

云南白秧坪银铜多金属矿集区成矿流体的 稳定同位素地球化学研究

邹志超^{1,2}, 胡瑞忠^{1*}, 毕献武¹, 武丽艳¹, 冯彩霞¹, 唐永永^{1,2}

(1. 中国科学院 地球化学研究所 矿床地球化学国家重点实验室, 贵州 贵阳 550002; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 白秧坪银铜多金属矿集区位于滇西兰坪中-新生代沉积盆地中北部, 由东矿带(上三叠统碳酸盐岩建造内的铅锌银铜矿床)和西矿带(下白垩统碎屑岩建造内的银铜钴铅锌矿床)两部分组成。本研究对该矿集区东、西矿带不同矿段、不同矿化类型矿石样品进行了硫-碳-氧同位素的研究。硫同位素研究表明, 东矿带硫主要为地层硫, 西矿带热液硫为沉积地层硫、有机硫及深源硫或地幔硫的混合。碳同位素显示, 东矿带碳酸盐矿物 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 值为 $-3.0\text{‰} \sim +3.1\text{‰}$, 接近于海相碳酸盐, 明显区别于其他各类地质体, 暗示成矿流体的碳应来自碳酸盐岩; 西矿带各矿段的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 值变化范围小, 除白秧坪少量样品外, 其余均为负值($-5.1\text{‰} \sim -1.5\text{‰}$), 表明该区热液流体中碳的来源复杂, 存在有机碳、地壳碳酸盐的碳及深源(地幔)碳。综合分析表明, 西矿带成矿流体是一种混入深源流体的盆地热卤水, 形成了下白垩统碎屑岩建造内的银铜钴铅锌矿床; 东矿带成矿流体则是源于大气降水的盆地热卤水, 形成了上三叠统碳酸盐岩建造内的铅锌银铜矿床。

关键词: 稳定同位素; 成矿流体; 银铜多金属矿集区; 白秧坪; 兰坪盆地

中图分类号: P597.2; P618.2 文献标识码: A 文章编号: 0379-1726(2012)06-0515-15

Study on isotope geochemistry compositions of the Baiyangping silver-copper polymetallic ore deposit area, Yunnan Province

ZOU Zhi-chao^{1,2}, HU Rui-zhong^{1*}, BI Xian-wu¹, WU Li-yan¹, FENG Cai-xia¹ and TANG Yong-yong^{1,2}

1. State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: Baiyangping silver-copper polymetallic ore-concentration area were developed on the northern border of the Lanping Basin, Yunnan Province. S-C-O isotopic compositions were analyzed to trace sources of ore-forming materials of the eastern ore-belt (limestone and dolomite of Upper Triassic Sanhedong Formation) and the western ore-belt (sandstone and fine-grained sandstone of Lower Cretaceous Jingxing Formation). Sulfur isotope analysis shows that the reduced sulfur of the eastern ore-belt mainly comes from the strata sulfate. The sulfur in the western ore-belt is derived from deep-seated mantle sulfur mixed by crustal sulfur. C and O isotopic analyses of silver-copper polymetallic ore concentration area show that the $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ values range from -3.0‰ to $+3.1\text{‰}$ in hydrothermal minerals such as calcite and siderite of the eastern ore-belt. The results show that CO_2 in ore-forming fluids are derived from thermal decomposition of marine carbonates. The C isotopic analyses of the western ore-belt show that the $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ values range from -5.1‰ to -1.5‰ , with limited variations. The carbon isotopic analyses indicate that CO_2 in ore-forming fluids of the western ore-belt are derived from deep-seated mantle carbon mixed by crustal carbon. The ore-forming fluids of the western ore-belt were hot brine of basin

收稿日期(Received): 2012-01-03; 改回日期(Revised): 2012-02-26; 接受日期(Accepted): 2012-04-17

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(2009CB421005); 中国科学院重要方向项目群项目(KZCX2-YW-Q04-01)

作者简介: 邹志超(1983-), 女, 博士研究生, 矿床地球化学专业。E-mail: zouzhichaoten@126.com

* 通讯作者(Corresponding author): HU Rui-zhong, E-mail: huruizhong@vip.gyig.ac.cn, Tel: +86-851-5891186

ZOU Zhi-chao et al.: Stable isotope geochemistry of copper deposits

which may partly derived from deeper sources, and formed the Ag-Cu-Co-Pb-Zn deposit in sandstone and fine-grained sandstone of the Lower Cretaceous Jingxing Formation; the ore-forming fluids of the eastern ore-belt were paleo-meteoric water, and formed the Pb-Zn-Ag-Cu deposit in limestone and dolomite of the Upper Triassic Sanhedong Formation.

Key words: stable isotope; ore-forming fluid; silver-copper polymetallic ore-concentration field; Baiyangping; Lanping Basin

0 引言

滇西兰坪中新世盆地蕴藏有丰富的 Ag、Cu、Pb、Zn、Sr、Co 等矿产资源。白秧坪银铜多金属矿集区位于兰坪盆地中北部, 包括东矿带(三山-河西银多金属矿带)和西矿带(富隆厂-白秧坪铜多金属矿带)两部分, 是著名三江成矿带内新近发现的重要成矿集中区之一, 具有重要的找矿前景。初步估算表明, 白秧坪银铜多金属矿集区 Ag 4598.65 t, 平均品位 178.43 g/t; Cu 37.60 万 t, 平均品位 1.45%; Pb 43.37 万 t, 平均品位 5.15%; Zn 36.63 万 t, 平均品位 5.02%; Co 1444 t, 平均品位 0.079%^[1-2]。

自发现白秧坪银铜多金属矿集区以来, 一些学者对该研究区成矿流体的性质和来源、矿床成因进行了研究^[3-11]。对成矿流体的研究主要存在下面几种认识: (1) 主要为源于深部的中低温热卤水, 成矿物质具有深源特征^[3-5]; (2) 以大气降水为主的盆地热卤水, 成矿物质来自地壳^[6-9]; (3) 具壳幔混合来源特征^[10-11]。对于矿床成因的研究亦存在较大的分歧和争议, 有“中低温浅成热液矿床”^[12]、“壳幔流体混合成矿”^[10]、“造山型 Pb-Zn-Ag-Cu 矿床”^[6-7]和“沉积-中低温热液改造构造控矿型”^[13]几种矿床成因类型的认识, 这在很大程度上制约着该多金属矿集区成矿机理的深入研究及区域成矿规律的系统总结。

白秧坪银铜多金属矿集区的成矿特征显示, 矿集区东、西矿带矿体分布受构造控制显著, 但两者在容矿岩石、矿物共生组合和成矿元素组合等方面均存在明显差异^[1-3, 12]; 这种成矿元素组合的差异应该是由东西矿带成矿物质源区特征、成矿流体的性质、成矿流体迁移和矿质沉淀的物理化学条件的差异所造成的, 不能将东、西矿带作为一个整体进行笼统讨论。本次研究工作拟在总结前人研究成果的基础上, 对比研究白秧坪矿集区东、西矿带成矿流体的稳定同位素地球化学特征, 探讨造成白秧坪铜多金属矿集区东西矿带成矿特征存在明显差异的

可能的控制机制, 为揭示该区大规模的成矿机制奠定理论基础。

1 地质背景

滇西兰坪盆地在大地构造上属于环特提斯构造域的一个重要部分, 位于阿尔卑斯-喜马拉雅巨型构造带东段弧形转弯处, 是冈瓦纳大陆和古欧亚大陆结合地带, 其形成发展经历了复杂多变的演化过程^[10, 14-16]。伴随着 60~65 Ma 开始的陆-陆碰撞作用, 盆地内形成超大型铅锌矿 1 个, 大型银矿 2 个, 中型铜银多金属矿 3 个, 小型矿床(点)多达百余个, 构成青藏高原东缘最重要的铅锌银多金属富集区^[6]。

兰坪盆地地处滇西三江地区, 位于三江构造带中段, 呈近南北向带状展布, 向南与思茅盆地相接, 向北趋于尖灭。其盆地边界断裂带为东侧的金沙江-哀牢山造山带和西侧的澜沧江断裂带, 中部兰坪-思茅断裂呈近南北向舒缓弧形分布, 断裂面在兰坪一带西倾, 在思茅一带东倾^[14, 17](图 1)。由于金沙江和澜沧江洋盆的相向俯冲和碰撞, 兰坪盆地两侧分别发育的两个前陆逆冲推覆构造系统, 自其两缘向盆地中心逆冲, 形成白秧坪矿集区东侧推覆构造主推覆断层——华昌山断裂^[18], 以及西侧推覆构造主推覆断层——四十里箐、上下庄断裂和瞎眼山断裂。

受深大断裂长期活动的影响, 兰坪盆地的岩浆活动自晚古生代至新生代都比较强烈, 火山岩主要分布在盆地的东西两侧, 呈条带状展布。在盆地西缘, 火山岩沿澜沧江断裂带分布, 南段为晚泥盆世钠质火山岩、中三叠世中酸性火山岩、晚三叠世中基性火山岩、侏罗-白垩纪中酸性花岗岩类; 北段则是以石炭纪中性火山岩为主夹少量酸性-基性火山岩、三叠纪中酸性熔岩及其火山碎屑岩夹少量中基性熔岩、侏罗-白垩纪中酸性花岗岩。在盆地东缘, 沿金沙江-哀牢山断裂分布有三叠纪中酸性喷出岩和流纹岩、侏罗-白垩纪酸性花岗岩。在盆地东缘及盆地内均存在新生代碱性岩, 沿金沙江-哀牢山断裂带

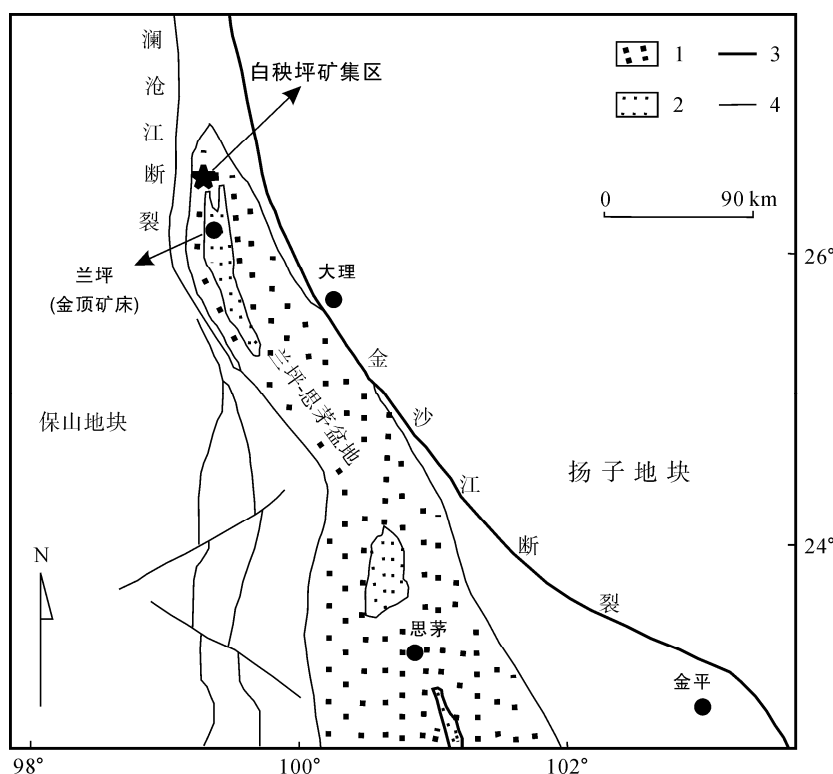


图1 兰坪盆地地质-构造简图和白秧坪多金属矿床所处位置^[17]

Fig.1 Sketch geological and tectonic map of the Lanping Basin and the location of Baiyangping poly-metallic deposit^[17]

1—中生代沉积物; 2—第三纪沉积物; 3—盆地边界断裂; 4—区域断裂。

1—Mesozoic sediments; 2—Tertiary sediments; 3—basin bounding fault; 4—regional fault.

出露有剑川碱性岩群、老君山正长岩、冷家坪碱性岩体等; 在盆地内部沿兰坪-思茅断裂出露永平卓潘碱性岩体、巍山岩群, 另外在普洱县北有喜马拉雅期喷出的玄武岩^[10,14]。

盆地边缘断裂带外侧出露元古宙变质基底, 盆地内主要出露中生代陆相沉积地层。上三叠统主要由杂色碎屑岩、泥质岩和灰岩、黑色页岩组成; 侏罗系主要由杂色和紫红色的细碎屑岩、泥质岩、夹泥灰岩组成, 其中含有石膏; 白垩系主要由紫红色夹灰绿色砂岩、粉砂岩、泥岩组成; 第三系主要由红色粉砂岩、钙质泥岩、砾岩与砂岩夹灰色泥灰岩和含盐泥砾岩组成^[10]。

2 矿集区地质特征

白秧坪银铜多金属矿集区位于兰坪盆地北部, 银铜多金属成矿作用发生于喜马拉雅期走滑盆地发育阶段, 主要受近南北向的逆冲断裂控制, 形成了一条主要产出白垩系地层中的银铜多金属成矿带^[6]。该矿集区受到与澜沧江-昌宁-孟连造山带、金沙江-

哀牢山造山带有关的两个前陆逆冲推覆构造系统的控制^[12]。根据矿化特征、构造特征及控矿作用等差异, 将白秧坪银铜多金属矿集区划分为沿华昌山断裂分布的东矿带和沿瞎眼山断裂、上下庄-四十里箐断裂所夹持的断块中分布的西矿带(图2)。东矿带与金沙江-哀牢山造山带前陆逆冲推覆构造系统关系密切, 而西矿带则与澜沧江-昌宁-孟连造山带前陆逆冲推覆构造系统关系密切^[18]。前人研究表明^[19], 西矿带形成于早阶段, 成矿时代为 57~62 Ma, 而东矿带形成于晚阶段, 成矿时代应小于 50 Ma。

矿集区内构造复杂, 褶皱、断裂十分发育, 其中的通甸-乔后断裂及清水江断裂为分区断裂。以通甸-乔后断裂为界, 以东为云岭褶皱带, 清水江断裂将其分为东部白茫雪山褶皱束, 西部雪龙山褶皱束之雪龙山断块; 以西为兰坪-思茅中坳陷的云龙-江城褶皱束, 其中包括华昌山断裂、四十里箐-上下庄断裂、瞎眼山断裂。总体构造线呈北北西、近南北向展布, 发育次级北东向、近东西向构造。矿集区出露的地层以中生界为主, 其次为新生界, 地层从老到新依次为上三叠统三合洞组(T_3s)、挖鲁八组(T_3w1)、

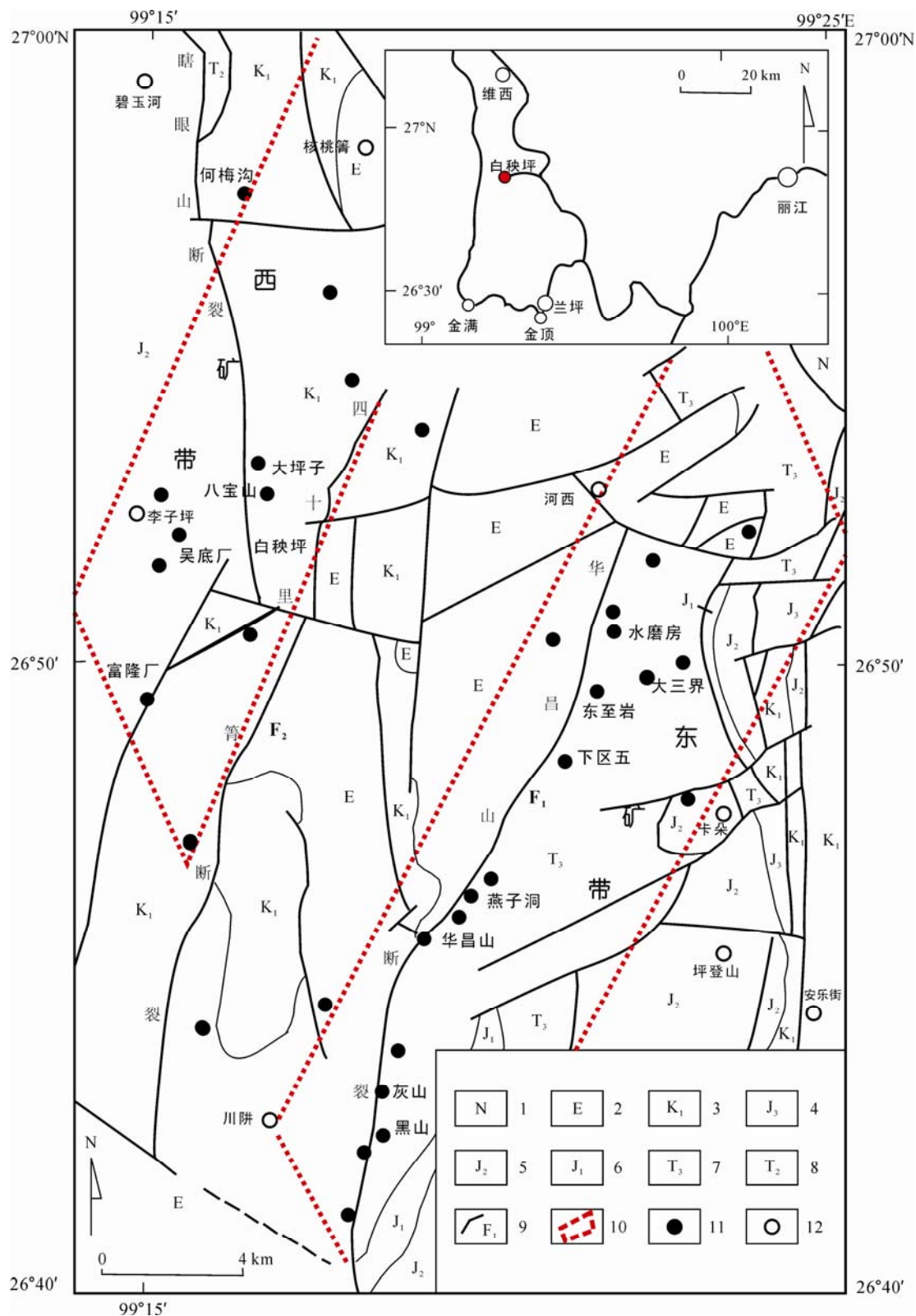


图 2 白秧坪银铜多金属矿集区矿床分布图^[11]

Fig.2 Sketch map of the distribution of the Baiyangping silver-copper polymetallic ore-concentration area^[11]

1-新近系; 2-古近系; 3-下白垩统; 4-上侏罗统; 5-中侏罗统; 6-下侏罗统; 7. 上三叠统; 8-中三叠统; 9-断裂; 10-矿区范围; 11-多金属矿床矿化点; 12-村镇。

1-Neogen; 2-Paleogene; 3-Lower Cretaceous; 4-Upper Jurassic; 5-Middle Jurassic; 6-Lower Jurassic; 7-Upper Triassic; 8-Middle Triassic; 9-fault; 10-mining areas; 11-polymetallic deposit; 12-village.

麦初箐组(T_3m)、下侏罗统漾江组(J_1y)、中侏罗统花开佐组(J_2h)、上侏罗统坝注路组(J_3b)、下白垩统景星组(K_{1j})、南新组(K_{1n})、虎头寺组(K_{1h})、古近系古新统云龙组(E_{1y})、果郎组(E_{2g})、宝相寺组(E_{2b})以及第四系更新统^[1-4,11,12,20]。

2.1 东矿带地质特征

白秧坪银铜多金属矿集区东矿带出露的地层从老到新依次为上三叠统三合洞组(T_3s)、挖鲁八组(T_3wl)、麦初箐组(T_3m)、古近系古新统云龙组(E_{1y})、果郎组(E_{2g})、宝相寺组(E_{2b})以及第四系更新统(图 2)。主要含矿层为上三叠统三合洞组含生物碎屑、白云质、碳质碳酸盐岩。该矿带长约 25 km, 宽约 4 km, 呈北北东向展布。主要包括下区五-东至岩银矿段、燕子洞铜矿段、华昌山-灰山-黑山铅锌矿段(表 1)。矿带内矿体以透镜状、似层状为主, 矿体产状与华昌山主断裂带基本一致, 主要赋存在华昌山断裂构造破碎带及其旁侧, 并随其变化而变化, 总体产状: 倾向 $80^\circ\sim 135^\circ$, 倾角 $35^\circ\sim 70^\circ$, 于东至岩-下区五部分地段转为倾向 $270^\circ\sim 330^\circ$, 倾角 $50^\circ\sim 80^\circ$ 。沿华昌山断裂自南向北, 成矿元素存在 Pb 、 $Zn(Ag)\rightarrow Cu(Ag)\rightarrow Ag(Cu)\rightarrow Cu$ 、 $Sr\rightarrow Sr$ 的演化趋势; 蚀变组合变化趋势依次表现为方解石化、弱硅化 \rightarrow 方解石化、白云石化、萤石化及弱黄铁矿化 \rightarrow 天青石化、方解石化、重晶石化、黄铁矿化。矿石组构比较复杂(图 3), 主要有角砾状构造、细(网)脉状构造、脉状构造、块状构造、浸染状构造、斑杂状构造; 主要矿石结构有交代残余结构、自形-他形粒状结构、碎裂结构、重结晶结构、同溶结构、淀晶结构等。该矿带的铜矿物主要有黝铜矿系列、辉铜矿、黄铜矿、斑铜矿、铜蓝、辉铜矿等; 铅矿物主要有方铅

矿及车轮矿等硫盐矿物; 锌矿物主要为闪锌矿和菱锌矿; 其他常见的金属硫化物有黄铁矿和少量白铁矿。脉石矿物主要有方解石、天青石、菱铁矿、白云石、萤石、石英及黏土矿物^[2-3]。

2.2 西矿带地质特征

白秧坪银铜多金属矿集区矿区出露的地层以中生界为主, 其次为新生界, 地层从老到新依次为中侏罗统花开佐组(J_2h)、下白垩统景星组(K_{1j})、南新组(K_{1n})、古近系古新统云龙组(E_{1y})以及第四系更新统(图 2)。主要含矿层为中侏罗统花开佐组(J_2h)碎屑岩及碳酸盐岩夹泥质岩组合、下白垩统景星组(K_{1j})石英砂岩及细砂岩建造。该矿带长约 15 km, 宽 1.2~3.0 km, 呈北东-南西向展布。主要包括白秧坪铜钴矿段、核桃箐铜矿段、李子坪铅锌矿段、吴底厂铅锌矿段、富隆厂铜银多金属矿段、何梅沟铜矿段、八宝山铜矿段(表 1)。矿带内矿体呈脉状、透镜状, 严格受瞎眼山断裂和四十里箐断裂控制, 主要产在两断裂之间的南北、北东、北西向次级断裂之中, 总体产状倾向以南东为主, 倾角 $43^\circ\sim 87^\circ$ 。成矿元素在北部核桃箐以 Cu 为主, 伴生 Ag ; 白秧坪以 Cu 、 Co 共生为主, 伴生 Ag ; 南部富隆厂则以 Ag 为主, 共(伴)生 Cu 、 Pb 、 Zn , 向深部有变富趋势。矿带内广泛发育的围岩蚀变有黄铁矿化、碳酸盐化、重晶石化和硅化。其中碳酸盐化表现为铁白云石化和菱铁矿化, 并与 Cu 、 Pb 矿化关系密切。矿石组构类型较简单, 矿石结构有交代残余、半自形-他形粒状、碎裂、针状-叶片状、似海绵陨铁、反应边及填隙结构; 矿石构造有块状、细(网)脉状、角砾状、浸染状、蜂窝状、多孔状、土状、肠状等构造。该矿带的矿石矿物总体以黝铜矿系列之硫化物发育为特征, 不同矿床

表 1 白秧坪铜银多金属矿集区东、西矿带成矿地质特征

Table 1 Geological features of the eastern and western ore-belts in the Baiyangping silver-copper polymetallic ore-concentration area

矿带	矿床(点)	主要容矿岩石	矿体形态	容矿控矿构造	矿物共生组合	元素组合	围岩蚀变
东矿带	下区五-东至岩, 燕子洞, 华昌山-灰山-黑山	上三叠统三合洞组含生物碎屑、白云质、碳质碳酸盐岩	似层状、透镜状	华昌山逆冲推覆构造及次级构造控制	方铅矿-闪锌矿-辉银矿-孔雀石-蓝铜矿-白铅矿-方解石-天青石-重晶石	$Pb-Zn-Ag-(Cu)$	硅化、碳酸盐化、重晶石化、褐铁矿化等
西矿带	白秧坪、核桃箐、李子坪、吴底厂、富隆厂、八宝山	中侏罗统花开佐组(J_2h)碎屑岩及碳酸盐岩夹泥质岩组合、下白垩统景星组(K_{1j})石英砂岩及细砂岩建造	透镜状、脉状	四十里箐主断裂及旁侧的次级断裂	砷黝铜矿-斑铜矿-黄铜矿-辉铜矿-硫钴矿-辉银矿-汞银矿-黝银矿-黄铁矿-方解石-天青石-铁白云石-石英	$Cu-Co-Ag-(Pb-Zn)$	方解石化、白云石化、天青石化、重晶石化、黄铁矿化、萤石化

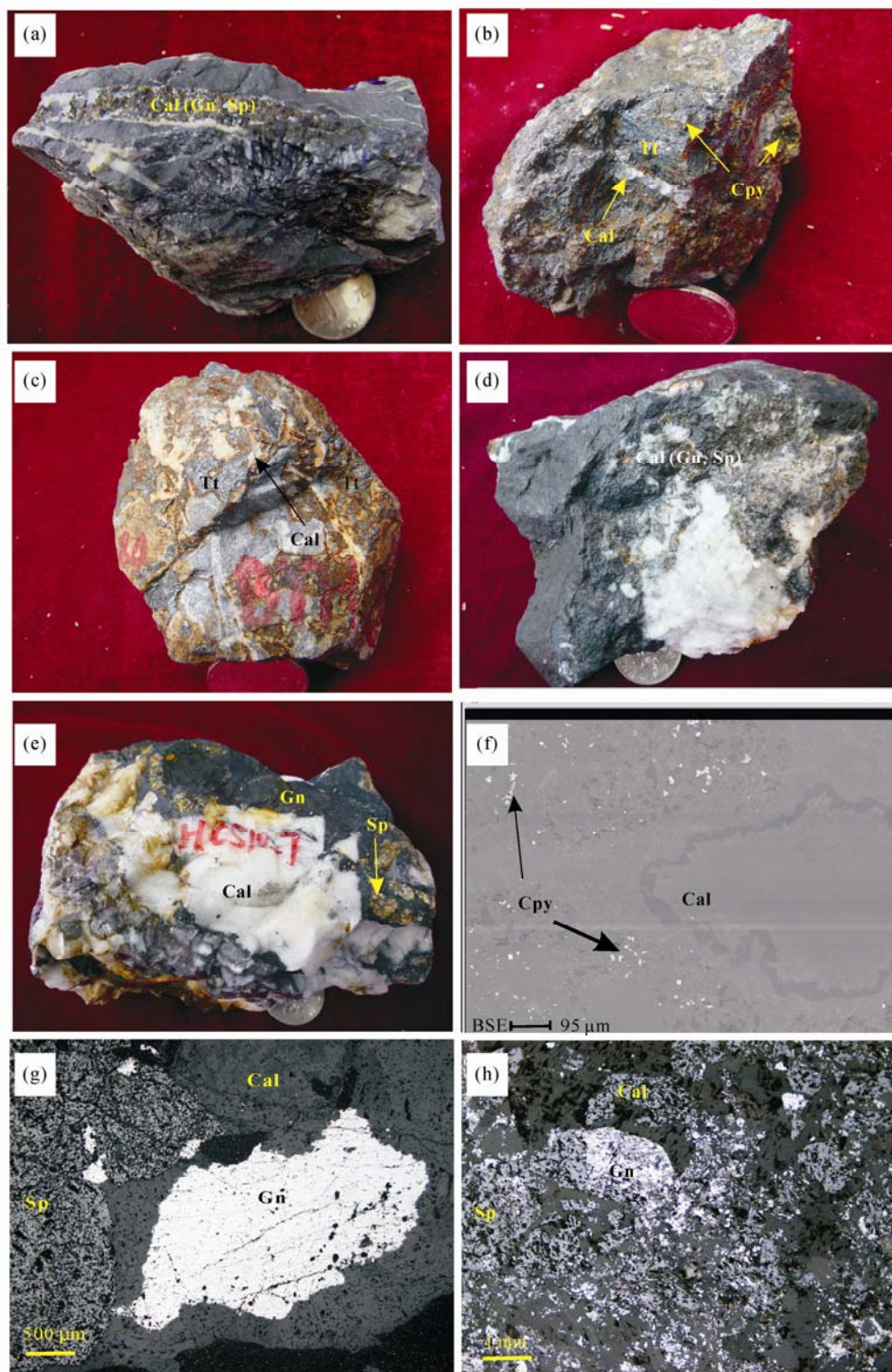


图3 白秧坪矿集区中主要矿石矿物组合

Fig.3 Ore mineral assemblages of the Baiyangping silver-copper polymetallic ore-concentration area

(a) 含铅锌矿方解石脉(西矿带); (b) 黝铜矿与黄铜矿共生, 方解石脉穿切其中(西矿带); (c) 角砾状黝铜矿(西矿带); (d) 含铅锌矿方解石脉(东矿带); (e) 铅锌矿石中发育方解石角砾(东矿带); (f) 浸染状黄铜矿(西矿带); (g) 方铅矿+闪锌矿+方解石(西矿带); (h) 方铅矿+闪锌矿+方解石(东矿带)。缩写代号: Sp-闪锌矿; Gn-方铅矿; Ag-银; Cpy-黄铜矿; Tt-黝铜矿; Cal-方解石; Q-石英。
(a) Calcite veins with lead and zinc (western belt); (b) tetrahedrite and chalcopyrite penetrated by calcite vein (western belt); (c) tetrahedrite (western belt); (d) calcite veins with lead and zinc (eastern belt); (e) galena + sphalerite + calcite (western belt); (f) chalcopyrite (western belt); (g) galena + sphalerite + calcite (western belt); (h) galena + sphalerite + calcite (eastern belt). Abbreviations: Sp-Sphalerite; Gn-Galena; Ag-Silver; Cpy-Chalcopyrite; Tt-Tetrahedrite; Cal-chalcopyrite; Q-Quartz.

或不同成矿地段矿石矿物组合存在差异^[1,4,11,20]。总体上,东、西矿带地质特征较为相似,矿石矿物均为中低温成因的矿物组合,但两者分别受控于两大推覆构造系统,元素组合亦显示差异性,因此,对东、西矿带的流体来源和成矿方式进行对比研究显得尤为重要。

3 采样及测试

本次研究所用硫化物和硫酸盐样品分别采自白秧坪、核桃箐、李子坪、吴底厂、何梅沟、下区五及华昌山等 7 个矿段,白秧坪、核桃箐、李子坪、吴底厂、何梅沟及华昌山的样品主要采自井下坑道矿脉中,下区五矿段的样品采自采矿场,其样品描述见表 2 和表 3。其中白秧坪、核桃箐、李子坪、吴底厂、何梅沟 5 个矿段的近矿围岩为花开佐组(J_2h)和景星组(K_{1j})粉砂岩,华昌山矿段近矿围岩为三合洞组(T_3s)灰岩,下区五矿段近矿围岩为云龙组粉砂岩、钙质泥岩、含石膏泥砾岩。分析所需样品均采用常规分选方法,首先将所采集样品破碎并过筛,粒级为 40~60 目,然后在双目显微镜下反复挑选,矿物纯度达到 99%以上,再将挑选出的单矿物在玛瑙研钵中磨成 200 目粉末。

硫-碳-氧同位素测试工作均在中国科学院地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室完成。硫同位素分析:在高温真空条件下,利用硫酸盐矿物样品与 Cu_2O 和 V_2O_5 混合氧化剂反应制取 SO_2 ,采用 MAT 251 型质谱仪测定, $\delta^{34}S$ 以 CDT 为标准,分析精度为 $\pm 0.2\text{‰}$ 。碳-氧同位素分析:在真空 25 $^{\circ}C$ 的条件下,使样品与 100%磷酸反应 24 h 释放 CO_2 ,再将收集的 CO_2 气体排放入 MAT 251 型质谱仪中进行碳-氧同位素测定,采用我国的国家一级碳酸盐碳-氧同位素参考物质 GBW04416 作为工作标准,GBW4416 的 $\delta^{13}C_{PDB}$ 和 $\delta^{18}O_{PDB}$ 值分别为 1.61‰和-11.59‰。 $\delta^{13}C$ 以 PDB 为标准, $\delta^{18}O$ 分别以 PDB 和 SMOW 为标准。分析精度优于 $\pm 0.2\text{‰}$ 。为便于比较,在计算 $\delta^{18}O_{SMOW}$ 时,采用 Friedman *et al.*^[24]的平衡方程, $\delta^{18}O_{SMOW} = 1.03086 \times \delta^{18}O_{PDB} + 30.86$ 。分析误差为 $\pm 0.2\text{‰}$ 。

4 结果与讨论

4.1 硫同位素组成

本次研究得到的硫同位素数据及前人数据列于

表 2,并分别绘制出各矿区硫化物及硫酸盐的 $\delta^{34}S$ 频率直方图(图 4)。东矿带方铅矿 $\delta^{34}S$ 值为-6.8‰~-4.1‰,平均为-5.1‰;闪锌矿 $\delta^{34}S$ 值为-6.1‰~-2.6‰,平均为-4.1‰。西矿带黄铜矿 $\delta^{34}S$ 值为-3.8‰~5.5‰,平均为 1.9‰;黝铜矿 $\delta^{34}S$ 值为 0.8‰~9.3‰,平均为 6.1‰;方铅矿 $\delta^{34}S$ 值为 5.0‰~5.8‰,平均为 5.4‰;闪锌矿 $\delta^{34}S$ 值为 10.0‰~11.2‰,平均为 10.6‰。东矿带中硫化物的 $\delta^{34}S$ 值整体上表现为以石膏>闪锌矿>方铅矿的顺序递减,表明各矿物之间已达到同位素分馏平衡;西矿带中各矿段硫化物之间亦达到同位素的分馏平衡^[25]。

Ohmoto^[26]指出,热液矿床中硫化物的硫同位素组成是成矿溶液中总硫同位素组成、氧逸度、pH、离子强度和温度的函数。因此,热液硫化物的硫同位素组成,不仅取决于其源区物质的硫同位素组成,还取决于成矿流体的物理化学条件,不能简单地用硫化物的 $\delta^{34}S$ 值来直接指示成矿流体中硫的来源,而应用成矿热液的总硫同位素($\delta^{34}S_{\Sigma S}$)组成来指示成矿流体的来源。Rye *et al.*^[27]通过对世界上一些著名的热液矿床的硫同位素研究,对成矿热液的总硫同位素组成进行了大致的归纳:(1) $\delta^{34}S_{\Sigma S} = 0$,这类矿床的硫源为地幔硫;(2) $\delta^{34}S_{\Sigma S} = +20\text{‰}$ 左右,硫来源于大洋水和海水蒸发岩;(3) $\delta^{34}S_{\Sigma S} = +5\text{‰} \sim +15\text{‰}$,介于前两种之间,硫来源则相对复杂;(4) 而 $\delta^{34}S_{\Sigma S}$ 为较大负值的矿床的硫,则来源于开放的沉积条件下的有机(细菌)还原成因硫。

前人研究认为,兰坪盆地地层中赋存有多层蒸发岩(膏岩)建造^[28],它们均可作为盆地内多金属矿床提供丰富硫源。东矿带东至岩矿段天青石 $\delta^{34}S$ 值为 16.3‰,与盆地中沉积地层中蒸发岩石膏的 $\delta^{34}S$ 值(13.7‰~14.6‰)相近;由于石膏与沉淀它的溶液之间的硫同位素分馏很小,仅 $1.7\text{‰} \pm 0.1\text{‰}$,可用石膏的 $\delta^{34}S$ 值来近似代表海水的 $\delta^{34}S$ 值^[29]。推测海水硫酸盐可能为该矿集区东矿带提供丰富的硫源。

东矿带未出现重晶石与硫化物的共生矿物组合,故硫化物的硫同位素组成可以基本表示热液的总硫同位素组成。该矿带矿石硫化物(闪锌矿、方铅矿)的 $\delta^{34}S$ 值为-6.8‰~-2.6‰,硫同位素组成变化幅度较小,表现出富集轻硫的特征。根据 Ohmoto *et al.*^[30]的硫同位素分馏模式,有机质热分解($T > 50\text{ }^{\circ}C$)有可能使源岩 $\delta^{34}S$ 值为+15‰的硫酸盐还原形成的硫化物具有 $0\text{‰} \pm 5\text{‰}$ 的硫同位素组成特征。另外,在硫酸盐的细菌还原作用下,由于初始硫酸盐与最终产物

表 2 白秧坪银铜多金属矿集区硫同位素组成

Table 2 $\delta^{34}\text{S}$ values of the Baiyangping silver-copper polymetallic ore-concentration area

矿带	矿段	样号	矿物名称	样品描述	$\delta^{34}\text{S}$ (‰)	资料来源
东 矿 带	华 昌 山	HCS10-14	闪锌矿	浸染状矿脉	-6.1	本文
		HCS10-23	闪锌矿	角砾状硫化物矿石	-5.4	本文
		HCS10-7	闪锌矿	含闪锌矿、方铅矿方解石脉	-2.9	本文
		HCS10-22	闪锌矿	含闪锌矿、方铅矿方解石脉	-2.6	本文
		HCS10-21	闪锌矿	闪锌矿石	-3.0	本文
		HCS10-16	方铅矿	铅矿石	-4.1	本文
		HCS10-23	方铅矿	含闪锌矿、方铅矿方解石脉	-4.8	本文
		HCS10-21	方铅矿	铅锌矿石	-4.8	本文
		HCS10-14	方铅矿	铅矿石	-4.6	本文
		HCS10-10	方铅矿	铅矿石	-4.8	本文
		HCS10-07-1	方铅矿	硫化物矿石	-6.8	本文
		HCS10-6	方铅矿	硫化物矿石	-5.3	本文
	下 区 五	XQW10-26-1	石膏	围岩中浸染状石膏	13.8	本文
		XQW10-26-2	石膏	围岩中浸染状石膏	13.8	本文
		XQW10-22	石膏	围岩中浸染状石膏	13.7	本文
		XQW10-2-2	石膏	围岩中浸染状石膏	14.6	本文
	东至岩		天青石		16.3	[21]
西 矿 带	何梅沟	BYH10-07-1	黝铜矿	铜矿石	8.0	本文
	李 子 坪	BYH10-17	方铅矿	铅矿石	5.0	本文
		BYH10-20-1	方铅矿	浸染状铅矿石	5.6	本文
		BYH10-LZP	方铅矿	块状铅矿石	5.2	本文
	吴底厂	BYH10-50	方铅矿	含铅矿石的方解石脉	5.7	本文
	白 秧 坪	BYH10-69	黝铜矿	脉状黝铜矿	7.8	本文
		BYH10-73	黝铜矿	铜矿石	7.6	本文
		BYH10-81	黝铜矿	浸染状黝铜矿	8.1	本文
		BYH10-82	黝铜矿	团块状黝铜矿	8.2	本文
		BYH10-84	黝铜矿	角砾状铜矿石	6.7	本文
		B4-2	黝铜矿	角砾状铜矿石	6.7	[22]
		B4-3	黝铜矿	角砾状铜矿石	6.8	[22]
		B4-4	黝铜矿	角砾状铜矿石	6.9	[22]
		BY-3-1	黝铜矿	角砾状铜矿石	5.8	[8]
		BY-3-2	黝铜矿	角砾状铜矿石	9.3	[8]
		BYP116	黝铜矿	角砾状铜矿石	9.1	[8]
	富 隆 厂	H-1	黝铜矿	角砾状铜矿石	4.8	[8]
		H-2	黝铜矿	角砾状铜矿石	4.8	[8]
		FLC-147	黝铜矿	角砾状铜矿石	9.2	[8]
		FLC-161	黝铜矿	角砾状铜矿石	7.9	[8]
		FLC149	闪锌矿	角砾状铜矿石	10.5	[8]
		FLC-160	闪锌矿	角砾状铜矿石	10.0	[8]
		FLC-176	闪锌矿	角砾状铜矿石	11.2	[8]
	核 桃 箐	HTQ10-12	黝铜矿	含铜矿石天青石脉	0.8	本文
		HTQ10-18	黝铜矿	含铜矿石天青石脉	1.3	本文
		HTQ10-4	黝铜矿	浸染状铜矿石	1.7	本文
		HTQ-6	黝铜矿	团块状铜矿石	4.0	本文
		HTQ-1	黝铜矿	含铜矿石重晶石脉	3.2	本文
		HTQ10-16	黄铜矿	脉状黝铜矿石	5.1	本文
		HTQ-8	黄铜矿	块状铜矿石	5.5	本文
		HTQ-1	黄铜矿	含铜矿石重晶石脉	4.7	本文
		HTQ10-37	黄铜矿	碳质围岩中发育浸染状黄铜矿	-3.8	本文
		HTQ10-39-1	黄铜矿	浸染状黄铜矿	-2.2	本文
	白秧坪	H-9-4	重晶石	含铜矿重晶石脉	13.5	本文
	核	H-11-3	重晶石	含铜矿重晶石脉	12.6	本文
	桃	H-11-4	重晶石	含铜矿重晶石脉	12.8	本文
	箐	H-11-7	重晶石	含铜矿重晶石脉	12.6	本文

表 3 白秧坪银铜多金属矿集区碳-氧同位素组成

Table 3 $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ values of the Baiyangping silver-copper polymetallic ore concentration area

矿带	矿段	样号	样品描述	$\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}} (\%)$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}} (\%)$	资料来源
东 矿 带	下 区 五	XQW10-7	含铜矿石方解石细脉	2.3	11.2	本文
		XQW10-7-1	含铜矿石方解石细脉	2.5	12.5	本文
		XQW10-48	脉状方解石	3.1	24.5	本文
	华 昌 山	HCS10-2	方解石与矿石角砾共生	-1.8	19.7	本文
		HCS10-4	脉状方解石中含铅矿石	-2.7	18.3	本文
		HCS10-5	脉状方解石中含铅矿石	-3.0	19.9	本文
		HCS10-7	方解石与矿石角砾共生	-3.0	17.5	本文
		HCS10-10	铅锌矿石中的方解石	-2.1	18.6	本文
		HCS10-13	脉状方解石中含锌矿石	-1.1	20.2	本文
	白 秧 坪	BYH10-07	脉状方解石中含铜矿石	-3.0	15.0	本文
		BYH10-16	角砾状矿石中方解石与闪锌矿共生	-2.1	17.3	本文
		BYH10-17	方解石脉与闪锌矿共生	-2.4	14.0	本文
		BYH10-19	角砾状矿石中的方解石	-2.3	17.3	本文
		BYH10-46	角砾状矿石中方解石与闪锌矿共生	-1.5	18.6	本文
		BYH10-53	含闪锌矿方解石脉	0.7	19.7	本文
		BYH10-70	矿石中的白云石	-2.2	7.5	本文
		H-85	铅矿石中的菱铁矿	-3.0	15.1	[23]
		H-84	角砾状矿石中铁方解石	-4.2	18.2	[23]
		HX-48	与黝铜矿共生的方解石脉	-3.6	20.3	[4]
西 矿 带	李子坪	lzp138	与方铅矿共生的方解石脉	-3.3	14.1	[4]
	核 桃 箐	HTQ10-17	与黄铜矿石共生方解石脉	-3.7	6.3	本文
		HTQ10-26	含矿方解石	-5.1	14.0	本文
		HTQ10-35	含黄铜矿方解石细脉	-4.0	13.1	本文
	富 隆 厂	H-72	角砾状矿石中的方解石	-2.3	13.6	[23]
		H-74	矿石中菱铁矿和白云石	-3.1	16.4	[23]
		H-76	铅矿石中的菱铁矿	-3.2	16.5	[23]
		H-77	含碳酸盐的条带状矿石	-2.9	12.2	[23]
		H-78	矿石中方解石	-3.1	16.4	[23]
		H-79-1	条带状矿石中的菱铁矿和方解石	-2.8	17.4	[23]
围 岩	燕 子 洞	H-48	蚀变灰岩	3.2	22.5	[23]
		H-66	深灰色泥晶灰岩	2.4	20.5	[23]
		H-56	菱铁矿化灰岩	1.3	10.7	[23]
		H-60	菱铁矿化细晶灰岩	1.8	4.4	[23]
		H-63	矿化灰岩	2.1	3.5	[23]
		yzd-110	灰岩	3.3	22.2	[4]
	大 三 界	H-102	含矿泥晶灰岩	5.7	3.9	[3]
		H-105	矿化团粒灰岩	6.0	4.3	[3]
		H-106	纹层状矿化灰岩	2.4	3.6	[3]
	东 至 岩	H-113	天青石化白云质灰岩	2.5	10.7	[3]
		H-114	团粒状灰岩	2.0	10.6	[3]
		dsp10-3	灰岩	2.9	21.1	[4]
	老鹰岩	lyy-114	灰岩	3.2	18.9	[4]

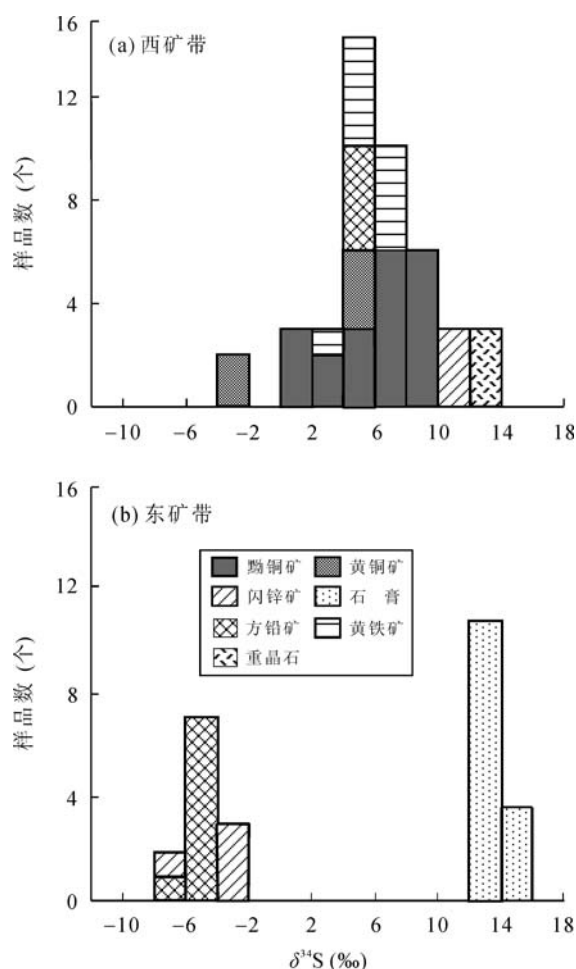


图4 白秧坪银铜多金属矿集区硫同位素组成分布图

Fig 4 The distribution chart of sulfur isotope of the Baiyangping silver-copper polymetallic ore-concentration area

H_2S 之间存在很强的稳定同位素分馏,形成的 H_2S 和最终产物(方铅矿、闪锌矿等)将富集 ^{32}S ,其 $\delta^{34}S$ 多为偏离零值较远的负值。考虑到东矿带较低的成矿温度(110~180 $^{\circ}C$)及矿集区内广泛发育有机质^[31],笔者推测东矿带成矿流体中的硫主要来源于盆地地层中硫酸盐,还原机制应为有机质参与的热化学还原作用及细菌还原作用。

西矿带硫化物(黄铜矿、黝铜矿、闪锌矿、方铅矿)的 $\delta^{34}S$ 值为-3.8‰~11.2‰,平均为 5.7‰;硫酸盐矿物(重晶石)的 $\delta^{34}S$ 值为 12.6‰~13.5‰,平均为 12.9‰。西矿带硫同位素组合呈塔式分布(图4)。根据西矿带矿物共生组合(重晶石、砷黝铜矿),结合流体包裹体的成分^[5,10,22]研究,通过计算得到该矿带成矿流体的 pH 值为 4.953~5.728, Eh 值为-0.878~0.583,平均-0.719,由此表明该矿集区成矿流体具有较高的氧逸度和较高的 pH 值。在此条件下,根据 Ohmoto 模式,热液的 $\delta^{34}S$ 值,应等于或略小于重

晶石的 $\delta^{34}S$ 值,而明显高于硫化物的 $\delta^{34}S$ 值^[26,27,29]。因此我们可确定西矿带成矿流体的 $\delta^{34}S_{SS}$ 值应在 +11.2‰~+13.5‰之间。此 $\delta^{34}S$ 值处于地幔硫和海洋沉积硫之间,表明该矿带的成矿流体的硫源为深源硫和海洋沉积硫的混合。考虑到该矿段赋矿围岩中发育有机质,而且硫同位素组成出现部分负值(-2.2‰~-2.8‰),表明通过还原有机质形成的 H_2S 也可能为成矿提供部分硫源。

由东矿带三合洞组中的铅锌矿($\delta^{34}S$ 值平均-4.6‰)到西矿带花开佐组和景星组中的银铜矿($\delta^{34}S$ 值平均+5.6‰),随着赋矿地层时代的变新,矿床中硫化物的硫同位素组成由富轻硫变为富重硫。张理刚^[32]认为,这种变化类似于近代红海热卤水沉积物的硫同位素分馏特征。已有的流体包裹体研究显示,东矿带成矿流体为低温、低密度、低盐度热液流体,西矿带为低温、高盐度、中等密度热液流体,东部成矿流体系统的 Eh 值略低于西部,表明东部成矿流体系统成矿流体的还原性稍强^[3,27,28]。结合该矿集区中硫化物和硫酸盐的硫同位素组成特征、矿床地质特征、矿物共生组合和成矿溶液物理化学条件等多方面综合考虑,认为该矿集区东、西矿带的硫源存在明显差异:东矿带的硫主要来源于沉积地层;西矿带的硫可能为沉积地层硫、有机硫及深源硫或地幔硫的混合。

4.2 碳-氧同位素组成

碳-氧同位素分析结果见表3,东矿带 $\delta^{13}C_{PDB}$ 值为-3.0‰~3.1‰,平均值为-0.5‰, $\delta^{18}O_{SMOW}$ 值为 11.2‰~24.5‰,平均值为 18.0‰;西矿带 $\delta^{13}C_{PDB}$ 值为-5.1‰~0.7‰,平均值为-2.9‰, $\delta^{18}O_{SMOW}$ 值为 6.3‰~20.3‰,平均值为 15.2‰。总体而言,白秧坪矿集区碳同位素组成变化于-5.1‰~3.1‰之间,变化范围较窄;而氧同位素组成变化于 6.3‰~24.5‰之间,变化范围较大。由此可见,东、西矿带碳同位素组成存在明显不同。

成矿热液中的碳主要有3种可能来源:(1)地幔射气或岩浆来源,地幔射气和岩浆来源的碳同位素组成 $\delta^{13}C_{PDB}$ 分别为-5‰~-2‰和-9‰~-3‰^[33];(2)沉积岩中碳酸盐岩的脱气或含盐卤水与泥质岩相互作用。这种来源的碳同位素组成具有重碳同位素特征,其 $\delta^{13}C_{PDB}$ 值变化范围为-2‰~+3‰,海相沉积碳 $\delta^{13}C_{PDB}$ 值为-3‰~+3‰;(3)各种岩石中的有机碳。其 $\delta^{13}C_{PDB}$ 值变化范围为-30‰~-15‰,平均为-22‰^[26,27,34]。

东矿带 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 值为 $-3.0\text{‰} \sim 3.1\text{‰}$, 平均值为 -0.1‰ 。其中下区五矿段 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 值为 $2.3\text{‰} \sim 3.1\text{‰}$, 平均值为 2.6‰ ; 三山矿段 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 值为 $-3.0\text{‰} \sim -1.1\text{‰}$, 平均值为 -2.3‰ 。与各类地质体的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 对比表明, 东矿带成矿流体的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 接近于海相碳酸盐, 明显高于其他各类地质体(图5)。推断东矿带成矿流体的碳应主要来自碳酸盐岩。

西矿带各矿段的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 值范围基本一致(图5), 除白秧坪3个方解石样品外, 其余均为负值。其中

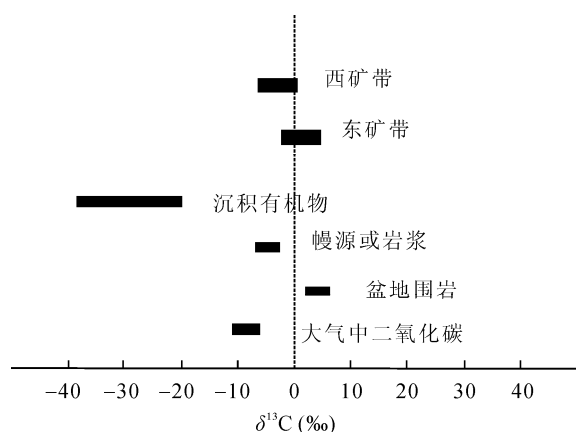


图5 白秧坪银铜多金属矿集区碳酸盐岩碳同位素组成 (据 Hoefs^[35]修改)

Fig.5 Carbon isotope compositions of carbonate from the Baiyangping metallogenic concentration area (after Hoefs^[35])

核桃箐矿段 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 值为 $-5.1\text{‰} \sim -3.7\text{‰}$, 平均值为 -4.3‰ , 位于沉积有机物与深源(地幔)碳的过渡区, 与深源(地幔)碳相近, 而明显区别于盆地围岩(沉积碳酸盐岩 $1.3\text{‰} \sim 6.0\text{‰}$)、有机碳、大气碳(-7‰); 白秧坪矿段 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 值为 $-4.2\text{‰} \sim 0.7\text{‰}$, 平均值为 -2.4‰ , 位于盆地围岩与深源(地幔)碳的过渡区。考虑到西矿带有机质比较发育, 在个别矿石中发育有少量沥青, 笔者认为西矿带成矿流体的碳来源相对复杂, 可能存在有机碳、地壳碳酸盐的碳及深源(地幔)碳多种来源。

将各矿段围岩及碳酸盐矿物的碳、氧同位素组成数据投在 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}-\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ 图解(图6)中, 总体上呈近水平展布的类型; 东、西矿带碳同位素组成分布明显不同, 但两者存在部分交集。前人研究建立了不同类型的碳、氧同位素分布型式^[36], 根据已知的分布模式可以确定, 成矿流体中溶解碳以 HCO_3^- 作为主要存在形式, 表明其所在流体源自一种浅部循环的地下水^[37]。碳、氧同位素出现水平展布的分布模式可能有以下两种原因: (1) CO_2 的脱气作用; (2) 流体与围岩之间相互作用^[31]。前人研究表明, CO_2 的脱气作用对流体氧同位素组成的影响并不明显, 而对碳同位素组成的影响却是显著的^[25]。在图解(图6)中, 西矿带碳酸盐岩的碳同位素组成变化范围很

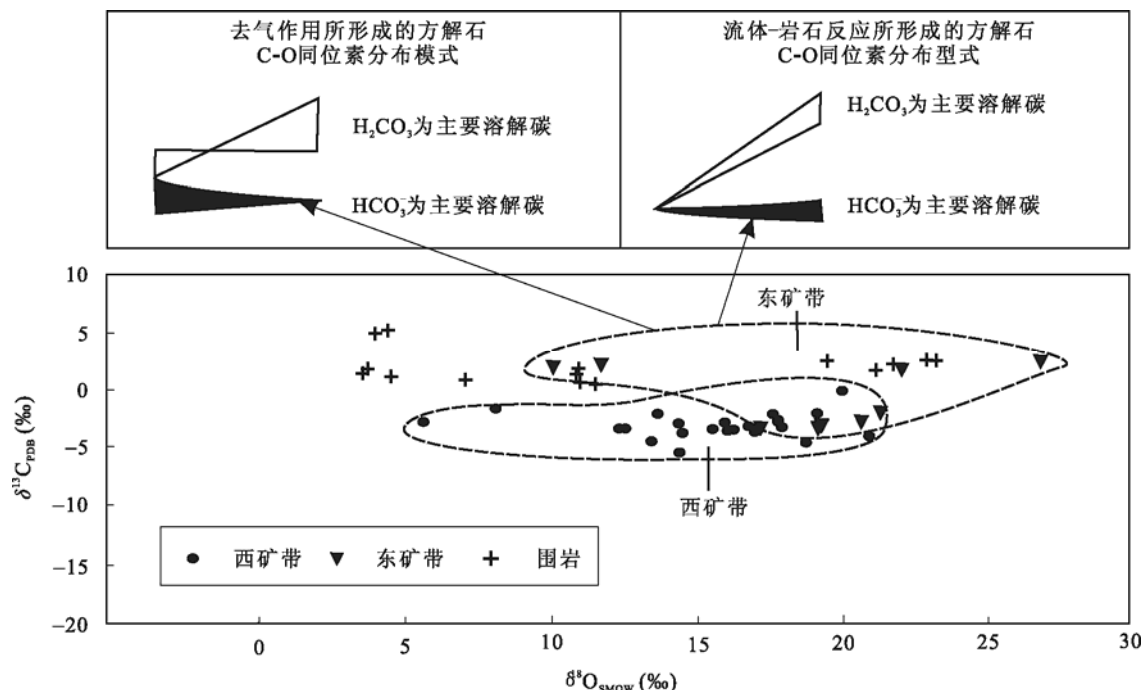


图6 白秧坪银铜多金属矿集区碳酸盐岩 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}-\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ 图解(底图据徐启东等^[9]资料修改)

Fig.6 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}-\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ diagram of carbonate from the Baiyangping metallogenic concentration area (after Xu^[9])

小,而氧同位素组成则变化显著。流体包裹体研究未见含 CO_2 的包裹体,没有发现指示流体沸腾的流体包裹体组合等证据^[20,31],说明通过流体沸腾或相分离引起 CO_2 去气,发挥的作用不是导致这一现象的主要因素。因此,流体与围岩之间的相互作用应是造成 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}-\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ 关系近水平展布的主要原因。在这种情况下,热液方解石的碳同位素组成与沉淀时成矿流体的碳同位素组成接近是其基本特点^[37]。而流体中溶解碳以 HCO_3^- 作为主要存在形式,表明其所在流体主要源自一种浅部循环的地下水。同时前人对矿集区中的氢、氧同位素组成的研究^[8,22]亦证明成矿流体属于循环的大气降水,也与上述对流体中可能的水源、碳源的判断相协调。

5 讨 论

对白秧坪多金属矿集区流体包裹体研究表明,成矿流体均一温度主要集中在 $100\sim 260\text{ }^\circ\text{C}$ 范围内,盐度多集中 $8\%\sim 22\%$ 之间,属中低温、中高盐度、贫 CO_2 流体,表明矿集成矿流体主要为源于大气降水的盆地热卤水^[20,31]。东、西矿带诸矿床成矿流体特征存在明显差异,总体上西矿带均一温度比东矿带分布范围更大、值也普遍更高;西矿带盐度也较东矿带分布范围更大、值更大^[20,38-40],暗示其成矿流体来源和演化比东矿带更为复杂。

对该矿集区成矿流体的硫-碳-氧同位素研究表明,矿集区成矿流体主要来源于大气降水,西矿带成矿流体硫和碳的来源相对复杂,可能存在部分深源物质参与成矿;东矿带成矿流体硫和碳的来源相对简单,主要来源于盆地沉积岩,几乎没有深源物质的参与。白秧坪多金属矿集区产于印度-亚洲大陆碰撞造山带前陆盆地环境中,受控于喜马拉雅-青藏高原构造带逆冲推覆构造系统;容矿围岩为碳酸盐建造及陆相硅质碎屑岩建造,成矿具有开放空间充填特征^[3,10,12,20,23,38-40]。结合笔者对矿集区成矿流体的硫-碳-氧同位素地球化学的分析,白秧坪多金属矿集区成矿流体主要为源于大气降水的盆地热卤水。前人基于成矿年代学的研究^[17,19,39],指出白秧坪银铜多金属矿集区可能存在两次成矿作用,形成了具有一定时差的西矿带和东矿带,前者的成矿时代为 $57\sim 62\text{ Ma}$,与喜马拉雅碰撞造山第 1 幕的年龄相一致;后者的成矿时代应小于 50 Ma ,可能与 $37\sim 26$

Ma 的喜马拉雅碰撞造山第 2 幕的年龄接近。

综上所述,笔者认为白秧坪多金属矿集区可能经历如下的成矿过程:始于 65 Ma 左右的印度-亚洲大陆对接强烈碰撞作用形成青藏高原造山带,受其影响在兰坪盆地发生东西向的对冲,形成了东西两个相对独立的逆冲推覆带^[6-7]。西矿带形成于两大板块强烈东西向挤压-拉张的转变期,盆地内的压性断裂因减压而逐步变为张性,并伴随着深源流体的上升,成矿流体以混入有深源流体的盆地热卤水为主;东矿带形成于晚碰撞转换成矿作用的成矿环境,挤压作用逐渐减退之后,地表浅部形成的部分挤压性断裂逐步由挤压-拉张转变完全过渡为张性,此时由深部物质形成的流体逐步减少以至消失,成矿流体以源于大气降水的盆地热卤水为主。西矿带成矿流体沿深部西倾的拆离滑脱带长距离迁移,并沿近南北向展布的四十里箐逆冲断裂和近东西向平移断裂上涌,流入浅部平行于逆冲带的共生断裂及主逆冲断裂上盘发育的次级断裂和平移断层内沉淀并富集成矿,从而形成下白垩统碎屑岩建造内的 Ag-Cu-Co-Pb-Zn 矿床;东矿带成矿流体沿深部东倾的拆离滑脱带长距离迁移,在成矿流体流经膏盐建造、含矿砂岩建造、黑色页岩建造时,从围岩建造中淋滤出成矿元素的同时,进一步影响并改变了成矿流体的物理化学条件,使矿物质在逆冲推覆构造的主逆冲断裂及邻近上(下)盘断裂带及反冲断层内卸载、沉淀,富集成矿,形成上三叠统碳酸盐岩建造内的铅锌银铜矿床。

6 结 论

(1) 白秧坪银铜多金属矿集区硫同位素研究表明,由东矿带三合洞组中的铅锌矿($\delta^{34}\text{S}$ 值平均 -4.6‰),到西矿带花开佐组和景星组中的银铜矿($\delta^{34}\text{S}$ 值平均 5.6‰),随着赋矿地层时代的变新,矿床中硫化物的硫同位素组成由富轻硫变为富重硫。结合该矿集区中硫化物和硫酸盐的硫同位素组成特征、矿床地质特征、矿物共生组合和成矿溶液物理化学条件等多方面综合考虑,认为该矿集区东、西矿带的硫源存在明显差异:东矿带的硫主要来源于沉积地层;西矿带的硫可能为沉积地层硫、有机硫及深源硫或地幔硫的混合。

(2) 白秧坪银铜多金属矿集区 C-O 同位素研究

表明,东、西矿带碳来源同样存在差异,东矿带成矿流体的碳主要来源于碳酸盐岩碳;西矿带成矿流体的碳来源相对复杂,可能存在有机碳、地壳碳酸盐的碳及深源(地幔)碳多种来源。矿集区东、西矿带诸矿床成矿元素组合、矿化形式及成矿流体等方面表现出的差异性,可能与东、西矿带成矿流体系统和控矿构造系统的差异有关。

矿区资料的收集得到云南省地质调查局尹光侯高级工程师的大力支持;中国科学院地球化学研究所温捷研究员、张锦让博士在野外工作及室内的研究讨论中给予的指导帮助,使作者受益匪浅,在此一并表示衷心的感谢。

参考文献(References):

- [1] 田洪亮. 兰坪白秧坪铜银多金属矿床地质特征[J]. 云南地质, 1997, 16(1): 105-108.
Tian Hong-liang. The geological features of the Baiyangping Cu-Ag poly-metallic deposit [J]. Yunnan Geol, 1997, 16(1): 105-108 (in Chinese).
- [2] 田洪亮. 兰坪三山铜银多金属矿床地质特征[J]. 云南地质, 1998, 17(2): 199-206.
Tian Hong-liang. The geological features of the Sanshan polymetallic deposit [J]. Yunnan Geol, 1998, 17(2): 199-206 (in Chinese with English abstract).
- [3] 何龙清, 陈开旭, 魏君奇, 余凤鸣. 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, 2005, 24(1): 61-70.
He Long-qing, Chen Kai-xu, Wei Jun-qi, Yu Feng-ming. Geological and geochemical characteristics and genesis of ore deposits in eastern ore belt of Baiyangping area, Yunnan Province [J]. Mineral deposit, 2005, 24(1): 61-70 (in Chinese with English abstract).
- [4] 刘家军, 何明勤, 李志明, 刘玉平, 张乾, 杨伟光, 杨爱平. 云南白秧坪银铜多金属矿集区碳氧同位素组成及其意义[J]. 矿床地质, 2004, 23(1): 2-10.
Liu Jia-jun, He Ming-qin, Li Zhi-ming, Liu Yu-ping, Zhang Qian, Yang Wei-guang, Yang Ai-ping. Oxygen and carbon isotopic geochemistry of Baiyangping silver-copper polymetallic ore concentration area in Lanping basin of Yunnan Province and its significance [J]. Mineral Deposit, 2004, 23(1): 2-10 (in Chinese with English abstract).
- [5] 刘家军, 翟德高, 李志明, 何明勤, 刘玉平, 李朝阳. 兰坪盆地白秧坪银铜多金属矿集区中银、钴、铋、镍的赋存状态与成因意义[J]. 岩石学报, 2010, 26(6): 1646-1660.
Liu Jia-jun, Zhai De-gao, Li Zhi-ming, He Ming-qin, Liu Yu-ping, Li Chao-yang. Occurrence of Ag, Co, Bi and Ni elements and its genetic significance in the Baiyangping silver-copper polymetallic metallogenic concentration area, Lanping basin, southwestern China [J]. Acta Petrol Sinica, 2010, 26(6): 1646-1660 (in Chinese with English abstract).
- [6] 侯增谦, 吕庆田, 王安建, 李晓波, 王宗起, 王二七. 初论陆-陆碰撞与成矿作用——以青藏高原造山带为例[J]. 矿床地质, 2003, 22(4): 319-333.
Hou Zeng-qian, Lü Qing-tian, Wang An-jian, Li Xiao-bo, Wang Zong-qi, Wang Er-qi. Continental collision and related metallogeny: A case study of mineralization in Tibetan Orogen [J]. Mineral deposit, 2003, 22(4): 319-333 (in Chinese with English abstract).
- [7] 侯增谦, 宋玉财, 李政, 王召林, 杨志明, 杨竹森, 刘英超, 田世洪, 何龙清, 陈开旭, 王富春, 赵呈祥, 薛万文, 鲁海峰. 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, 2008, 27(2): 124-144.
Hou Zeng-qian, Song Yu-cai, Li Zheng, Wang Zhao-lin, Yang Zhi-ming, Yang Zhu-sen, Liu Ying-chao, Tian Shi-hong, He Long-qing, Chen Kai-xu, Wang Fu-chun, Zhao Cheng-xiang, Xue Wan-wen, Lu Hai-feng. Thrust controlled, sediments hosted Pb-Zn-Ag-Cu deposits in eastern and northern margins of Tibetan orogenic belt: Geological features and tectonic model [J]. Mineral deposit, 2008, 27(2): 124-144 (in Chinese with English abstract).
- [8] 李志明, 刘家军, 秦建中, 廖宗廷, 何明勤, 刘玉平. 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, 2005, 45(1): 1-6.
Li Zhi-ming, Liu Jia-jun, Qin Jian-zhong, Liao Zong-ting, He Ming-qin, Liu Yu-ping. Ore-forming material sources of the Baiyangping copper-cobalt-silver polymetallic deposit in Lanping basin, western Yunnan [J]. Geol Prospect, 2005, 45(1): 1-6 (in Chinese with English abstract).
- [9] 徐启东, 李建威. 云南兰坪北部铜多金属矿化区成矿流体与矿化分带——流体包裹体和稳定同位素证据[J]. 矿床地质, 2003, 22(4): 365-376.
Xu Qi-dong, Li Jian-wei. Migration of ore-forming fluids and its relation to zoning of mineralization in northern Lanping Cu-polymetallic metallogenic area, Yunnan Province: Evidence from fluid inclusions and stable isotopes [J]. Mineral Deposit, 2003, 22(4): 365-376 (in Chinese with English abstract).
- [10] 薛春纪, 陈毓川, 杨建民, 王登红, 徐珏. 滇西北兰坪铅锌铜银矿田含烃富 CO₂ 成矿流体及其地质意义[J]. 地质学报, 2002, 76(2): 244-253.
Xue Chun-ji, Chen Yu-chuan, Yang Jian-min, Wang Deng-hong, Xu Jue. The CO₂-rich and hydrocarbon-bearing ore-forming fluid and their metallogenic role in the Lanping Pb-Zn-Ag-Cu ore field, North-western Yunnan [J]. Acta Geol Sinica, 2002,

- 76(2): 244-253 (in Chinese with English abstract).
- [11] 薛春纪, Chi Guo-xiang, 陈毓川, 曾荣, 高永宝, Qing Hai-ruo. 西南三江兰坪盆地大规模成矿的流体动力学过程——流体包裹体和盆地流体模拟证据[J]. 地学前缘, 2007, 14(5): 147-157.
Xue Chun-ji, Chi Guo-xiang, Chen Yu-chuan, Zeng Rong, Gao Yong-bao, Qing Hai-ruo. Fluid dynamic processes of large-scale mineralization in the Lanping Basin, Yunnan, SW-China: evidence from fluid inclusions and basin fluid modeling[J]. Earth Sci Front, 2007, 14(5): 147-157 (in Chinese with English abstract).
- [12] 张尔新. 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, 2005, 24(3): 282-289.
Zhang Er-xin. On the genesis of ore deposits in west metallogenetic zone of Baiyangping Cu-Ag polymetallic deposit concentration area, Lanping [J]. Yunnan Geol, 2005, 24(3): 282-289 (in Chinese with English abstract).
- [13] 邓霜岭. 云南李子坪铅锌矿段地质特征及成因[J]. 四川地质学报, 2011, 31(3): 323-325.
Deng Shuang-ling. Geological features and genesis for the Liziping Pb-Zn ore block in Yunnan [J]. Acta Geol Sichuan, 2011, 31(3): 323-325 (in Chinese with English abstract).
- [14] 阙梅英, 程敦摸, 张立生, 夏文杰, 朱创业. 兰坪-思茅盆地铜矿床[M]. 北京: 地质出版社, 1998: 1-20, 37-46.
Que Mei-ying, Cheng Dun-mo, Zhang Li-sheng, Xia Wen-jie, Zhu Chuang-ye. Copper Deposits in Lanping-Simao Basin [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1998: 1-20, 37-46 (in Chinese with English abstract).
- [15] 陶晓风, 朱利东, 刘登忠, 王国芝, 李佑国. 滇西兰坪盆地的形成及演化[J]. 成都理工大学学报, 2002, 29(5): 521-525.
Tao Xiao-feng, Zhu Li-dong, Liu Deng-zhong, Wang Guo-zhi, Li You-guo. The formation and evolution of the Lanping basin in western Yunnan [J]. J Chengdu Univ Technol, 2002, 29(5): 521-525 (in Chinese with English abstract).
- [16] 王江海, 颜文, 常向阳. 陆相热水沉积作用——以云南地区为例[M]. 北京: 地质出版社, 1998: 1-189.
Wang Jiang-hai, Yan Wen, Chang Xiang-yang. Continental Hydrothermal Sedimentation: A Case Study of the Yunnan Area, China [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1998: 1-189 (in Chinese with English abstract).
- [17] 薛春纪, 陈毓川, 杨建民, 王登红, 杨伟光, 杨清标. 滇西兰坪盆地构造体制和成矿背景分析[J]. 矿床地质, 2002, 21(1): 36-44.
Xue Chun-ji, Chen Yu-chuan, Yang Jian-min, Wang Deng-hong, Yang Wei-guang, Yang Qing-biao. Analysis of ore-forming background and tectonic system of Lanping basin, western Yunnan Province [J]. Mineral Deposit, 2002, 21(1): 36-44 (in Chinese with English abstract).
- [18] 何龙清, 季玮, 陈开旭, 余凤鸣, 魏君奇, 杨爱平, 杨伟光. 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, 2007, 13(2): 110-118.
He Long-qing, Ji Wei, Chen Kai-xu, Yu Feng-ming, Wei Jun-qi, Yang Ai-ping, Yang Wei-guang. Ore-controlling effect of nappe structure in the east ore zone of the Baiyangping area, Lanping basin, Yunnan [J]. J Geomech, 2007, 13(2): 110-118 (in Chinese with English abstract).
- [19] 李兴振, 江新胜, 孙志明. 西南三江地区碰撞造山过程[M]. 北京: 地质出版社, 2002: 173-206.
Li Xing-zhen, Jiang Xin-sheng, Sun Zhi-ming. The Process of Orogenic Collision of Southwest of Sanjiang Region [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2002: 173-206 (in Chinese with English abstract).
- [20] 薛伟, 薛春纪, 池国祥, 石海岗, 高炳宇, 杨寿发. 滇西北兰坪盆地白秧坪多金属矿床流体包裹体研究[J]. 岩石学报, 2010, 26(6): 1773-1784.
Xue Wei, Xue Chun-ji, Chi Guo-xiang, Shi Hai-gang, Gao Bing-yu, Yang Shou-fa. Study on the fluid inclusion of Baiyangping poly-metallic deposit in Lanping Basin, northwestern Yunnan, China [J]. Acta Petrol Sinica, 2010, 26(6): 1773-1784 (in Chinese with English abstract).
- [21] 魏君奇. 云南河西铜多金属矿 S、Pb 同位素地球化学[J]. 华南地质与矿产, 2001, 17(3): 36-39.
Wei Jun-qi. S-Pb isotopic geochemistry of copper multi-metal deposits in Hexi, Yunnan [J]. Geol Mineral Resour South China, 2001, 17(3): 36-39 (in Chinese with English abstract).
- [22] 王峰, 何明友. 兰坪白秧坪铜银多金属矿床成矿物质来源的铅和硫同位素示踪[J]. 沉积与特提斯地质, 2003, 22(2): 82-85.
Wang Feng, He Ming-you. Lead and isotopic tracing of the ore-forming material from the Baiyangping copper-silver polymetallic deposit in Lanping, Yunnan [J]. Sediment Geol Tethyan Geol, 2003, 22(2): 82-85 (in Chinese with English abstract).
- [23] 陈开旭, 何龙清, 杨振强, 魏君奇. 云南兰坪三山-白秧坪铜银多金属成矿富集区的碳氧同位素地球化学[J]. 华南地质与矿产, 2000, 16(4): 1-8.
Chen Kai-xu, He Long-qing, Yang Zhen-qiang, Wei Jun-qi. Oxygen and carbon isotope geochemistry in Sanshan-Baiyangping copper-silver polymetallogenic enrichment district, Lanping, Yunnan [J]. Geol Mineral Resour South China, 2000, 16(4): 1-8 (in Chinese with English abstract).
- [24] Friedman I, O'Neill J R. Compilation of stable isotope fractionation factors of geochemical interest [M]//Fleischer M. Data of Geochemistry (6th ed). Geological Professional Paper 440-KK, 1977: 440p.

- [25] 郑永飞, 陈江峰. 稳定同位素地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 2000: 218–245.
Zheng Yong-fei, Cheng Jiang-feng. Stable Isotope Geochemistry [M]. Beijing: Science Press, 2000: 218–245 (in Chinese).
- [26] Ohmoto H. Systematics of sulfur and carbon isotopes in hydrothermal ore deposits [J]. Econ Geol, 1972, 67(5): 551–578.
- [27] Rye R O, Ohmoto H. Sulfur and carbon isotope and ore genesis: A review [J]. Econ Geol, 1974, 69(6): 902–909.
- [28] 苏祺. 云南兰坪白秧坪银多金属矿流体与成矿关系——流体包裹体的研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2002: 13–48.
Su Qi. The relationship between the fluid and mineralization in the Baiyangping polymetallic mineralization district of Lanping, Yunnan: A study of fluid inclusions [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2002: 13–48 (in Chinese with English abstract).
- [29] 郑永飞, 徐宝龙, 周根陶. 矿物稳定同位素地球化学研究[J]. 地学前缘, 2000, 7(2): 299–320.
Zheng Yong-fei, Xu Bao-long, Zhou Gen-tao. Geochemical studies of stable isotopes in minerals [J]. Earth Sci Front, 2000, 7(2): 299–320 (in Chinese with English abstract).
- [30] Ohmoto H, Rye R O. Isotope of sulfur and carbon [M]/Barnes H L. Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits (2nd ed). Wiley: New York, 1979: 509–567.
- [31] 陈开旭, 姚书振, 何龙清, 魏君奇, 杨爱平, 黄惠兰. 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, 2004, 23(2): 45–50.
Chen Kai-xu, Yao Shu-zhen, He Long-qing, Wei Jun-qi, Yang Ai-ping, Huang Hui-lan. Ore-forming fluid in Baiyangping silver-polymetallic mineralization concentration field in Lanping, Yunnan Province [J]. Geol Sci Technol Inf, 2004, 23(2): 45–50 (in Chinese with English abstract).
- [32] 张理刚. 湘西雪峰山隆起区钨锡金矿床稳定同位素地质学[J]. 地质与勘探, 1985, 21(11): 24–28.
Zhang Li-gang. Stable isotope geology of the tungsten-antimony-gold deposits in the Xuefeng Uplift region, west Hunan [J]. Geol Prospect, 1985, 21(11): 24–28 (in Chinese with English abstract).
- [33] Taylor S R, McLennan S M. The Continental Crust: Its Composition and Evolution [M]. Oxford: Blackwell, 1985: 1–372.
- [34] Ohmoto H. Stable isotope of ore deposits in high temperature geological processes [J]. Rev Mineral Geochem, 1986, 16: 491–560.
- [35] Hoefs J. Stable Isotope Geochemistry (4th ed) [M]. Berlin: Springer-Verlag, 1997: 65–168.
- [36] 郑永飞. 稳定同位素体系理论模式及其矿床地球化学应用[J]. 矿床地质, 2001, 20(1): 57–70.
Zheng Yong-fei. Theoretical modeling of stable isotope systems and its applications to geochemistry of hydrothermal ore deposits [J]. Mineral Deposit, 2001, 20(1): 57–70 (in Chinese with English abstract).
- [37] Zheng Yong-fei, Hoefs J. Carbon and oxygen isotopic covariations in hydrothermal calcites: Theoretical modeling on mixing processes and application to Pb-Zn deposits in the Harz Mountains, Germany [J]. Mineral Deposit, 1993, 28(2): 79–89.
- [38] 龚文君, 谭凯旋, 李小明, 龚革联. 兰坪白秧坪银铜多金属矿床流体地球化学特征及成矿机制探讨[J]. 大地构造与成矿学, 2000, 24(2): 175–181.
Gong Wen-jun, Tan Kai-xuan, Li Xiao-ming, Gong Ge-lian. Geochemical characteristics of fluid and mechanism for ore formation in the Baiyangping copper-silver deposit, Yunnan [J]. Geotect Metallogen, 2000, 24(2): 175–181 (in Chinese with English abstract).
- [39] 何明勤, 刘家军, 李朝阳, 李志明, 刘玉平. 兰坪盆地白秧坪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, 2004: 1–108.
He Ming-qin, Liu Jia-jun, Li Chao-yang, Li Zhi-ming, Liu Yu-ping. Mechanism of Ore-Forming Fluid of the Lanping Pb-Zn-Cu Polymetallic Mineralized Concentration Area: An Example Study on the Baiyangping Ore District [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2004: 1–108 (in Chinese).
- [40] 侯增谦. 大陆碰撞成矿论[J]. 地质学报, 2010, 84(1): 30–58.
Hou Zeng-qian. Metallogensis of continental collision [J]. Acta Geol Sinica, 2010, 84(1): 30–58 (in Chinese with English abstract).