

doi:10.3799/dqkx.2012.109

兰坪盆地白秧坪铅锌铜银多金属 矿床成矿流体及成矿物质来源

王晓虎^{1,2}, 侯增谦², 宋玉财², 王光辉³, 张洪瑞²,
张 翀⁴, 庄天明⁵, 王 哲⁵, 张天福⁵

1. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081
2. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037
3. 江西地质调查研究院, 江西南昌 330030
4. 东华理工大学地球科学学院, 江西南昌 330013
5. 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083

摘要: 白秧坪矿床位于滇西北兰坪盆地北部, 是一沉积岩容矿的铅锌铜银多金属矿床, 矿体赋存于中生代地层中, 受断裂构造控制明显. 通过成矿期方解石、石英、闪锌矿中流体包裹体研究, 以及方解石的 C、O 和含硫矿物的 S、Pb 同位素研究, 来探讨成矿流体性质及其来源和成矿物质来源. 研究表明, 白秧坪矿床包裹体一般小于 10 μm , 气液两相为主, 成矿流体体系为 Ca^{2+} - Na^+ - K^+ - Mg^{2+} - Cl^- - F^- - NO_3^- 卤水体系, 矿床矿物中冰点温度范围为 $-26.4 \sim -0.2$ $^{\circ}\text{C}$, 平均为 -14.6 $^{\circ}\text{C}$, 均一温度集中于 $120 \sim 180$ $^{\circ}\text{C}$, 盐度为 $0.35\% \sim 24.73\%$ (NaCl_{eq}), 平均值 16.9% (NaCl_{eq}), 成矿流体密度在 $0.84 \sim 1.11$ g/cm^3 之间, 平均值 1.04 g/cm^3 , 成矿压力为 $28.0 \sim 46.9$ MPa, 平均 37.6 MPa, 对应的成矿深度约 $1058 \sim 2452$ m, 平均 1555 m, 集中于 $1200 \sim 1800$ m; 碳质的来源较为均一, 矿石中热液方解石中碳源自地层中碳酸盐岩溶解, 成矿流体属于盆地流体系统, 有大气降水的加入; 成矿物质硫来自硫酸盐的热化学还原作用, 或者含硫有机质的热分解, 金属成矿物质来自沉积地层和盆地基底.

关键词: 兰坪盆地; 白秧坪; 成矿流体; 成矿物质; 多金属矿床.

中图分类号: P611; P618.4

文章编号: 1000-2383(2012)05-1015-14

收稿日期: 2012-01-16

Baiyangping Pb-Zn-Cu-Ag Polymetallic Deposit in Lanping Basin: A Discussion on Characteristics and Source of Ore-Forming Fluids and Source of Metallogenic Materials

WANG Xiao-hu^{1,2}, HOU Zeng-qian², SONG Yu-cai², WANG Guang-hui³, ZHANG Hong-ru²,
ZHANG Chong⁴, ZHUANG Tian-ming⁵, WANG Zhe⁵, ZHANG Tian-fu⁵

1. Institute of Geomechanics, CAGS, Beijing 100081, China
2. Institute of Geology, CAGS, Beijing 100037, China
3. Jiangxi Provincial Institute of Geological Survey, Nanchang 330030, China
4. College of Earth Sciences, East China Institute of Technology, Nanchang 330013, China
5. Faculty of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

Abstract: Located in Mesozoic strata of northern Lanping basin, Northwest of Yunnan Province, Baiyangping deposit is a sediment-hosted Pb-Zn-Cu-Ag polymetallic deposit controlled by fracture. In this paper, a study is carried out on the fluid inclusions in ore-forming stage calcite, quartz, sphalerite and C, O isotope of calcite and S, Pb isotope of sulfur-bearing minerals, on basis of which the character and source of ore-forming fluids and the source of ore-forming materials are discussed. The fluid inclusions of Baiyangping deposit are generally less than 10 μm , main gas-liquid phase. The ore-forming fluid system was Ca^{2+} -

基金项目: 中国地质科学院地质力学研究所基本科研业务费项目 (No. DZLXJK201103); 国家自然科学基金项目 (Nos. U09336051, 41072071); 国家重点基础研究发展计划项目 (Nos. 2009CB421001, 2009CB421008).

作者简介: 王晓虎 (1983-), 男, 博士, 助理研究员, 从事矿床学和矿田构造研究. E-mail: wangzykc@yeah.net

$\text{Na}^+ - \text{K}^+ - \text{Mg}^{2+} - \text{Cl}^- - \text{F}^- - \text{NO}_3^-$ brine system. The freezing temperature of fluid inclusions in mineral deposits ranges from -26.4 to -0.2 °C, with an average of -14.6 °C; the homogenization temperature is concentrated in $120 - 180$ °C, and the salinity varies from 0.35% to 24.73% (NaCl_{eq}), with an average of 16.9% (NaCl_{eq}). ore-forming fluid density is between 0.84 g/cm^3 and 1.11 g/cm^3 , with an average of 1.04 g/cm^3 , mineralization pressure is between 28.0 MPa and 46.9 MPa , with an average of 37.6 MPa ; the corresponding mineralization depths is between $1\,058 \text{ m}$ and $2\,452 \text{ m}$, with an average of $1\,555 \text{ m}$, concentrated in $1\,200 \text{ m}$ to $1\,800 \text{ m}$; Carbon and oxygen isotope data indicate a homogeneous carbon source, and the carbon in hydrothermal calcite is derived from the dissolution of carbonate rock strata. The ore-forming fluid belongs to the basin brine fluid system, which is mixed with the precipitate water; S isotope data show that sulfur in sulfides and sulphosalts is derived from thermochemical sulfate reduction, or the thermal decomposition of sulfur-bearing organic matter; the metal mineralization material is from sedimentary strata and basement.

Key words: Lanping basin; Baiyangping; ore-forming fluid; metallogenic material; polymetallic deposit.

兰坪中生代盆地在大地构造位置上位于“西南三江”中段,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—乔后断裂一线,西抵兔峨—旧州。盆地边界断裂之外分别出露元古代变质基底,盆地内主要出露中生代陆相红色碎屑岩,新生代的岩浆岩仅在盆地南缘永平—巍山一带和盆地外金沙江—红河一带有出露。盆地内构造格局以中生代逆冲推覆构造为主,并形成两侧向盆地中心对冲的格局(何龙清等,2004)。白秧坪矿集区位于兰坪盆地北部,距金顶铅锌矿床北约 30 km ,是一个大型 Pb-Zn-Cu-Ag 多金属矿集区(田洪亮,1997)。该矿集区由东、西两个矿带构成(邵兆刚等,2002,2003;朱大岗等,2002;陈开旭等,2004a,2004b;何明勤等,2004;陈开旭,2006),其西矿带发育多个矿段,包括白秧坪矿段、富隆厂矿段、吴底厂矿段、李子坪矿段等。通过已有的研究将这 4 个矿段统称为白秧坪铅锌铜银多金属矿床(王晓虎等,2011a,2011b),同时将矿床分为两期成矿作用,一期是古新世末—始新世初的铜矿化事件,另一期是始新世末—渐新世早期的以铅锌为主的矿化事件(王晓虎等,2011c)。由于早期铜矿化被后期铅锌矿化叠加改造(王晓虎等,2011c),所以本文着重探讨后期铅锌矿化期成矿作用。

随着白秧坪铅锌铜银多金属矿床成因认识的不断深化,已有的研究还存在较大的争议,如对成矿流体还有不同的认识。对于流体来源,有学者认为流体有深部流体加入、壳幔混源特征(杨伟光等,2003;徐仕海等,2005);有学者认为是大气降水补给的地下水经深部循环形成的热卤水(陈开旭等,2004b);也有认为成矿流体具有 MVT 成矿流体特点(薛伟等,2010)。对于成矿物质来源,有学者认为是壳—幔混源(薛春纪等,2003;王峰和何明友,2003;陈开旭等,2004b;王彦斌等,2004;何龙清等,2005);有认为以

壳源为主(李志明等,2004,2005;徐启东和周炼,2004);也有认为以幔源为主(张尔新,2005)以及来源于含有基性火山岩的兰坪盆地基底变质岩系(刘家军等,2010;冯彩霞等,2011)。这些争议的存在,制约了研究者对白秧坪矿床成矿作用的深入理解,甚至影响了对沉积岩容矿矿床成矿作用的认识深度。本文试图通过成矿期方解石、石英、闪锌矿中流体包裹体研究,以及方解石 C、O 和含硫矿物 S、Pb 同位素研究,探讨白秧坪矿床成矿流体性质及其来源和成矿物质来源。

1 矿床地质特征

白秧坪铅锌铜银多金属矿床的 4 个矿段中,白秧坪矿段主要发育 Cu-Co(-Ag-As-Zn-Pb)矿化,富隆厂矿段以 Pb-Zn(-Cu-Ag)矿化为主,吴底厂矿段以 Pb-Zn(-Ag-Cu)矿化为主,李子坪矿段 Pb-Zn-Ag 矿化为主。矿区主要发育中生代地层,包括侏罗系花开佐组,白垩系景星组、南星组,古新统云龙组。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,1974.1:20 万兰坪幅区域地质调查报告)(图 1;牟传龙等,1999)。主要含矿地层为侏罗系中统花开佐组(J_2h)及白垩系下统的景星组(K_1j)及南新组(K_1n)。矿体在平面上展布方向主要有 3 组,北西向、北东向、北西西向。北西向矿体,倾向北东,倾角 30° 左右;北东向矿体,倾向北西,倾角在 70° 左右;北西西向,倾向南西,倾角 $20 \sim 40^\circ$ 。矿石类型有角砾状、块状、浸染状,其中角砾状矿石分布于北西西向、北东向矿体中,块状矿石分布于北西西向

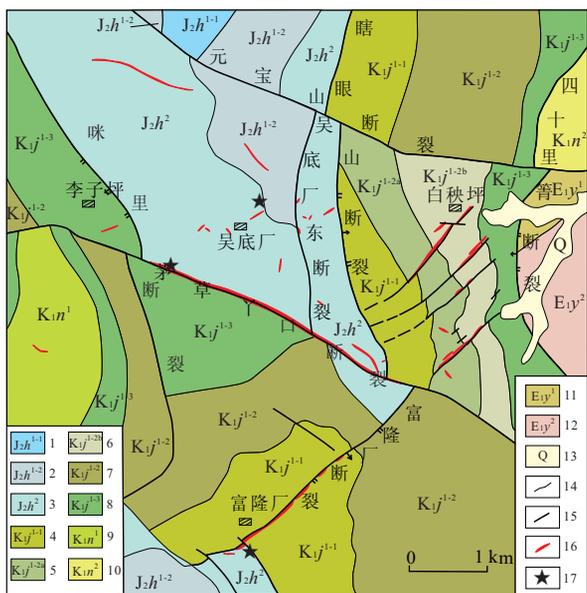


图1 白秧坪铅锌铜银多金属矿床矿区地质及矿体分布 (据云南省地质调查院矿产调查所及宁夏有色金属地质勘查院修编①②)

Fig. 1 The geological map and distribution of ore bodies of Baiyangping Pb-Zn-Cu-Ag polymetallic deposit

1. 花开佐组下段一亚段; 2. 花开佐组下段二亚段; 3. 花开佐组上段; 4. 景星组下段一亚段; 5. 景星组下段二亚段下部; 6. 景星组下段二亚段上部; 7. 景星组下段二亚段; 8. 景星组下段三亚段; 9. 南星组下段; 10. 南星组上段; 11. 云龙组下段; 12. 云龙组上段; 13. 第四系; 14. 地层界线; 15. 断层; 16 矿体; 17. 采样点

矿体中,浸染状矿体分布于北东向矿体中,在灰岩中主要以角砾状、块状矿石为主;在砂岩中以角砾状、浸染状矿石为主。总体上矿物组成复杂,主要有硫化物、硫酸盐矿物、碳酸盐矿物、硫酸盐矿物及氧化矿物。矿区围岩蚀变主要有褪色化、硅化、白云岩化、方解石化,其中在泥质粉砂岩中主要发生褪色化;在砂岩中发生硅化、方解石化;在灰岩中发生方解石化、白云岩化。在白秧坪铅锌铜银多金属矿区,充填和交代是基本的成矿方式。容矿空间有4类,先挤后张形成的空间——茅草一丫口断裂;北东向、北西向的张性裂隙;小褶皱形成的裂隙——李子坪矿段可见;溶洞垮塌——富隆厂矿段可见。矿区铅锌热液矿化大致分3期: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、雄黄、雌黄、黝铜矿系列矿物,伴有方解石。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

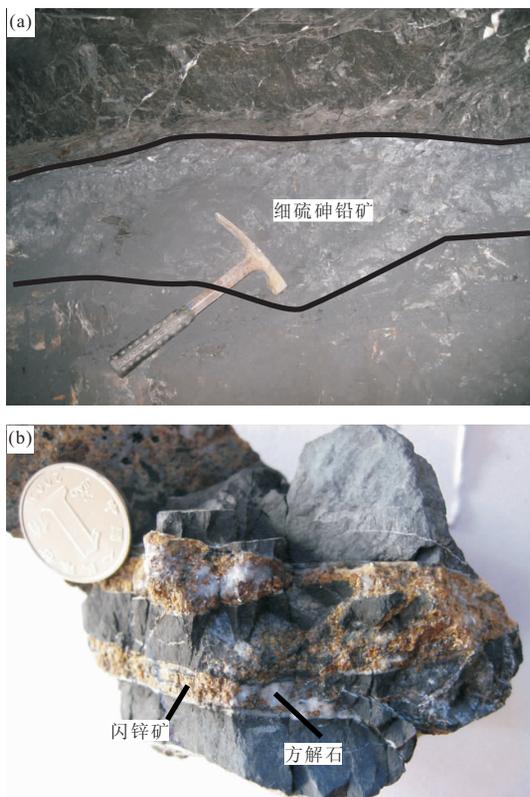


图2 部分矿石野外产状及矿石照片

Fig. 2 The partial photos of ore

- a. 呈脉状充填的细硫砷铅矿脉; b. 脉状充填的闪锌矿、方解石脉

矿脉、黝铜矿细脉,以及纯的方铅矿+闪锌矿矿脉,闪锌矿+方解石脉、闪锌矿+方铅矿/细硫砷铅矿+方解石脉等,是主成矿阶段(图2),本文测试样品即采自此阶段;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(王晓虎等,2011c)。

2 样品处理及测试方法

对铅锌矿床来说,成矿流体最直观的研究对象应该是闪锌矿中的流体包裹体。本次研究选择闪锌矿及成矿期的石英、方解石中包裹体为研究对象,采样位置如图1标示。首先将用于研究的样品磨制成厚0.125~0.13 mm的包裹体片,在显微镜上进行流体包裹体岩相学观察,鉴定出与成矿同期的流体包裹体,圈出适合测温的有代表性的原生流体包裹体。

流体包裹体群体成分分析在中国地质科学院矿产资源研究所进行,分析样品为双目镜下挑选的方解石和闪锌矿单矿物,粒度0.2~0.3 mm(80目~60目)。气相色谱分析仪器为日本 Shimadzu GC2010 气相色谱仪,载气为 He;爆裂炉为澳大利

①云南省地质调查院矿产调查所,2004. 1:1万吴底厂铅锌银铜矿地形地质图。

②宁夏有色金属地质勘查院,2009. 1:1万云南省兰坪县富隆厂银铜铅锌多金属矿区地质图。

亚 SGE 公司产的热爆裂炉,包裹体爆裂取样温度为 100~500 °C. 样品在分析前用王水在 70~80 °C 时煮 3~4 h,然后用二次蒸馏水超声波振荡淋洗 20 次,放入烘箱在 70~80 °C 下烘 4~5 h. 载气和标准气体均来自国家标准物质研究中心. 气相色谱最低检出限为 10^{-6} . 离子色谱分析仪器为日本 Shimadzu HICSP Super 离子色谱仪,样品经王水清洗、二次蒸馏水淋洗和真空干燥后,放入爆裂炉 500 °C 爆裂,用 Millipure 纯水在超声波振荡下淋洗,直至淋洗液电导率前后无变化. 收集淋洗液定容,送入离子色谱仪进行分析. 阳离子最低检出限为 10^{-6} ,阴离子最低检出限为 10^{-9} .

流体包裹体显微测温工作在中国地质科学院地质研究所完成,所用冷热台型号为 THSMG-600,测定温度范围 -200~600 °C,冷冻数据和均一温度数据精度分别为 $\pm 0.1^{\circ}$ 和 $\pm 1^{\circ}$. 先将符合条件的包裹体片用酒精浸泡并清洗干净,分别编号装入小盒中待测. 冷冻测温时,利用液氮对流体包裹体降温,在温度下降过程中观察流体包裹体的变化,待流体包裹体完全冻结后,缓慢升温,观察初熔点、冰点等. 当温度接近相变点时,控制升温速度,速率变为 $0.5^{\circ}\text{C}/\text{min}$,记录流体包裹体冰点温度. 测定均一温度时,升温速度在 $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$,在升温过程中观察气液两相的变化,当气相接近消失时,将升温速度控制到 $1^{\circ}\text{C}/\text{min}$,以便准确记录均一温度.

方解石 C、O 同位素测试由南京大学内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室完成,测试仪器为 MAT-252 型同位素质谱计. 具体方法为:选取 200 目的纯净方解石样品,采用 100% 正磷酸方法 (McCrea, 1950); 在 25 °C 时,方解石与 100% 的 H_3PO_4 反应产生 H_2O 和 CO_2 气,通过灼烧碳炉 (在 Pt 催化下) 提取 CO_2 气体;再将 CO_2 经反复冷却提纯,在质谱仪上进行同位素组成测定,分析精度优于 $\pm 0.2\%$.

硫化物、硫酸矿物硫同位素分析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. 具体分析方法为:选取 200 目的纯净样品,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, Pb 同位素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. 实验流程为:先用蒸馏水把样品洗净,把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,用磷酸和硅胶涂

到铼带上;最后用质谱分析. 同位素比值绝对误差低于 0.01.

3 流体包裹体

流体包裹体岩相学观察发现,包裹体总体颗粒较小,形态上有圆形、椭圆形、不规则形状等,一般小于 $10\ \mu\text{m}$,气液两相为主 (图 3).

本次研究共测方解石中流体包裹体 42 个,闪锌矿中流体包裹体 46 个,石英中流体包裹体 9 个,获得冰点温度数据 83 个,均一温度数据 93 个. 如表 1 所示,白秧坪多金属矿床冰点温度范围为 $-26.4\sim-0.2^{\circ}\text{C}$,平均为 -14.6°C . 按矿段分,李子坪矿段流体包裹体冰点温度分布较广,位于 $-26.4\sim-0.3^{\circ}\text{C}$,平均值 -13.8°C ;吴底厂矿段流体包裹体冰点温度较集中,为 $-21.6\sim-15.6^{\circ}\text{C}$,平均值 -18.8°C ;富隆厂矿段流体包裹体冰点温度范围为 $-21\sim-3.8^{\circ}\text{C}$,平均值 -12.6°C ;白秧坪矿段流体包裹体冰点温度为 $-7.6\sim-0.2^{\circ}\text{C}$,平均值 -2.4°C . 闪锌矿中流体包裹体冰点温度为 $-24.5\sim-9^{\circ}\text{C}$,平均值为 -20.2°C .

对于简单的 $\text{NaCl-H}_2\text{O}$ 体系,冷冻法只适用于盐度在 $0\%\sim 23.3\%$ 稀释溶液的测定,当盐度高于 23.3% 时,溶液的盐度就不能根据冰点测定了. 因此, $\text{NaCl-H}_2\text{O}$ 体系的冰点温度最低不会低于 -21.2°C ,即相当盐度为 23.3% 时的冰点 (卢焕章等, 2004). 在流体包裹体岩相学观察时测得冰点温度一部分低于 -21.2°C ,同时也没见石盐子晶,所以当冰点温度大于 -21.2°C 时,用简单盐水体系计算盐度,当温度小于 -21.2°C 时用池国祥经验公式计算盐度 (Chi and Ni, 2007),计算结果见表 1;矿床盐度介于 $0.35\%\sim 24.73\%$ (NaCl_{eq}),平均值 16.9% (NaCl_{eq}). 其中李子坪矿段盐度范围为 $0.53\%\sim 24.73\%$ (NaCl_{eq}),平均值 16.0% (NaCl_{eq});吴底厂矿段盐度介于 $19.1\%\sim 23.1\%$ (NaCl_{eq}) 之间,平均值 21.4% (NaCl_{eq});富隆厂矿段盐度介于 $8.7\%\sim 23.1\%$ (NaCl_{eq}),平均值 17.5% (NaCl_{eq});白秧坪矿段盐度介于 $0.35\%\sim 5.3\%$ (NaCl_{eq}),平均为 2.3% (NaCl_{eq}). 根据闪锌矿中流体包裹体计算出的盐度范围为 $12.9\%\sim 24.2\%$ (NaCl_{eq}),平均值 22.1% (NaCl_{eq}) (图 4).

通过对流体包裹体均一温度的测定,总体上均一温度集中于 $120\sim 180^{\circ}\text{C}$ (表 1),李子坪矿段流体包裹体均一温度位于 $111\sim 238^{\circ}\text{C}$,平均值 154°C ;

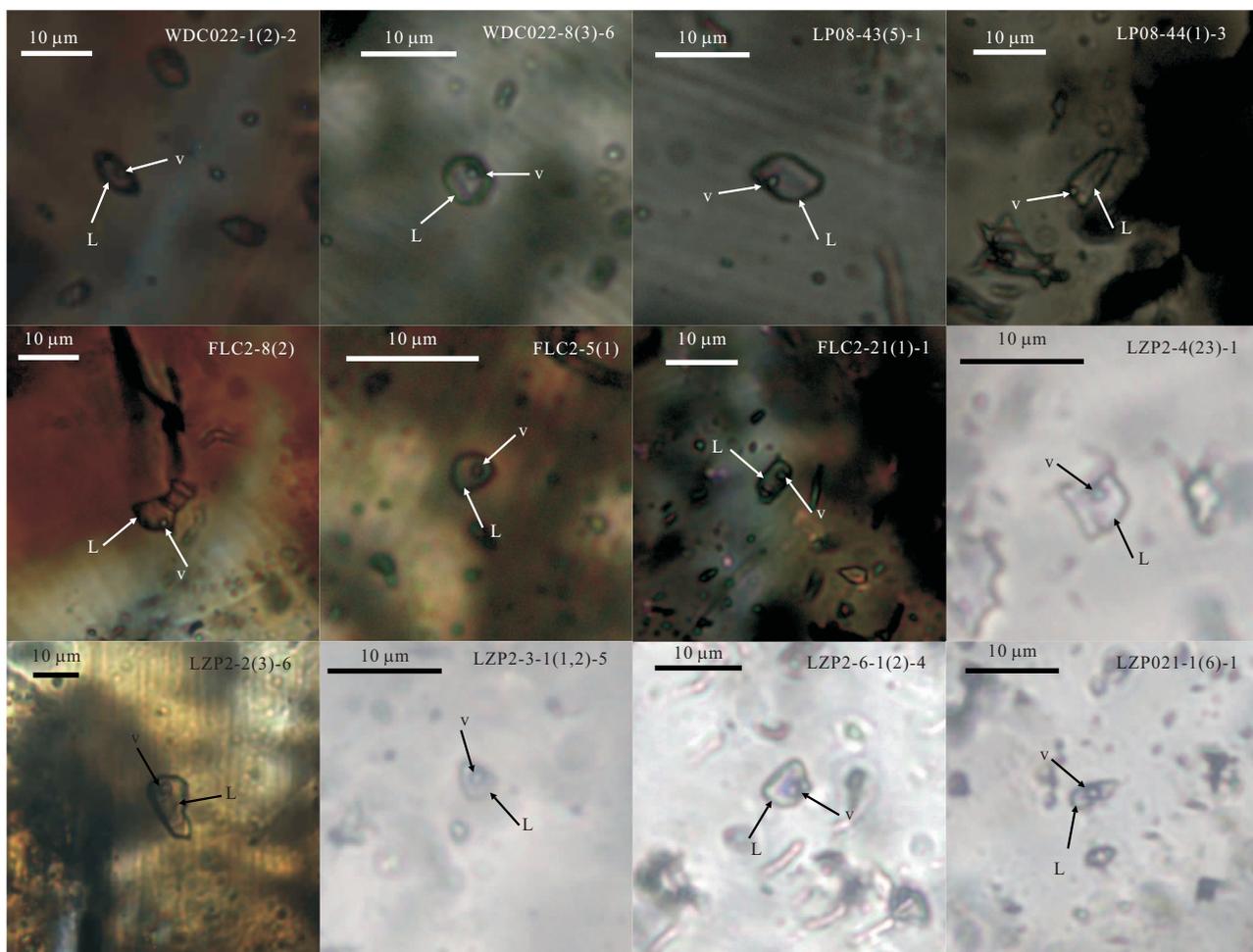


图 3 白秧坪铅锌铜银多金属矿床流体包裹体显微照片

Fig. 3 Photomicrographs of fluid inclusions from Baiyangping Pb-Zn-Cu-Ag polymetallic deposit

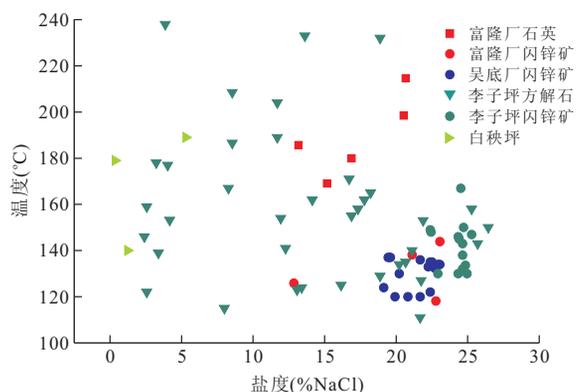


图 4 白秧坪铅锌铜银多金属矿床盐度与均一温度关系

Fig. 4 The homogenization temperature and salinity relation of Baiyangping Pb-Zn-Cu-Ag polymetallic deposit

吴底厂矿段流体包裹体均一温度介于 100 ~ 206.1 °C, 平均值 131.8 °C; 富隆厂矿段流体包裹体均一温度介于 118.2 ~ 214.6 °C, 平均值 163.6 °C; 白秧坪矿段流体包裹体均一温度为 105 ~ 284 °C, 平

均为 183.5 °C. 闪锌矿中流体包裹体均一温度为 100 ~ 206.1 °C, 平均值为 136.9 °C (图 4).

流体系统中, 在 CaCl_2 和 MgCl_2 盐度高的情况下, 可形成一些不同的水合物. 但是在盐度 $< 30\%$ 的情况下, 其习性类似于简单的冰-盐水体, 即与 $\text{NaCl-H}_2\text{O}$ 体系一致 (卢焕章等, 2004). 由此, 流体密度根据 $\text{NaCl-H}_2\text{O}$ 体系的 $T-W-\rho$ 相图得出 (Bodnar, 1983), 结果见表 1, 密度在 0.84 ~ 1.11 g/cm^3 之间, 平均值 1.04 g/cm^3 . 闪锌矿中流体包裹体显示的成矿流体密度为 1.025 ~ 1.11 g/cm^3 , 平均值 1.09 g/cm^3 .

白秧坪铅锌铜银多金属矿床成矿流体在开放空间充填是主要成矿方式, 所以利用流体包裹体对成矿压力/深度估算时考虑流体压力, 压力估算采用邵洁涟 (1988) 的经验公式, 即 $P = P_0 \times T/T_0$, 其中 $P_0 = 219 + 2620S$, $T_0 = 374 + 920S$ (T 为流体包裹体均一温度, S 为流体包裹体盐度), 成矿深度估算

表 1 白秧坪铅锌银铜多金属矿床流体包裹体特征及参数
Table 1 Microthermometric data and characteristics of fluid inclusion in Baiyangping Pb-Zn-Cu-Ag polymetallic deposit

序号	矿段	样品号	寄主矿物	包裹体特征		冰点温度(°C)	均一温度(°C)	盐度(NaCl _{eq} %)	密度ρ(g/cm ³)	深度估算(m)	资料来源
				类型	大小(μm)						
1	富隆厂	FLC054-2	石英	富液两相	4~10	-17.6~-5.6	137~214.6	8.7~20.67	0.975~1.02	1 780.4~2 272.0	实测
2	富隆厂	FLC2-5	闪锌矿	富液两相	4~5		138~181.6				实测
3	富隆厂	FLC2-8	闪锌矿	富液两相	10	-21	143.9	23.05	1.09	1 525.9	实测
4	富隆厂	FLC2-21	闪锌矿	富液两相	5~7	-20.6~-9	118.2~138.2	12.85~22.78	1.025~1.11	1 253.2~1 463.6	实测
5	富隆厂	FLC054-7	闪锌矿	富液两相	5~10		123~188.1				实测
6	吴底厂	2WDC2-4	闪锌矿	富液两相	6~10	-20~-15.6	120~206.1	19.13~22.38	1.07~1.105	1 270.6~1 449.0	实测
7	吴底厂	2WDC2-9	闪锌矿	富液两相	10~13	-21	130~134	23.05	1.1	1 420.9	实测
8	吴底厂	LP08-43	闪锌矿	富液两相	8	-16.6	120	19.92	1.08	1 269.7	实测
9	吴底厂	LP08-44	闪锌矿	富液两相	11~12	-20.8~-16.2	130~137	19.6~22.91	1.07~1.1	1 375.8~1 449.2	实测
10	吴底厂	WDC022-1	闪锌矿	富液两相	7~8	-21.6~-16.9	100~138	20.15~22.38	1.08~1.105	1 058.3~1 461.7	实测
11	吴底厂	WDC022-8	闪锌矿	富液两相	4~10	-20.5~-19	120~139	21.68~22.71	1.08~1.095	1 271.4~1 440.9	实测
12	李子坪	LZP2-2	方解石	富液两相	5	-2.5	153.2	4.18	0.94	1531.2	实测
13	李子坪	LZP2-2	闪锌矿	富液两相	5~20	-24~-20.1	130~167	22.44~24.02	1.07~1.11	1 379.0~1 771.6	实测
14	李子坪	LZP2-3-1	方解石	富液两相	4~10	-5.5~-1.4	122~238	2.57~8.55	0.84~0.96	1 169.4~2 365.7	实测
15	李子坪	LZP2-4	方解石	富液两相	7~8	-19.3~-2	129~153	3.39~21.89	0.945~1.07	1 363.8~1 621.2	实测
16	李子坪	LZP2-6-1	方解石	富液两相	4~12	-19.1~-5.1	111~233	8~21.75	0.925~1.105	1 176.0~2 452.6	实测
17	李子坪	LZP2-6-1	闪锌矿	富液两相	8~10	-24.5~-20	145~150	22.38~24.17	1.08~1.095	1 538.2~1 591.3	实测
18	李子坪	LZP2-9-2	方解石	富液两相	20	-0.3		0.53			实测
19	李子坪	LZP021-1	方解石	富液两相	6~17	-26.4~-5	143~189	7.86~24.73	0.93~1.1	1 517.5~1 977.9	实测
20	李子坪	LZP021-2	闪锌矿	富液两相	9	-20.8	130	22.91	1.1	1 378.4	实测
21	白秧坪	B29	重晶石			-0.2	179	0.35	0.9	1 103.0	曾荣,2007
22	白秧坪	B29	方解石			-7.6~-2.1	165~238				曾荣,2007
23	白秧坪	B28	天青石			-3.1~-0.9	183~284				曾荣,2007
24	白秧坪	BYP29	方解石			-3.0~-0.9	122~181				曾荣,2007
25	白秧坪	B33	天青石			-4.1~-0.8	123~258				曾荣,2007
26	白秧坪	B20	方解石			-0.7	140	1.22	0.94	1 206.4	曾荣,2007
27	白秧坪	BYP	闪锌矿				105~155				杨伟光等,2003
28	白秧坪	ss97066	石英脉	富液两相		-3.3	189	5.3	0.91	1 917.1	徐启东和李建威,2003

采用 Sheperd *et al.* (1985) 的经验公式, 即 $p = 2.7 \times 0.0981 \times H$ (p 单位为 bar, $1\text{bar} = 0.1\text{MPa}$, H 单位为 m). 根据石英、方解石、闪锌矿中包裹体盐度、温度来估算, 结果显示白秧坪铅锌铜银多金属矿床成矿压力介于 28.0 ~ 46.9 MPa, 平均 37.6 MPa, 对应的成矿深度约 1 058 ~ 2 452 m, 平均 1 555 m, 集中于 1 200 ~ 1 800 m. 以闪锌矿中流体包裹体推算的成矿深度中, 富隆厂矿段约为 1 253 ~ 1 526 m, 平均值约为 1 391 m; 吴底厂矿段约为 1 058 ~ 1 462 m, 平均值约为 1 361 m, 集中于 1 300 ~ 1 500 m; 李子坪矿段约为 1 378 ~ 1 772 m, 平均值约为 1 507 m, 集中于 1 400 ~ 1 600 m.

白秧坪铅锌铜银多金属矿床不同矿段脉石方解石中流体包裹体气体组成见表 2. 分析表明, 流体包裹体中气相成分主要为 H_2O 、 CO_2 、 N_2 和 O_2 , 少量 CH_4 、 C_2H_2 、 C_2H_4 、 C_2H_6 等还原性气体, 不同矿段具有相似的气体组成. 流体包裹体群体液相成分分析显示(表 2), 脉石方解石中流体包裹体阳离子组成以 Mg^{2+} 、 Na^+ 、 K^+ 为主, 其中富隆厂矿段和吴底

厂矿段含少量 Li^+ , 阴离子组成以 Cl^- 、 F^- 为主, 还含有一定量的 Br^- 、 NO_3^- . 闪锌矿中流体包裹体成分是成矿流体的直接记录, 其中流体包裹体阳离子组成以 Ca^{2+} 、 Na^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} 为主, 阴离子组成以 Cl^- 为主, 含一定量的 F^- 、 NO_3^- , 个别含少量 Br^- . 由此, 成矿流体体系为 Ca^{2+} - Na^+ - K^+ - Mg^{2+} - Cl^- - F^- - NO_3^- 卤水体系, 以 Ca^{2+} - Na^+ - Cl^- 体系为主.

4 同位素地球化学特征

4.1 C、O 同位素特征

本次研究共对白秧坪铅锌铜银多金属矿床 10 件方解石样品进行了 C、O 同位素测试, 结合前人分析结果(叶庆同等, 1992; 陈开旭等, 2000; 薛春纪等, 2002; 杨伟光等, 2003; 何明勤等, 2004; 刘家军等, 2004; 赵海滨, 2006; 曾荣, 2007) 得出, 白秧坪矿床方解石 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 值变化范围为 $-4.16\text{‰} \sim 3\text{‰}$, 平均值 -2.09‰ , $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ 值范围为 $-2.5\text{‰} \sim 20.4\text{‰}$, 平

表 2 流体包裹体气相液相成分分析结果($\mu\text{g/g}$)

Table 2 Gas and liquid compositions of fluid inclusions from Baiyangping Pb-Zn-Cu-Ag polymetallic deposit

样号	矿物名称	CH_4	$\text{C}_2\text{H}_2 + \text{C}_2\text{H}_4$	C_2H_6	CO_2	H_2O	O_2	N_2	CO	Li^+	
LZP2-1	方解石	0.223	0.065	微量	167.509	195.102	5.316	33.188	—	0	
LZP2-6-1	方解石	0.356	0.082	微量	468.483	198.428	39.196	171.563	—	0	
FLC2-3-3	方解石	0.577	0.106	0.027	203.815	210.382	3.088	28.287	—	0.437	
WDC022-4	方解石	0.505	0.126	0.018	184.049	177.565	4.247	30.514	—	0.195	
FLC2-8	闪锌矿									0	
FLC2-21	闪锌矿									0	
LZP021-2	闪锌矿									0	
LZP2-6-1	闪锌矿									0	
2WDC2-7	闪锌矿									0	
2WDC2-15	闪锌矿									0	
WDC022-4	闪锌矿									0	
LP08-45	闪锌矿									0	
样号	矿物名称	Na^+	K^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}	F^-	Cl^-	NO_2^-	Br^-	NO_3^-	SO_4^{2-}
LZP2-1	方解石	15.939	5.817	224.675	—	9.814	19.839	0	0.276	0.634	—
LZP2-6-1	方解石	14.667	1.658	9.225	—	1.417	39.652	0	0.859	0.264	—
FLC2-3-3	方解石	8.488	10.360	104.774	—	5.903	10.688	0	0.071	0.174	—
WDC022-4	方解石	2.072	0.622	2.474	—	1.078	2.431	0	0	0.140	—
FLC2-8	闪锌矿	14.447	6.385	4.941	28.253	0.244	5.226	0	0.153	0.254	—
FLC2-21	闪锌矿	21.732	3.284	8.840	67.825	0.278	11.479	0	0	0.267	—
LZP021-2	闪锌矿	7.485	1.180	1.498	24.699	0.251	4.983	0	0	0.115	—
LZP2-6-1	闪锌矿	13.151	2.197	0.713	125.827	0.264	9.080	0	0	0.195	—
2WDC2-7	闪锌矿	12.227	1.217	0	4.393	0.095	4.767	0	0	0.102	—
2WDC2-15	闪锌矿	3.663	0.958	1.116	131.645	0.103	1.294	0	0	0.089	—
WDC022-4	闪锌矿	7.459	1.504	0.561	25.270	0.160	6.550	0	0	0.488	—
LP08-45	闪锌矿	8.569	3.642	1.737	12.580	0.200	7.569	0	0	0.768	—

注:“—”表未检出.

均值 7.33‰。在晚三叠统灰岩中 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 值变化范围为 $-5.46\text{‰} \sim 2.63\text{‰}$ ，平均值 -0.58‰ (叶庆同等, 1992)。按矿段分, 在李子坪矿段, $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 值变化范围为 $-3.4\text{‰} \sim 3\text{‰}$ ，平均值 -1.09‰ ， $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ 值范围为 $1.38\text{‰} \sim 20.4\text{‰}$ ，平均值 13.18‰ ；吴底厂矿段 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 值变化范围为 $-3.1\text{‰} \sim 0.8\text{‰}$ ，平均值 -1.99‰ ， $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ 值范围为 $1.3\text{‰} \sim 19.7\text{‰}$ ，平均值 11.32‰ ；富隆厂矿段 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 值变化范围为 $-3.9\text{‰} \sim -2.3\text{‰}$ ，平均值 -2.95‰ ， $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ 值范围为 $0.66\text{‰} \sim 17.36\text{‰}$ ，平均值 14.40‰ ；白秧坪矿段 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 值变化范围为 $-4.16\text{‰} \sim -0.5\text{‰}$ ，平均值 -2.02‰ ， $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ 值范围为 $-2.5\text{‰} \sim 18.18\text{‰}$ ，平均值 2.28‰ 。

热液矿物的氧同位素组成受热液流体的同位素组成、结晶温度以及同位素交换程度控制, 所以热液流体中氧同位素组成可以由不含氧矿物中流体包裹体直接测得或者间接地由含氧矿物 $\delta^{18}\text{O}$ 值计算得出 (Changkakonti *et al.*, 1986)。本文根据 Changkakonti *et al.* (1986) 公式 $1000\ln\alpha = 2.78 \times (10^6/T^2) - 2.89$ 来计算成矿流体中 $\delta^{18}\text{O}$ 值, 温度采用各矿段所测流体包裹体均一温度的平均值, 在成矿流体中, $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ 值变化范围 $-12.94\text{‰} \sim 8.05\text{‰}$ ，平均值 -3.93‰ 。

4.2 S 同位素特征

本次研究选取白秧坪铅锌铜银多金属矿床 37 件硫化物、硫酸盐矿物进行 S 同位素测试, 结合前人数据 (潘桂棠等, 2003; 王峰, 2004; 何明勤等, 2004; 李志明等, 2005; 陈开旭, 2006; 赵海滨, 2006; 曾荣, 2007) 得出, 白秧坪 Pb-Zn-Cu-Ag 多金属矿床 $\delta^{34}\text{S}$ 值分布范围为 $-10.2\text{‰} \sim 11.2\text{‰}$ ，平均值约 5.6‰ ，集中于 $4\text{‰} \sim 8\text{‰}$ 之间 (图 5)。不同矿段、不同矿物之间 $\delta^{34}\text{S}$ 值接近。

4.3 Pb 同位素特征

在矿区, $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 的变化范围为 $18.609 \sim 18.818$ ， $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 变化范围为 $15.548 \sim 15.842$ ， $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 变化范围为 $38.514 \sim 39.556$ 。其中, 在富隆厂矿段, $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 的变化范围为 $18.609 \sim 18.725$ ， $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 变化范围为 $15.548 \sim 15.72$ ， $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 变化范围为 $38.514 \sim 39.135$ ；在李子坪矿段, $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 18.620 \sim 18.818$ ， $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15.597 \sim 15.842$ ， $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 38.716 \sim 39.556$ ；在吴底厂矿段, $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 18.626 \sim 18.783$ ， $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15.609 \sim 15.756$ ， $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 38.791 \sim 39.269$ ；在白秧坪矿段, $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} =$

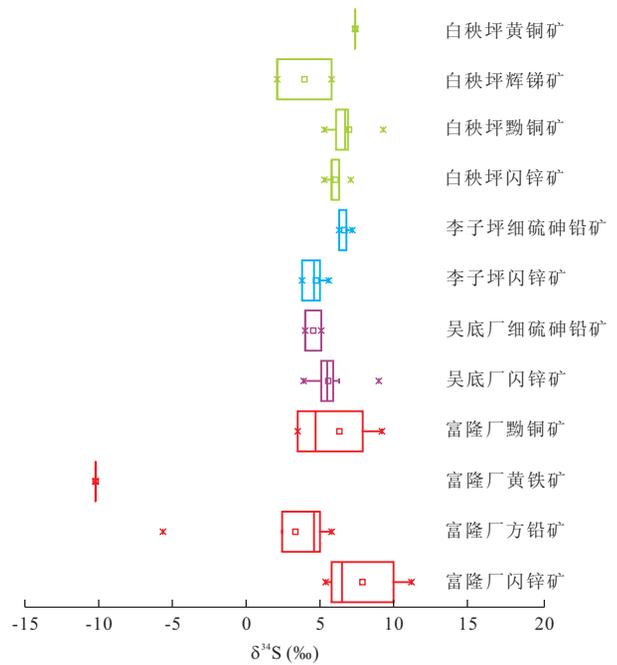


图 5 白秧坪铅锌铜银多金属矿床硫同位素组成
Fig. 5 S isotopic composition of Baiyangping Pb-Zn-Cu-Ag polymetallic deposit

$18.612 \sim 18.747$ ， $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15.605 \sim 15.754$ ， $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 38.781 \sim 39.245$ 。

5 讨论

5.1 成矿流体及碳的来源

总结白秧坪矿床流体包裹体测试分析结果, 矿床成矿流体具有中低温、高盐度、高密度特征。从本次流体包裹体群体气相成分分析结果来看, 李子坪、吴底厂、富隆厂 3 个矿段都存在还原性气体 CH_4 、 $\text{C}_2\text{H}_2 + \text{C}_2\text{H}_4$ 、 C_2H_6 、 N_2 ，并且 CO_2 含量较高, 说明成矿过程中还原性烃类气体参与了成矿作用; 结合流体包裹体液相成分分析结果 (表 2), 成矿流体体系为 $\text{Ca}^{2+} - \text{Na}^+ - \text{K}^+ - \text{Mg}^{2+} - \text{Cl}^- - \text{F}^- - \text{NO}_3^-$ 体系。由此, 矿床成矿流体特征与盆地卤水较为相似。

将方解石 $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ 值与不同的地质体中氧同位素组成对比 (图 6), 可以看出本次研究方解石中 $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ 值分布较广, 与其他几个储库都有交集, 只是沉积岩中更富集 $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ ，大气降水中具更大负值。成矿流体 $\delta^{18}\text{O}$ 值总体位于大气降水范围内, 说明大气降水是成矿流体的重要组成部分。

研究认为, 当矿床内热液脉中无石墨与方解石共生时, 方解石 (或流体包裹体热液中 CO_2) 的碳同位素组成 ($\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$) 可以近似作为成矿热液的总碳同

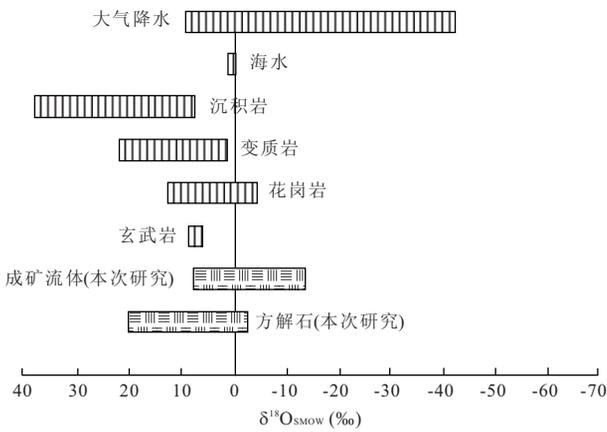


图 6 白秧坪铅锌铜银多金属矿床方解石氧同位素组成分布(底图据 Hoefs, 2009)

Fig. 6 $\delta^{18}O$ values of calcite from Baiyangping Pb-Zn-Cu-Ag polymetallic deposit and important geological reservoirs

位素组成(Ohmoto, 1972). 由于矿区和方解石共生的矿物中不含石墨,且成矿流体中 $CH_4 + C_2H_2 + C_2H_4 + C_2H_6$ 较少(表 2),因此,本矿区热液方解石的碳同位素组成可近似作为成矿热液总碳同位素组成. 将白秧坪铅锌铜银多金属矿床方解石中 $\delta^{13}C_{PDB}$ 值与已有的体系中 $\delta^{13}C_{PDB}$ 值(Clark and Fritz, 1997)对比,与大气中 CO_2 、土壤中 CO_2 、变质 CO_2 、煤、石油、大气中 CH_4 、生物成因 CH_4 、热成因 CH_4 、陨石墨、球粒陨石碳酸盐 $\delta^{13}C_{PDB}$ 值没有交叉重叠,而与地下水总溶解无机碳、淡水盐酸盐、海相灰岩、地幔 CO_2 中 $\delta^{13}C_{PDB}$ 值有交集,特别是和海相灰岩 $\delta^{13}C_{PDB}$ 值范围最接近. 如图 7 所示, $\delta^{13}C_{PDB}$ 值较为集中,范围在 $-4\text{‰} \sim 0\text{‰}$,方解石 $\delta^{13}C_{PDB}$ 值范围和晚三叠世灰岩 $\delta^{13}C_{PDB}$ 值范围接近,不同矿段之间范围变化不大,亦显示碳主要来自碳酸盐岩的溶解作用.

5.2 S 源及金属物质来源

热液矿床中硫化物的 $\delta^{34}S$ 值所获得的成矿流体中总硫的同位素组成对分析硫的来源具有重要意义(韩吟文等, 2003),矿区矿脉中无共生硫酸盐,而且成矿显示还原、酸性环境,中低温,所以矿区硫化物中 $\delta^{34}S$ 值近似于流体的总硫同位素组成.

从硫同位素看,白秧坪铅锌铜银多金属矿床 $\delta^{34}S$ 值组成稳定,集中在 $4\text{‰} \sim 8\text{‰}$ 之间(图 5),说明矿床中具有均一的硫源. 参与成矿的 S^{2-} 可以由硫酸盐的生物还原(BSR)和热化学还原(TSR)得到,生物还原要求较低温度($<50\text{ }^\circ\text{C}$),热化学还原要求较高温度($>80\text{ }^\circ\text{C}$)(Ohmoto and Rye, 1979). 一般

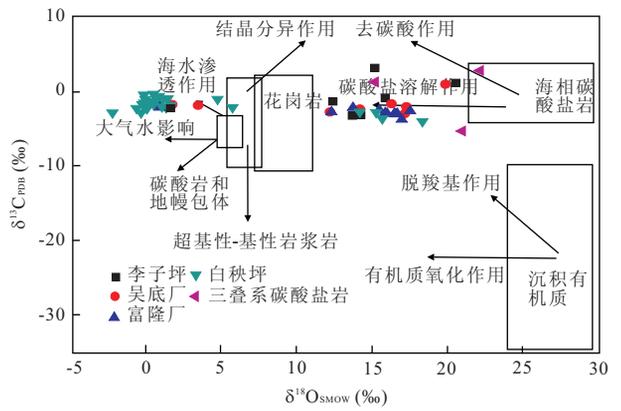


图 7 白秧坪铅锌铜银多金属矿床方解石的 C、O 同位素值分布(底图据刘家军等, 2004;略简化)

Fig. 7 C-O isotope of calcite in the Baiyangping Pb-Zn-Cu-Ag polymetallic deposit

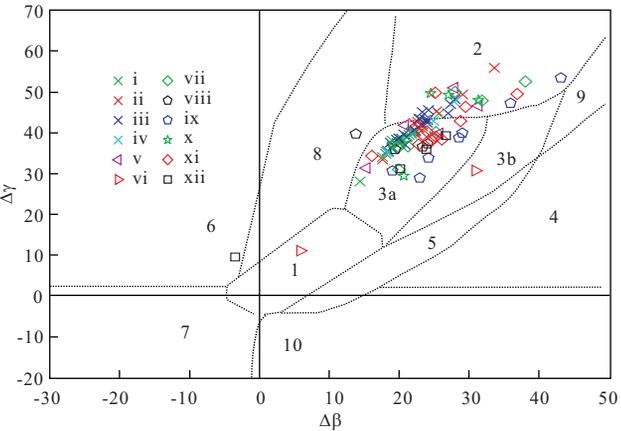


图 8 白秧坪铅锌铜银多金属矿床铅同位素 $\Delta\beta-\Delta\gamma$ 成因分类图解(底图据朱炳泉, 1998)

Fig. 8 $\Delta\beta-\Delta\gamma$ genetic classification of lead isotope in Baiyangping Pb-Zn-Cu-Ag polymetallic deposits

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 $^{207}Pb/^{204}Pb$ 和 $^{208}Pb/^{204}Pb$; i. 富隆厂矿段; ii. 李子坪矿段; iii. 吴底厂矿段; iv. 白秧坪矿段; v. 元古代变质岩、花岗岩; vi. 寒武系片岩、白云岩; vii. 二叠系凝灰岩、灰岩、玄武岩、角斑岩; viii. 三叠系流纹岩、玄武岩; ix. 三叠系灰岩; x. 侏罗系砂岩; xi. 白垩系砂岩; xii. 第三系砂岩

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 $\delta^{32}S$ 的富集明显超过原始硫酸盐, $\delta^{34}S$ 通常为负值;二是硫化氢或硫化物中 $\delta^{32}S$ 的富集随还原程度而变化,表现为 $\delta^{34}S$ 值具有大幅度波动范围(韩吟文等, 2003). 矿区硫化物、硫酸盐矿物中 $\delta^{34}S$ 值大多为正

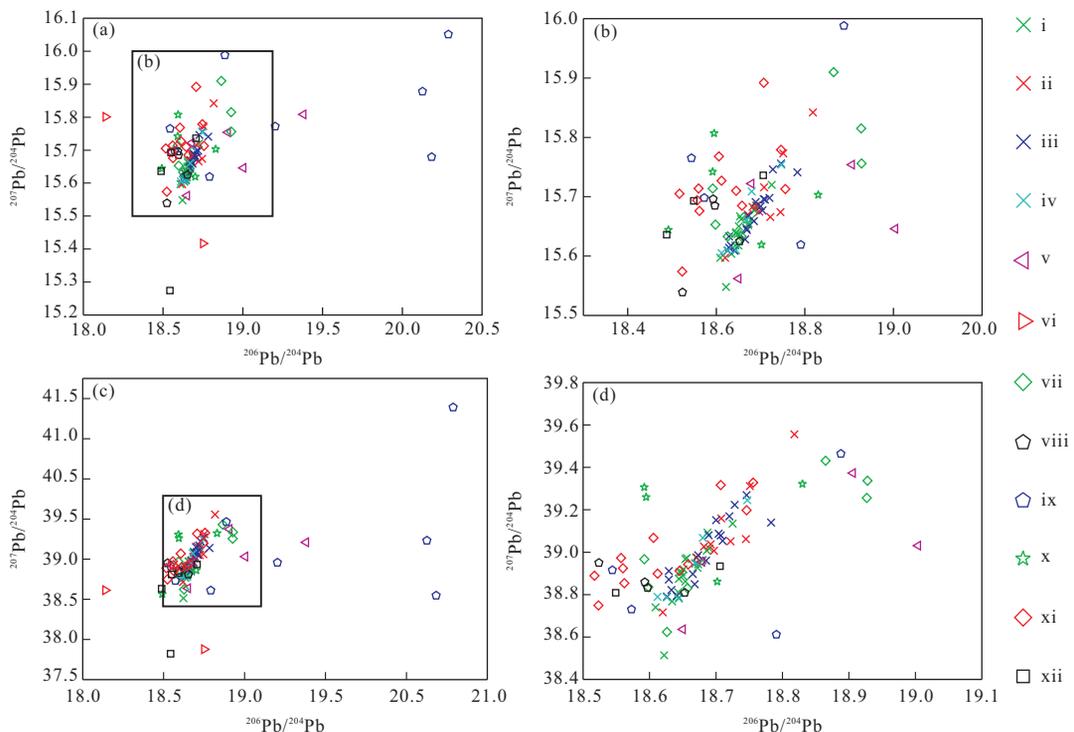


图 9 兰坪盆地白秧坪铅锌铜银多金属矿床 Pb 同位素组成与邻区地层全岩 Pb 同位素对比(地层岩石中 Pb 同位素数据引自陈式房等,1991; 王峰,2004)

Fig. 9 Comparison of Pb isotope composition of sulfides from Baiyangping Pb-Zn-Cu-Ag polymetallic deposit and whole-rock Pb isotope composition of strata from adjacent areas

i. 富隆厂矿段; ii. 李子坪矿段; iii. 吴底厂矿段; iv. 白秧坪矿段; v. 元古代变质岩、花岗岩; vi. 寒武系片岩、白云岩; vii. 二叠系凝灰岩、灰岩、玄武岩、角斑岩; viii. 三叠系流纹岩、玄武岩; ix. 三叠系灰岩; x. 侏罗系砂岩; xi. 白垩系砂岩; xii. 第三系砂岩

值,且较集中,所以排除了生物成因硫。如果是有机热还原作用其成矿温度要大于 $80\text{ }^{\circ}\text{C}$,而无机还原作用要求达到 $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上(Ohmoto and Rye, 1979)。由于云龙组膏盐建造的硬石膏 $\delta^{34}\text{S} = 13.5\text{‰} \sim 15.8\text{‰}$ (覃功炯和朱上庆,1991),在 $100 \sim 150\text{ }^{\circ}\text{C}$,通过热化学硫酸盐还原(TSR)可以使硫酸盐 $\delta^{34}\text{S}$ 降低 $10\text{‰} \sim 15\text{‰}$ (Machel *et al.*, 1995; Ohmoto and Goldhaber, 1997),前文所得成矿温度集中于 $120 \sim 180\text{ }^{\circ}\text{C}$,且有机质参与成矿,所以云龙组海相硫酸盐经过有机质热化学还原(TSR)可以使 $\delta^{34}\text{S}$ 值位于 $4\text{‰} \sim 8\text{‰}$ 。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,由此有机质的热化学还原硫酸盐是硫的来源之一。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 $120 \sim 180\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。当温度大于 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,含硫有机物(如石油)可受热分解,生成 H_2S (郑永飞和陈江峰,2000)。所以,含硫有机物的分解亦是硫的可能来源(王晓虎等,2011a)。

朱炳泉(1998)认为钍铅的变化以及钍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 $\Delta\beta - \Delta\gamma$ 成因分类图解。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 $\Delta\gamma$,做出白秧坪铅锌铜银多金属矿床 Pb 同位素和地层岩石中 Pb 同位素 $\Delta\beta - \Delta\gamma$ 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,这能否说明直接来自地幔的物质参与成矿呢? 将白秧坪矿区 Pb 同位素数据与邻区地层全岩的 Pb 同位素数据对比(图 9),显示邻区地层全岩大部分 Pb 同位素数据和矿床的 Pb 同位素数据接近。再看盆地地层岩性,元古界岩石岩性为片岩、混合岩、花岗岩;寒武系为片岩、白云岩;二叠系为凝灰岩、灰岩、玄武岩、角斑岩;三叠系为流纹岩、玄武岩、灰岩;侏罗系为砂岩;白垩系为砂岩;第三系为砂岩(陈式房等,1991),再者从 $1:20$ 万地质矿产图上看,兰坪盆地内部无岩浆岩出露(王晓虎等,2011a)。由于二叠系和三叠

系含有大量玄武岩,所以 $\Delta\beta-\Delta\gamma$ 图中显示上地壳与地幔混合的俯冲带铅是由于流体萃取了三叠系或二叠系玄武岩中成矿物质,而三叠系和二叠系为盆地基底岩系,因此推断白秧坪铅锌铜银多金属矿床中的金属物质来自沉积地层和盆地基底岩系。

6 结论

(1)白秧坪矿床包裹体总体颗粒较小,形态复杂,气液两相为主,成矿流体体系为盆地卤水体系,中低温,中高盐度,成矿流体密度高,成矿深度浅。(2)碳质的来源较为均一,矿石中热液方解石中碳质源自地层中碳酸盐岩溶解。成矿流体来自盆地流体及大气降水。(3)成矿物质硫来自硫酸盐的有机质热化学还原作用,或者含硫有机质的热分解。金属成矿物质来自沉积地层和盆地基底。

致谢:审稿人及编辑部提出了宝贵的意见,在此深表感谢。

References

Bodnar, R. J., 1983. A method of calculating fluid inclusion volumes based on vapor bubble diameters and P-V-T-X properties of inclusion fluids. *Econ. Geol.*, 78: 535—542. doi:10.2113/gsecongeo.78.3.535

Changkakoti, A., Morton, R. D., Gray, J., et al., 1986. Oxygen, hydrogen, and carbon isotopic studies of the Great Bear Lake silver deposits, Northwest Territories. *Can. J. Earth Sci.*, 23: 1463—1469. doi:10.1139/e86-141

Chen, K. X., 2006. The forming mechanism of copper-silver polymetallic ore concentration area in the north of Lanping foreland basin in Yunnan Province (Dissertation). China University of Geosciences, Beijing (in Chinese with English abstract).

Chen, K. X., He, L. Q., Wei, J. Q., et al., 2004a. Preliminary study on the characteristics of ore minerals and the occurrence states of silver and cobalt in the Baiyangping ore-concentrated field, Yunnan Province. *Acta Mineralogica Sinica*, 24(1): 61—67 (in Chinese with English abstract).

Chen, K. X., Yao, S. Z., He, L. Q., et al., 2004b. Ore-forming fluid in Baiyangping silver-polymetallic mineralization concentration field in Lanping, Yunnan Province. *Geological Science and Technology Information*, 23(2): 45—50 (in Chinese with English abstract).

Chen, K. X., He, L. Q., Yang, Z. Q., et al., 2000. Oxygen and carbon isotope geochemistry in Sanshan-Baiyangping copper-silver polymetallogenic enrichment district, Lanping,

Yunnan. *Geology and Mineral Resources of South China*, 4: 1—8 (in Chinese with English abstract).

Chen, S. F., Liu, Y. L., Bao, Y. X., et al., 1991. Research into metallogenic law, ore deposit types of Deqin-Xianguang lead-zinc ore zone. *Yunnan Geology*, 10(2): 119—144 (in Chinese with English abstract).

Chi, G. X., Ni, P., 2007. Equation of calculation of NaCl/(NaCl+CaCl₂) ratios and salinities from hydrohalite-melting and ice-melting temperatures in the H₂O-NaCl-CaCl₂ system. *Acta Petrologica Sinica*, 23: 33—37.

Clark, I. D., Fritz, P., 1997. Environmental isotopes in hydrogeology. Lewis Publishers, New York, 1—328.

Feng, C. X., Bi, X. W., Hu, R. Z., et al., 2011. Study on paragenesis-separation mechanism and source of ore-forming element in the Baiyangping Cu-Pb-Zn-Ag polymetallic ore deposit, Lanping basin, southwestern China. *Acta Petrologica Sinica*, 27(9): 2609—2624 (in Chinese with English abstract).

Han, Y. W., Ma, Z. D., Zhang, H. F., et al., 2003. Geochemistry. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).

He, L. Q., Chen, K. X., Wei, J. Q., et al., 2005. Geological and geochemical characteristics and genesis of ore deposits in eastern ore belt of Baiyangping area, Yunnan Province. *Mineral Deposits*, 24(1): 61—70 (in Chinese with English abstract).

He, L. Q., Chen, K. X., Yu, F. M., et al., 2004. Nappe tectonics and their ore-controlling of Lanping basin in Yunnan Province. *Geology and Prospecting*, 40(4): 7—12 (in Chinese with English abstract).

He, M. Q., Liu, J. J., Li, C. Y., et al., 2004. Fluid mineralization mechanism of a large copper-lead-zinc ore-concentrated area in Lanping basin—Taking Baiyangping copper-cobalt polymetallic area as the example. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).

Hoefs, J., 2009. Stable isotope geochemistry (Sixth Edition). Springer, 1—285.

Li, Z. M., Liu, J. J., Qin, J. Z., et al., 2004. C, O and H isotope compositions of polymetallic deposits in Lanping basin, western Yunnan Province and their geological significance. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 34(3): 360—366 (in Chinese with English abstract).

Li, Z. M., Liu, J. J., Qin, J. Z., et al., 2005. Ore-forming material sources of the Baiyangping copper-cobalt-silver polymetallic deposit in Lanping basin, western Yunnan. *Geology and Prospecting*, 41(1): 1—6 (in Chinese with English abstract).

- Liu, J. J., He, M. Q., Li, Z. M., 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. *Mineral Deposits*, 23(1): 1—10 (in Chinese with English abstract).
- Liu, J. J., Zhai, D. G., Li, Z. M., et al., 2010. Occurrence of Ag, Co, Bi and Ni elements and its genetic significance in the Baiyangping silver-copper polymetallic metallogenetic concentration area, Lanping basin, southwestern China. *Acta Petrologica Sinica*, 26(6): 1646—1660 (in Chinese with English abstract).
- Lu, H. Z., Fang, H. R., Ni, P., et al., 2004. Fluid inclusion. Science Press, Beijing (in Chinese).
- Machel, H. G., Krouse, H. R., Sassen, R., 1995. Products and distinguishing criteria of bacterial and thermochemical sulfate reduction. *Applied Geochemistry*, 10: 373—389. doi:10.1016/0883-2927(95)00008-9
- McCrea, J. M., 1950. On the isotope chemistry of carbonates and a paleotemperature scale. *Journal of Chemical Physics*, 18(6): 849—857. doi:10.1063/1.1747785
- Mou, C. L., Wang, J., Yu, Q., et al., 1999. The evolution of the sedimentary basin in Lanping area during Mesozoic-Cenozoic. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 19(3): 30—36 (in Chinese with English abstract).
- Ohmoto, H., 1972. Systematics of sulfur and carbon isotopes in hydrothermal ore deposits. *Econ. Geol.*, 67(5): 551—578. doi:10.2113/gsecongeo.67.5.551
- Ohmoto, H., Goldhaber, M., 1997. Sulfur and carbon isotopes. In: Barnes, H. L., ed., *Geochemistry of hydrothermal ore deposits* (3rd edition). Wiley-Inter Science, New York, 517—600.
- Ohmoto, H., Rye, R. O., 1979. Isotopes of sulfur and carbon. In: Barnes, H. L., ed., *Geochemistry of hydrothermal ore deposits*. Wiley-Inter science, New York, 509—567.
- Pan, G. T., Xu, Q., Hou, Z. Q., et al., 2003. Archipelagic orogenesis, metallogenic systems and assessment of the mineral resources along the Nujiang-Lancangjiang-Jinshajiang area in southwestern China. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Qin, G. J., Zhu, S. Q., 1991. Genetic model and prospecting prediction of Jinding lead-zinc ore deposit. *Yunnan Geology*, 10(2): 145—190 (in Chinese with English abstract).
- Shao, J. L., 1988. Prospecting mineralogy of gold deposit. China University of Geosciences Press, Wuhan, 38—45 (in Chinese).
- Shao, Z. G., Meng, X. G., Feng, X. Y., et al., 2002. Analysis on the ore-forming geodynamics of the Baiyangping ore-concentrated field, Yunnan Province. *Acta Geoscientia Sinica*, 23(3): 201—206 (in Chinese with English abstract).
- Shao, Z. G., Meng, X. G., Feng, X. Y., et al., 2003. Tectonic characteristics of the Baiyangping-Huachangshan ore belt, Yunnan Province and its ore-controlling effect. *Journal of Geomechanics*, 9(3): 246—253 (in Chinese with English abstract).
- Shepherd, T. J., Rankin, A. H., Alderton, D. H. M., 1985. A practical guide to fluid inclusion studies. Blackie Chapman and Hall, New York, 1—239.
- Tian, H. L., 1997. The geological features of the Baiyangping polymetallic deposit. *Yunnan Geology*, 16(1): 105—108 (in Chinese).
- Wang, F., 2004. The mineralization geochemical mechanism of Baiyangping silver polymetallic deposit (Dissertation). Chengdu University of Technology, Chengdu (in Chinese with English abstract).
- Wang, F., He, M. Y., 2003. Lead and sulfur isotopic tracing of the ore-forming material from the Baiyangping copper-silver polymetallic deposit in Lanping, Yunnan. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 23(2): 82—85 (in Chinese with English abstract).
- Wang, X. H., Song, Y. C., Hou, Z. Q., et al., 2011a. Characteristics of trace elements and S-Pb isotopes in sphalerites from lead-zinc polymetallic deposit in Fulongchang area, Lanping basin, western Yunnan Province, and their implications. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 30(1): 45—59 (in Chinese with English abstract).
- Wang, X. H., Song, Y. C., Hou, Z. Q., et al., 2011b. Geological characteristics of the Baiyangping Pb-Zn-Cu-Ag polymetallic deposit in northern Lanping basin. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 30(3): 503—514 (in Chinese with English abstract).
- Wang, X. H., Hou, Z. Q., Song, Y. C., et al., 2011c. Baiyangping Pb-Zn-Cu-Ag polymetallic deposit in Lanping basin: metallogenic chronology and regional mineralization. *Acta Petrologica Sinica*, 27(9): 2652—2634 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Y. B., Zeng, P. S., Li, Y. H., et al., 2004. He-Ar isotope composition of Jinding and Baiyangping mineral deposit and its significance. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 24(4): 76—80 (in Chinese with English abstract).
- Xu, Q. D., Li, J. W., 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. *Mineral Deposits*, 22(4): 365—376 (in Chinese with English abstract).

- abstract).
- Xu, Q. D., Zhou, L., 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. *Mineral Deposits*, 23(4): 452—463 (in Chinese with English abstract).
- Xu, S. H., Gu, X. X., Tang, J. X., et al., 2005. Stable isotopic geochemistry of three major types of Cu-Ag polymetallic deposits in the Lanping basin, Yunnan. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 24(4): 309—316 (in Chinese with English abstract).
- Xue, C. J., Chen, Y. C., Wang, D. H., et al., 2003. Geology and isotopic composition of helium, neon, xenon and metallogenic age of the Jinding and Baiyangping ore deposits, Northwest Yunnan, China. *Science in China (Series D)*, 33(4): 315—322 (in Chinese with English abstract).
- Xue, C. J., Chen, Y. C., Yang, J. M., et al., 2002. Ore-forming fluids characteristics in Lanping basin, Yunnan: restricted by O- and C-isotope composition. *Mineral Deposits*, 21: 1064—1067 (in Chinese with English abstract).
- Xue, C. J., Chi, G. X., Chen, Y. C., et al., 2007. Fluid dynamic processes of large-scale mineralization in the Lanping basin, Yunnan, SW-China: evidence from fluid inclusions and basin fluid modeling. *Earth Science Frontiers*, 14(5): 147—157 (in Chinese with English abstract).
- Xue, C. J., Gao, Y. B., Chi, G. X., et al., 2009. Possible former oil-gas reservoir in the Giant Jinding Pb-Zn deposit, Lanping, NW-Yunnan: the role in the ore accumulation. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 31(3): 221—229 (in Chinese with English abstract).
- Xue, W., Xue, C. J., Chi, G. X., et al., 2010. Study on the fluid inclusions of Baiyangping poly-metallic deposit in Lanping basin, northwestern Yunnan, China. *Acta Petrologica Sinica*, 26(6): 1773—1784 (in Chinese with English abstract).
- Yang, W. G., Yu, X. H., Li, W. C., et al., 2003. The characteristics of metallogenic fluids and metallogenic mechanism in Baiyangping silver and polymetallic mineralization concentration area in Yunan Province. *Geoscience*, 17(1): 27—33 (in Chinese with English abstract).
- Ye, Q. T., Hu, Y. Z., Yang, Y. Q., et al., 1992. Regional geochemical background and gold, silver and lead-zinc mineralization in the Nujiang-Lancangjiang-Jinshajiang area. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Zeng, R., 2007. The large-scale fluid ore-forming process in the Lanping basin—taking the Jinding and Baiyangping deposits as the examples, Shaanxi (Dissertation). Chang'an University, Xi'an (in Chinese with English abstract).
- Zhang, E. X., 2005. On the genesis of ore deposits in west metallogenetic zone of Baiyangping Cu-Ag polymetallic ore concentration area, Lanping. *Yunnan Geology*, (24) 3: 282—289 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, H. B., 2006. Study on the characteristics and metallogenic conditions of copper-polymetallic deposits in middle-northern Lanping basin, western Yunnan (Dissertation). China University of Geosciences, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Zheng, Y. F., Chen, J. F., 2000. Stable isotope geochemistry. Science Press, Beijing (in Chinese).
- Zhu, B. Q., 1998. The isotopic system theory and application in earth science—and on the crust-mantle evolution in China. Science Press, Beijing (in Chinese).
- Zhu, D. G., Meng, X. G., Feng, X. Y., et al., 2002. Characteristics of tectonic structures at Baiyangping, Yunnan Province and their control over the mineralogenesis of polymetal deposits in the mining area. *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铜、银多金属矿集区形成机制(博士学位论文). 北京: 中国地质大学.
- 陈开旭, 何龙清, 魏君奇, 等, 2004a. 云南白秧坪矿化集中区矿石矿物特征及银、钼赋存状态的初步研究. *矿物学报*, 24(1): 61—67.
- 陈开旭, 何龙清, 杨振强, 等, 2000. 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. *华南地质与矿产*, 4: 1—8.
- 陈开旭, 姚书振, 何龙清, 等, 2004b. 云南兰坪白秧坪银多金属矿集区成矿流体研究. *地质科技情报*, 23(2): 45—50.
- 陈式房, 刘仪来, 包育秀, 等, 1991. 德钦—下关铅锌矿带矿床类型、成矿规律研究. *云南地质*, 10(2): 119—144.
- 冯彩霞, 毕献武, 胡瑞忠, 等, 2011. 兰坪盆地白秧坪 Cu-Pb-Zn-Ag 多金属矿集区元素共生分异机制及物质来源. *岩石学报*, 27(9): 2609—2624.
- 韩吟文, 马振东, 张宏飞, 等, 2003. 地球化学. 北京: 地质出版社.
- 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. *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. 地质与勘探,40(4):7—12.
- 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. 北京:地质出版社,1—117.
- 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. 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. 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氧同位素组成及其意义. 矿床地质,23(1):1—10.
- 刘家军,翟德高,李志明,等,2010. 兰坪盆地白秧坪银铜多金属矿集中银、钴、铋、镍的赋存状态与成因意义. 岩石学报,26(6):1646—1660.
- 卢焕章,范宏瑞,倪培,等,2004. 流体包裹体. 北京:科学出版社.
- 牟传龙,王剑,余谦,等,1999. 兰坪中新生代沉积盆地演化. 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. 北京:地质出版社.
- 覃功炯,朱上庆,1991. 金顶铅锌矿床成因模式及找矿预测. 云南地质,10(2):145—190.
- 邵洁涟,1988. 金矿找矿矿物学. 武汉:中国地质大学出版社,38—45.
- 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. 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. 地质力学学报,9(3):246—253.
- 田洪亮,1997. 兰坪白秧坪铜银多金属矿床地质特征. 云南地质,16(1):105—108.
- 王峰,2004. 云南白秧坪银多金属矿床形成的地球化学机制(博士学位论文). 四川:成都理工大学.
- 王峰,何明友,2003. 云南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. 沉积与特提斯地质,23(2):82—85.
- 王晓虎,宋玉财,侯增谦,等,2011a. 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. 岩石矿物学杂志,30(1):45—59.
- 王晓虎,宋玉财,侯增谦,等,2011b. 兰坪盆地北部白秧坪铅锌铜银多金属矿床地质特征. 岩石矿物学杂志,30(3):507—518.
- 王晓虎,侯增谦,宋玉财,等,2011c. 兰坪盆地白秧坪铅锌铜银多金属矿床:成矿年代及区域成矿作用. 岩石学报,27(9):2652—2634.
- 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. 矿物岩石,24(4):76—80.
- 徐启东,李建威,2003. 云南兰坪北部铜多金属矿化区成矿流体流动与矿化分带——流体包裹体与稳定同位素依据. 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. 矿床地质,23(4):452—461.
- 徐仕海,顾雪祥,唐菊兴,等,2005. 兰坪盆地三类主要铜银多金属矿床的稳定同位素地球化学. 矿物岩石地球化学通报,24(4):309—316.
- 薛春纪,Chi, G. X., 陈毓川,等,2007. 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. 地学前缘,14(5):147—157.
- 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. 中国科学 D 辑,33(4):315—322.
- 薛春纪,陈毓川,杨建民,等,2002. 云南兰坪盆地成矿流体性质:氧、碳同位素制约. 矿床地质,21(增刊):1064—1067.
- 薛春纪,高永宝,Chi G. X., 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. 地球科学与环境学报,31(3):221—229.
- 薛伟,薛春纪,池国祥,等,2010. 滇西北兰坪盆地白秧坪多金属矿床流体包裹体研究. 岩石学报,26(6):1773—1784.
- 杨伟光,喻学惠,李文昌,等,2003. 云南白秧坪银多金属矿集区成矿流体特征及成矿机制. 现代地质,17(1):27—33.
- 叶庆同,胡云中,杨岳清,等,1992. 三江地区区域地球化学背景和金银铅锌成矿作用. 北京:地质出版社.
- 曾荣,2007. 兰坪盆地流体大规模成矿过程——以金顶和白秧坪矿床为例(博士学位论文). 西安:长安大学.
- 张尔新,2005. 兰坪白秧坪铜银多金属矿集区西矿带矿床成因. 云南地质,3:282—289.
- 赵海滨,2006. 滇西兰坪盆地中北部铜多金属矿床成矿特征及地质条件(博士学位论文). 北京:中国地质大学.
- 郑永飞,陈江峰,2000. 稳定同位素地球化学. 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. 北京:科学出版社.
- 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. 地质地球化学,30(1):28—33.