

滇西镇康放羊山 Cu-Pb-Zn 多金属矿床流体包裹体和 C-O 同位素研究

陈伟¹, 邓明国², 耿齐卫³, 管申进², 孔志岗², 贾祯², 张海⁴

(1. 滇西应用技术大学, 云南 大理 671000; 2. 昆明理工大学 国土资源工程学院, 云南 昆明 650093; 3. 贵州地矿三稀资源科技股份有限公司, 贵州 六盘水 553000; 4. 贵州地矿局一一三地质大队, 贵州 六盘水 553000)

摘要: 滇西镇康放羊山 Cu-Pb-Zn 多金属矿床是保山地块发现的首个富铜的铅锌多金属矿床。为探讨其成矿流体来源和矿床成因, 对该矿床开展了流体包裹体和 C-O 同位素研究。结果表明, 阶段 II 主要发育富液相包裹体, 均一温度和盐度(NaCl_{eq} , 质量分数)集中在 240 ~ 300°C 和 8.0% ~ 18.0%; 阶段 III 以含 CO_2 和子矿物包裹体为特征, 均一温度和盐度的两个峰值为 360 ~ 400°C、16.0% ~ 24.0% 和 240 ~ 320°C、4.0% ~ 14.0%; 阶段 IV 以富液相和纯液相包裹体为主, 均一温度和盐度降低至 220 ~ 340°C 和 8.0% ~ 14.0%。C-O 同位素分析结果($\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$ 值为 -5.88‰ ~ -2.37‰, $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ 值为 8.18‰ ~ 12.79‰)显示成矿流体主要来源于岩浆热液, 在迁移过程中受到围岩溶解作用的影响。综合研究认为, 放羊山矿床阶段 II 和阶段 III 的成矿流体主要来源于大陆碰撞形成的中高温、中高盐度、富 CO_2 岩浆热液, 在阶段 III 晚期和阶段 IV 受到中低温、低盐度大气降水的影响; 矿床为受构造控制明显的中高温热液矿床, 预测在矿区深部有望找到矽卡岩型矿体。

关键词: 放羊山 Cu-Pb-Zn 矿床; C-O 同位素; 流体包裹体; 成矿流体; 矿床成因; 保山地块

中图分类号: P597+.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2020)06-0780-15

Fluid inclusion and C-O isotopic compositions of the Fangyangshan Cu-Pb-Zn polymetallic deposit, Zhenkang County, west Yunnan Province

CHEN Wei¹, DENG Ming-guo², GENG Qi-wei³, GUAN Shen-jin², KONG Zhi-gang²,
JIA Zhen² and ZHANG Hai⁴

(1. West Yunnan University of Applied Sciences, Dali 671000, China; 2. Faculty of Land Resource Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China; 3. Sanxi Resource of Geology and Mineral Resources Technology Co., Ltd., Liupanshui 553000, China; 4. No. 113 Geological Party, Guizhou Bureau of Geology and Mineral Resources, Liupanshui 553000, China)

Abstract: The Fangyangshan Cu-Pb-Zn polymetallic deposit in Zhenkang County of western Yunnan Province is the first copper-rich deposit recently discovered in the south of Baoshan block. Fluid inclusions and C-O isotopes were studied in order to reveal the source of ore-forming fluid and the genesis of the deposit. The study shows that stage II is dominated by liquid-rich inclusions, whose homogenization temperatures range from 240 to 300°C and salinities from 8.0% to 18.0%. Stage III is characterized by CO_2 -rich and daughter minerals-bearing fluid inclusions with homogenization temperatures and salinities both showing two peaks of concentration. Their homogenization temperatures range from 360 to 400°C with salinities from 16.0% to 24.0%, and temperatures from 240 to 320°C

收稿日期: 2020-04-26; 接受日期: 2020-09-21; 编辑: 尹淑苹

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41762009, 41363001); 黔地矿科合(2020)25号

作者简介: 陈伟(1993-), 男, 硕士, 从事矿床地球化学、地质工程研究和学生工作, E-mail: 164205932@qq.com; 通讯作者: 耿齐卫(1989-), 男, 工程师, 从事矿产勘查工作, E-mail: 512855359@qq.com。

with salinities from 4.0% to 14.0% respectively. Stage IV is mainly characterized by liquid-rich and pure-liquid inclusions, whose homogenization temperatures range from 220 to 340°C and salinities range from 8.0% to 14.0%. The values of $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$ and $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ in different stages are plotted in the range of -5.88‰ to -2.37‰ and 8.18‰ to 12.79‰ respectively, indicating that ore-forming fluid of the Fangyangshan deposit was sourced from magmatic hydrothermal solution, with its migration process influenced by the dissolution of wall rocks. According to the above studies, the authors hold that the ore-forming fluid in stage II and stage III of the Fangyangshan deposit mainly came from the medium-high temperature and salinity and CO_2 -rich magmatic hydrothermal solution formed by continental collision, and the ore-forming fluid was influenced by medium-low temperature and low salinity meteoric water in late stage III and stage IV. The authors hold that the Fangyangshan Cu-Pb-Zn polymetallic deposit is a middle-high temperature hypothermal deposit which is controlled by the structure. It is also inferred that skarn type orebodies might be found in the deep part of the mining area.

Key words: Fangyangshan Cu-Pb-Zn poly-metallic deposit; C-O isotope; fluid inclusion; ore-forming fluid sources; genesis; Baoshan block

Fund support: National Natural Science Foundation of China (41762009, 41363001); Combination of Geology and Mineral Resources in Guizhou (2020) 25

“三江”特提斯成矿域中南段的保山地块(图 1a)是我国西南地区重要的 Pb-Zn-Fe-Cu-Ag-Hg-Sn-Sb 矿集区(Hou *et al.*, 2007; 李文昌等, 2010; Deng *et al.*, 2014; Wang *et al.*, 2016), 经过多年的找矿勘查评价工作, 已发现了 1 个超大型矿床(芦子园 Pb-Zn 多金属矿床)、4 个大型矿床(核桃坪、金厂河、西邑和勐兴矿床)和 10 余个中型矿床(如黑岩凹、东山、摆田和水头山矿床等), 并伴生有丰富的 Au、W、Cd、Ga、Ge、Tl、Bi 等金属元素(薛传东等, 2008; 陈福川, 2018), 显示出良好的成矿和找矿前景, 成为寻找铅锌铁铜矿产和矿床学研究的热点区域(陶琰等, 2010; 邓明国等, 2018; 陈俞宏等, 2020)。位于保山地块南部镇康矿集区的放羊山矿床是保山地块内新突破的首个富铜的铅锌多金属矿床, 矿体 Cu 平均品位达 1.70%, 从浅表到深部呈现出 Pb-Zn→Cu 的金属元素分带特征, 铜矿体规模及品位有增大变富趋势, 且距芦子园超大型铅锌铁铜多金属矿床仅约 6 km(图 1b、图 2a), 预示矿区深部具有良好的铜成矿和找矿潜力, 但有关该矿床的成矿流体来源和矿床成因等方面的研究尚属空白, 也进一步制约了矿区的找矿勘查和评价工作。

前人研究认为, 保山地块内成矿作用主要形成了与白垩纪岩浆作用有关的以芦子园、金厂河和核桃坪为代表的中高温矽卡岩型(陶琰等, 2010; 杨玉龙等, 2012; 黄华, 2014; 邓明国等, 2018; Xu *et al.*, 2019)和以勐兴、西邑和东山为代表(聂飞等, 2015; Chen *et al.*, 2016)的中低温热液型铅锌矿床。

然而放羊山矿床在地质特征上有别于上述两种 Pb-Zn 矿化类型, 其产出部位、赋矿地层及中高温矿物共生组合(闪锌矿、方铅矿、黄铜矿、磁黄铁矿和毒砂)和与岩浆热液有关的芦子园等矽卡岩型铅锌铁铜矿床相似, 但围岩蚀变未见明显矽卡岩化, 其成矿流体来源以及形成机制是否与地块内的两种典型铅锌多金属矿床相一致? 这是目前需要首先回答的科学问题。本文在矿床地质特征研究的基础上, 通过对放羊山矿床中 C-O 同位素和流体包裹体研究, 结合区内典型矿床研究成果, 试图阐明该矿床的成矿流体来源, 初步探讨其矿床成因, 以期对区内此类富铜铅锌矿床的找矿突破和成矿规律认识提供参考资料。

1 成矿地质背景

放羊山矿床所属的保山地块位于“三江”特提斯构造域中南段(图 1a), 经历了从泛大陆解体、原特提斯洋的形成到印-欧大陆碰撞造山长期而复杂的演化过程(李文昌等, 2010; 邓军等, 2010), 形成了多期不同性质构造作用叠加的格局, 造就了有利的成矿地质环境(Wang *et al.*, 2016)。区域构造主要发育以近南北向为主的怒江断裂、澜沧江断裂、柯街断裂和北东向的南汀河断裂, 次为保山-施甸复背斜和永德-镇康复背斜, 二者联合控制保山地块地层、岩浆岩和矿产的分布及侵位(图 1b)。

区域地层由变质基底和沉积盖层构成。基底为

震旦系-中寒武统公养河群,底部以岩屑砂岩和杂砂岩变质形成的砂板岩为主,顶部过渡为云母质砂岩和页岩组成复理石韵律的沉积旋回(杨学俊等, 2012)。沉积盖层从古生代到第四系均有出露,岩性

主要为半深海-滨海相沉积的泥砂岩质和碳酸盐岩建造。其中以碳酸盐岩和钙质板岩为主的上寒武统核桃坪组、沙河厂组和保山组是保山地块铅锌矿床的重要产出层位(李文昌等, 2010; 陶琰等, 2010)。

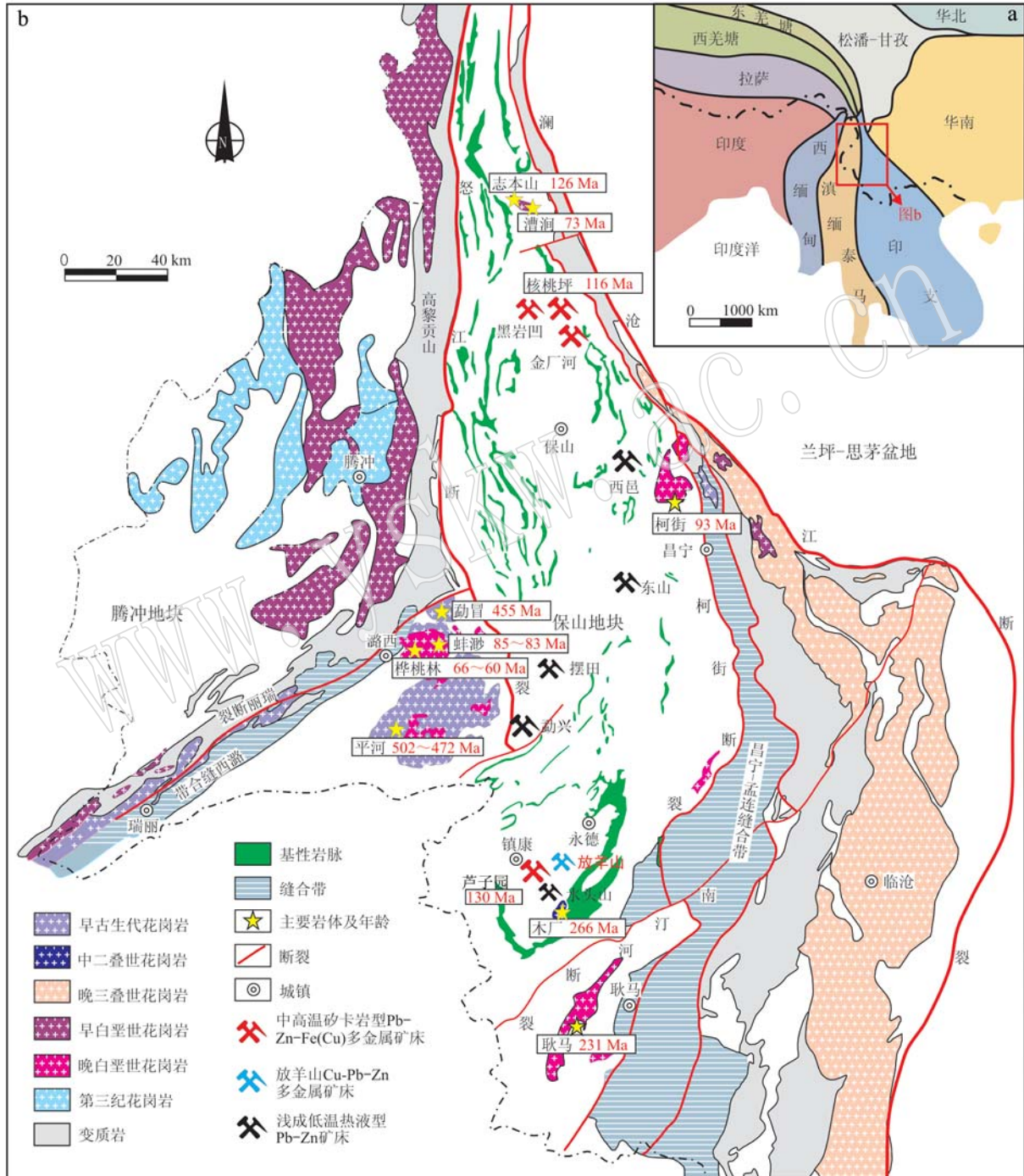


图1 保山地块大地构造位置(a, 据 Deng *et al.*, 2014; Deng and Wang, 2016)和主要构造、岩浆岩及矿床分布图 (b, 据董美玲等, 2013; 禹丽等, 2014; Li *et al.*, 2015 修改)

Fig. 1 Tectonic location of the Baoshan block (a, after Deng *et al.*, 2014; Deng and Wang, 2016) and distribution of major structures, magmatic rocks and deposits of the Baoshan block (b, modified after Dong Meiling *et al.*, 2013; Yu Li *et al.*, 2014; Li *et al.*, 2015)

地块岩浆岩活动频繁，以分布广泛的辉绿岩和高钾过铝质的花岗岩为特征(图 1b)，其中在早白垩世位的高钾钙碱过铝质 S 型花岗岩被认为与芦子园、核桃坪和金厂河等矽卡岩型铅锌铁铜多金属矿床的成矿作用有密切的成因联系(陶琰等, 2010; 邓明国等, 2018)。

2 矿床地质特征及成矿阶段划分

放羊山矿床位于芦子园次级背斜和 NE 向断裂的交汇部位(图 2a)。矿区地层由老到新出露有上寒武统沙河厂组一、二、三段和保山组一段，倾向 NW，倾角 36°~58°。其中，上寒武统沙河厂组为放

羊山矿床的重要赋矿层位(图 2b)，岩性为钙质板岩、泥质粉砂岩、大理岩及石英粉砂岩。矿区断裂构造发育，NE 向断裂组是主要的控矿和容矿构造(图 2b)，以 F_1 高角度逆断裂为主，倾向 NW，倾角 65°~70°，并产生一系列次级断裂(F_6 、 F_7)和张裂隙，褐铁矿化明显。NW 向的 F_5 断裂为一左倾平移断层，倾向 SW，倾角 40°~50°，为成矿后期破矿构造。矿区岩浆岩不发育，仅出露沿 NE 向断裂展布的辉绿岩脉。Liang 等(2015)通过航磁、重力及地质资料综合研究认为芦子园矿集区深部存在隐伏酸性岩体，可能为芦子园、水头山等矿床的形成提供成矿物质、流体来源及热源驱动(邓明国等, 2018)。

矿体产出受构造控制作用显著，呈不规则脉状、

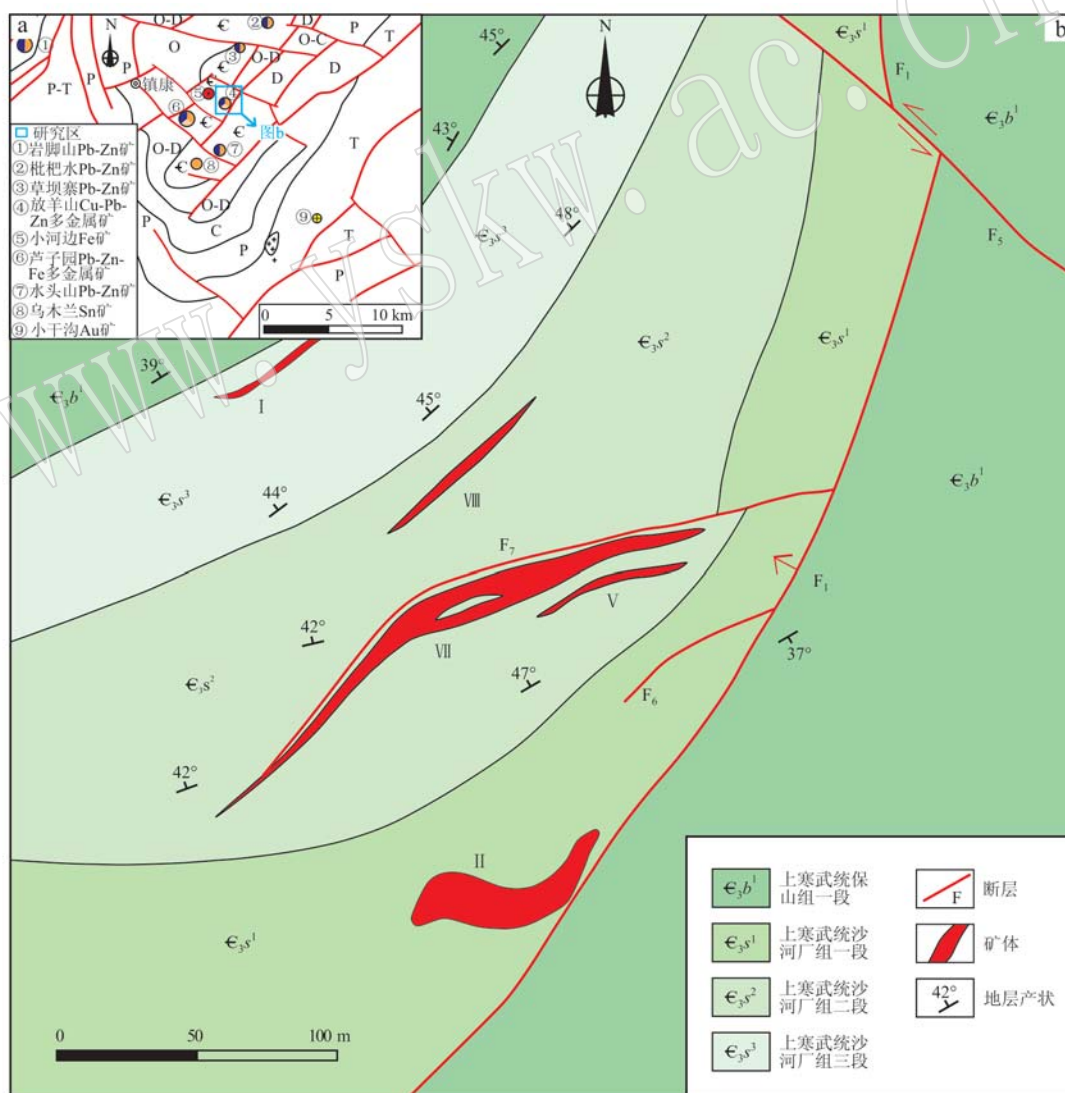


图 2 放羊山矿床地质图(据熊磊等, 2018; 邓明国等, 2018)

Fig. 2 Geological map of the Fangyangshan deposit (after Xiong Lei et al., 2018; Deng Mingguo et al., 2018)

透镜状及似层状产于上寒武统沙河厂组 F_1 、 F_6 和 F_7 断层破碎带和次级裂隙中(图 2b),具多层成群分布、膨胀收缩和分枝复合的特点。据现有资料共圈定铜铅锌矿体 11 条,按其空间展布、规模及赋存层位可划分为 I、II、V、VII 和 VIII 号矿带(图 2b),矿带总体走向与 F_1 主控断裂一致,倾向 NW。其中规模最大、品位最富的 VII 号矿带为本文重点研究对象,呈不规则脉状产于上寒武统沙河厂组二段的 F_7 断层破碎带内,顶板为上寒武统沙河厂组一段灰-灰绿色钙质板岩,底板以灰岩、大理岩化灰岩及大理岩为主。矿体形态和产状与断裂破碎带基本一致,走向延伸控制矿体长度达 260 m,倾向 NW,延伸 > 280 m,倾角为 $23^\circ \sim 57^\circ$,矿体厚 0.74 ~ 9.79 m,平均 3.32 m。矿石品位 Cu 1.03% ~ 3.50%, Pb 1.03% ~ 7.34%, 平均 1.16%; Zn 0.40% ~ 9.80%, 平均 2.99%, 在构造破碎带较宽、裂隙发育和构造叠加部位明显富集。

矿石矿物组合多样(图 3),中上部主要为棕褐色闪锌矿和黄铁矿,深部以黄铜矿、闪锌矿和方铅矿为主,伴生少量磁黄铁矿。脉石矿物主要为方解石、白云石、石英和萤石(图 3),少量绿泥石和绢云母。矿石结构早期主要为半自形-自形粒状结构和压碎结构,晚期以它形粒状、骸晶结构和交代溶蚀-残余结构为特征;矿石普遍发育脉状-网脉状和浸染状构造,偶见块状(图 3f)和角砾-碎斑状构造。

矿区围岩蚀变作用明显,主要有硅化、碳酸盐化、绿泥石化、萤石化和大理岩化(图 3)。其中,淡黄色-红棕色铁白云石化和绿泥石化分别是寻找黄铜矿和闪锌矿的典型蚀变特征,硅化和碳酸盐化是分布最广、贯穿成矿全过程的两种重要蚀变类型。

根据野外地质调查,结合镜下矿物共生组合及其穿插交代,将矿床成矿作用划为 4 个阶段:阶段 I (黄铁矿-毒砂-白云石-方解石-石英阶段)、阶段 II (闪锌矿-绿泥石-石英-方解石阶段)、阶段 III (黄铜矿-磁黄铁矿-白云石-萤石阶段)、阶段 IV (方铅矿-闪锌矿-方解石-石英阶段),其矿物生成顺序见表 1。

阶段 I 主要形成黄铁矿-毒砂-白云石-方解石-石英共生组合(图 3a)。黄铁矿以半自形-自形粗粒结构和压碎结构为主,方解石和白云石波状消光和双晶纹弯曲等应变特征发育,被闪锌矿、黄铜矿和方铅矿等充填交代形成残余-溶蚀结构和骸晶结构

(图 3j),矿石主要为脉状、斑杂状和浸染状构造(图 3a)。

阶段 II 是闪锌矿的主要形成阶段,矿物共生组合主要有闪锌矿、绿泥石、石英和方解石,少量黄铁矿和黄铜矿。该阶段闪锌矿主要呈棕褐-黑色,沿阶段 I 的矿物裂隙和粒间呈脉状-网脉状产出,普遍被黄铜矿、磁黄铁矿和方铅矿交代充填(图 3a、3j、3k、3l),形成浸染状、脉状和块状构造(图 3f)。

阶段 III 是黄铜矿的主要形成阶段,以开始出现大规模的黄铜矿、少量磁黄铁矿、闪锌矿和方铅矿为特征,在构造-流体作用下沿阶段 I、阶段 II 的黄铁矿和闪锌矿边缘及裂隙充填和交代,形成脉状-网脉状构造和交代残余结构(图 3c、3d、3k、3l)。

阶段 IV 是方铅矿的主要矿化阶段,次为红棕色粗粒闪锌矿和少量黄铁矿细脉,常呈团块状、脉状分布于晚期石英方解石脉中,局部切穿早期锌铜矿体,普遍穿插交代早阶段黄铁矿、闪锌矿和黄铜矿(图 3l、3n、3o)等金属矿物,反映出成矿晚期的热液组构特征。

3 样品采集和分析方法

本次测试分析样品取自 VII 号矿带的 1762 和 1910 中段。C-O 同位素测试分析在北京科荟测试技术有限公司完成,样品特征见表 2。测试分析采用连续流动质谱 100% 磷酸法,将制备好的方解石和白云石粉末与 100% 的正磷酸在真空系统中充分反应 24 h,收集纯净的 CO_2 在 MAT-251 质谱仪上进行 C、O 同位素测定,分析精度为 $\pm 0.2\text{‰}$ (2σ),测试结果以 PDB 和 SMOW 为标准。

流体包裹体研究选取不同阶段棕-浅黄色闪锌矿和与矿共生的石英、方解石和萤石磨制包裹体片进行岩相学观察。重点对阶段 II、阶段 III 和阶段 IV 的代表性包裹体开展显微热力学研究。流体包裹体显微热力学实验测试仪器为 Linkam THMSG600 型冷热台,测温范围为 $-196 \sim 600^\circ\text{C}$,在 $-196 \sim 25^\circ\text{C}$ 和均一温度时的精度分别为 $\pm 0.2^\circ\text{C}$ 和 $\pm 2^\circ\text{C}$ 。显微测温时,先将代表性流体包裹体冷冻降温至 $-110 \sim -90^\circ\text{C}$ 后,以 $0 \sim 15^\circ\text{C}/\text{min}$ 的速率逐渐升温,均一温度附近控制在 $1^\circ\text{C}/\text{min}$,其他相变附近为 $0.2^\circ\text{C}/\text{min}$ 。根据包裹体冰点、 CO_2 笼合物熔化温度和子矿物消失温度计算得相应包裹体盐度(Roedder, 1984)。

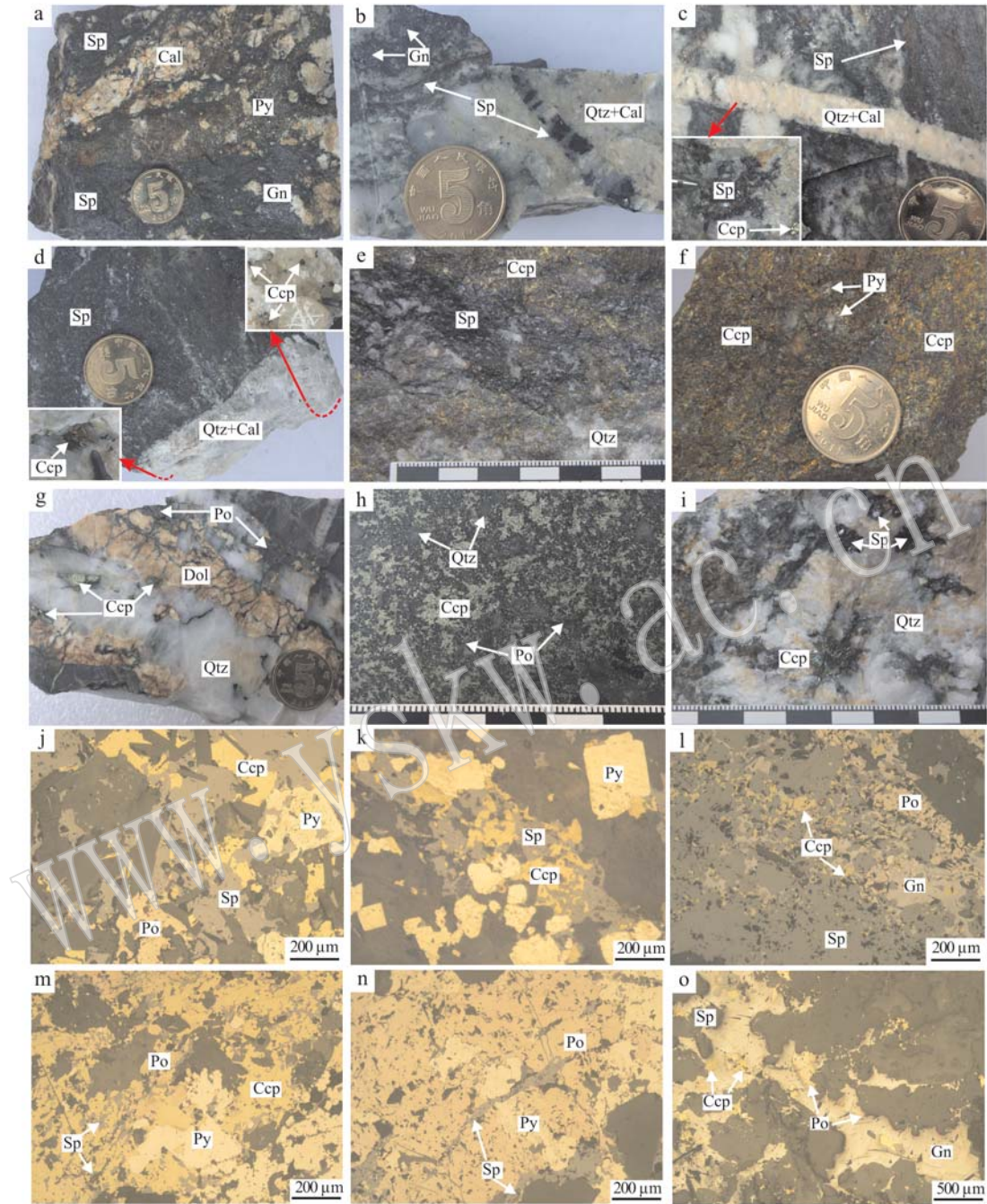


图 3 放羊山矿床矿石矿物组合特征

Fig. 3 Ore mineral assemblages and occurrences of the Fangyangshan deposit

a—脉状-网脉状构造；b—两个世代的闪锌矿；c~d—阶段 II 闪锌矿被阶段 III 含闪锌矿、黄铜矿-石英-方解石脉切穿；e—闪锌矿被黄铜矿穿插交代；f—块状黄铜矿石；g—含黄铜矿白云石石英脉；h—浸染状构造；i—阶段 III 粗粒闪锌矿；j—阶段 II 闪锌矿交代阶段 I 黄铁矿，又被阶段 III 黄铜矿和磁黄铁矿穿插交代（反射光）；k—阶段 III 黄铜矿穿插交代阶段 I 黄铁矿和阶段 II 闪锌矿（反射光）；l—阶段 IV 方铅矿和阶段 III 黄铜矿、磁黄铁矿交代阶段 II 闪锌矿（反射光）；m—阶段 III 黄铜矿、磁黄铁矿穿插交代阶段 I 黄铁矿（反射光）；n—阶段 IV 闪锌矿穿插交代阶段 III 磁黄铁矿和阶段 II 黄铁矿（反射光）；o—阶段 III 黄铜矿、磁黄铁矿和闪锌矿被阶段 IV 方铅矿穿插交代（反射光）；Py—黄铁矿；Sp—闪锌矿；Ccp—黄铜矿；Gn—方铅矿；Po—磁黄铁矿；Cal—方解石；Qtz—石英；Dol—白云石（矿物缩写符号据沈其韩，2009）

a—veined-mesh veined structure；b—sphalerite of two different stages；c~d—sphalerite of stage II，cut by calcite and quartz veins（sphalerite and galena-bearing）；e—sphalerite cut and replaced by chalcopyrite；f—massive chalcopyrite ore；g—chalcopyrite-bearing dolomite and quartz veins；h—disseminated structure；i—coarse grain of sphalerite of stage III；j—sphalerite of stage II，replacing pyrite of stage I，crosscut and replaced by chalcopyrite and pyrrhotine of stage III（reflected light）；k—chalcopyrite of stage III crosscutting and replacing pyrite of stage I and sphalerite of stage II（reflected light）；l—sphalerite of stage II，replaced by galena of stage IV and chalcopyrite and pyrrhotine of stage III（reflected light）；m—pyrite of stage I，crosscut and replaced by chalcopyrite and pyrrhotine of stage III（reflected light）；n—sphalerite of stage IV crosscutting pyrrhotine of stage III and pyrite of stage II（reflected light）；o—chalcopyrite, pyrrhotine and sphalerite of stage III，crosscut and replaced by galena of stage IV（reflected light）；Py—pyrite；Sp—sphalerite；Ccp—chalcopyrite；Gn—galena；Po—pyrrhotine；Cal—calcite；Qtz—quartz；Dol—dolomite（mineral abbreviation after Shen Qihan, 2009）

表1 放羊山矿床矿物生成顺序表

Table 1 Mineral paragenesis of the Fangyangshan deposit

| 阶段 矿物 | 阶段 I | 阶段 II | 阶段 III | 阶段 IV |
|----------|------|-------|--------|-------|
| 白云石 | ● | ● | ● | ● |
| 方解石 | ● | ● | ● | ● |
| 石英 | ● | ● | ● | ● |
| 黄铁矿 | ● | ● | | ● |
| 毒砂 | ● | | | |
| 闪锌矿 | | ● | ● | ● |
| 绿泥石 | | ● | | |
| 绢云母 | | ● | | |
| 黄铜矿 | | ● | ● | |
| 磁黄铁矿 | | ● | ● | |
| 萤石 | | ● | ● | ● |
| 方铅矿 | | | ● | ● |

表2 放羊山矿床 C-O 同位素组成

‰

Table 2 C-O isotopic compositions from the Fangyangshan deposit

| 样品 编号 | 测试 对象 | 采样 位置 | 样品特征 | 成矿阶段 | $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$ | $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-PDB}}$ | $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ |
|----------|----------|----------|---------------------------------|--------|--------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|
| FYS-8 | 方解石 | 1762 中段 | 方解石呈团块状与早期闪锌矿共生, 解理裂隙被磁黄铁矿细脉充填 | | -3.57 | -21.28 | 8.92 |
| FYS-12 | 方解石 | 1762 中段 | 构造破碎带中的团块状方解石, 裂隙被黄铜矿、磁黄铁矿细脉充填 | 阶段 II | -3.58 | -22.00 | 8.18 |
| FYS-18 | 方解石 | 1910 中段 | 方解石脉被黄铜矿、磁黄铁矿细脉切穿 | | -3.67 | -21.69 | 8.50 |
| FYS-7 | 方解石 | 1910 中段 | 褐色粗粒闪锌矿被含黄铜矿-石英-方解石脉切穿 | | -5.31 | -19.47 | 10.79 |
| FYS-13 | 白云石 | 1762 中段 | 含半自形-自形粗粒方铅矿-白云石-萤石脉 | 阶段 III | -5.88 | -22.00 | 8.18 |
| FYS-20 | 白云石 | 1762 中段 | 含脉状闪锌矿、黄铜矿和磁黄铁矿白云石-石英脉切穿砂板岩 | | -5.26 | -21.28 | 8.92 |
| FYS-4 | 方解石 | 1762 中段 | 团块状方解石与棕色粗粒闪锌矿共生 | | -2.79 | -18.86 | 11.42 |
| FYS-5 | 方解石 | 1910 中段 | 脉状闪锌矿和黄铜矿-方解石-石英脉, 方解石破碎、变形特征显著 | 阶段 IV | -2.37 | -19.00 | 11.28 |
| FYS-7-1 | 方解石 | 1910 中段 | 晶洞方解石与四面体黄铜矿共生 | | -3.75 | -17.53 | 12.79 |
| FYS-17 | 方解石 | 1910 中段 | 方解石呈团块状与方铅矿、棕色闪锌矿紧密共生 | | -2.63 | -20.26 | 9.97 |

4.2 流体包裹体岩相学特征

放羊山矿床原生流体包裹体发育, 类型和组合方式多样, 主要赋存于石英和萤石中, 次为方解石和浅黄色闪锌矿。根据室温条件(25℃)包裹体的分离相态和冷冻加热过程的相变, 将放羊山矿床的流体包裹体划分为6种类型: 富液相包裹体(R-L型)、富气相包裹体(R-V型)、含/富CO₂三相包裹体(C型)、纯液相包裹体(P-L型)、纯气相包裹体(P-V型)和含子矿物多相包裹体(S型)。

R-L型在各个阶段均有发育, 约占包裹体总量的45%, 多呈米粒状、管状和不规则状自由产出, 少量沿解理面定向分布, 个体3~100 μm, 集中在10~30 μm, 气相比例10%~35%。

R-V型在阶段II和阶段III均有发育, 呈椭圆形、米粒状和不规则状随机分布, 部分与R-L型、P-V型

4 分析结果

4.1 C-O 同位素组成特征

放羊山矿床不同阶段白云石和方解石碳氧同位素测试结果如表2所示。阶段II的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$ 值为-3.67‰~-3.57‰, 平均-3.61‰, $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ 为8.18‰~8.92‰, 平均8.53‰; 阶段III具相对低的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$ 值, 为-5.88‰~-5.26‰, 平均-5.48‰, $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ 为8.18‰~10.79‰, 平均9.30‰; 阶段IV的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$ 值略高, 为-3.75‰~-2.37‰, 平均-2.89‰, $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ 为9.97‰~12.79‰, 均值11.37‰。上述结果显示不同成矿阶段的碳同位素组成存在一定差异, 而同一阶段碳同位素值相对稳定, 晚阶段相对富集 $\delta^{13}\text{C}$, 氧同位素组成变化不明显。

和C型包裹体共存(图4e、4h), 粒径介于3~30 μm之间, 气相比例为55%~95%, 约占包裹体总量的20%。

C型呈雨滴状、米粒状和不规则状发育于阶段III, 大小集中在10~50 μm, 最大可达80 μm。包裹体内的CO₂成分占总体积的比例变化较大(图4f、4h、4i), 气相CO₂约占5%~60%, 两相合计约30%~95%, 约占包裹体总量的7%。

S型呈不规则状和四方体发育于阶段II和阶段III, 大小为8~28 μm, 气相比例5%~35%, 约占包裹体总量的3%。所含子矿物种类有透明和不透明子晶两大类。透明子矿物一是呈无色或草绿色立方体产出, 初熔温度-21.5℃左右, 为NaCl晶体(图4g); 二是呈浑圆状产出的KCl子晶(图4l); 三是呈椭圆形的不明子矿物(图4l), 在加热至500℃过程

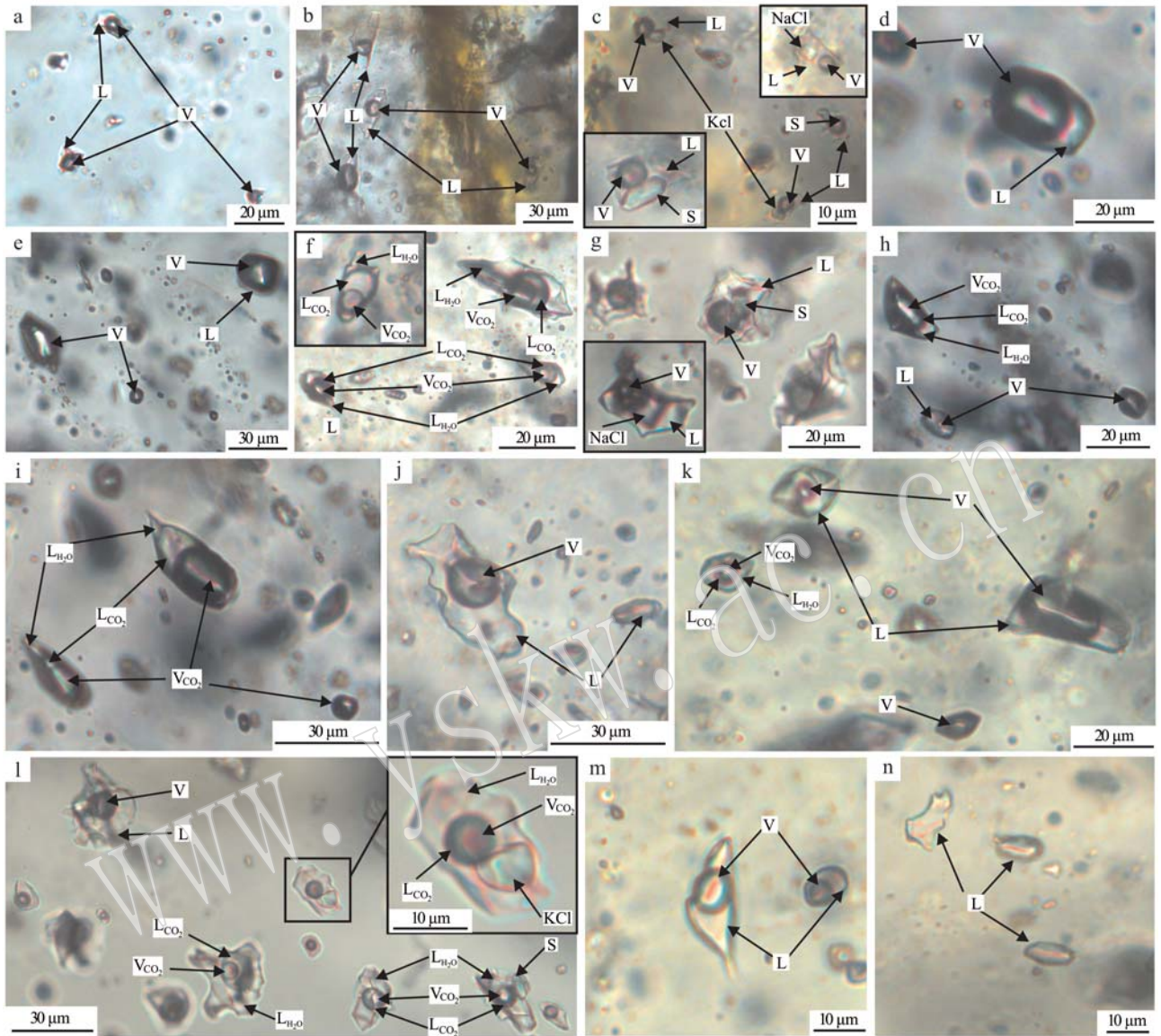


图 4 放羊山矿床流体包裹体显微照片

Fig. 4 Photomicrographs of fluid inclusions in the Fangyangshan deposit

a—阶段 II 石英中的 R-V 型包裹体；b ~ c—阶段 II 石英和闪锌矿中的 R-V 型、R-L 型和 S 型包裹体；d—阶段 III 石英中 R-V 型包裹体；e—阶段 III 石英中 R-V 型和 P-V 型包裹体；f—阶段 III 石英中 C 型包裹体；g—阶段 III 石英中 S 型包裹体；h—阶段 III 的 R-L 型、P-V 型和 C 型包裹体共生于石英中；i—阶段 III 的 C 型和 P-V 型包裹体在石英中共存；j—阶段 III 的 R-L 型与 P-L 型包裹体共存于石英中；k—阶段 III 石英中 R-V 型、R-L 型、P-V 型和 C 型的包裹体组合；l—阶段 III 萤石中 C 型、R-L 型和 S 型包裹体共存；m ~ n—阶段 IV 的 R-L 型和 P-L 型包裹体赋存于石英中；V—气相；L—液相；S—待测定子矿物

a—R-V type inclusions in stage II quartz；b ~ c—R-V type, R-L type and S type inclusions in stage II quartz and sphalerite；d—R-V type inclusion of quartz in stage III；e—R-V type and P-V type inclusions in stage III quartz；f—C type inclusion in stage III quartz；g—S type inclusion in stage III quartz；h—the coexistence of R-L type, P-V type and C type inclusions in stage III quartz；i—the coexistence of C type and P-V type inclusions in stage III quartz；j—the coexistence of R-L type and P-L type inclusions in stage III quartz；k—the coexistence of R-V type, R-L type, P-V type and C type inclusions in stage III quartz；l—the coexistence of C type, R-L type and S type inclusions in stage III fluorite；m ~ n—R-L type and P-L type inclusions in stage IV quartz；V—vapor phase；L—liquid phase；S—the crystal to be determined

未见子晶溶解现象。不透明子矿物呈黑色四方体产出(图 4g)，在加热至 550℃ 过程未见溶解现象，可能为硫化物晶体。此外，可见个别同时含钾盐子晶和 CO₂ 的流体包裹体(图 4l)。

P-V 型仅在阶段 IV 中观察到，呈米粒状、圆形和椭圆形自由分布，大小为 3 ~ 50 μm，约占包裹体总量的 15%。气相多呈深黑色，冷却降温过程中大部分包裹体分离出两相，为纯 CO₂ 包裹体，部分冷却过

程未见相变,可能含 CH_4 等挥发性气体。

P-L 型比较少见,主要发育于阶段Ⅳ中,呈米粒状和不规则状自由分布,粒径约 $5 \sim 40 \mu\text{m}$,约占包裹体总量的 10%。

4.3 显微热力学特征

在实验显微测温过程中,多数包裹体完全均一至液相(图5),少数包裹体均一至气相,S型包裹体中气泡或子矿物先消失的现象均有出现。本次实验最终获得 291 个有效数据(表3、图6)。

阶段Ⅱ流体包裹体均一温度和盐度(NaCl_{eq} ,质量分数,下同)最高达 357°C 和 43.1%,多集中在 $240 \sim 300^\circ\text{C}$ 和 8.0% ~ 18.0% (图6)。其中,浅黄色闪锌矿内的包裹体均一温度为 $270 \sim 304^\circ\text{C}$,盐度介于 6.6% ~ 12.7% 之间。

阶段Ⅲ的流体包裹体均一温度和盐度最高达 451°C 和 51.6%,整体分布呈现出两个峰值(图6),分别为 $240 \sim 320^\circ\text{C}$ 、4.0% ~ 14.0% 和 $360 \sim 400^\circ\text{C}$ 、16.0% ~ 24.0%。

阶段Ⅳ的包裹体均一温度及盐度较阶段Ⅲ呈现下降趋势,均一温度为 $213 \sim 343^\circ\text{C}$,盐度为 7.6% ~ 14.5%,总体集中在 $220 \sim 340^\circ\text{C}$ 和 8.0% ~ 14.0% 之间(图6)。

5 讨论

5.1 成矿流体来源

放羊山矿床不同阶段碳酸盐矿物的 C、O 同位素组成比较稳定,总体亏损 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$ 值为 $-5.88\text{‰} \sim -2.37\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ 值为 $8.18\text{‰} \sim 12.79\text{‰}$,在 $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}} - \delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$ 图解中,投点总体落入花岗岩来源区域(图7),表明放羊山矿床原始成矿流体中碳的来源主要与深部岩浆热液有关。阶段Ⅲ投点除向海相碳酸盐岩溶解作用区域漂移外,部分点呈线性沿沉积混染或高温效应作用方向分布(图7)。刘家军等(2004)研究认为,如果样品的 C、O 同位素组成呈线性沿沉积混染或高温效应作用方向分布时,其 C、O 同位素组成的变化主要受到沉积岩混染作用或高温分异作用所致,表现为对流体 $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ 值的影响相对较小,而对 $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$ 值的影响显著;而当投点介于花岗岩和海相碳酸盐岩区间呈水平直线分布时,成矿流体中的 CO_2 主要是受到了海相碳酸盐岩溶解作用的加入,使得碳同位素与原始流体来源较为接近,氧同位素发生明显变化(刘

建明等,1997;周家喜等,2012)。据此推断,放羊山矿床晚阶段投点向两个方向漂移,是由于原始流体在运移成矿过程中,深部岩浆热液与具有较高 $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$ 和 $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ 的围岩发生水-岩反应,受到围岩碳酸盐岩溶解作用和沉积混染或高温效应的影响。

进一步将放羊山矿床的 C、O 同位素组成与保山地块上典型铅锌矿床的 C、O 同位素进行对比(图7),发现其碳氧同位素组成更接近毗邻的芦子园和南部金厂河矽卡岩型铅锌矿床。 $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$ 值比芦子园矿床亏损而略高于金厂河矿床, $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ 值低于芦子园矿床,与金厂河矿床十分相近,在 $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}} - \delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$ 图解中,投点主要介于上述两个矿床之间。黄华(2014)和徐荣(2016)分别对金厂河和芦子园矿床的研究认为,成矿流体中的 CO_2 主要来源于岩浆,在晚阶段与围岩发生交代反应产生碳的混入。放羊山矿床原始成矿流体的 C 来源与金厂河矿床一致,演化趋势更接近于芦子园矿床,晚期向以碳酸盐岩溶解作用为主的西邑矿床靠近,佐证了放羊山矿床成矿流体主要来源于深部岩浆热液,其迁移过程可能受到围岩溶解作用的影响。

流体包裹体岩相学和显微热力学特征表明,放羊山矿床包裹体类型丰富,多种类型包裹体共存,显示出成矿流体比较复杂。阶段Ⅱ主要发育富液相和富气相包裹体,少量含石盐和钾盐子矿物包裹体,均一温度集中在 $240 \sim 300^\circ\text{C}$ 之间,盐度为 8.0% ~ 18.0%,为 $\text{H}_2\text{O-KCl-NaCl}$ 体系。阶段Ⅲ以含 CO_2 包裹体和少量含子矿物包裹体为主要特征,均一温度和盐度最高达 451°C 和 51.6%,总体分布的两个峰值分别为 $240 \sim 320^\circ\text{C}$ 、4.0% ~ 14.0% 和 $360 \sim 400^\circ\text{C}$ 、16.0% ~ 24.0%。其均一温度接近区内核桃坪矿床的早矽卡岩阶段(Chen *et al.*, 2016),但高于陆陆碰撞机制下形成岩浆来源的芦子园矿床(邓明国等,2018),而盐度均高于同一构造背景的芦子园、金厂河、核桃坪矽卡岩型矿床和西邑等低温热液型矿床,与大陆碰撞体制下形成的高盐度、高氧化性、富 CO_2 和富水的浆控高温热液特征相一致(Chen *et al.*, 2007; 陈衍景等,2009),可能为大陆碰撞体制下形成的 $\text{H}_2\text{O-CO}_2\text{-KCl-NaCl}$ 体系。同时,在该阶段同一包裹体片内小范围视域下可观察到 R-L 型、C 型和 S-NaCl 型包裹体共存组合(图4h、4k、4l),在均一温度测定时 R-L 型和 S-NaCl 型包裹体均一至液相,充填度较小的 C 型包裹体则均一至气相,

表3 放羊山矿床流体包裹体显微测温数据表
Table 3 The microthermometric data of fluid inclusion from the Fangyangshan deposit

| 成矿阶段 | 样号 | 主矿物 | 包裹体类型 | 数量 | 大小/ μm | 气体比例/% | 冰点/ $^{\circ}\text{C}$ | 笼合物熔化 温度/ $^{\circ}\text{C}$ | CO_2 部分均一 温度/ $^{\circ}\text{C}$ | 子矿物熔化 温度/ $^{\circ}\text{C}$ | 均一温度/ $^{\circ}\text{C}$ | 盐度/% |
|----------|----------|-----|--------|------|-------------------|-----------|------------------------|---------------------------------|--|---------------------------------|--------------------------|-----------|
| 阶段 II | FYS-10-4 | 石英 | R-L | 20 | 8~23 | 20~35 | -10.1~-4.1 | - | - | - | 249~311 | 6.6~14.0 |
| | FYS-10-4 | 闪锌矿 | R-L | 6 | 5~22 | 25~40 | -8.9~-4.1 | - | - | - | 271~304 | 6.6~12.7 |
| | FYS-10-4 | 闪锌矿 | R-V | 3 | 7~10 | 55~60 | -6.2~-4.6 | - | - | - | 270~293 | 7.3~9.5 |
| | FYS-10-1 | 石英 | R-L | 15 | 7~25 | 25~40 | -13.2~-5.7 | - | - | - | 207~324 | 8.8~17.1 |
| | FYS-10-1 | 石英 | R-V | 2 | 11,18 | 60,80 | -9.7,-6.7 | - | - | - | 276,295 | 10.1,13.6 |
| | FYS-2 | 石英 | R-L | 15 | 5~13 | 30~40 | -6.8~-4.5 | - | - | - | 243~295 | 7.6~10.2 |
| | FYS-10-3 | 石英 | R-L | 27 | 5~27 | 20~35 | -14.8~-9.5 | - | - | - | 280~283 | 13.4~18.5 |
| | FYS-10-3 | 石英 | S-NaCl | 2 | 17,24 | 20,30 | - | - | 310.7,357.0 | - | 311,357 | 39.0,43.1 |
| | FYS-31 | 石英 | R-L | 18 | 5~20 | 20~40 | -3.4~-20.7 | - | - | - | 249~410 | 5.6~22.9 |
| | FYS-3 | 石英 | R-L | 8 | 10~21 | 25~35 | -5.7~-3.7 | - | - | - | 286~339 | 6.0~8.8 |
| 阶段 III | FYS-3 | 石英 | C | 8 | 15~30 | 10~85 | - | 6.2~7.4 | 23.1~26.5 | - | 272~362 | 5.0~7.1 |
| | FYS-20-2 | 石英 | R-L | 5 | 9~23 | 15~30 | -6.3~-5.7 | - | - | - | 238~246 | 8.8~9.6 |
| | FYS-20-2 | 石英 | C | 7 | 17~52 | 25~85 | - | 6.4~7.6 | 22.6~24.8 | - | 370~451 | 4.6~6.7 |
| | FYS-20-3 | 石英 | R-L | 10 | 9~20 | 25~45 | -10.1~-5.7 | - | - | - | 256~357 | 8.8~14.0 |
| | FYS-20-3 | 石英 | C | 2 | 12,21 | 30,35 | - | 6.9,7.2 | 25.1,26.4 | - | 301,309 | 5.3,5.7 |
| | FYS-20-4 | 石英 | R-L | 15 | 5~20 | 15~40 | -3.5~-8.9 | - | - | - | 243~394 | 5.7~12.7 |
| | FYS-20-4 | 石英 | C | 15 | 10~23 | 30~55 | - | 5.4~7.7 | 25.2~26.8 | - | 304~395 | 4.4~8.4 |
| | FYS-20-4 | 石英 | S-KCl | 1 | 22 | 20 | - | - | - | 275 | 290 | 51.6 |
| | FYS-10-2 | 石英 | R-L | 47 | 7~34 | 20~40 | -16.5~-5.4 | - | - | - | 249~321 | 7.6~19.8 |
| | FYS-10-2 | 石英 | C | 2 | 35,55 | 17,20 | - | 7.4,7.6 | 25.9,26.2 | - | 268,279 | 4.6,5.0 |
| 阶段 IV | FYS-12 | 方解石 | R-L | 11 | 5~10 | 25~45 | -9.5~-5.5 | - | - | - | 353~446 | 8.6~13.4 |
| | FYS-13-1 | 萤石 | R-L | 8 | 8~25 | 20~35 | -18.9~-8.0 | - | - | - | 246~270 | 11.7~21.6 |
| | FYS-13-1 | 萤石 | C | 4 | 17~20 | 3~10 | - | 6.8~7.2 | 24.2~25.9 | - | 260~279 | 5.3~6.0 |
| | FYS-13-1 | 萤石 | S-NaCl | 2 | 20,24 | 20,25 | - | - | 249.8,262.7 | - | 260,264 | 34.7,35.5 |
| | FYS-16 | 石英 | R-L | 6 | 10~15 | 30~45 | -10.5~-8.7 | - | - | - | 297~328 | 12.5~14.5 |
| FYS-21 | 石英 | R-L | 9 | 6~20 | 20~35 | -8.9~-6.3 | - | - | - | 254~343 | 9.6~12.7 | |
| FYS-13-2 | 石英 | R-L | 23 | 7~25 | 10~35 | -8.5~-5.6 | - | - | - | 213~281 | 8.7~12.3 | |

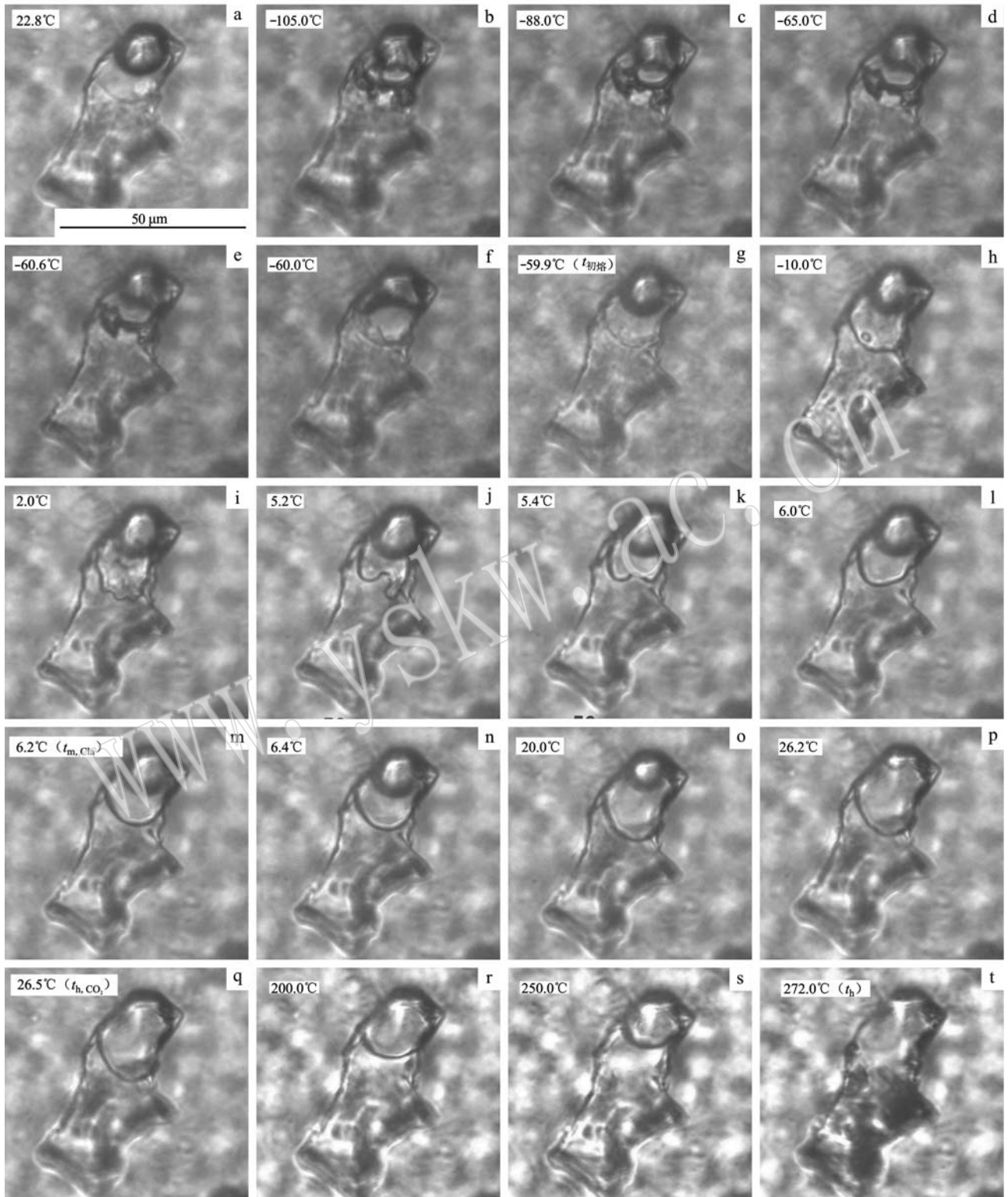


图5 放羊山矿床阶段Ⅲ石英中C型包裹体在冷冻-加热实验中的相变过程

Fig. 5 Phase change process of C type inclusion in stage Ⅲ quartz of the Fangyangshan deposit during heating after cooling to -105°C

a—室温下C型三相包裹体; b~t—冷冻-加热实验相变过程(g—固体 CO_2 初熔; m— CO_2 笼合物熔化; q— CO_2 部分均一; t—完全均一); $t_{m, \text{cla}}$ —笼合物熔化温度; t_{h, CO_2} — CO_2 部分均一温度; t_h —完全均一温度
 a—three phase of C type inclusion at room temperature; b~t—phase change process during heating after cooling to -105°C (g—initial melting of solid CO_2 ; m—final melting of CO_2 clathrate; q—partial homogenization of CO_2 ; t—total homogenization); $t_{m, \text{cla}}$ —the temperature of final melting of clathrate; t_{h, CO_2} —partial homogenization temperature of CO_2 ; t_h —total homogenization temperature

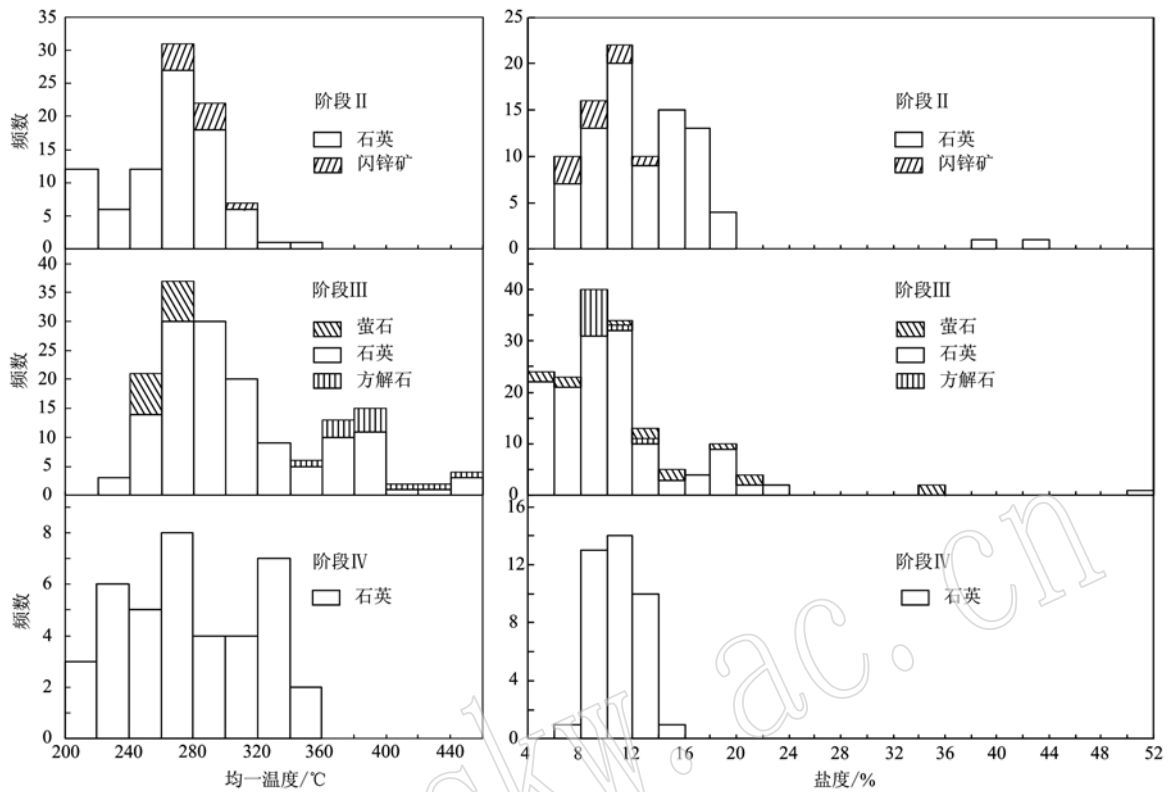


图 6 放羊山矿床不同阶段流体包裹体均一温度、盐度分布直方图

Fig. 6 Homogenization temperature and salinity histogram of fluid inclusions in different stages of the Fangyangshan deposit

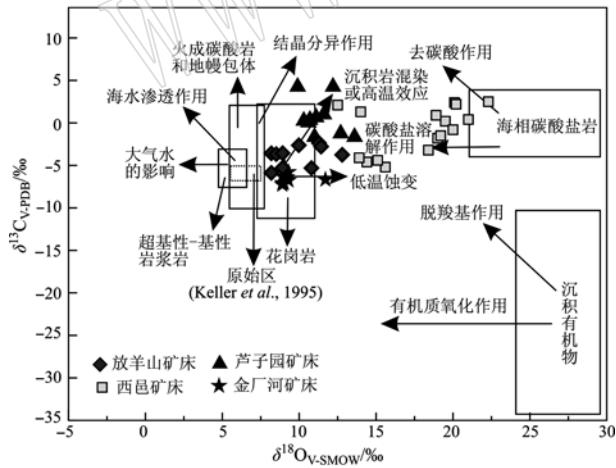


图 7 放羊山矿床 $\delta^{13}C_{V-PDB} - \delta^{18}O_{V-SMOW}$ 图解(底图据刘建明等, 1997; 毛景文等, 2002; 刘家军等, 2004; 芦子园据徐荣, 2016; 金厂河据黄华, 2014; 西邑据高海军, 2017) Fig. 7 $\delta^{13}C_{V-PDB}$ versus $\delta^{18}O_{V-SMOW}$ diagram from the Fangyangshan deposit (after Liu Jianming *et al.*, 1997; Mao Jingwen *et al.*, 2002; Liu Jiajun *et al.*, 2004; Luziyuan deposit after Xu Rong, 2106; Jinchanghe deposit after Huang Hua, 2014; Xiyi deposit after Gao Haijun, 2017)

它们的均一温度比较接近(表 3, 如 FYS-20-3、FYS-20-4 和 FYS-10-2), 暗示成矿过程发生过流体沸腾作用(Roedder, 1984; 卢焕章等, 2004)。结合同一包裹体片内可观察到气相颜色较浅、占比小(15% ~ 20%)的富液相包裹体相比颜色深、占比大(25% ~ 30%)的同类型包裹体具有更低的均一温度和盐度, 认为可能是晚阶段有部分大气降水的混入, 成为流体发生沸腾作用的原因之一。阶段 IV 的包裹体以富液相和纯液相包裹体为主, 含/富 CO_2 包裹体和含子矿物包裹体逐渐消失, 均一温度和盐度逐渐降低至 220 ~ 340°C 和 8.0% ~ 14.0%, 演化为 $H_2O-NaCl$ 体系。

综上所述, 放羊山矿床阶段 II 和阶段 III 的成矿流体主要来源于大陆碰撞体制形成的中高温、中高温高盐度深部岩浆热液, 在阶段 III 晚期和阶段 IV 受到部分中低温、低盐度大气降水的影响, 并在成矿流体上升迁移过程中可能与地层围岩发生水-岩反应促使 C-O 同位素发生交换。

5.2 矿床成因初探

放羊山矿床地处“三江”特提斯成矿域的保山地

块,经历了从晚元古代到早古生代泛大陆解体与原特提斯洋形成(李文昌等, 2010; Wang *et al.*, 2016),在早白垩世形成了与碰撞造山作用有关的芦子园、核桃坪和金厂河等矽卡岩型矿床(陶琰等, 2010; 邓明国等, 2018)。放羊山矿床位于保山-镇康地块南部的镇康复式背斜之芦子园次级背斜(NE向)和乌木兰次级背斜(EW向)交汇处,矿体产出受芦子园次级背斜和NE向断裂构造控制作用明显,呈脉状和透镜状产于以 F_1 为主的构造破碎带及次级断裂中,主要控矿因素(构造条件、容矿层位)与镇康矿集区内的芦子园矿床一致(夏庆霖等, 2005; 邓明国等, 2018)。矿物组合以黄铁矿-毒砂-石英-方解石和黄铜矿-雌黄铁矿-闪锌矿-方铅矿等中高温矿物组合为主。矿石发育半自形-自形粗粒结构、压碎结构和交代残余溶蚀结构,脉状-网脉状构造和碎斑-角砾状构造等典型的构造-热液作用组构特征,表明构造热液作用是放羊山矿床形成的关键因素。

C-O同位素和流体包裹体研究表明,放羊山矿床原始成矿流体主要来源于深部岩浆热液,与芦子园(徐荣, 2016; 邓明国等, 2018)和金厂河(黄华, 2014)矽卡岩型铅锌矿床比较相似。综合研究认为,放羊山矿床的形成很可能与处于同一构造背景的芦子园等矽卡岩型矿床相似,在保山地块与腾冲地块碰撞造山由挤压转为伸展阶段,造山作用不但在碰撞部位发生挤压熔融,同时致使地块内部受到挤压、拉张形成褶皱和断裂等构造,为流体运移及矿液的沉淀富集提供最有利通道和场所(莫宣学等, 2006; 陈衍景等, 2007; Deng *et al.*, 2014),地壳加厚重熔形成的岩浆热液沿早期形成的断裂构造系统运移至有利空间聚集成矿(Chen *et al.*, 2009; 邓明国等, 2018)。因此,认为放羊山矿床的成矿作用是发生在陆陆碰撞、陆内挤压和幕式剪切拉张的动力学背景下,为受构造控制明显的中高温热液矿床,结合矿物组合、成矿流体性质和地质背景,预测矿区深部有望找到矽卡岩型Cu-Pb-Zn矿体。

6 结论

(1) 放羊山矿床阶段II和阶段III的成矿流体来源以中高温、中高盐度、富 CO_2 和富水的岩浆热液为主,在阶段III晚期和阶段IV受到部分中低温、低盐度大气降水的影响,并在上升运移过程中与地层围岩发生水-岩反应。

(2) 综合研究认为,放羊山矿床的形成可能与处于同一构造背景的芦子园等矽卡岩型矿床相似,是在陆陆碰撞、陆内挤压和剪切拉张的地质背景下,与区域构造关系密切的中高温热液矿床。

致谢 野外地质调查得到了鑫达公司的大力支持,C-O同位素和流体包裹体测试分析分别得到北京科荟测试技术有限公司和昆明理工大学流体包裹体实验室的大力帮助,审稿专家所提出的建设性修改意见和建议使论文质量得到提升,在此一并致谢!

References

- Chen Fuchuan. 2018. The Study of Early Cretaceous Skarn Mineralization in Longyang Ore Concentration Area, Baoshan Block, Sanjiang Region, SW China[D]. Beijing: China University of Geosciences(in Chinese with English abstract).
- Chen Fuchuan, Deng Jun, Shu Qihai, *et al.* 2016. Geology, fluid inclusion and stable isotopes(O, S) of the Hetaoping distal skarn Zn-Pb deposit, northern Baoshan block, SW China[J]. *Ore Geology Reviews*, 90(11): 913~927.
- Chen Yanjing, Chen Huayong, Zaw K, *et al.* 2007. Geodynamic settings and tectonic model of skarn gold deposits in China: An overview [J]. *Ore Geology Reviews*, 31(1~4): 139~169.
- Chen Yanjing and Li Nuo. 2009. Nature of ore-fluids of intracontinental intrusion-related hypothermal deposits and its difference from those in island arcs[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(10): 2477~2508 (in Chinese with English abstract).
- Chen Yanjing, Ni Pei, Fan Hongrui, *et al.* 2007. Diagnostic fluid inclusion of different types hydrothermal gold deposits[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(9): 2085~2108(in Chinese with English abstract).
- Chen Yanjing, Pirajno F, Li Nuo, *et al.* 2009. Isotope systematics and fluid inclusion studies of the Qiyugou breccia pipe-hosted gold deposit, Qinling orogen, Henan Province, China: Implications for ore genesis[J]. *Ore Geology Reviews*, 35(2): 245~261.
- Chen Yuhong, Gan Tian, Guan Shenjin, *et al.* 2020. Shuitoushan magmatic hydrothermal lead-zinc deposit in western Yunnan: Evidence from REE and C-O isotopes[J/OL]. *Geology in China*, 1~24. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1167.p.20200602.0925.002.html>.
- Deng Jun, Hou Zengqian, Mo Xuanxue, *et al.* 2010. Superimposed orogenesis and metallogenesis in Sanjiang Tethys[J]. *Mineral Deposits*, 29(1): 37~42(in Chinese with English abstract).
- Deng Jun and Wang Qingfei. 2016. Gold mineralization in China: Metal-

- logenic provinces, deposit types and tectonic framework[J]. *Gondwana Research*, 36(8): 219 ~ 274.
- Deng Jun, Wang Qingfei, Li Gongjian, *et al.* 2014. Cenozoic tectono-magmatic and metallogenic processes in the Sanjiang region, southwestern China[J]. *Earth-Science Reviews*, 138: 268 ~ 299.
- Deng Mingguo, Chen Wei, Wang Xuewu, *et al.* 2018. Fluid inclusion and ore genesis of the Luziyuan distal skarn Pb-Zn-Fe(-Cu) polymetallic deposit, West Yunnan, SW China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 34(5): 1 239 ~ 1 257(in Chinese with English abstract).
- Dong Meiling, Dong Guochen, Mo Xuanxue, *et al.* 2013. The Mesozoic-Cenozoic magmatism in Baoshan Block, western Yunnan and its tectonic significance[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 29(11): 3 901 ~ 3 913(in Chinese with English abstract).
- Gao Haijun. 2017. Ore-Forming Mechanism of the Xiyi Lead-Zinc Deposit and Regional Ore Indications in Baoshan-Longling Area, Yunnan Province[D]. Beijing: China University of Geosciences(in Chinese with English abstract).
- Hou Zengqian, Zaw K, Pan Guitang, *et al.* 2007. Sanjiang Tethyan metallogenesis in S. W. China: Tectonic setting, metallogenic epochs and deposit type[J]. *Ore Geology Reviews*, 31(1 ~ 4): 48 ~ 87.
- Huang Hua. 2014. The Research on Geological Characteristics and Metallogenesis of the Jinchanghe Fe-Cu-Pb-Zn Polymetallic Deposit, Yunnan Province[D]. Beijing: China University of Geosciences (in Chinese with English abstract).
- Keller J and Hoefs J. 1995. Stable isotope characteristics of recent natrocarbonatites from Oldoinyo Lengai[J]. *Carbonatite Volcanism*, 4: 113 ~ 123.
- Li Gongjian, Deng Jun, Wang Qingfei, *et al.* 2015. Metallogenic model for the Laochang Pb-Zn-Ag-Cu volcanogenic massive sulfide deposit related to a Paleo-Tethys OIB-like volcanic center, SW China[J]. *Ore Geology Reviews*, 70: 578 ~ 594.
- Li Wenchang, Pan Guitang, Hou Zengqian, *et al.* 2010. Archipelagic-basin, Forming Collision Theory and Prospecting Techniques along the Nujiang-Lancangjiang-Jinshajiang Area in Southwestern China [M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese with English abstract).
- Liang Shengxian, Jiao Yanjie and Guo Jing. 2015. Prediction of hidden granites in the Luziyuan area of Yunnan Province and the prospecting direction[J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 89(5): 1 781 ~ 1 782 .
- Liu Jiajun, He Mingqin, Li Zhiming, *et al.* 2004. Oxygen and carbon isotopic geochemistry of Baiyangping silver-vopper 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).
- Liu Jianming and Liu Jiajun. 1997. Basin fluid genetic model of sediment-hosted micro-disseminated gold deposits in the gold-triangle area between Guizhou, Guangxi and Yunnan[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 17(4): 448 ~ 456(in Chinese with English abstract).
- Lu Huanzhang, Fan Hongrui, Ni Pei, *et al.* 2004. Fluid Inclusions[M]. Beijing: Science Press(in Chinese with English abstract).
- Mao Jingwen, He Ying and Ding Tiping. 2002. Mantle fluids involved in metallogenesis of Jiaodong(East Shandong) gold district: Evidence of C, O and H isotopes[J]. *Mineral Deposits*, 21(2): 121 ~ 128 (in Chinese with English abstract).
- Mo Xuanxue and Pan Guitang. 2006. From the tethys to the formation of the Qinghai-Tibet Plateau: Constrained by tectono-magmatic events [J]. *Earth Science Frontiers*, 13(6): 43 ~ 51(in Chinese with English abstract).
- Nie Fei, Dong Guochen, Mo Xuanxue, *et al.* 2015. The characteristics of sulfur and lead isotopic compositions of the Xiyi Pb-Zn deposit in Baoshan Block, western Yunnan [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 31(5): 1 327 ~ 1 334(in Chinese with English abstract).
- Roedder E. 1984. Fluid Inclusions [M]. *Reviews in Mineralogy*, 12(11): 1 ~ 644.
- Shen Qihan. 2009. The recommendation of a systematic list of mineral abbreviations[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 28(5): 495 ~ 500 (in Chinese with English abstract).
- Tao Yan, Hu Ruizhong, Zhu Feilin, *et al.* 2010. Ore-forming age and the geodynamic background of the Hetaoping lead-zinc deposit in Baoshan, Yunnan[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(6): 1 760 ~ 1 772(in Chinese with English abstract).
- Wang Changming, Bagas L, Lu Yongjun, *et al.* 2016. Terrane boundary and spatio-temporal distribution of ore deposits in the Sanjiang Tethyan Orogen: Insights from zircon Hf-isotopic mapping [J]. *Earth-Science Reviews*, 156(5): 39 ~ 65.
- Xia Qinglin, Chen Yongqing, Lu Yingxiang, *et al.* 2005. Geochemistry, fluid inclusion, and stable isotope studies of Luziyuan Pb-Zn deposit in Yunnan Province, Southwestern China[J]. *Earth Science*, 30(2): 177 ~ 186(in Chinese with English abstract).
- Xiong Lei, Li Shibin, Liu Xiaodong, *et al.* 2018. The feature and a preliminary genesis analysis of Fangyangshan Pb-Zn deposit in Zhenkang, Yunnan[J]. *Yunnan Geology*, 37(4): 447 ~ 451(in Chinese with English abstract).
- Xu Rong. 2016. Isotope Geochemistry Characteristics and Discussion Genesis of Luziyuan Lead-Zinc-Iron Polymetallic Mineral Deposit, Zhenkang, West Yunnan, China[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology(in Chinese with English abstract).

- Xu Rong, Li Wenchang, Deng Mingguo, *et al.* 2019. Genesis of the superlarge Luziyuan Zn-Pb-Fe (-Cu) distal skarn deposit in western Yunnan (SW China): Insights from ore geology and C-H-O-S isotopes[J]. *Ore Geology Reviews*, 107: 944 ~ 959.
- Xue Chuandong, Han Runsheng, Yang Hailin, *et al.* 2008. Isotope geochemical evidence for ore-forming fluid resources in Hetaoping Pb-Zn deposit, Baoshan, northwestern Yunnan[J]. *Mineral Deposits*, 27(2): 243 ~ 252 (in Chinese with English abstract).
- Yang Xuejun, Jia Xiaochuan, Xiong Changli, *et al.* 2012. LA-ICP-MS zircon U-Pb age of metamorphic basic volcanic rock in Gongyanghe Group of southern Gaoligong Mountain, western Yunnan Province, and its geological significance[J]. *Geological Bulletin of China*, 31(2): 264 ~ 276(in Chinese with English abstract).
- Yang Yulong, Ye Lin, Cheng Zengtao, *et al.* 2012. A tentative discussion on the genesis of skarn Pb-Zn deposits in the Baoshan-Zhenkang terrane[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 31(4): 554 ~ 564 (in Chinese with English abstract).
- Yu li, Li Gongjian, Wang Qingfei, *et al.* 2014. Petrogenesis and tectonic significance of the Late Cretaceous magmatism in the northern part of the Baoshan block: Constraints from bulk geochemistry, zircon U-Pb geochronology and Hf isotopic compositions[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 30(9): 2 709 ~ 2 724(in Chinese with English abstract).
- Zhou Jiayi, Huang Zhilong, Zhou Guofu, *et al.* 2012. C, O isotope and REE geochemistry of the hydrothermal calcites from the Tianqiao Pb-Zn ore deposit in NW Guizhou Province, China[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 36(1): 93 ~ 101(in Chinese with English abstract).
- 董美玲, 董国臣, 莫宣学, 等. 2013. 滇西保山地块中-新生代岩浆作用及其构造意义[J]. *岩石学报*, 29(11): 3 901 ~ 3 913.
- 高海军. 2017. 云南保山-龙陵地区西邑铅锌矿床成矿机制及区域找矿标志[D]. 北京: 中国地质大学(北京).
- 黄 华. 2014. 云南金厂河铁铜铅锌多金属矿床地质特征及成矿作用研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京).
- 李文昌, 潘桂堂, 侯增谦, 等. 2010. 西南“三江”多岛弧盆-碰撞造山成矿理论与勘查技术[M]. 北京: 地质出版社.
- 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[J]. *矿床地质*, 23(1): 1 ~ 10.
- 刘建明, 刘家军. 1997. 滇黔桂金三角区微细浸染型金矿床的盆地流体成因模式[J]. *矿物学报*, 17(4): 448 ~ 456.
- 卢焕章, 范宏瑞, 倪 培, 等. 2004. 流体包裹体[M]. 北京: 科学出版社.
- 毛景文, 赫 英, 丁悌平. 2002. 胶东金矿形成期间地幔流体参与成矿过程的碳氧氢同位素证据[J]. *矿床地质*, 21(2): 121 ~ 128.
- 莫宣学, 潘桂堂. 2006. 从特提斯到青藏高原形成——构造-岩浆事件的约束[J]. *地学前缘*, 13(6): 43 ~ 51.
- 聂 飞, 董国臣, 莫宣学, 等. 2015. 云南保山西邑铅锌矿床硫铅同位素地球化学特征研究[J]. *岩石学报*, 31(5): 1 327 ~ 1 334.
- 沈其韩. 2009. 推荐一个系统的矿物缩写表[J]. *岩石矿物学杂志*, 28(5): 495 ~ 500.
- 陶 琰, 胡瑞忠, 朱飞霖, 等. 2010. 云南保山核桃坪铅锌矿成矿年龄及动力学背景分析[J]. *岩石学报*, 26(6): 1 760 ~ 1 772.
- 夏庆霖, 陈永清, 卢映祥, 等. 2005. 云南芦子园铅锌矿床地球化学、流体包裹体及稳定同位素特征[J]. *地球科学——中国地质大学学报*, 30(2): 177 ~ 186.
- 熊 磊, 李仕斌, 刘晓东, 等. 2018. 云南镇康县放羊山铅锌矿床特征及成因浅析[J]. *云南地质*, 37(4): 447 ~ 451.
- 徐 荣. 2016. 滇西镇康芦子园 Pb-Zn-Fe 多金属矿床同位素地球化学特征及成因探讨[D]. 北京: 昆明理工大学.
- 薛传东, 韩润生, 杨海林, 等. 2008. 滇西北保山核桃坪铅锌矿床成矿流体来源的同位素地球化学证据[J]. *矿床地质*, 27(2): 243 ~ 252.
- 杨学俊, 贾小川, 熊昌利, 等. 2012. 滇西高黎贡山南段公养河群变质基性火山岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. *地质通报*, 31(2): 264 ~ 276.
- 杨玉龙, 叶 霖, 程增涛, 等. 2012. 保山镇康地块砂卡岩型铅锌矿床成因初探[J]. *岩石矿物学杂志*, 31(4): 554 ~ 564.
- 禹 丽, 李龚健, 王庆飞, 等. 2014. 保山地块北部晚白垩世岩浆岩成因及其构造指示: 全岩地球化学、锆石 U-Pb 年代学和 Hf 同位素制约[J]. *岩石学报*, 30(9): 2 709 ~ 2 724.
- 周家喜, 黄智龙, 周国富, 等. 2012. 黔西北天桥铅锌矿床热液方解石 C、O 同位素和 REE 地球化学[J]. *大地构造与成矿学*, 36(1): 93 ~ 101.

附中文参考文献

- 陈福川. 2018. 西南“三江”保山地块珑阳矿集区早白垩世砂卡岩矿床成矿作用研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京).
- 陈衍景, 李 诺. 2009. 大陆内部浆控高温热液矿床成矿流体性质及其与岛弧区同类矿床的差异[J]. *岩石学报*, 25(10): 2 477 ~ 2 508.
- 陈衍景, 倪 培, 范宏瑞, 等. 2007. 不同类型热液金矿系统的流体包裹体特征[J]. *岩石学报*, 23(9): 2 085 ~ 2 108.
- 陈俞宏, 甘 甜, 管申进, 等. 2020. 滇西水头山岩浆热液铅锌矿床: 来自 REE 和 C-O 同位素的证据[J/OL]. *中国地质*, 1 ~ 24 (<http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1167.p.20200602.0925.002.html>, 网络首发).
- 邓 军, 侯增谦, 莫宣学, 等. 2010. “三江”特提斯复合造山与成矿作用[J]. *矿床地质*, 29(1): 37 ~ 42.
- 邓明国, 陈 伟, 王学武, 等. 2018. 滇西芦子园远程砂卡岩 Pb-Zn-Fe(Cu)多金属矿床流体包裹体初探及矿床成因探讨[J]. *岩石学报*, 34(5): 1 239 ~ 1 257.