

滇西兰坪盆地富隆厂一带铅锌多金属矿床中闪锌矿的微量元素、S-Pb 同位素特征及意义

王晓虎¹, 宋玉财¹, 侯增谦¹, 张洪瑞¹, 刘英超¹, 杨竹森², 杨天南¹,
潘小菲¹, 王淑贤³, 薛传东⁴

(1. 中国地质科学院 地质研究所, 北京 100037; 2. 中国地质科学院 矿产资源研究所, 北京 100037;
3. 国家地质实验测试中心, 北京 100037; 4. 昆明理工大学, 云南 昆明 650093)

摘要:在野外地质观测基础上,对滇西兰坪盆地富隆厂一带的铅锌多金属矿床中广泛发育的闪锌矿进行了微量元素、S-Pb 同位素组成的综合对比分析研究。结果表明,3个矿床的闪锌矿均表现出富 Cd, 贫 Ge 和 Ga, Fe-Cd 呈反相关关系, Zn/Cd 平均比值较低, $\delta^{34}\text{S}$ 值基本一致, 其变化范围较窄, 峰值在 5‰~6‰ 之间; 不同矿床闪锌矿的铅同位素基本重合, 在 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 和 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 投影图解中, 主体均位于上地壳线和造山带线之间, 在 $\Delta\beta$ - $\Delta\gamma$ 图解中, 总体上落入上地壳-地幔混合的俯冲带铅范围和上地壳铅范围内, 与盆地内不同物质来源端员对比发现矿物中的 Pb 同位素基本在中新生代沉积岩系范围内。因此认为富隆厂一带铅锌多金属矿床是同一成矿流体活动的产物, 只是产出空间位置不同, 实为同一矿床。同时, 其成矿温度为中低温, 硫可能来自盆地中膏盐的有机质热化学还原或含硫有机物的分解, 金属可能源自区域沉积地层。

关键词:兰坪盆地, 富隆厂, 铅锌, 闪锌矿, 微量元素, S-Pb 同位素

中图分类号: P578.2⁺3; P597

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2011)01-0045-15

Characteristics of trace elements and S-Pb isotopes in sphalerites from lead-zinc polymetallic deposits in Fulongchang area, Lanping Basin, western Yunnan Province, and their implications

WANG Xiao-hu¹, SONG Yu-cai¹, HOU Zeng-qian¹, ZHANG Hong-rui¹, LIU Ying-chao¹, YANG Zhu-sen²,
YANG Tian-nan¹, PAN Xiao-fei¹, WANG Shu-xian³ and XUE Chuan-dong⁴

(1. Institute of Geology, CAGS, Beijing 100037, China; 2. Institute of Mineral Resources, CAGS, Beijing 100037, China;
3. National Research Center of Geoanalysis, Beijing 100037, China; 4. Kunming University of Science and Technology,
Kunming 650093, China)

Abstract: There are many lead-zinc polymetallic deposits related to continental collision in Lanping Basin, western Yunnan Province. These deposits were formed in a continental collision environment, developed in a strong deformation sedimentary basin, controlled by thrust structure, had no obvious affinity to igneous activities and belong genetically to epigenetic mineralization. Thus they are significantly different from Sedex-type Zn-Pb deposits produced in the passive continental margin and also different from marine sandstone-type Pb deposits

收稿日期: 2010-03-18; 修订日期: 2010-07-02

基金项目: 国家基础研究计划 973 项目(2009CB421000); 国家自然科学基金联合基金(U09336051); 国家自然科学基金杰出青年基金(40772067); 国家科技支撑计划项目(2006BA01A08); 国土资源大调查项目(1212010818096)

作者简介: 王晓虎(1983-), 男, 矿床学专业博士研究生, E-mail: wangzykc@yeah.net; 通讯作者: 侯增谦(1961-), 博士, 研究员, 博士生导师, 长期从事海底与大陆成矿作用研究, E-mail: houzhengqian@126.com

(SST) and sandstone-type Cu deposits (SSC). Although they are similar to the MVT lead-zinc deposits, they are not the typical characteristics of MVT lead-zinc deposits in such aspects as basin environment, structural location, source material, metals and ore combination. Therefore, due to their unique characteristics, they are an important research object for the comprehensive understanding of the sediments-hosted base metal mineralization. In the past, less researches have been devoted to the lead-zinc polymetallic deposits in Fulongchang area, and hence the relationship between the different deposits is not clear. On the basis of geological field observations, the authors selected sphalerite which exist in all these deposits as the object to study its trace elements and S-Pb isotopic composition so as to make a comparative analysis. On the whole, these deposits are developed in the thrust nappe structure system and the secondary faults caused by thrust, have no obvious wall rock affinity, and show injection filling epigenetic mineralization in the fault system. The ore minerals include not only sphalerite, galena, pyrite, gratonite and tetrahedrite but also cinnabar, realgar and orpiment, with the main gangue minerals being calcite, assuming a low temperature hydrothermal mineral assemblage. Ore structures mainly include brecciated, veinlike, massive, disseminated, spotted and banded structures. The mineral textures are mainly euhedral granular, hypidiomorphic granular, xenomorphic granular and saccharoidal textures. Besides Zn-Pb, these ore deposits also have Cu and Ag, showing features of Pb-Zn-Cu-Ag polymetallic assemblage. Wall rock alteration is mainly carbonation. The three deposits have rich Cd, poor Ge and Ga, inversely related Fe-Cd, low average ratios of Zn/Cd in sphalerite. $\delta^{34}\text{S}$ values of sphalerite in the three deposits are basically consistent, have a narrow range, and show peaks at 5‰~6‰. Lead isotope values of sphalerite from different ore deposits are basically in coincidence. In the diagrams of $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ and $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, the main data are located between the upper crust line and the orogenic belt line. In the $\Delta\beta$ - $\Delta\gamma$ diagram, the whole values fall into the upper crust lead zone and the mixed range of the upper crust lead and the mantle subduction zone lead. Compared with the values of different metal source end-members in Lanping basin, the value of Pb isotope in sphalerite is consistent with the values of the Mesozoic and Cenozoic sedimentary rocks. Therefore, the lead-zinc polymetallic deposits in Fulongchang area must have been formed at the same ore-forming fluid activity in different spatial locations, being of the same origin. Meanwhile, the ore-forming temperature was of middle-low temperature, and sulfur was probably derived from the thermochemical sulfate reduction of organic matter in the basin or the decomposition of sulfur-bearing organic matter. The metals for mineralization might have come from regional sedimentary strata.

Key words: Lanping Basin; Fulongchang; lead-zinc deposit; spalerite; trace elements; S-Pb isotope

滇西兰坪盆地除发育我国最大的 Pb-Zn 矿——金顶矿床外,还发育众多沉积岩容矿的脉状 Pb-Zn 多金属矿床。这些矿床同金顶矿床一样,形成于大陆碰撞环境,发育在强烈变形的沉积盆地内,受逆冲推覆构造控制(徐启东等,2003;何龙清等,2004,2007;侯增谦等,2006,2008;He *et al.*,2009),与岩浆活动无关且后生成矿,由此明显区别于被动大陆边缘产出的 Sedex 型 Zn-Pb 矿,也不同于海相砂岩型 Pb 矿(SST)及砂岩型(SSC)Cu 矿床(Xue *et al.*,2007;He *et al.*,2009;侯增谦等,2008)。这些 Pb-Zn 多金属矿床虽与 MVT 型铅锌矿床有相似之处,但其产出的盆地环境、矿床出现的构造位置、物质来源、金属组合等无法被典型的 MVT 型矿床特点所涵

盖(Xue *et al.*,2007;侯增谦等,2008;宋玉财,2009),它们的发育,为更全面理解沉积岩容矿贱金属矿床成矿作用及大陆碰撞成矿作用提供了难得的素材。

在兰坪盆地内,这类沉积岩容矿的脉状 Pb-Zn 多金属矿床多集中于白秧坪矿集区,学者常把该矿集区划分为东矿带和西矿带(朱大岗等,2002;邵兆刚等,2002,2003;何明勤等,2004;陈开旭等,2004;陈开旭,2006),前者指沿华昌山断裂带分布的一系列矿床、矿点,后者主要指白秧坪 Cu-Co 矿床和富隆厂 Pb-Zn-Cu-Ag 等矿床。前人对东矿带和西矿带的白秧坪矿集区开展了许多工作(薛春纪等,2001,2003;王峰等,2003;邵兆刚等,2002,2003;杨伟光,2003;徐启东等,2003,2004;刘家军等,2004;王彦斌

等 2004 陈开旭等 2004 李志明等 2004, 2005 何龙清等 2004, 2007 张尔新 2005 陈开旭 2006 范世家等 2006) 但对富隆厂矿床(一些学者涉及到富隆厂矿床的地质特征)及近来开采的李子坪和吴底厂两个矿床很少有工作开展。这些矿床是不同的矿床?还是属于同一矿床但人为划分为不同矿床?它们的基本特点是什么?这些基本问题不解决,深入讨论矿床成因就缺乏共识,阻碍了全面理解兰坪盆地成矿作用。

本文在野外地质观察的基础上,侧重开展矿床地球化学的工作,选取富隆厂、李子坪、吴底厂 3 个矿床均发育的闪锌矿为研究对象,开展了电子探针和 S、Pb 同位素分析,通过综合对比分析,探讨这些矿床是否是同一成矿系统的产物,同时也讨论它们的形成条件和成矿物质来源。

1 区域地质概况

兰坪盆地位于青藏高原东缘,呈南北向带状展布,向南与思茅盆地相接,向北趋于尖灭,东至通甸—乔后一线,西抵兔峨—旧州。其边界断层分别为西缘的澜沧江断裂和东缘的金沙江断裂。盆地边界断裂之外分别出露元古宙变质基底,盆地内主要出露中生代陆相红色碎屑岩,新生代岩浆岩仅在盆地南缘永平—巍山一带和盆地外金沙江—红河一带出露。盆地内构造格局以新生代逆冲推覆构造最为醒目,并形成两侧向盆地中心对冲的格局(图 1, He *et al.*, 2009)。兰坪盆地经历了复杂的演化历史,在早二叠世晚期—晚二叠世时期,由于金沙江洋俯冲消减,兰坪地区成为弧后盆地;早中三叠世,由于弧陆碰撞作用,使得兰坪盆地由弧后盆地转化成弧后前陆盆地;晚白垩世—早第三纪,由于印度板块向欧亚板块的持续俯冲挤压,兰坪盆地由弧后前陆盆地转化成走滑拉分盆地(牟传龙等, 1999)。

2 矿床地质

白秧坪矿集区位于兰坪盆地北部(图 1),其西矿带由白秧坪 Cu-Co、富隆厂 Pb-Zn-Cu-Ag、吴底厂 Pb-Zn、李子坪 Pb-Zn 等 4 个矿床/矿段构成(图 2)。整个西矿带主要出露中侏罗统花开佐组(J_2h)及下白垩统南新组(K_1n)、景星组(K_1j)地层。花开佐组岩性为紫红色间夹黄绿色砂岩、泥岩,偶见灰岩,下段为红色碎屑岩沉积,见石膏层,上段为杂色碎屑岩、

碳酸盐岩,景星组为紫红色、灰白-灰绿色石英砂岩、粉砂质泥岩交互出现,局部灰绿色砾岩,南新组为湖相紫红色砂岩、砂砾岩、泥岩、粉砂岩(据云南省地质局, 1974; 牟传龙等, 1999)。矿区发育多组近南北向的逆冲断裂和其派生的北东-南西走向的次级断裂,晚期发育北西西-南东东走向断裂(图 2)。

富隆厂矿床主矿体受西倾的四十里箐主逆冲断裂派生的 NE 向次级断裂控制,呈脉状、似层状、透镜状顺断裂产出,产状与控矿断裂一致。围岩主要为景星组砂岩,矿石主要以两种形式赋存:细脉状矿石见于主控矿断裂派生的北西西向走滑断层中,矿物组成有闪锌矿、方铅矿、黄铁矿等,见脉状方铅矿穿插于泥岩和砂岩张性微裂隙中(图 3a);角砾状矿石见于北东向控矿断裂内,为方铅矿、闪锌矿胶结砂岩角砾,角砾大小不一,大者直径 3~5 cm,小者小于 1 cm(图 3b)。热液矿化期次大致分 3 期(表 1):早期出现无矿方解石脉,以细脉形式出现;中期出现闪锌矿、方铅矿/细硫砷铅矿、黝铜矿系列矿物,伴有少量方解石,出现这几种硫化物和少量方解石胶结围岩角砾、纯的方铅矿或闪锌矿脉、以及纯的方铅矿+闪锌矿脉,是主成矿阶段;晚期无矿方解石作为胶结破碎的矿化角砾出现。除上述矿物外,前人研究还发现有辉银矿、汞银矿、砷黝铜矿、菱铁矿、蓝铜矿、孔雀石等(陈开旭, 2006)。

李子坪矿床矿体受横切四十里箐逆冲断层的 NW-SE 走向断裂控制,脉状顺断裂产出,围岩为泥灰岩、生物碎屑灰岩。矿石呈块状(图 3c)或脉状(图 3d),充填在围岩裂隙中,局部见围岩呈角砾裹入硫化物脉中(图 3e)。矿石矿物有方铅矿、细硫砷铅矿、闪锌矿、雄黄、雌黄、菱铁矿等,脉石矿物以方解石为主。热液矿化期次大致分 3 期(表 2):最早期出现无矿方解石脉,稍晚见硅化,以无矿石英±方解石脉形式出现;中期出现闪锌矿、方铅矿、细硫砷铅矿、黝铜矿、雄黄、雌黄、方解石系列矿物,是主成矿阶段,以闪锌矿+方解石脉、纯闪锌矿脉、闪锌矿+方铅矿/细硫砷铅矿+方解石脉等几种脉体形式出现;晚期无矿方解石作为脉体再次出现,胶结早期形成的矿石角砾。

吴底厂矿床矿体受北西、北东向断裂破碎带控制,脉状、似层状、透镜状产出。围岩为泥灰岩、生物碎屑灰岩。矿石类型有块状(图 3f)、脉状(图 3g)、角砾状(图 3h)。矿石矿物有闪锌矿、方铅矿、细硫砷铅矿、黄铁矿、黝铜矿、雄黄、雌黄等,前人还报道

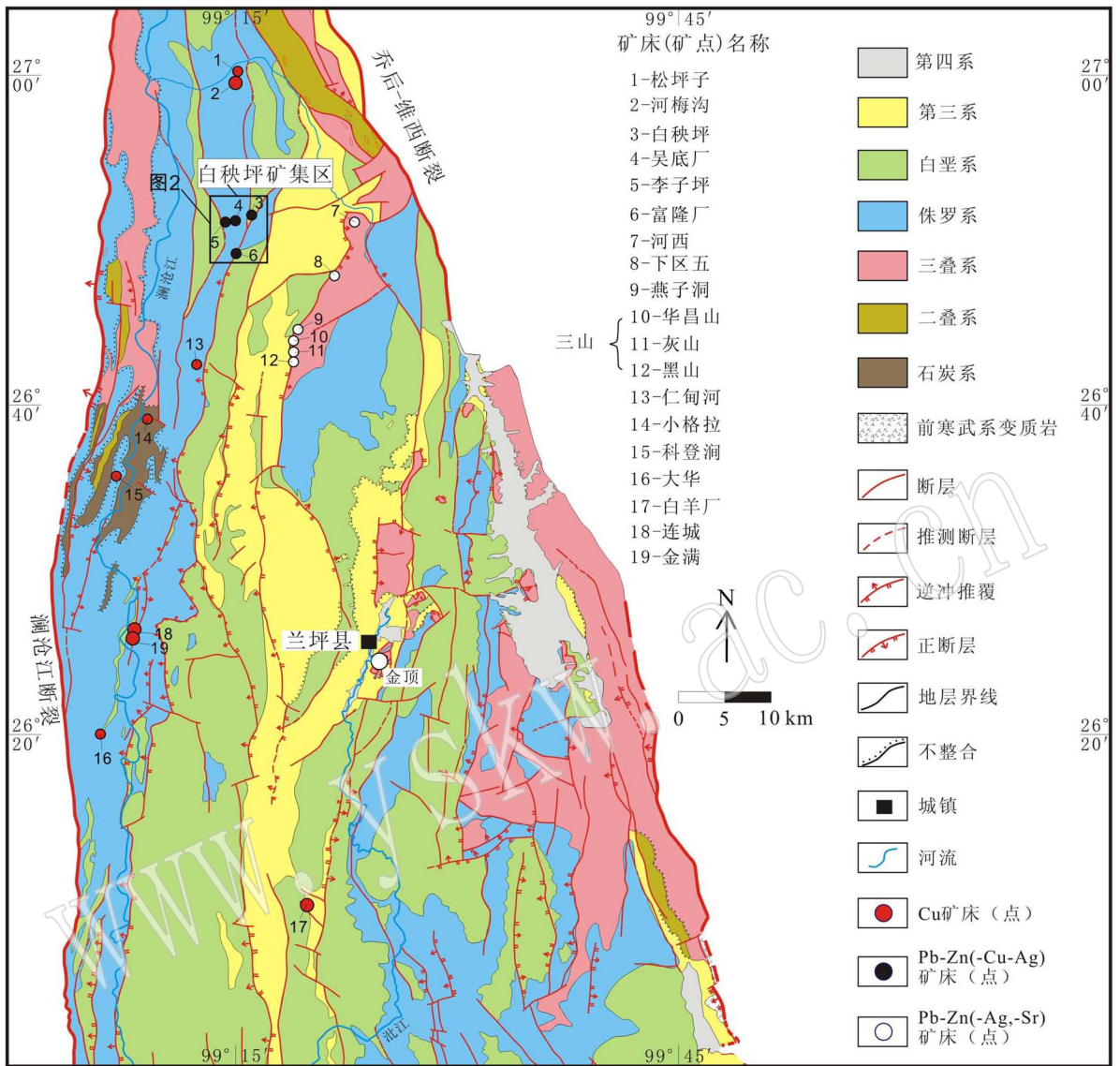


图1 兰坪盆地北部区域地质简图及主要矿床、矿点分布(据1:20万矿产图维西幅、兰坪幅简化)

Fig. 1 Geological sketch map of northern Lanping Basin, Yunnan Province, showing the distribution of main ore deposits (simplified after 1:20 000 Map of Geology and Mineral Resources of Weixi and Lanping Sheets)

有白铅矿、磁黄铁矿、脆硫锑铅矿、硫砷铜矿、硫镉矿、黄铜矿、黑铜矿、辉铜矿、辉锑矿、孔雀石、蓝铜矿、菱锌矿、菱铁矿等(陈开旭, 2006), 脉石矿物以方解石、粘土矿物为主。热液矿化期次大致分两期(表3): 早期出现闪锌矿、方铅矿、细硫砷铅矿、黝铜矿系列矿物, 伴有方解石, 是主成矿阶段, 呈闪锌矿+方铅矿+方解石脉、纯的方铅矿/闪锌矿脉、闪锌矿+细硫砷铅矿胶结围岩角砾, 晚期为无矿方解石脉。

总体看来, 这些矿床发育于推覆构造所派生的裂隙系统内, 虽然有的矿床对碳酸盐岩建造有一定

选择性, 但总体显示在断裂系统中灌入充填后生成矿; 矿石硫化物以闪锌矿、方铅矿、细硫砷铅矿、黄铁矿、黝铜矿为主, 也见雄黄、雌黄等, 脉石矿物为方解石, 为一套中低温热液矿物组合; 矿石构造有角砾状构造、细脉状构造、块状构造、浸染状构造、斑点状构造、条带状构造等; 矿石结构主要有自形粒状结构、半自形粒状结构、他形粒状结构、砂糖状结构; 矿床除具有相对简单的 Zn-Pb 组合外, 伴有 Cu、Ag, 呈现 Pb-Zn-Cu-Ag 多金属组合特征; 围岩主要发生碳酸盐化。

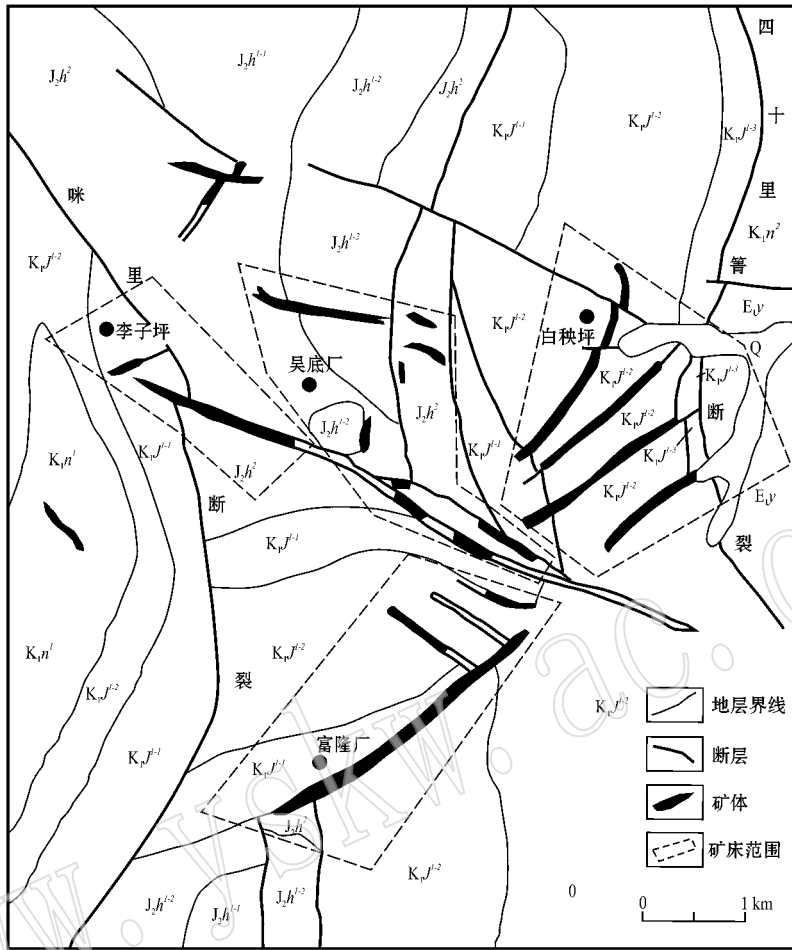


图 2 富隆厂一带铅锌多金属矿床地质简图 [据何明勤等(2004)略有改动]

Fig. 2 Geological sketch map of lead-zinc polymetallic deposits in Fulongchang area (modified after He Mingqin *et al.*, 2004)

J_2h^{1-1} —花开佐组下段下亚段; J_2h^{1-2} —花开佐组下段上亚段; J_2h^2 —花开佐组上段; K_{1j}^{1-1} —景星组下段下亚段; K_{1j}^{1-2} —景星组下段中亚段; K_{1n}^1 —南新组下段; K_{1n}^2 —南新组上段; E_{1y} —云龙组; Q—第四系

J_2h^{1-1} —lower section of Lower Huakaizuo Formation; J_2h^{1-2} —upper section of Lower Huakaizuo Formation; J_2h^2 —Upper Huakaizuo Formation; K_{1j}^{1-1} —lower section of Lower Jingxing Formation; K_{1j}^{1-2} —middle section of Lower Jingxing Formation; K_{1n}^1 —lower Nanxing Formation; K_{1n}^2 —upper Nanxing Formation; E_{1y} —Yunlong Formation; Q—Quaternary

表 1 富隆厂 Pb-Zn-Cu-Ag 矿床主要热液矿化期次

Table 1 Main hydrothermal mineralization periods in the Fulongchang Pb-Zn-Cu-Ag deposit

矿物名称	无矿方解石脉阶段	硫化物±方解石矿化阶段	方解石化阶段
闪锌矿		●●●●	
方铅矿/细硫锑铅矿		●●●●	
黝铜矿		●●●●	
方解石	●●●●		●●●●

早 → 晚

3 闪锌矿成分及 S-Pb 同位素组成

本文选择富隆厂、吴底厂、李子坪矿床中主成矿

期闪锌矿作为测试对象,首先在显微镜下观察磨制的电子探针片,圈出特定的区域,并通过喷碳处理后再对矿物成分利用电子探针进行分析。电子探针分析在南京大学内生金属矿床成矿机制研究国家重点实



图 3 富隆厂一带铅锌多金属矿床矿石类型
Fig. 3 Ore types of lead-zinc polymetallic deposits in Fulongchang area

表 2 李子坪 Pb-Zn 多金属矿床主要热液矿化期次

Table 2 Main hydrothermal mineralization periods in the Liziping Pb-Zn polymetallic deposit

矿物名称	无矿方解石脉阶段	无矿石英±方解石脉阶段	硫化物±方解石脉阶段	方解石脉阶段
闪锌矿			●	
方铅矿			●	
石英		●		
方解石	●	●	●	●
	早 → 晚			

表 3 吴底厂 Pb-Zn 多金属矿床主要热液矿化期次

Table 3 Main hydrothermal mineralization periods in the Wudichang Pb-Zn polymetallic deposit

矿物名称	硫化物±方解石矿化阶段	方解石化阶段
闪锌矿	●	
方铅矿/细硫砷铅矿	●	
黝铜矿	●	
方解石		●
	早 → 晚	

实验室完成,仪器型号为 JXA-8100(JEOL),测试条件为:加速电压为 15.0 kV,束流 20 nA,束斑直径 1 μm ,标准样品闪锌矿来自美国国家标准局;测量时间:主量元素峰位 10 s,背景为 5 s,微量元素峰位测量为 20 s,背景为 10 s,测试精度 0.01%。分析结果列于表 4。

由表 4 所示,富隆厂矿床闪锌矿中 Zn 含量 58.0%~65.1%,S 含量 31.6%~33.3%,Fe 含量 0~2.9%,Cd 含量 0.1%~0.7%,Au 含量 0~0.4%,As 含量 0~0.3%,其他元素含量较低,Zn/Cd 比值为 91.37~509.49,平均值为 241.09;李子坪矿床闪锌矿中 Zn 含量 64.7%~66.5%,S 含量 32.0%~33.7%,Fe 含量 0~1.0%,Cd 含量 0.2%~0.8%,Au 含量 0~0.3%,其他元素含量低,Zn/Cd 比值为 83.1~321.5,平均值是 161.9;吴底厂矿床闪锌矿中 Zn 含量 64.1%~68.5%,S 含量 31.7%~33.6%,Fe 含量 0~0.5%,Cd 含量 0.1%~0.6%,Au 含量 0~0.7%,其他元素含量较低,Zn/Cd 比值为 106.2~752.4,平均值为 301.7。3 个矿床闪锌矿中 Zn/Cd 比值平均为 249.9。总体来看,3 个矿床闪锌矿中 Zn 的含量变化较大,为 58.0%~68.5%,平均 64.3%;S 的变化范围为 31.7%~33.7%,平均 32.8%;Fe 变化范围 0~2.9%,平均 0.4%。闪锌矿中富 Cd、Fe、As、Au 等元素,Ge、Ga 的富集不明显。对闪锌矿颗粒中环带进行连续测点(图 4),从内到外,Au 的含量有增高的趋势。在闪锌矿环带中,颜色深的区域含 Fe 较高,与颜色浅处相比,呈一个数量级的增长,同时 Cd 含量低。在 Fe-Cd 散点图(图 5)中,Fe 和 Cd 并非呈线性关系,而是呈现出曲线反相关关系,说明 Fe 和 Cd 以类质同像方式赋存于闪锌矿中。

在富隆厂、吴底厂、李子坪矿床共挑选成矿期的 25 件闪锌矿样品进行 S 同位素测定,测试工作在国土资源部同位素地质重点实验室 MAT-251EM 型质谱计(Finnigan 公司)上完成。具体分析方法是:选取 200 目的纯净样品,直接以 Cu_2O 作氧化剂制备 SO_2 ,分析精度均为 $\pm 0.2\%$ (2σ),采用 V-CDT 标准,分析结果见表 5。

所有数据的 $\delta^{34}\text{S}$ 值变化范围较窄,在 3‰~8‰ 之间,落入变质岩和沉积岩 $\delta^{34}\text{S}$ 值分布范围,部分也可与地球外物质(陨石) $\delta^{34}\text{S}$ 值分布范围范围重合(图 6 和表 5)。其中富隆厂矿床闪锌矿 $\delta^{34}\text{S}$ 值变化范围为 5.4‰~7.8‰,峰值 5‰~6‰,平均 6.3‰;吴底厂矿床闪锌矿 $\delta^{34}\text{S}$ 值变化范围为 3.9‰~

6.3‰,峰值 5‰~6‰,平均 5.4‰;李子坪矿床闪锌矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值从 3.8‰~5.6‰,峰值 5‰~6‰,平均 4.8‰。从富隆厂矿床到吴底厂矿床再到李子坪矿床, $\delta^{34}\text{S}$ 值基本一致,从平均值看略有降低的趋势。

本次研究从 3 个矿床中选 25 件闪锌矿样品进行 Pb 同位素测定,测试工作在中国地调局宜昌地质调查中心同位素实验室完成,测试仪器型号为 MAT261 质谱仪,实验流程:先用蒸馏水把样品洗净,再用二次蒸馏的硝酸和盐酸混合物使样品溶解,然后用氢溴酸和阴离子交换树脂分离和提纯铅,再用磷酸和硅胶涂到铍带上,最后用质谱分析。闪锌矿 Pb 同位素组成见表 6 和图 7。富隆厂矿床闪锌矿的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 18.609\sim 18.725$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15.548\sim 15.72$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 38.514\sim 39.169$,在 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} - ^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 图中,从上地壳线之上到上地壳线与造山带线之间,再到造山带线与地幔线之间都有分布;在李子坪矿床, $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 18.620\sim 18.745$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15.597\sim 15.685$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 38.716\sim 39.062$,在 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} - ^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 图中,数据点大多靠近上地壳,其中有 1 个点位于造山带线附近;在吴底厂矿床, $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 18.626\sim 18.783$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15.609\sim 15.746$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 38.791\sim 39.223$,在 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} - ^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 图中,数据落在上地壳线之上以及上地壳线和造山带线之间。在 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} - ^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 图上除富隆厂有 1 个点接近造山带线,其余 3 个矿床的点均落于造山带线附近。总之,3 个矿床的铅同位素组成基本一致,数据点总体位于造山带线和上地壳线附近,并呈线性排列。

朱炳泉(1998)认为钼铅的变化以及钼铅与铀铅同位素组成的相互关系对于地质过程与物质来源能提供更丰富的信息,为突出这种变化关系,将 Pb 同位素表示成与同时代地幔的相对偏差,直观的表现是 $\Delta\gamma - \Delta\beta$ 成因分类图解。本文根据样品 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 和 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 相对于同时代地幔的 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 和 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 的偏差值 $\Delta\beta$ 和 $\Delta\gamma$,做出富隆厂一带铅锌多金属矿床 $\Delta\gamma - \Delta\beta$ 图解(图 8)。数据点总体上落入上地壳与地幔混合的俯冲带铅范围和上地壳铅范围内。其中李子坪矿床闪锌矿 Pb 同位素点落入上地壳与地幔混合的俯冲带铅范围内,靠近上地壳铅范围;富隆厂矿床大部分落入上地壳与地幔混合的俯冲带铅范围,只有一点在上地壳铅范围内;吴底厂矿床闪锌矿 Pb 同位素点跨上地壳与地幔混合的俯冲带铅和上地壳铅范围,靠近两者边界。

表4 富隆厂一带铅锌多金属矿床闪锌矿电子探针数据

Table 4 Electron microprobe analyses ($w_B/\%$) of sphalerite from lead-zinc polymetallic deposits of Fulongchang area

序号	样品号	点号	S	Se	Ag	Au	As	Zn	Cu	Ga	Bi	Fe	Ge	Sb	Pb	Cd	总和
1	2WDC2-11	2	31.709	-	-	0.226	-	68.458	0.029	-	0.012	0.032	-	0.005	-	0.281	100.752
2	2WDC2-11	3	32.993	-	-	0.039	0.155	65.492	0.136	-	0.003	0.067	-	-	0.067	0.333	99.285
3	WDC2-3	1	33.196	-	-	-	0.053	67.318	-	-	-	0.370	-	-	0.006	0.157	101.100
4	WDC022-1	4	33.045	-	-	0.087	0.102	64.554	-	-	-	0.497	-	-	0.041	0.184	98.510
5	WDC022-1	5	32.607	-	-	0.251	0.180	64.102	-	-	0.084	0.507	-	-	1.231	0.137	99.099
6	WDC022-4	2	32.610	0.004	-	-	0.069	66.665	-	0.021	-	0.147	0.012	-	-	0.298	99.826
7	WDC022-4	3	32.661	-	-	-	-	66.058	-	-	0.053	0.117	-	-	-	0.360	99.249
8	WDC022-5	3	32.806	0.011	0.105	-	0.489	65.459	0.419	-	0.112	0.510	-	-	0.401	0.087	100.399
9	2WDC2-7	3	33.582	0.018	-	0.729	-	64.608	0.037	-	-	0.055	-	-	0.162	0.355	99.546
10	LP08-44	1	33.522	0.022	-	0.560	-	65.900	0.002	-	0.050	0.091	-	-	0.142	0.360	100.649
11	LP08-44	3	33.293	-	-	-	0.014	65.440	-	-	0.038	0.144	0.012	-	0.103	0.616	99.660
12	LZP2-2	2	32.716	0.051	-	0.024	0.042	66.542	0.034	-	-	0.136	-	-	0.017	0.207	99.769
13	LZP2-6-1	1	32.917	-	-	-	-	66.181	-	-	0.017	0.054	-	-	-	0.379	99.548
14	LZP2-6-1	2	33.104	-	-	0.283	-	66.133	0.036	-	-	0.032	-	0.006	-	0.440	100.034
15	LZP2-6-1	4	32.040	-	-	0.290	0.027	65.194	-	-	0.015	0.436	0.001	-	0.184	0.747	98.934
16	LZP2-6-1	6	32.973	-	-	0.079	-	65.802	-	-	0.047	0.155	0.050	-	-	0.337	99.443
17	LZP2-6-1	9	33.422	0.030	0.018	0.055	0.136	64.994	-	-	-	0.112	-	-	0.095	0.537	99.399
18	LZP2-6-1	8	32.975	-	-	0.110	-	65.464	0.005	-	-	0.156	-	-	-	0.788	99.498
19	LZP2-6-1	10	33.737	-	-	0.206	-	64.759	-	-	-	1.040	-	-	-	0.154	99.896
20	FLC2-2	3	32.896	0.011	-	0.072	-	62.952	0.076	0.017	-	0.423	-	-	0.121	0.606	97.174
21	FLC2-2	4	32.810	-	-	-	0.021	63.918	0.037	-	-	0.510	-	-	-	0.534	97.830
22	FLC2-2	5	33.085	-	-	0.368	0.050	63.013	0.051	-	0.021	1.038	-	0.002	-	0.214	97.842
23	FLC2-2	6	33.165	-	-	-	0.034	60.120	0.091	0.053	-	2.930	-	-	-	0.118	96.511
24	FLC2-2	7	33.121	0.016	-	-	0.319	63.484	0.256	-	0.028	0.687	-	-	0.133	0.460	98.504
25	FLC2-2	8	31.953	0.014	-	0.408	-	60.620	-	-	-	2.184	-	0.001	-	0.128	95.308
26	FLC2-8	3	31.662	0.021	-	0.448	0.021	59.570	0.054	0.096	-	0.008	-	0.003	-	0.652	92.535
27	FLC2-8	4	32.238	0.008	-	0.184	0.071	61.629	-	-	0.029	-	-	0.018	-	0.438	94.615
28	FLC2-10	3	33.005	0.025	-	-	0.004	64.705	0.027	-	-	0.562	-	-	-	0.140	98.508
29	FLC2-22	2	31.801	0.010	-	-	-	57.979	-	-	0.034	0.218	-	-	0.070	0.129	90.241
30	FLC2-22	3	32.138	0.015	-	0.071	0.188	62.146	0.207	-	0.006	0.265	-	-	-	0.485	95.521
31	FLC2-22	4	32.735	-	-	0.205	0.026	63.325	0.043	-	0.015	0.124	-	0.002	0.130	0.254	96.859
32	FLC054-8	3	33.254	-	-	-	-	65.131	0.051	-	0.030	0.550	0.007	-	0.134	0.692	99.849
33	FLC054-8	6	32.322	-	-	-	0.014	64.766	-	-	0.060	0.048	-	0.005	0.006	0.536	97.757

“-”表示未检测出。

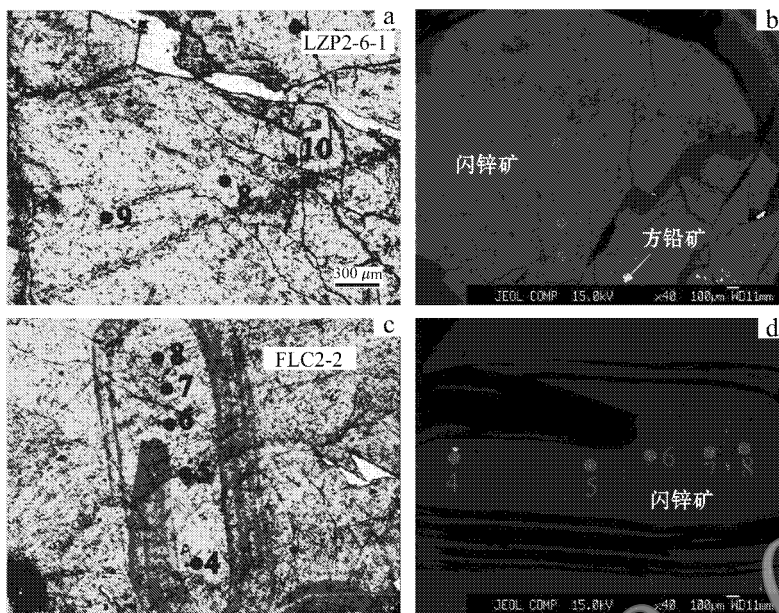


图 4 富隆厂一带铅锌多金属矿床中闪锌矿电子探针点位图

Fig. 4 Points of electron microprobe analyses in sphalerite from lead-zinc polymetallic deposits of Fulongchang area

a 和 c 为单偏光镜下照片, b, d 为背散射图片

a and c are plainlight images, b and d are BSE images. The point number in a and b is consistent with number from sample

LZP2-6-1 in Table 4, the point number in c and d is consistent with number from sample FLC2-2 in Table 4

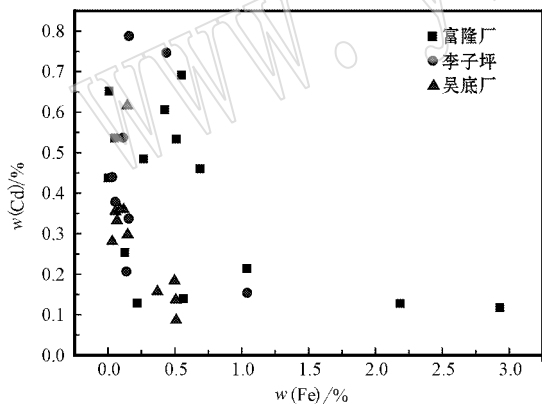


图 5 富隆厂一带铅锌多金属矿床闪锌矿中 Cd-Fe 散点图

Fig. 5 Scatter diagram of Cd-Fe in sphalerite from lead-zinc polymetallic deposits of Fulongchang area

前人为获得兰坪盆地内可能的物质来源信息进行了 Pb 同位素测定, 划分出了具有扬子陆块西缘物源系统特征的低铅地块属性、具有冈瓦纳陆块物源系统特征的高铅地块属性, 用澜沧江和金沙江带玄武岩类代表古特提斯阶段洋壳组成, 盆地内新生代浅成侵入体主要代表盆地中下部地壳的物质属性, 盆地内新生代沉积岩系则代表上部地壳的物质属

表 5 富隆厂一带铅锌多金属矿床闪锌矿 S 同位素测试结果
Table 5 S isotope data in sphalerite from lead-zinc polymetallic deposits of Fulongchang area

序号	样号	矿床名称	$\delta^{34}\text{S}_{\text{‰}}$
1	FLC054-5	富隆厂	5.9
2	FLC054-8	富隆厂	5.4
3	FLC2-8	富隆厂	6.5
4	FLC2-21	富隆厂	5.8
5	FLC2-23	富隆厂	7.8
6	LP08-41	吴底厂	5.9
7	LP08-42	吴底厂	5.9
8	LP08-43	吴底厂	5.3
9	LP08-44	吴底厂	6.3
10	LP08-45	吴底厂	5.7
11	WDC022-2	吴底厂	5.8
12	WDC022-4	吴底厂	4
13	WDC022-5	吴底厂	5.6
14	WDC022-8	吴底厂	4.7
15	WDC2-3	吴底厂	5.1
16	WDC2-7	吴底厂	5.5
17	2WDC2-4	吴底厂	5.4
18	2WDC2-7	吴底厂	3.9
19	2WDC2-9	吴底厂	5.1
20	2WDC2-11	吴底厂	6.3
21	2WDC2-15	吴底厂	5.3
22	LZP021-2	李子坪	5
23	LZP2-2	李子坪	5.6
24	LZP2-6-1	李子坪	3.8
25	LZP2-9-1	李子坪	4.6

分析单位: 国土资源部同位素地质重点实验室。

表6 富隆厂一带铅锌多金属矿床闪锌矿中铅同位素组成

Table 6 Pb isotope data in Sphalerite from lead-zinc polymetallic deposits of Fulongchang area

序号	样品号	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	表面年龄/Ma	Φ	μ	Th/U	β_{M}	γ_{M}	$\Delta\beta$	$\Delta\gamma$	矿床	资料来源
1	LP08-41	18.720±0.006	15.698±0.002	39.169±0.017	64.9	0.574	9.62	3.89	15.33	37.46	24.01	45.68	吴底厂	本文
2	LP08-42	18.710±0.006	15.695±0.006	39.054±0.015	68.4	0.574	9.62	3.85	15.33	37.46	23.83	42.60	吴底厂	本文
3	LP08-43	18.707±0.005	15.696±0.006	39.079±0.015	71.8	0.575	9.62	3.86	15.33	37.46	23.91	43.27	吴底厂	本文
4	LP08-44	18.629±0.007	15.633±0.003	38.911±0.013	48.6	0.573	9.51	3.82	15.33	37.46	19.71	38.78	吴底厂	本文
5	LP08-45	18.629±0.005	15.614±0.005	38.871±0.015	24.2	0.571	9.47	3.80	15.33	37.46	18.37	37.71	吴底厂	本文
6	WDC022-2	18.633±0.007	15.618±0.005	38.822±0.014	26.4	0.571	9.48	3.78	15.33	7.46	18.62	36.40	吴底厂	本文
7	WDC022-4	18.626±0.012	15.609±0.008	38.791±0.020	19.9	0.570	9.46	3.77	15.33	37.46	18.05	35.57	吴底厂	本文
8	WDC022-5	18.641±0.008	15.609±0.005	38.794±0.014	8.8	0.569	9.46	3.76	15.33	37.46	17.99	35.65	吴底厂	本文
9	WDC022-8	18.704±0.009	15.677±0.007	39.087±0.019	50.0	0.573	9.59	3.86	15.33	37.46	22.58	43.49	吴底厂	本文
10	WDC2-3	18.668±0.005	15.647±0.006	38.849±0.020	38.0	0.572	9.53	3.78	15.33	37.46	20.58	37.12	吴底厂	本文
11	WDC2-7	18.665±0.006	15.628±0.006	38.897±0.016	15.7	0.570	9.49	3.80	15.33	37.46	19.25	38.41	吴底厂	本文
12	2WDC2-4	18.783±0.008	15.741±0.007	39.140±0.019	73.5	0.575	9.70	3.86	15.33	37.46	26.85	44.90	吴底厂	本文
13	2WDC2-7	18.669±0.002	15.644±0.002	38.947±0.007	33.4	0.571	9.52	3.82	15.33	37.46	20.36	39.74	吴底厂	本文
14	2WDC2-9	18.673±0.006	15.668±0.007	38.986±0.020	61.1	0.574	9.57	3.84	15.33	37.46	22.04	40.79	吴底厂	本文
15	2WDC2-11	18.689±0.009	15.691±0.006	39.080±0.019	78.6	0.575	9.61	3.87	15.33	37.46	23.61	43.30	吴底厂	本文
16	2WDC2-15	18.728±0.007	15.746±0.008	39.223±0.020	119	0.579	9.72	3.92	15.33	37.46	27.36	47.12	吴底厂	本文
17	LZP021-2	18.722±0.005	15.666±0.006	39.051±0.016	22.8	0.571	9.56	3.84	15.33	37.46	21.76	42.52	李子坪	本文
18	LZP2-2	18.745±0.006	15.674±0.006	39.062±0.017	16.2	0.570	9.58	3.83	15.33	37.46	22.26	42.82	李子坪	本文
19	LZP2-6-1	18.620±0.008	15.597±0.007	38.716±0.017	8.7	0.569	9.44	3.74	15.33	37.46	17.21	33.57	李子坪	本文
20	LZP2-9-1	18.697±0.004	15.675±0.003	39.007±0.017	52.5	0.573	9.58	3.83	15.33	37.46	22.46	41.35	李子坪	本文
21	FLC2-8	18.725±0.003	15.720±0.002	39.135±0.005	89.0	0.576	9.67	3.88	15.33	37.46	21.89	40.49	富隆厂	本文
22	FLC2-21	18.609±0.004	15.597±0.003	38.740±0.019	16.9	0.570	9.44	3.76	15.33	37.46	18.59	38.19	富隆厂	本文
23	FLC2-23	18.645±0.007	15.640±0.006	38.906±0.014	45.9	0.572	9.52	3.81	15.33	37.46	25.54	44.77	富隆厂	本文
24	FLC054-5	18.670±0.002	15.667±0.002	38.975±0.008	62.0	0.574	9.57	3.83	15.33	37.46	17.24	34.21	富隆厂	本文
25	FLC054-8	18.650±0.006	15.618±0.006	38.889±0.010	13.8	0.570	9.48	3.80	15.33	37.46	20.15	38.65	富隆厂	本文
26	LZP1-1	18.692	15.685	39.037									李子坪	赵海滨(2006)
27	LZP145	18.685	15.659	38.96									吴底厂	何明勤等(2004)
28	FLC149	18.643	15.618	38.811									富隆厂	何明勤等(2004)
29	FLC160	18.634	15.604	38.768									富隆厂	何明勤等(2004)
30	FLC176	18.622	15.548	38.514									富隆厂	何明勤等(2004)

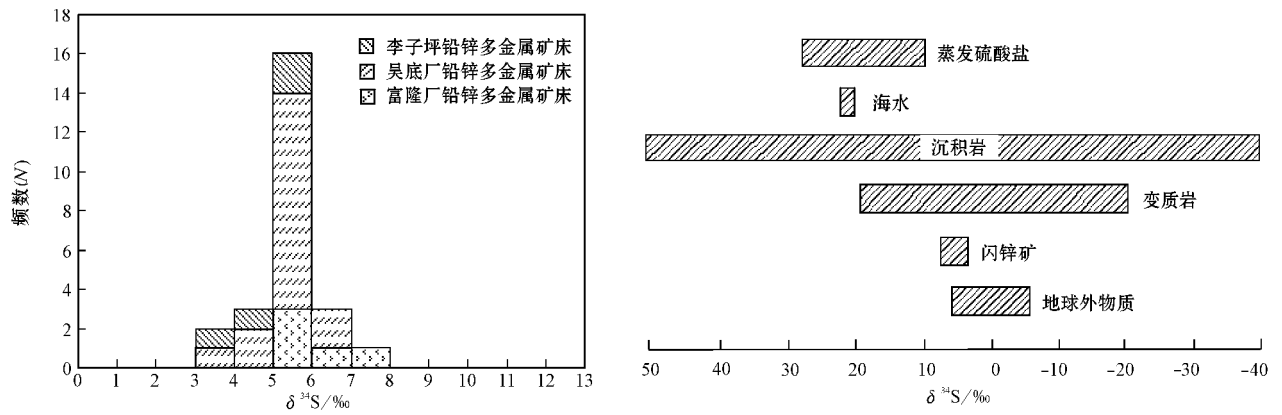


图 6 富隆厂一带铅锌多金属矿床闪锌矿 S 同位素组成直方图(左)及分布图(右)
(右图除闪锌矿范围外据韩吟文等 2003)

Fig. 6 Histogram (left) and distribution (right) of S isotopes in sphalerite from lead-zinc polymetallic deposits of Fulongchang area (the right figure from Han Yinwen *et al.*, 2003, except for sphalerite data)

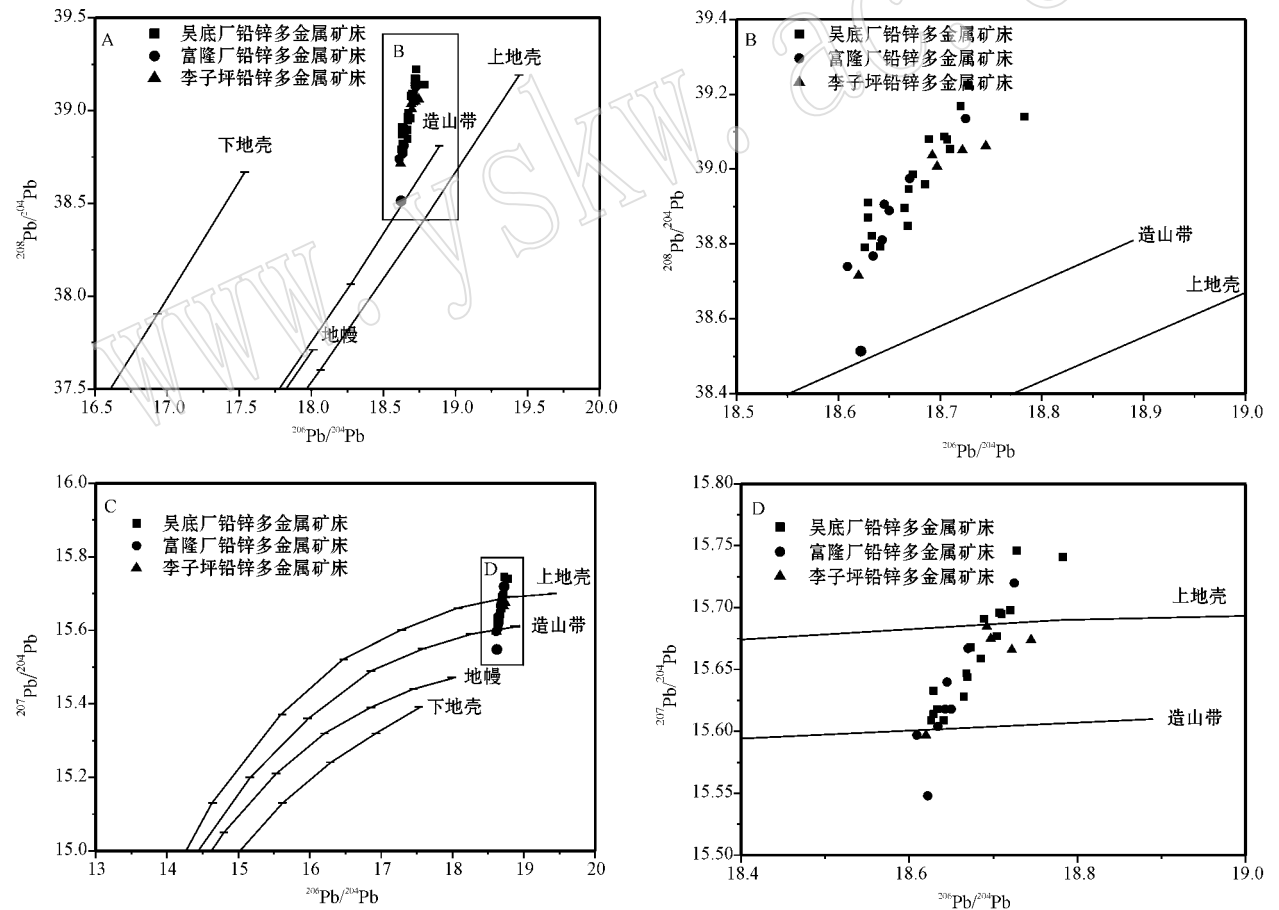


图 7 富隆厂一带铅锌多金属矿床闪锌矿铅同位素图(底图据 Zartman and Doe, 1981)

Fig. 7 Pb isotope in sphalerite from lead-zinc polymetallic deposits of Fulongchang area (base map from Zartman and Doe, 1981)

性(潘桂棠等, 2003)。将富隆厂一带铅锌多金属矿床中矿物 Pb 同位素值放入图中和兰坪盆地已有的

物源端员对比(图 9),发现矿物中的 Pb 同位素基本在中新生代沉积岩系范围内。

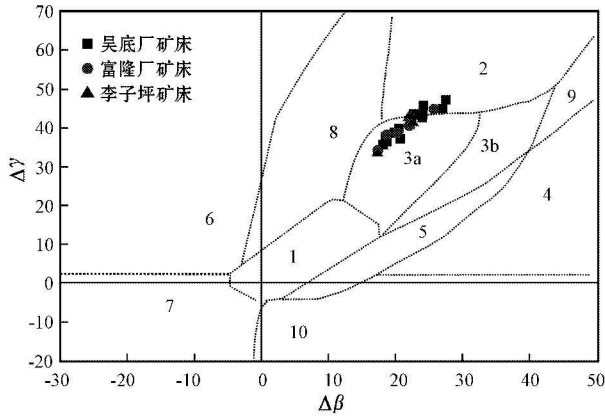


图8 富隆厂一带铅锌多金属矿床闪锌矿铅同位素 $\Delta\gamma$ - $\Delta\beta$ 成因分类图解(底图据朱炳泉等, 1998)

Fig. 8 $\Delta\gamma$ - $\Delta\beta$ genetic classification diagram of lead isotopes in sphalerite from lead-zinc polymetallic deposits of Fulongchang area (base map after Zhu Bingquan *et al.*, 1998)

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; $\Delta\beta = 1000 \times \beta / (\beta_M - 1)$, $\Delta\gamma = 1000 \times \gamma / (\gamma_M - 1)$, β 、 γ 和 β_M 、 γ_M 分别为样品和地幔的 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 和 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$

1—mantle-derived lead; 2—upper crust lead; 3—mixed lead of the upper crust and mantle subduction zone (3a: magmatism; 3b: sedimentation); 4—chemical sedimentary lead; 5—submarine hydrothermal lead; 6—medium-high grade metamorphism lead; 7—lower crust lead of high grade metamorphism; 8—orogenic belt lead; 9—upper crust lead of ancient shale; 10—retrograde metamorphism lead; $\Delta\beta = 1000 \times \beta / (\beta_M - 1)$, $\Delta\gamma = 1000 \times \gamma / (\gamma_M - 1)$, β and γ are values of $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ and $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ respectively in samples, β_M and γ_M are values of $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ and $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ respectively in the mantle

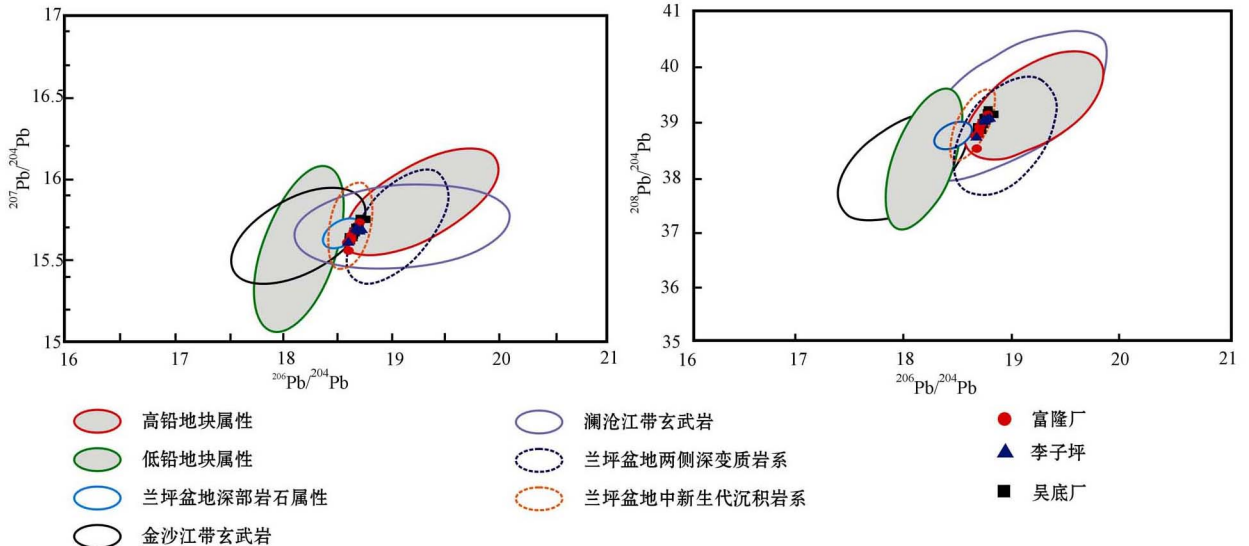


图9 兰坪盆地富隆厂一带金属矿化及可能成分端员的铅同位素组成范围

Fig. 9 Lead isotopic composition of lead-zinc polymetallic deposits in Fulongchang area and metal source end-member in Lanping Basin

4 讨论

富隆厂、吴底厂、李子坪矿床彼此相邻, 它们的矿体或受逆冲断裂次级断裂控制, 或受稍晚期的走滑断裂控制, 矿石矿物均以闪锌矿、方铅矿、细硫砷铅矿、黝铜矿等为主, 也见黄铁矿、雄黄、雌黄等矿物, 脉石矿物都以方解石为主, 这些特点均显示出3个矿床可能为同一构造-流体活动下的产物。本文研究结果显示出3个矿床的闪锌矿S同位素分布于较窄的范围内, $\delta^{34}\text{S}$ 值峰值一致(图6), Pb同位素组成基本重合(图7), 进一步证实3个矿床是同一构造-流体活动下的产物, 可以划归为同一矿床。

关于白秧坪矿集区西矿带成矿物质来源, 前人做了大量工作, 还存在较大争议, 争议的焦点为是否有幔源物质的参与。有人认为是壳-幔混源(薛春纪等, 2003; 王峰等, 2003; 王彦斌等, 2004; 何龙清等, 2005), 有人认为以壳源为主(李志明等, 2004, 2005; 徐启东等, 2004), 也有人认为以幔源为主(张尔新, 2005)。

从硫同位素看, 闪锌矿中 $\delta^{34}\text{S}$ 值组成稳定, 范围 3.8‰~7.8‰, 集中在 5‰~6‰ 之间, 说明闪锌矿形成时矿床中具有均一的硫源, 闪锌矿结晶过程中没有发生硫同位素的显著分馏。一般情况下, 生物成因硫化物的硫同位素具有两个明显的特征, 一是还原形成的硫化氢或硫化物中 $\delta^{32}\text{S}$ 的富集明显超过原始硫酸盐, $\delta^{34}\text{S}$ 通常为负值; 二是硫化氢或硫化物中 $\delta^{32}\text{S}$ 的富集随还原程度而变化, 表现为 $\delta^{34}\text{S}$ 值具有

大幅度波动范围(韩吟文等,2003)。而本文所测富隆厂一带闪锌矿中 $\delta^{34}\text{S}$ 值为正值,且较集中,所以基本排除了闪锌矿形成阶段硫同位素生物动力分馏。这些矿床 $\delta^{34}\text{S}$ 值分布十分集中,由于无硫酸盐伴生,该值可以近似代表流体的硫同位素组成。从图 6 看,闪锌矿中的 $\delta^{34}\text{S}$ 值和海相硫酸盐接近。由于云龙组膏盐建造的硬石膏 $\delta^{34}\text{S} = 13.5\text{‰} \sim 15.8\text{‰}$ (覃功炯等,1991)在 $100 \sim 150^\circ\text{C}$ 通过热化学硫酸盐还原(TSR)可以使硫酸盐 $\delta^{34}\text{S}$ 值降低 $10\% \sim 15\%$ (Machel *et al.*, 1995; Ohmoto and Goldhaber, 1997),所以云龙组海相硫酸盐经过热化学还原(TSR)可以使 $\delta^{34}\text{S}$ 值位于 $3\% \sim 8\%$ 。在兰坪盆地金顶铅锌矿区,三叠系三合洞组(T_{3s})含 $1\% \sim 25\%$ 不等的沥青,在第三系云龙组(E_{1y})中可见黑色玻璃状沥青和黑褐色粘稠原油物质(薛春纪等,2007, 2009),说明三合洞组和云龙组含大量的有机质,因此有机质的热化学还原是可能的还原方式。通过流体包裹体测温数据显示闪锌矿中包裹体均一温度集中于 $130 \sim 150^\circ\text{C}$ (未发表数据)。当温度大于 50°C 时,含硫有机物(如石油)可受热分解,生成 H_2S (郑永飞等,2000)。所以,含硫有机物的分解亦是硫的可能来源。

在 Zartman 的铅构造模式图(图 7)上,富隆厂一带铅锌多金属矿床闪锌矿铅同位素组成主要落入区域地层的铅同位素组成的范围,还有一部分落入造山带线附近,在 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 图中,亦有少数点落入造山带线和地幔线之间,表明这些矿床铅主要来自盆地内的地层,但也显示出幔源物质的信息。从图 8 中看,数据点总体上落入上地壳与地幔混合的俯冲带铅范围和上地壳铅范围内。Zartman 的铅构造模式图上显示有幔源物质参与成矿的信息, $\Delta\gamma - \Delta\beta$ 成因图上显示是岩浆作用的上地壳与地幔混合的俯冲带铅,这是否说明成矿和幔源的岩浆有关呢?通过对比矿床闪锌矿中 Pb 同位素值和兰坪盆地内的可能的物质来源端员(图 9),显示矿物 Pb 同位素值与兰坪盆地内中生代沉积岩系端员对应。从 1:20 万地质矿产图上看,兰坪盆地内部无岩浆岩出露,因此认为富隆厂一带铅锌多金属矿床中的成矿物质来自沉积地层。

5 结论

(1)富隆厂一带铅锌多金属矿床可以视为同一

矿床,只是成矿流体充填的成矿空间不同。

(2)成矿物质闪锌矿中的硫可能来自盆地中膏盐的有机质热化学硫酸盐还原,也可能为含硫有机物的分解,成矿物质主要来源于区域沉积地层。

致谢 在野外及室内和 David Leach 博士进行了有益的探讨,成文过程中和郑远川博士进行了充分的交流,两位评审专家提出了宝贵的建议,受益匪浅,在此一并致以衷心的感谢。

References

- Chen Kaixu. 2006. The Forming Mechanism of Copper-Silver Polymetallic Ore Concentration Area in the North of Lanping Foreland Basin in Yunnan Province[D]. Beijing: Dissertation for the Doctor Degree of China University of Geosciences, 1~160(in chinese with English abstract).
- Chen Kaixu, Yao Shuzhen, He Longqing, *et al.* 2004. Ore-forming fluid in Baiyangping silver-polymetallic mineralization concentration field in Lanping, Yunnan province[J]. Geological Science and Technology Information, 23(2): 45~50(in chinese with English abstract).
- Fan Shijia, Wang Anjian, Liu Hanbin, *et al.* 2006. A discussion on the helium and argon isotopic evidences for genesis of the Baiyangping copper-cobalt deposit in the Lanping basin[J]. Geological Review, 52(5): 628~635(in chinese with English abstract).
- Geological Bureau of Yunnan Province. 1974. 1:200000 Regional Geological Investigation Report of Lanping[M]. 1~149(in Chinese).
- Han Yinwen, Ma Zhendong, Zhang Hongfei, *et al.* 2003. Geochemistry [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1~369(in chinese).
- He Longqing, Chen Kaixu, Wei Junqi, *et al.* 2005. Geological and geochemical characteristics and genesis of ore deposits in eastern ore belt of Baiyangping area, Yunnan Province[J]. Mineral Deposits, 24(1): 61~70(in chinese with English abstract).
- He Longqing, Chen Kaixu, Yu Fengming, *et al.* 2004. Nappe tectonics and their ore-controlling of Lanping basin in Yunnan Province[J]. Geology and Prospecting, 40(4): 7~12(in chinese with English abstract).
- He Longqing, Ji Wei, Chen Kaixu, *et al.* 2007. Ore-controlling effect of nappe structure in the east ore zone of the Baiyangping area, Lanping basin, Yunnan province[J]. Journal of Geomechanics, 13(2): 110~118(in chinese with English abstract).
- He Longqing, Song Yucai, Chen Kaixu, *et al.* 2009. Thrust-controlled, sediment-hosted, Himalayan Zn-Pb-Cu-Ag deposits in the Lanping foreland fold belt, eastern margin of Tibetan Plateau[J]. Ore Geology Reviews, 36: 106~132.
- He Mingqin, Liu Jiajun, Li Chaoyang, *et al.* 2004. Fluid Mineralization Mechanism of a Large Copper-Lead-Zinc Ore-Concentrated Area in Lanping Basin-Taking Baiyangping Copper-Cobalt Polymet-

- allitic Area as the Example[M]. Beijing : Geological Publishing House , 1~117(in chinese).
- Hou Zengqian , Pan Guitang , Wang Anjian , *et al.* 2006. Metallogenesis in Tibetan collisional orogenic belt : II . Mineralization in late-collisional transformation setting[J]. *Mineral Deposits* , 25(5) : 521~543(in chinese with English abstract).
- Hou Zengqian , Song Yucai , Li Zheng , *et al.* 2008. Thrust-controlled , sediments-hosted Pb-Zn-Ag-Cu deposits in eastern and northern margins of Tibetan orogenic belt : Geological features and tectonic mode[J]. *Mineral Deposits* , 27(2) : 123~144(in chinese with English abstract).
- Li Zhiming , Liu Jiajun , Qin Jianzhong , *et al.* 2004. C , O and H isotope compositions of polymetallic deposits in Lanping basin , western Yunnan province and their geological significance[J]. *Journal of Jilin University(Earth Science Edition)* , 34(3) : 360~366(in chinese with English abstract).
- Li Zhiming , Liu Jiajun , Qin Jianzhong , *et al.* 2005. Ore-forming material sources of the Baiyangping copper-cobalt-silver polymetallic deposit in Lanping basin , western Yunnan province[J]. *Geology and Prospecting* , 41(1) : 1~6(in chinese with English abstract).
- Liu Jiajun , He Mingqin , Li Zhiming , *et al.* 2004. Oxygen and carbon isotopic geochemistry of Baiyangping silver-copper polymetallic ore concentration area in Lanping basin of Yunnan province and its significance[J]. *Mineral Deposits* , 23(1) : 1~10(in chinese with English abstract).
- Machel H G , Krouse H R and Sassen R. 1995. Products and distinguishing criteria of bacterial and thermochemical sulfate reduction [J]. *Applied Geochemistry* , 10 : 373~89.
- Mou Chuanlong , Wang Jian , Yu Qian , *et al.* 1999. The evolution of the sedimentary basin in Lanping area during mesozoic-cenozoic [J]. *Journal of Mineralogy and Petrology* , 19(3) : 30~36(in chinese with English abstract).
- Ohmoto H and Goldhaber M. 1997. Sulfur and carbon isotopes[A]. Barnes H L. *Geochemistry of hydrothermal ore deposits*[C]. New York : Wiley-Inter Science , 517~600.
- Pan Guitang , Xu Qiang , Hou Zengqian , *et al.* 2003. Archipelagic Orogenesis , Metallogenic Systems and Assessment of the Mineral Resources along the Nujiang-Lancangjiang-Jinshajiang Area in Southwestern China [M]. Beijing : Geological Publishing House , 1~420.
- Qin Gongjiong and Zhu Shangqing. 1991. Genetic model and prospecting prediction of Jinding lead-zinc ore deposit[J]. *Yunnan Geology* , 10(2) : 145~190(in chinese with English abstract).
- Shao Zhaogang , Meng Xiangang , Feng Xiangyang , *et al.* 2002. Analysis on the ore-forming geodynamics of the Baiyangping Ore-concentrated Field , Yunnan Province[J]. *Acta Geoscience Sinica* , 23(3) : 201~206(in chinese with English abstract).
- Shao Zhaogang , Meng Xiangang , Feng Xiangyang , *et al.* 2003. Tectonic characteristics of the Baiyangping- Huachangshan ore belt , Yunnan province and its ore-controlling effect[J]. *Journal of Geomechanics* , 9(3) : 246~253(in chinese with English abstract).
- Song Yucai. 2009. Characteristics and genetic model of sediment-hosted base metal deposits in Sanjiang area , southwest China[R]. Post-doctoral Report of Chinese Academy of Geological Sciences.
- Wang Feng and He Mingyou. 2003. Geochemistry of the trace elements from the Baiyangping silver polymetallic deposit in Lanping , Yunnan[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology* , 23(4) : 103~107(in chinese with English abstract).
- Wang Yanbin , Zeng Pusheng , Li Yanhe , *et al.* 2004. He-Ar isotope composition of Jinding and Baiyangping mineral deposit and its significance[J]. *Journal of Mineralogy and Petrology* , 24(4) : 76~80(in chinese with English abstract).
- Xu Qidong and Li Jianwei. 2003. Migration of ore-forming fluids and its relation to zoning of mineralization in northern Lanping Cu polymetallic area , Yunnan Province : Evidence from fluid inclusions and stable isotopes[J]. *Mineral Deposits* , 22(4) : 366~376(in Chinese with English abstract).
- Xu Qidong and Zhou Lian. 2004. Ore-forming fluid migration in relation to mineralization zoning in Cu-polymetallic mineralization district of northern Lanping , Yunnan : Evidence from Lead isotope and mineral chemistry of ores[J]. *Mineral Deposits* , 23 : 452~463(in Chinese with English abstract).
- Xue Chunji , Chen Yuchuan , Wang Denghong , *et al.* 2003. Geology and isotopic composition of helium , neon , xenon and metallogenic age of the Jinding and Baiyangping ore deposits , northwest Yunnan , China[J]. *Science in China , Series D* , 33(4) : 315~322(in Chinese with English abstract).
- Xue Chunji , Gao Yongbao , Chi Guoxiang , *et al.* 2009. Possible Former Oil-gas Reservoir in the Giant Jinding Pb-Zn Deposit , Lanping , NW-Yunnan : the Role in the Ore Accumulation[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment* , 31(3) : 221~229.
- Xue Chunji , Gao Yongbao , Zeng Rong , *et al.* 2007. Organic petrography and geochemistry of the giant Jinding deposit , Lanping basin , northwestern Yunnan , China[J]. *Acta Petrologica Sinica* , 23(11) : 2889~2900.
- Xue Chunji , Yang Jianming , Chen Yuchuan , *et al.* 2001. Copper-silver multimetallogenic characteristics of Baiyangping , Lanping[A]. Chen Yuchuan and Wang Denghong. *Study on Himalayan Endogenic Mineralization*[C]. Beijing : Seismological Press , 69~83(in Chinese with English abstract).
- Xue Chunji , Zeng Rong , Liu Shuwen , *et al.* 2007. Geologic , fluid inclusion and isotopic characteristics of the Jinding Zn-Pb deposit , western Yunnan , South China : A review[J]. *Ore Geology Reviews* , 31 : 337~359.
- Yang Weiguang. 2003. Geology and Geochemical Conditions of Mineralization and Ore-Forming Mechanism in Baiyangping Cu-Ag Polymetallic Ore Concentration , Yunnan Province[D]. Doctoral Dissertation of China University of Geosciences(in Chinese with English abstract).
- Zartman R E and Doe B R. 1981. Plumbotectonics-the mode[J]. *Tectonophysics* , 75 : 135~162.
- Zhang Erxin. 2005. On the genesis of ore deposits in west metallogenic zone of Baiyangping Cu-Ag polymetallic ore concentration area ,

- Lanping[J]. *Yunnan Geology*, 24(3):282~289(in Chinese with English abstract).
- Zheng Yongfei and Chen Jiangfeng. 2000. *Stable Isotope Geochemistry* [M]. Beijing: Science Press(in Chinese).
- Zhu Bingquan. 1998. *The Isotopic System Theory and Application in Earth Science-and on the Crust-Mantle Evolution in China* [M]. Beijing: Science Press, 1~330(in Chinese).
- Zhu Dagang, Meng Xiangang, Feng Xiangyang, *et al.* 2002. Characteristics of tectonic structures at Baiyangping, Yunnan province and their control over the minerogenesis of polymetal deposits in the minging area[J]. *Geology and Geochemistry*, 30(1): 28~33(in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 陈开旭. 2006. 云南兰坪前陆盆地北部 Cu、Ag 多金属矿集区形成机制[博士学位论文]. 北京: 中国地质大学, 1~160.
- 陈开旭, 姚书振, 何龙清, 等. 2004. 云南兰坪白秧坪银多金属矿集区成矿流体研究[J]. *地质科技情报*, 23: 45~50.
- 范世家, 王安建, 刘汉斌, 等. 2006. 论兰坪盆地白秧坪铜(钴)矿床成因的氩同位素证据[J]. *地质论评*, 52(5): 628~635.
- 韩吟文, 马振东, 张宏飞, 等. 2003. *地球化学* [M]. 北京: 地质出版社, 1~369.
- 何龙清, 陈开旭, 魏君奇, 等. 2005. 云南白秧坪地区东矿带矿床地质地球化学特征及成因分析[J]. *矿床地质*, 24(1): 61~70.
- 何龙清, 陈开旭, 余凤鸣, 等. 2004. 云南兰坪盆地推覆构造及其控矿作用[J]. *地质与勘探*, 40(4): 7~12.
- 何龙清, 李玮, 陈开旭, 等. 2007. 滇西兰坪盆地白秧坪地区东矿带推覆构造的控矿作用[J]. *地质力学学报*, 13(2): 110~118.
- 何明勤, 刘家军, 李朝阳, 等. 2004. 兰坪盆地铅锌铜大型矿集区的流体成矿作用机制——以白秧坪铜钴多金属地区为例[M]. 北京: 地质出版社, 1~117.
- 侯增谦, 潘桂棠, 王安建, 等. 2006. 青藏高原碰撞造山带: II. 晚碰撞转换成矿作用[J]. *矿床地质*, 25(5): 521~543.
- 侯增谦, 宋玉财, 李政, 等. 2008. 青藏高原碰撞造山带 Pb-Zn-Ag-Cu 矿床新类型: 成矿基本特征与构造控矿模型[J]. *矿床地质*, 27(2): 123~144.
- 李志明, 刘家军, 秦建中, 等. 2004. 滇西兰坪盆地多金属矿床碳、氧、氢同位素组成及其地质意义[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 34(3): 360~366.
- 李志明, 刘家军, 秦建中, 等. 2005. 兰坪盆地白秧坪铜钴银多金属矿床成矿物质来源研究[J]. *地质与勘探*, 41(1): 1~6.
- 刘家军, 何明勤, 李志明, 等. 2004. 云南白秧坪银铜多金属矿集区碳同位素组成及其意义[J]. *矿床地质*, 23(1): 1~10.
- 牟传龙, 王剑, 余谦, 等. 1999. 兰坪中新生代沉积盆地演化[J]. *矿物岩石*, 19(3): 30~36.
- 潘桂棠, 徐强, 侯增谦, 等. 2003. 西南“三江”多岛弧造山过程成矿系统与资源评价[M]. 北京: 地质出版社, 1~420.
- 邵兆刚, 孟宪刚, 冯向阳, 等. 2002. 云南白秧坪矿化集中区成矿构造动力学分析[J]. *地球学报*, 23(3): 201~206.
- 邵兆刚, 孟宪刚, 冯向阳, 等. 2003. 云南白秧坪—华昌山矿带构造特征及其控矿作用[J]. *地质力学学报*, 9(3): 246~253.
- 宋玉财. 2009. “三江”沉积岩容矿贱金属矿床: 发育特点与成矿模型[R]. 中国地质科学院博士后出站报告.
- 覃功炯, 朱上庆. 1991. 金顶铅锌矿床成因模式及找矿预测[J]. *云南地质*, 10(2): 145~190.
- 王峰, 何明友. 2003. 云南白秧坪银多金属矿床微量元素地球化学特征[J]. *沉积与特提斯地质*, 23(4): 103~107.
- 王彦斌, 曾普胜, 李延河, 等. 2004. 云南金顶和白秧坪矿床 He, Ar 同位素组成及其意义[J]. *矿物岩石*, 24(4): 76~80.
- 徐启东, 李建威. 2003. 云南兰坪北部多金属矿化区区域流体流动与矿化分带——流体包裹体与稳定同位素依据[J]. *矿床地质*, 22(4): 365~376.
- 徐启东, 周炼. 2004. 云南兰坪北部铜多金属矿化区成矿流体流动与矿化分带——矿石铅同位素和特征元素组成依据[J]. *矿床地质*, 23(4): 452~461.
- 薛春纪, 陈毓川, 王登红, 等. 2003. 滇西北金顶和白秧坪矿床地质和 He, Ne, Xe 同位素组成及成矿时代[J]. *中国科学 D 辑*, 33(4): 315~322.
- 薛春纪, 高永宝, Chi Guoxiang, 等. 2009. 滇西北兰坪金顶可能的古油气藏及对铅锌大规模成矿的作用[J]. *地球科学与环境学报*, 31(3): 221~229.
- 薛春纪, 高永宝, 曾荣, 等. 2007. 滇西北兰坪盆地金顶超大型矿床有机岩相学和地球化学[J]. *岩石学报*, 23(11): 2889~2900.
- 薛春纪, 杨建民, 陈毓川, 等. 2001. 兰坪白秧坪 Cu-Ag-Co 多金属成矿学特征[A]. 陈毓川. 喜马拉雅期内生成矿作用研究[C]. 北京: 地震出版社, 66~80.
- 杨伟光. 2003. 云南兰坪白秧坪铜银多金属矿集区成矿作用的地质-地球化学条件和成矿机制[博士学位论文]. 中国地质大学.
- 云南省地质局. 1974. 1:20 万兰坪幅区域地质调查报告[M]. 1~149.
- 张尔新. 2005. 兰坪白秧坪铜银多金属矿集区西矿带矿床成因[J]. *云南地质*, 24(3): 282~289.
- 郑永飞, 陈江峰. 2000. 稳定同位素地球化学[M]. 北京: 科学出版社.
- 朱炳泉. 1998. 地球科学中同位素体系理论与应用——兼论中国大陆壳幔演化[M]. 北京: 科学出版社, 1~330.
- 朱大岗, 孟宪刚, 冯向阳, 等. 2002. 云南白秧坪多金属成矿区构造特征及其控矿作用[J]. *地质地球化学*, 30(1): 28~33.