912±0.008	72.46	31.59	45.50	9.88	40.56	3.97 421
P121	307 采场	条带状矿石	18.376±0.001	15.774±0.001	38.797±0.003	71.00	29.37	42.41	9.81	39.88	3.93 400
P122	307 采场	条带状矿石	18.386±0.001	15.791±0.001	38.854±0.003	71.58	30.48	43.94	9.85	40.23	3.95 412

注:样品测定工作由核工业北京地质研究院分析测试研究中心分析完成。

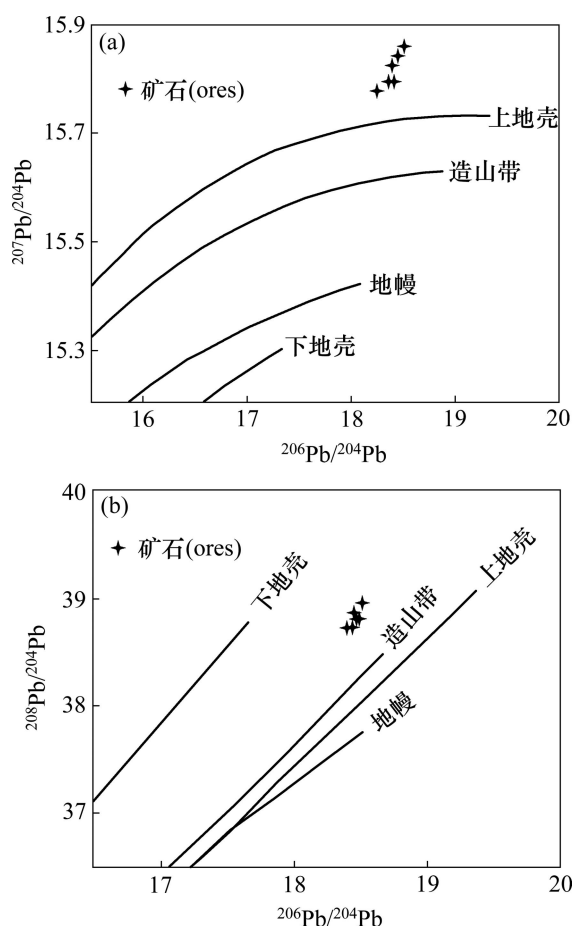


图4 盘龙铅锌矿床铅同位素组成 Zartman-Doe 图

Fig. 4 Zartman-Doe diagram of lead isotopic composition in Panlong lead-zinc deposit

中可能还受到深部幔源物质的影响。

3.2.3 硅-氧和氢-氧同位素特征

硅质岩的 $\delta^{30}\text{Si}$ 值是判别沉积环境的有效指标^[21], 不同来源的 Si 有不同的同位素组成。热水来源的硅质岩的 $\delta^{30}\text{Si} = -1.5 \times 10^{-3} \sim -0.8 \times 10^{-3}$, 交代成因的硅质岩的 $\delta^{30}\text{Si} = 2.4 \times 10^{-3} \sim 3.4 \times 10^{-3}$ ^[22]。研究区内硅质岩的 $\delta^{30}\text{Si} = -0.3 \times 10^{-3} \sim 0.3 \times 10^{-3}$, $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}} = 20.7 \times 10^{-3} \sim 21.8 \times 10^{-3}$ ($n=2$)^[5], 从硅质岩的 $\delta^{30}\text{Si}$ 值变化来看, 具有一定的硅同位素分馏现象, 表现出典型的热液沉积特征。研究区内硅质岩的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}} = 20.7 \times 10^{-3} \sim 21.8 \times 10^{-3}$ ($n=2$)^[5], 接近于海底喷流硅质岩的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}} (16.5 \times 10^{-3} \sim 23.7 \times 10^{-3})$, 与正常海水中沉积硅质岩的 $\delta^{18}\text{O} (25.6 \times 10^{-3})$ 和火山沉积硅质岩的 $\delta^{18}\text{O} (1.9 \times 10^{-3} \sim 12.4 \times 10^{-3})$ ^[22] 相差较远, 推断可能为海底喷流作用的产物。

矿区的氢、氧同位素 δD 为 -40×10^{-3} , $\delta^{18}\text{O}$ 为 -6.2×10^{-3} ^[5], 在 $\delta\text{D}-\delta^{18}\text{O}$ 图上样品落在大气降水线附近之间, 表明成矿热液是大气降水(或海水)的深循

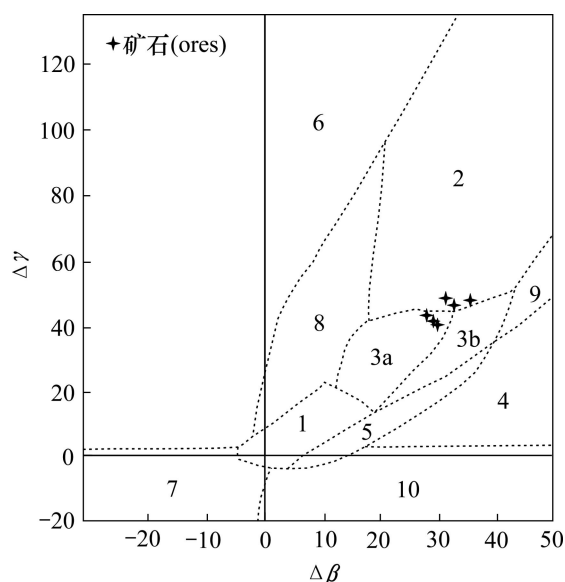


图5 盘龙铅锌矿床铅同位素 $\Delta\beta-\Delta\gamma$ 图(底图据文献[21])

1—地幔源铅; 2—上地壳铅; 3—上地壳与地幔混合的俯冲带铅(3a—岩浆作用; 3b—沉积作用); 4—化学沉积型铅; 5—海底热水作用铅; 6—中深变质作用铅; 7—深变质下地壳铅; 8—造山带铅; 9—古老页岩上地壳铅; 10—退变质铅

Fig. 5 $\Delta\beta$ versus $\Delta\gamma$ genetic classification diagram showing lead isotopic distribution of Panlong lead-zinc deposit (Base map from Ref. [12])

1—Mantle; 2—Upper crust; 3—Mantle and upper crust mixed subduction zone (3a — Magmatism; 3b — Sedimentation); 4—Chemical sediments; 5—Hydrothermal sediments on sea floor; 6 — Middle to deep metamorphism; 7 — Deep metamorphism lower crust; 8—Organic belt; 9—Upper crust of old shale; 10—Retrogressive metamorphism

环地下水混合了岩浆水。

3.3 成矿流体特征

利用盘龙铅锌矿床的重晶石-方解石脉型铅锌矿石磨制了包裹体测温片10片, 镜下发现的原生包裹体多为富液二相包裹体和纯液相包裹体, 含子矿物的三相包裹体很少。对重晶石、方解石中的气液二相包裹体进行了测温。包裹体的观察、测温及包裹体气、液相成分分析在中南大学有色金属成矿预测教育部重点实验室室内完成。

经显微镜下详细观察和系统鉴定, 大部分样品中流体包裹体不发育, 少数样品局部流体包裹体发育, 但类型较为单一。本研究的主要研究对象是重晶石液体包裹体, 这些包裹体的形态以近椭圆形为主、次为长条状和不规则状, 大小为 $4 \sim 10 \mu\text{m}$ 的约占 94%; 气

液比多在 15%~45% 之间,个别气体包裹体的气液比达 60%;均一法测温度范围最低为 166 °C,最高为 289 °C, $\omega(\text{NaCl})$ 盐度为 4.01%~14.07%。根据均一温度和盐度可进一步推算出盘龙铅锌矿床的成矿流体的密度为 0.804~0.955 g/cm³,均一压力为 $10.40 \times 10^5 \sim 60.89 \times 10^5$ Pa。

成矿流体的气相成分主要是 CO₂、CH₄ 和 H₂O, H₂O 含量占绝对优势,成分中无 O₂,富含 CO₂ 和 CH₄、H₂ 等挥发分,表明成矿环境为还原环境,而且生物参与了成矿作用^[23]。包裹体液相组分中的 K⁺、Na⁺、Ca²⁺、Cl⁻、F⁻ 是成矿流体的重要组成部分,其中 K⁺/Na⁺、F⁻/Cl⁻、Ca²⁺/Mg²⁺ 等比值是成矿流体来源的重要指示标志^[24]。盘龙铅锌矿的 Na⁺/K⁺ 为 1.98~3.22,流体中 Cl⁻ 含量远高于 F⁻ 含量,具有深源流体与少量海水混合的组分特征。深源流体中的 SO₄²⁻ 含量极少,低于海水中几个数量级。盘龙铅锌矿成矿流体的 SO₄²⁻ 含量为 $5.86 \times 10^{-6} \sim 26.10 \times 10^{-6}$,指示海水参与了成矿作用,海水与深源流体混合是层状矿体形成的重要机制。

4 矿床成因初探

盘龙铅锌矿床位于广西大瑶山西侧铅锌多金属成矿带南段,它是早泥盆世开始的板内张裂运动的结果,并受区域性同沉积大断裂控制。矿体顺层发育于下泥盆统上伦组白云岩中。矿床中发育层状、条纹-条带状构造、同沉积角砾岩和层间揉皱等,沉积特征明显,矿化与白云岩化、重晶石化及硅质岩关系比较密切。盘龙铅锌矿床地质特征不同于 MVT 类型,相比之下,与国内外报道的 SEDEX 型矿床的地质特征更加相似^[25-26]。

从表 1 和图 2 可以看出,矿石和围岩稀土总量为 $4.43 \times 10^{-6} \sim 28.46 \times 10^{-6}$,这种较低的稀土总量特征一般代表热液活动形成的。矿石和围岩的 REE 配分曲线基本相似,轻微右倾, LREE 富集, HREE 亏损,同时表现出弱的 Ce 负异常和较强的 Eu 正异常。不同之处在于矿石具有更加显著的 Eu 正异常,这种特征说明矿床受热水作用影响较大,同时具 $\Sigma \text{LREE} > \Sigma \text{HREE}$ 的热水沉积建造的基本特点^[27]。

矿石富集轻稀土和显著的 Eu 正异常,与后太古代正常沉积物稀土分布特征显然不同,而与现代大洋底热液及热液喷口附近沉积物中稀土元素组成相似^[28-31]。正常海水与喷流含矿热水的 REE 组成特征的不同反映在碳酸盐岩样品的 Eu 值上,喷流卤水的

矿石样品具有正的 Eu 异常,而正常沉积碳酸盐岩呈 Eu 负异常或无异常。矿石的 δEu 从 5.65~39.24,说明在成矿过程中,其成矿温度逐渐降低,成矿环境从相对还原条件向相对氧化条件改变。这反映出海水与海底喷流卤水共同参与了盘龙铅锌矿成矿作用。而弱矿化和不含矿白云岩的 REE 组成多显示正常海水沉积的特点。这也进一步反映出喷流成矿作用是海水与喷流热水相互混合的过程,成矿物质来源与两者的混合程度有关。矿石中 Ce 相对亏损是成矿热液 Ce 相对亏损的反映。Ce 亏损与海水的加入有关,同时从海水正常沉淀出的物质也不会发育 Eu 的正异常^[32]。盘龙铅锌矿区赋矿白云岩除具负 Ce 异常外,还具明显正 Eu 异常,表明形成它们的流体不可能以海水为主。而 Eu 正异常和 Ce 负异常同时出现在矿石中,与现代海底热水系统流体及沉积物的稀土配分模式相类似^[33-34],矿石沉淀可能是相对高温的热水流体和较低温的海水在海底附近发生了对流混合,类似于海底热水系统沉积物的形成过程。

该矿床的重晶石的 $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$ 值与同时期海水的 $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$ 值比较相近,说明重晶石中的硫来自于同期海水硫酸盐,指示了沉积成因;而大部分硫化物的 $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$ 平均值趋向于 0,暗示矿床的硫来自深源。以上现象体现了该矿床的硫具有多源的特征,即具有深源和浅源两个来源混合的特点,符合块状硫化物矿床硫主要来源的特征,同时牛树银等认为块状硫化物矿床成矿物质主要来自深源^[35]。少部分样品不具有深源硫的特征,可能是在较开放的环境中,由海水硫酸盐在生物作用下和还原速率较低条件下形成的。盘龙铅锌矿硫来源与典型的喷流-沉积矿床稍有不同,这可能是由变质作用使硫同位素发生变化导致的。矿床的铅同位素组成较均一,与国内大多数 SEDEX 铅锌矿床相比略富含放射性成因铅,与典型 MVT 矿床极富含放射性成因铅的特点显然不同,具有壳混的特征。同时计算了矿床成矿模式年龄为 387~445 Ma(见表 3),与赋矿围岩上伦组地层比较接近,这些均表明矿石铅很可能来源于围岩地层,同时也说明了矿床的同生性。

对研究区流体包裹体的测温和流体包裹体盐度、密度的估算,以及流体液相、气相成分及硅氧、氢氧同位素的分析显示,盘龙铅锌矿床成矿流体为中低温、低盐度、中低密度的 H₂O-NaCl 体系。成矿流体具有岩浆流体与大气降水混合的特征,同时具有显著的喷流成矿的特点。

5 结论

1) 盘龙铅锌矿的矿体呈层状与地层整合产出, 矿层延伸规模较大, 矿体底部普遍发育浸染状矿化, 矿床未受变形变质而保存良好。层状矿体中心矿石矿物含量高, 上下两侧则变少。矿石具有条纹状、条带状、块状和浸染状、胶状构造和草莓状构造等。矿物种类简单, 主要是闪锌矿、黄铁矿和方铅矿, 以及大量的重晶石, 矿物粒度以微细粒为主。

2) 矿化与热水沉积硅质岩和重晶石岩密切相关。层状矿体中及其上下盘附近, 出现化学沉积的重晶石岩及少量硅质岩等, 它们发育齐全、分异良好, 这些岩石目前被认为是典型热水沉积岩的标志。

3) 矿石与围岩的稀土元素分析表明, 矿石的沉淀受到古海洋热水流体/海水对流混合机制控制, 矿床形成与热水沉积作用密切相关。

4) 矿石的硫、铅同位素分析表明, 硫同位素特点既具有喷流沉积的特点, 而又反映了与中生代岩浆活动有关(深源)的特点; 铅同位素研究结果表明, 成矿物质来源于壳源, 并受到岩浆作用的混染。

5) 流体包裹体地球化学研究表明, 成矿流体为中低温、低盐度、低密度, 属于 $\text{NaCl-H}_2\text{O}$ 体系。成矿流体具有大气降水的特征, 且具有热水成矿的特点。

6) 系统的矿床地质特征、稀土元素、硫铅同位素和包裹体分析表明, 盘龙铅锌矿床可能为喷流沉积矿床。

REFERENCES

- [1] 宁浦功, 王 剑. 大瑶山西侧泥盆系富铅锌资源量预测研究[J]. 广西地质, 1997, 10(1): 23-36.
NI Pu-gong, WANG Jian. Study on the prognosis to the reserves of rich Lead-zinc resources at the western side of Dayanshan[J]. Guangxi Geology, 1997, 10(1): 23-26.
- [2] 杨 斌, 彭省临, 李水如, 张起钻. 广西有色金属成矿系列与成矿区带[J]. 矿产与地质, 2007(1): 8-11.
YANG Bin, PENG Sheng-lin, LI Shui-ru, ZHANG Qi-zuan. Metallogenic series and metallogenic belt of nonferrous metals in Guangxi[J]. Geology and Resources, 2007(1): 8-11.
- [3] 张 科, 胡明安, 曹新志, 徐伯骏. 广西大瑶山及其西侧铅锌成矿区地质特征及找矿方向[J]. 地质找矿论丛, 2005, 20(1): 21-25.
ZHANG Ke, HU Ming-an, CAO Xin-zhi, XU Bo-jun. Geological characteristics of lead-zinc ore district in the west of Dayaoshan of Guangxi Province and the ore prospect directions[J]. Contributions to Geology and Mineral Resources Research, 2005, 20(1): 21-25.
- [4] 梁国宝, 廖开立. 广西武宣县盘龙铅锌矿地质特征及找矿方向[J]. 南方国土资源, 2003(2): 26-29.
LIANG Guo-bao, LIAO Kai-li. Geological characteristics and ore-prospecting suggestions of the Panlong lead-zinc deposit in Wuxuan county Guangxi region[J]. Land and Resources of Southern China, 2003(2): 26-29.
- [5] 罗永恩. 广西武宣县盘龙铅锌矿床地质特征及控矿因素分析[J]. 地质与资源, 2009, 18(3): 183-188.
LUO Yong-en. Analysis on the geological characteristics and ore-controlling factors of the Panlong lead-zinc deposit in Guangxi region[J]. Geology and Resources, 2009, 18(3): 183-188.
- [6] 黄大放, 黄庆武. 广西武宣县盘龙铅锌矿床地质特征[C]//华南青年地质学术研讨会论文集. 桂林: 华南青年地质学会, 2006: 43-46.
HUANG Da-fang, HUANG Qing-Wu. Geological characteristics of the Panlong lead-zinc deposit in Guangxi region[C]//South China Youth Geoscience Symposium. Guilin: South China Youth Geoscience, 2006: 43-46.
- [7] 李 毅. 广西热水沉积矿床成矿规律及找矿方向研究[D]. 长沙: 中南大学, 2007: 1-100.
LI Yi. Metallogenic regularity and prospecting direction of hot water sedimentary deposits, Guangxi, China[D]. Changsha: Central South University, 2007: 1-100.
- [8] 杨向荣, 彭建堂, 胡瑞忠, 戚华文, 刘 燊. 新疆塔里木盆地西南缘塔木铅锌矿床矿石管状构造特征与成因[J]. 岩石学报, 2009(4): 977-983.
YANG Xiang-rong, PENG Jiang-tang, Hu Rui-zhon, QI Hua-wen, LIU Shen. Characteristics and genesis of ore tube structure of Tamu zinc-lead deposit, southwest margin of Tarim Basin, Xinjiang[J]. Acta Petrologica Sinica, 2009(4): 977-983.
- [9] 范 裕, 周涛发, 袁 峰, 张千明, 吴明安, 侯明金, 胡清华. 安徽和县香泉独立铊矿床的地质地球化学特征及成因探讨[J]. 矿床地质, 2007, 26(6): 597-608.
FAN Yu, ZHOU Tao-fa, YUAN Feng, ZHANG Qian-ming, WU Ming-an, HOU Ming-jin, HU Qing-Hua. Geological-geochemical features and genesis of Xiangquan independent thallium deposit in Hexian County, Anhui Province[J]. Mineral Deposits, 2007, 26(6): 597-608.
- [10] 张志斌, 叶 霖, 李文铅, 李朝阳, 高珍权, 李建峰, 徐力峰. 新疆霍什布拉克铅锌矿床地质、地球化学特征研究[J]. 大地构造与成矿学, 2007, 31(2): 205-217.
ZHANG Zhi-bin, YE Lin, LI Wen-qian, LI Chao-yan, GAO Zhen-quan, LI Jian-fen, XU Li-fen. Geological and Geochemical characteristics of Huoshibulake lead-zinc deposit in Xinjiang[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2007, 31(2): 205-217.
- [11] 夏学惠, 李钟模. 鲕状黄铁矿的热水沉积与微生物成矿作用

- [J]. 沉积学报, 1999, 17(A12): 712-717.
- XIA Xue-hui, LI Zhong-mo. Hot-water deposition and microbiomineralization of oolitic pyrite[J]. Acta Sedimentological Sinica, 1999, 17(A12): 712-717.
- [12] JORGE NSEN C J, JACOBSEN O S. Microbial oxidation of pyrite coupled to nitrate reduction in anoxic groundwater sediment[J]. Environmental Science and Technology, 2009, 43(13): 4851-4857.
- [13] CANFIELD D E, HABICHT K S, THAMDRUP B. The Archean sulfur cycle and the early history of atmospheric oxygen[J]. Science, 2000, 288(4): 658-661.
- [14] 周树青, 黄海平, 史晓颖, 林畅松, 胡尊伟. 稳定同位素记录与环境、生命演化中的重大事件[J]. 地质论评, 2008, 54(2): 225-231.
- ZHOU Shu-qing, HUANG Huang-ping, SHI Xiao-song, HU Zun-wei. Stable isotopic records vs. important events in life evolution and the concurrent environment[J]. Geology Review, 2008, 54(2): 225-231.
- [15] JOHNSON C A, EMSBO P, POOLE F G, RYE R O. Sulfur- and oxygen-isotopes in sediment-hosted stratiform barite deposits[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2009, 73(1): 133-147.
- [16] KLINKHARNMER G P. Geochemical implications of rare earth element patterns in hydrothermal fluids from mid-ocean ridges[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1994, 58: 5105-5133.
- [17] 炎金才. 银洞子银铅矿床重晶石岩的地球化学特征[J]. 矿物学报, 1995, 15(1): 61-67.
- YAN Jin-cai. Geochemical characteristics of the baritic rock in the Yindongzi Ag-Pb deposit[J]. Acta Mineralogica Sinica, 1995, 15(1): 61-67.
- [18] 刘家军, 吴胜华, 柳振江, 杨艳, 石龙. 扬子地块北缘大型钨成矿带中硫同位素组成及其意义[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2008, 27(3): 269-275.
- LIU Jia-jun, WU Sheng-hua, LIU Zhen-jiang, YANG Yan, SHI Long. Sulfur isotopic compositions of the large barium metallogenic belt in the northern Yangtze block and its significance[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2008, 27(3): 269-275.
- [19] DOE B R, STACEY J S. The application of lead isotopes to the problems of ore genesis and ore prospect evaluation: A review[J]. Economic Geology, 1974, 67(6): 757-767.
- [20] 薛传东, 韩润生, 杨海林, 杨志明, 田世洪, 刘勇强, 郝百武. 滇西北保山核桃坪铅锌矿床成矿流体来源的同位素地球化学证据[J]. 矿床地质, 2008, 27(2): 243-252.
- XUE Chuan-dong, HAN Run-sheng, YANG Hai-lin, YANG Zhi-ming, TIAN Shi-hong, LIU Yong-qiang, HAO Bai-wu. Isotope geochemical evidence for ore-forming fluid resources in Hetaoping lead-zinc deposit, Baoshan, Northwestern Yunnan[J]. Mineral Deposits, 2008, 27(2): 243-252.
- [21] 朱炳泉. 地球科学中同位素体系理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 1998: 224-246.
- ZHU Bing-quan. Theory and application of isotopic system in the earth science[M]. Beijing: Science Press, 1998: 224-226.
- [22] DOUTHITT C B. The geochemistry of the stable isotopes of silicon[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1982, 46(8): 1449-1458.
- [23] 丁梯平, 万德芳, 蒋少涌. 稳定同位素分析方法研究进展[M]. 北京: 科学出版社, 1992: 1-120.
- DING Ti-ping, WAN De-fang, JIANG Shao-yong. Advances in the study of Mo stable isotope geochemistry[M]. Beijing: Science Press, 1992: 1-120.
- [24] 齐文, 侯满堂. 镇旬矿田泥盆系和志留系铅锌矿的成矿地质条件分析[J]. 中国地质, 2005, 32(3): 452-462.
- QI Wen, HOU Man-tang. Metallogenic conditions of Devonian-Silurian lead-zinc deposits in the Zhenxun ore field[J]. Geology in China, 2005, 32(3): 452-462.
- [25] 张德会. 矿物包裹体液相成分特征及其矿床成因意义[J]. 地球科学—中国地质大学学报, 1992, 17(6): 677-688.
- ZHANG De-hui. Aqueous phase composition characteristics of mineral fluid inclusion and its significance in ore genesis[J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 1992, 17(6): 677-688.
- [26] LEACH D L, BRADLEY D C, HUSTON D, PISAEVSKY S A, TAYLOR R D, GARDOLL S J. Sediment-hosted lead-zinc deposits in earth history[J]. Economic Geology, 2010, 105(3): 593-625.
- [27] 林方成. 扬子地台北缘大渡河谷超大型层状铅锌矿床地质地球化学特征及成因[J]. 地质学报, 2005, 79(4): 540-556.
- LIN Fang-cheng. Geological and geochemical characteristics and genesis of super-large-scale sedex-type stratiform lead-zinc deposits in the Dadu river valley on the western margin of the Yangtze Craton[J]. Acta Geological Sinica, 2005, 79(4): 540-556.
- [28] 郑荣才, 文华国, 高红灿, 柯光明. 酒西盆地青西凹陷下沟组湖相喷流岩稀土元素地球化学特征[J]. 矿物岩石, 2006, 26(4): 41-47.
- ZHENG Rong-cai, WEN Hua-guo, GAO Hong-can, KE Guang-ming. Characteristics of rare earth elements of lacustrine exhalative rock in the Xiagou formation, lower cretaceous in Qingxi sag, Jiuxi basin[J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 2006, 26(4): 41-47.
- [29] KLINKHAMMER G P, ELDERFIELD, EDMOND J M. Geochemical implications of rare element patterns in hydrothermal fluid from mid—Ocean ridge[J]. Geochim Cosmochim Acta, 1994, 58(23): 5105-5113.
- [30] OLIVIER N, BOYET M. Rare earth and trace elements of microbialite in Upper Jurassic coral-and sponge-microbialite reefs[J]. Chemical Geology, 2006, 230: 105-123.
- [31] 丁振举, 刘丛强. 碧口群古热水系统发育的富铁硅岩稀土元素地球化学证据[J]. 自然科学进展, 2000, 10(5): 427-434.

- DING Zhen-ju, LIU Cong-qiang. Ancient hydrothermal system in Bikouqu-Group: Evidence from REE characteristics of iron-rich siliceous rocks[J]. *Progress in Natural Science*, 2000, 10(5): 427-434.
- [32] 丁振举, 刘丛强, 姚书振, 周宗桂. 海底热液系统高温流体的稀土元素组成及其控制因素[J]. *地球科学进展*, 2000, 15(3): 307-312.
- DING Zhen-ju, LIU Cong-qiang, YAO Shu-zhen, ZHOU Zong-gui. Rare earth elements compositions of high-temperature hydrothermal fluids in sea floor and control factors[J]. *Advance in Earth Sciences*, 2000, 15(3): 307-312.
- [33] 丁振举, 刘丛强, 姚书振, 周宗桂, 杨明国. 东沟坝多金属矿床矿质来源的稀土元素地球化学限制[J]. *吉林大学学报: 地球科学版*, 2003, 33(4): 437-442.
- DING Zhen-ju, LIU Cong-qiang, YAO Shu-zhen, ZHOU Zong-gui, YAN G Ming-guo. The REE constraints on ore sources of the Donggouba Polymetallic deposit[J]. *Journal of Jilin University: Earth Science Edition*, 2003, 33(4): 437-442.
- [34] MILLS R A, ELDERFIELD H. Rare earth element geochemistry of hydrothermal deposits from the active TAG Mound, 26°N Mid-Atlantic Ridge[J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 1995, 59: 3511-3524.
- [35] 丁振举, 刘丛强, 姚书振, 周宗桂. 海底热液沉积物稀土元素组成及其意义[J]. *地质科技情报*, 2000, 19(1): 27-30.
- DING Zhen-ju, LIU Cong-qiang, YAO Shun-zhen, ZHOU Zong-gui. REE composition and implication of hydrothermal sedimentation of sea-floor[J]. *Geological Science and Technology Information*, 2000, 19(1): 27-30.
- [36] 牛树银, 孙爱群, 郭利军, 王宝德, 胡华斌, 刘建明. 大兴安岭白音诺尔铅锌矿控矿构造研究与找矿预测[J]. *大地构造与成矿学*, 2008, 32(1): 72-80.
- NIU Shu-yin, SUN Ai-qun, GUO Li-jun, WANG Bao-de, HU Hua-bin, LIU Jian-ming. Ore-control structures and prospecting for the Baiyinnuoer lead-zinc deposit in the Da Hinggan Range[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2008, 32(1): 72-80.
- (编辑 何学锋)