

# 湘中杏枫山金矿床流体包裹体特征 及其对矿床成因的指示

肖静芸<sup>1,2)</sup>, 彭建堂<sup>1,3)</sup>, 胡阿香<sup>1)</sup>, 木兰<sup>3)</sup>

1) 中南大学地球科学与信息物理学院教育部有色金属成矿预测重点实验室, 长沙, 410083;

2) 河池学院化学与生物工程学院, 广西宜州, 546300;

3) 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, 贵阳, 550002

**内容提要:** 杏枫山金矿是湘中盆地典型的石英脉型金矿床, 矿床位于白马山复式岩体的外接触带, 主要赋存于新元古界板岩—千枚岩中。为了查明杏枫山金矿床的成矿流体特征, 并揭示其矿床成因, 本文在对该金矿的矿床地质特征、矿物共生关系进行了野外调查和室内镜下研究的基础上, 利用岩相学、显微测温以及激光拉曼显微探针分析等技术手段, 对该金矿的不同期次石英中的包裹体开展了系统研究。研究表明: 成矿期石英脉呈席状产出, 其流体包裹体以富液相为主, 含少数富气相包裹体和 CO<sub>2</sub> 包裹体, 流体包裹体的均一温度在 220~420℃ 范围内, 盐度为 0.35%~11.94% NaCl<sub>eq</sub>; 成矿后石英中流体包裹体的均一温度和盐度均明显小于成矿期。该金矿床的成矿流体属中高温、贫 CO<sub>2</sub> 的还原性 H<sub>2</sub>O—NaCl(±KCl)—CO<sub>2</sub>—CH<sub>4</sub>—N<sub>2</sub> 体系, 减压沸腾作用造成成矿流体的氧逸度、pH 值改变, 是导致该区金矿石沉淀的主要原因。湘中杏枫山金矿的成矿温度高, 成矿压力较小, 成矿流体及地质特征均明显有别于国内外典型的造山型金矿床。结合其围岩蚀变类型和矿物共生组合等特征, 可推断杏枫山金矿床属于与侵入岩有关的金矿体系(IRGS)。

**关键词:** 流体包裹体; 成矿机制; 矿床成因; 杏枫山金矿床; 湘中

湘中金(锑)矿带是华南成矿带的重要组成部分(胡瑞忠等, 2016), 其内分布有大、中、小型金矿床 50 多处, 如龙山、铲子坪、大新等金(锑)矿床(图 1), 是我国重要的金矿产地之一(孙际茂等, 2007)。该成矿带中金矿大多数赋存于一套前寒武系浅变质岩地体中, 且多围绕在白马山、龙山、紫云山等穹隆分布, 在空间上与中酸性侵入岩有着密切关系。

目前对该金矿带的成矿流体来源及矿床成因仍存在较多争议: 一些学者认为该区金矿床属于改造型金矿(梁华英, 1991; 李己华等, 2007; 吴继承等, 2007), 成矿流体主要来自大气降水; 而另一些学者则认为其属于变质热液型金矿(罗献林, 1991; 鲍振襄, 1994), 成矿流体主要为变质流体; 还有一些学者认为, 该区金矿在时间和成因上与印支期岩浆活动有关, 属于岩浆热液型矿床, 成矿流体主要为岩浆热液(钟东球, 1990; 李恒新, 1995; 骆学全, 1996; 梁

栋和戴建斌, 2007; 孙际茂等, 2007; 李华芹等, 2008; 曹亮等, 2015; 付山岭等, 2016; 陈佑纬等, 2016; Li Wei et al, 2018; 孙骥等, 2020)。最近有人提出, 湘中金矿床位于江南造山带内, 应与整个江南成矿带的成矿作用一致, 同属造山型金矿(李伟等, 2016; Xu Deru et al., 2017); 但彭建堂等(2017)则认为, 湘中金矿带与湘西雪峰山一带造山型金矿在空间分布、矿化类型、矿物组合、载金矿物、围岩蚀变、以及成矿时间等方面均存在明显差异, 湘中一带金矿床应属与还原性侵入岩有关的金矿床(IRGS 型)。

杏枫山金矿床位于湘中 EW 向金矿带西端与湘西雪峰山 NE 向成矿带的交汇部位, 其地理位置具有重要的研究意义, 但目前该矿床的研究程度较低, 已有的研究仅侧重于矿床地质特征和成矿规律(罗鸣皋, 1993; 伦生平, 2012 等; 陈武等, 2013; 李惠纯等, 2016)及矿物学(刘佳等, 2018; 陈佑玮等, 2019)

注: 本文为国家自然科学基金资助项目(编号:41972090、41473043); 国家重点研发计划项目(编号:2016YFC0600207; 2018YFC0603500); 广西教育厅高校中青年教師基础能力提升项目(编号:2019KY0635); 河池学院硕士专业学位立项建设专项基金(编号:2018LG006)的成果。

收稿日期:2019-12-04; 改回日期:2020-05-16; 责任编辑:章雨旭。Doi: 10.16509/j.georeview.2020.05.021

作者简介:肖静芸,女,1992年生,硕士,研究方向为成矿流体地球化学;Email:jingyun1013@126.com。通讯作者:彭建堂,男,1968年生,博士,教授,主要从事矿床地球化学研究;Email:jtpeng@126.com。

研究,缺乏系统的流体包裹体研究,其成矿流体性质、来源和金成矿过程尚不清楚,这严重影响了对其矿床成因的认识。本文系统地研究了杏枫山金矿床的矿物组合及其共生关系,在此基础上,通过详细的流体包裹体研究,查明了该金矿床的成矿流体特征及矿石沉淀机制,并通过与国内外变质岩中脉型金矿床的对比分析,确定了其成因类型,为进一步揭示湘中金矿带的区域成矿作用奠定了良好的基础。

### 1 区域地质背景

湘中地区地处扬子地块与华夏地块接触带西侧,区域内经历了极其复杂的地质过程,具有得天独厚的成矿条件,其地层具有典型的双层结构,由新元古界浅变质碎屑岩基底和上部古生界—中生界沉积盖层构成(马东升等,2002)。其中,金矿的赋矿地层为新元古界青白口系板溪群(高涧群)和南华系江口群,主要是由一套浅变质砂砾岩、板岩、千枚岩、凝灰岩等组成。该区域经历了多期构造事件,形成了独特的穹盆叠加构造格局(王建等,2010;颜丹平等,2017;李智等,2019),西部至雪峰山弧形构造带,东部至沅山—南岳隆起带,南部为苗儿山—越城岭—关帝庙串珠状隆起带,中部为白马山—大乘

山—龙山隆起带、涟源盆地及邵阳盆地。断裂带主要呈 NE—NNE 向展布,其中有两条北东向基底深大断裂桃江—城步及宁乡—新宁断裂带贯穿全区。区内岩浆活动强烈,具有多期多阶段的特征,先后经历了加里东期、印支期及燕山期等多期岩浆侵入,其中,加里东期以酸性侵入岩为主,主要分布于白马山复式岩体;印支期侵入岩分布最广、出露面积最大,在紫云山岩体、关帝庙岩体及白马山岩体中均有广泛分布;燕山期岩浆侵入规模较小,多呈岩株或岩脉形式产出。

### 2 矿床地质

杏枫山金矿位于湖南省隆回县石桥铺倒转背斜向西突出的弧形部位,其附近金矿化较集中,现已查明的金矿床有神山冲、金山里、淘金函、蛤蟆函等(图 2a)。该矿床现开采面积约 0.4 km<sup>2</sup>,Au 的储量约为 10 t,为典型的产于浅变质岩中的石英细脉型金矿床。

矿区出露地层主要为新元古界青白口系高涧群(板溪群)漠滨组和天井组,主要岩性是灰绿色千枚理化石英板岩夹薄层状粉砂质板岩,是主要的赋矿围岩,矿区西北角有少量南华系江口群地层出露

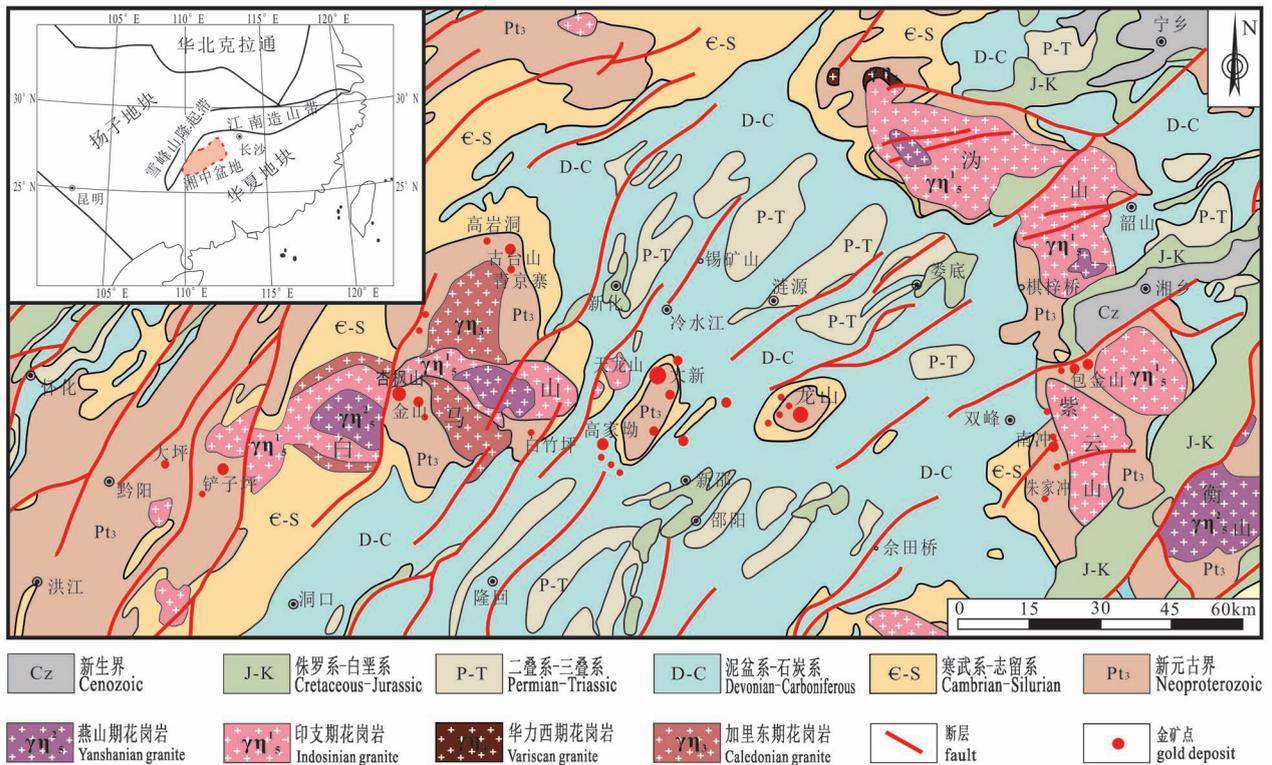


图 1 湘中白马山—龙山—紫云山金矿带的地质图及矿床(点)分布图

Fig. 1 Geological map of Baimashan—Longshan—Ziyunshan gold belt, central Hunan, showing main gold deposits

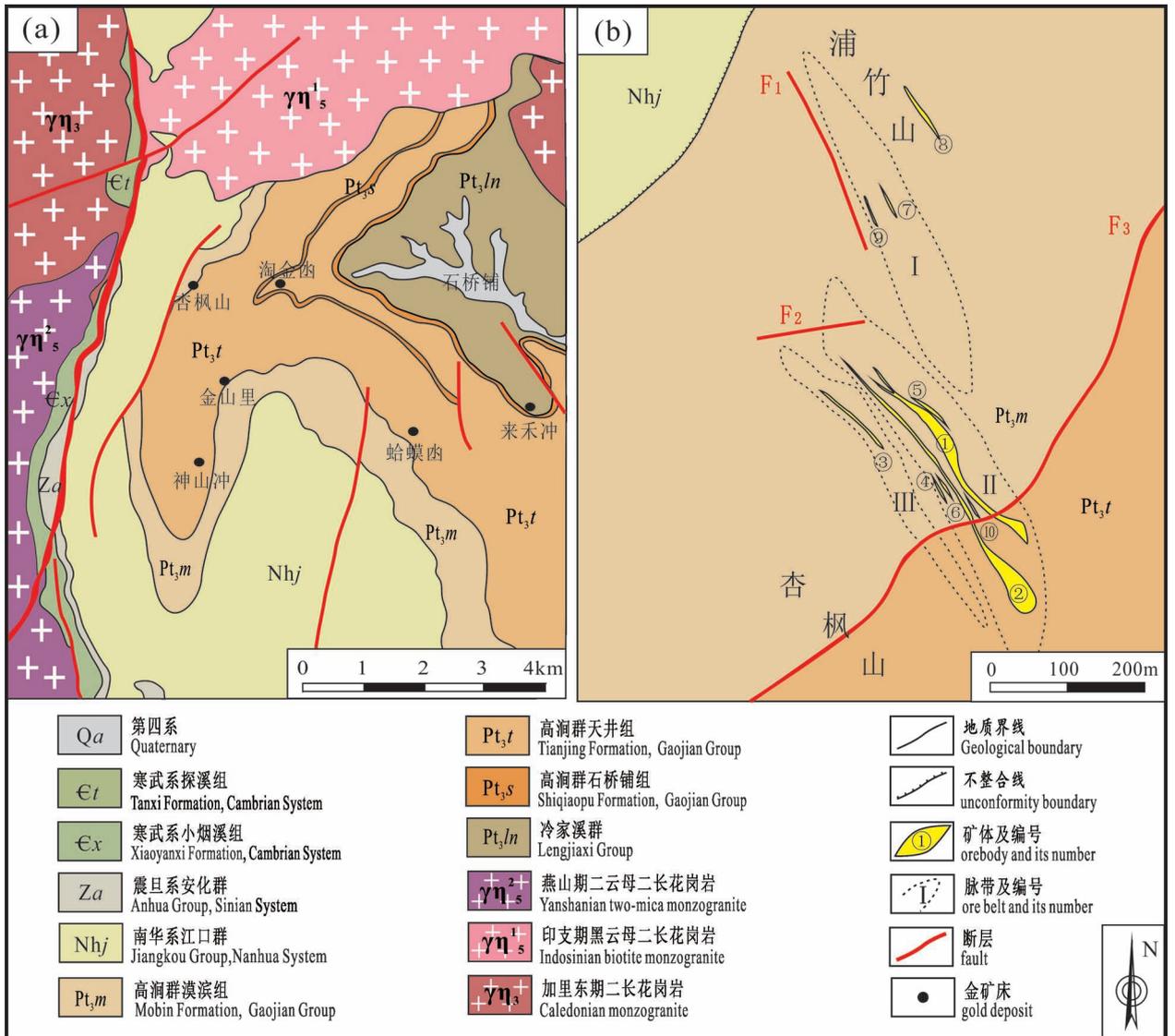


图 2 湘中杏枫山金矿地质图 (据陈武,2013 修改)

Fig. 2 Geological map of Xingfengshan gold deposit, central Hunan(modified from Chen Wu,2013&)

(图 2b)。在构造上,杏枫山金矿床主要受到向西南倾伏的金山里鼻状倒转背斜及 NW 向、NNE 向断裂的控制,其中 NW 向断裂属脆性剪切带,成组的含金石英细脉带充填于其中,为矿床重要的导矿、容矿构造。矿区内尚未有见岩浆岩出露,但其外围 3 km 左右为白马山复式岩体,矿区处于岩体外接触带茫花坪—石桥铺变质带中。

金矿体常呈脉状、透镜状,呈北西向展布,目前区内共划分出三个矿脉带,长约 380~500 m,总体走向 140°~150°,其中 II 号矿脉带为主矿脉带,金的储量占矿床总储量的 85%(图 2b)。该区金矿体为一系列密集的、近似平行的席状(sheeted)石英细脉组成(图 3a—d),含金石英脉体产状稳定,呈 NW 向产

出,脉体主要由烟灰色石英和硫化物(主要为浸染状毒砂,少量为团块状磁黄铁矿)组成,与两侧围岩的接触界线平整,常斜交于浅变质围岩中的千枚理方向(图 4a),石英细脉两侧常发育有较窄的黑云母蚀变带(图 4b)。此外,矿区内还发育一组 NE 向石英脉体,常切割 NW 向的含矿石英脉(图 4c),部分地段可见明显错距,为成矿后的石英脉。明显有别于 NW 向含矿石英脉中的烟灰色石英,这些无矿的 NE 向脉体中石英呈乳白色,与围岩接触界面常发育有白云母化蚀变(图 4d)。

矿石主要由平行密集的石英细脉和发生毒砂化的绢英千枚岩组成,平均品位为  $2 \times 10^{-6} \sim 3 \times 10^{-6}$ ,通常小于  $2.5 \times 10^{-6}$ (陈武等,2013)。矿石类型为石



图 3 湘中杏枫山金矿矿脉的野外照片: (a) 620 中段 II 脉带席状含矿石英脉(2#矿体); (b) 660 中段 II 脉带席状含矿石英脉(2#矿体); (c) 700 中段 II 脉带席状含矿石英脉(2#矿体); (d) 700 中段 II 脉带席状含矿石英脉(1#矿体)

Fig. 3 Photographs of ore veins in the Xingfengshan gold deposit, central Hunan: (a) sheeted quartz veins, at No. 620 level on II ore belt (2# orebody); (b) sheeted quartz veins, at No. 660 level on II ore belt (2# orebody); (c) sheeted quartz veins, at No. 700 level on II ore belt (2# orebody); (d) sheeted quartz veins, at No. 700 level on II ore belt (1# orebody)

野外测得含矿石英细脉的走向约  $290^{\circ} \sim 340^{\circ}$ , 脉宽约 0.2~5 cm, 通常为 1~2 cm, 密度为 8~25 条/m

NNW-trending auriferous quartz veins, about  $0.2 \sim 5.0$  cm wide, with most clustering between

1 and 2 cm. 8 to 25 veins commonly occur within 1 m

英—毒砂—金型, 矿石矿物以毒砂为主, 并伴有磁黄铁矿、钛铁矿、含砷黄铁矿、自然金以及微量的黄铜矿、方铅矿、闪锌矿, 脉石矿物为石英、黑云母、绿泥石、绢云母、长石、电气石、白云母、磷灰石、方解石, 其中毒砂为主要载金矿物, 金大多以晶格金的形式赋存在毒砂中, 极少数呈显微、次显微的形式赋存于蚀变板岩中。矿石结构主要为粒状结构(图 5a)、交代溶蚀结构(图 5b)、交代残余结构(图 5c)、假晶交代结构等, 其中毒砂以自形粒状结构为主, 部分呈半自形或其他形; 矿石构造以浸染状构造为主, 并发育有脉状构造、条带状构造等。围岩蚀变主要发育硅化、

绢云母化、黑云母化、绿泥石化、碳酸盐化、电气石化以及褪色化蚀变晕, 其中硅化和绿泥石化与毒砂—金矿化关系密切。

杏枫山金矿床的形成经历了相对复杂的热液活动, 根据脉体的穿插关系(图 4)以及矿物共生组合(图 5), 可将该区的成矿过程分为三期四阶段, 即成矿前、成矿期(早阶段、晚阶段)和成矿后:

## 2.1 成矿前

该期发育的磁黄铁矿具有定向性, 呈发丝状产于千枚状板岩中, 他形结构, 并沿千枚理方向线性分布。磁黄铁矿细脉往往被成矿期石英脉截断, 并被

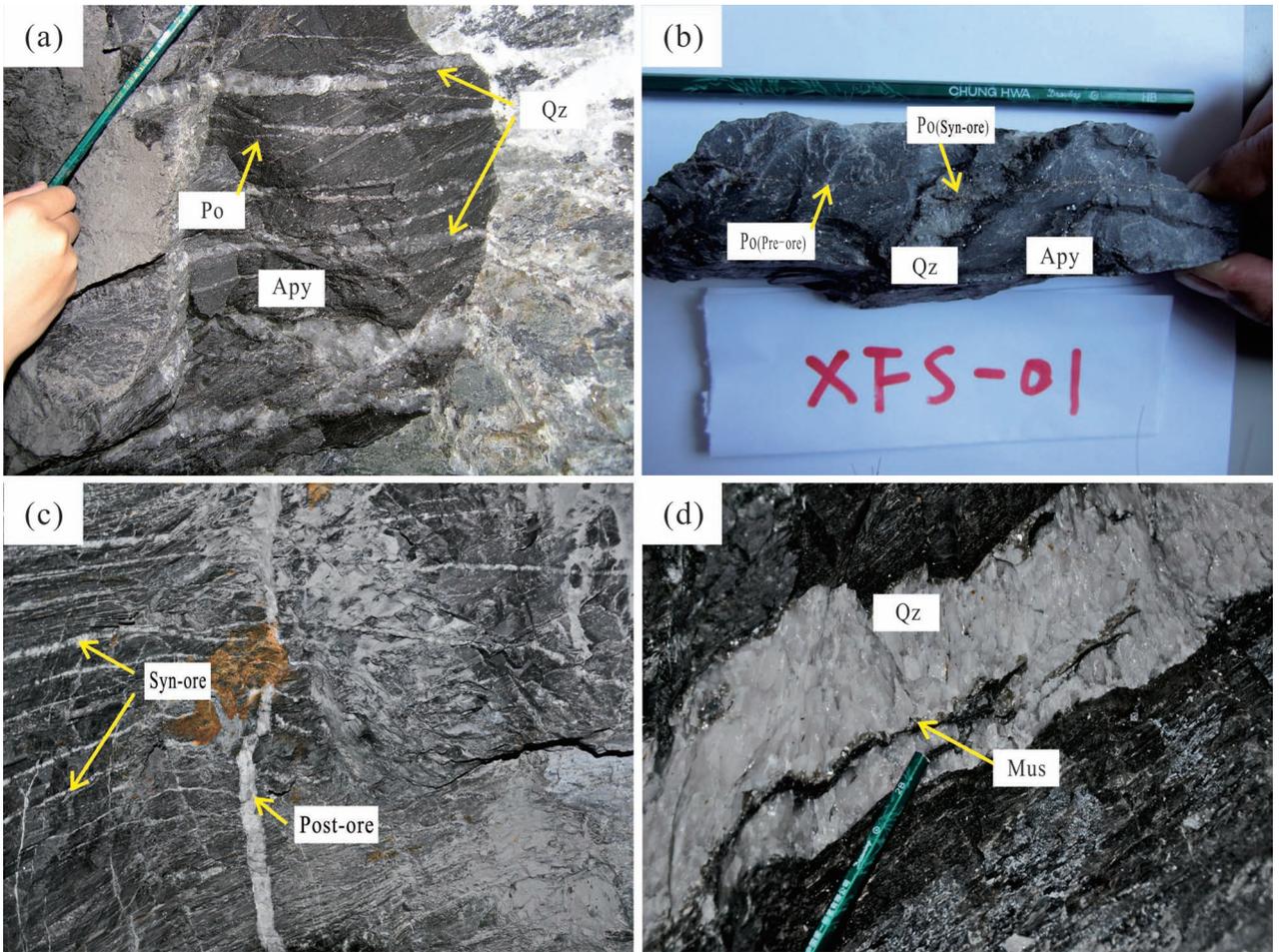


图4 湘中杏枫山矿区不同期次石英脉及手标本照片：(a) 成矿前发丝状磁黄铁矿细脉被成矿期的石英脉截断；(b) 成矿期的石英脉两侧与蚀变围岩的接触界线发育黑云母边；(c) 成矿后 NE 向石英脉将成矿期 NW 向石英脉截断；(d) 成矿后 NW 向石英脉两侧发育的白云母边

Fig. 4 Photographs of different quartz veins and hand specimen from the Xingfengshan gold deposit, central Hunan: (a) vein with pyrrhotite in pre-ore period crosscut by auriferous quartz vein; (b) biotite developed on both sides of auriferous quartz vein; (c) NW-trending auriferous quartz vein crosscut by NE-trending barren quartz vein; (d) muscovite developed on both sides of barren quartz vein

Qz—石英；Apy—毒砂；Po—磁黄铁矿；Mus—白云母

Qz—Quartz；Apy—Arsenopyrite；Po—Pyrrhotite；Mus—Muscovite

后期热液矿物交代(图5d),应当是成矿前岩石变形变质发生千枚理化的产物。

## 2.2 成矿期

(1) 成矿早阶段:发育黑云母—毒砂—钛铁矿组合,毒砂颗粒粗大,呈自形柱状,稀疏浸染状产于石英脉体两侧的蚀变围岩中,该阶段形成的毒砂部分被后期磁黄铁矿交代溶蚀(图5b)。钛铁矿呈他形鳞片状(图5e),围岩蚀变以黑云母化为主,黑云母蚀变带内常伴随有副矿物磷灰石(图5f)。

(2) 成矿晚阶段:为主要成矿阶段,发育绿泥

石—石英—毒砂—金组合,毒砂粒径明显小于成矿早阶段,呈他形板状,稠密浸染状分布于石英脉与围岩的接触带两侧。该阶段发育有自然金以及磁黄铁矿、黄铜矿(图5g)、含砷黄铁矿等硫化物,金通常以晶格金的形式赋存在毒砂中,偶见显微金、次显微金沉淀于毒砂边部(图5h)。围岩蚀变以绿泥石化(图5i)为主,并时常发育有绿泥石+斜长石的褪色化蚀变晕。

## 2.3 成矿后

发育石英—白云母—方解石组合,石英呈乳白

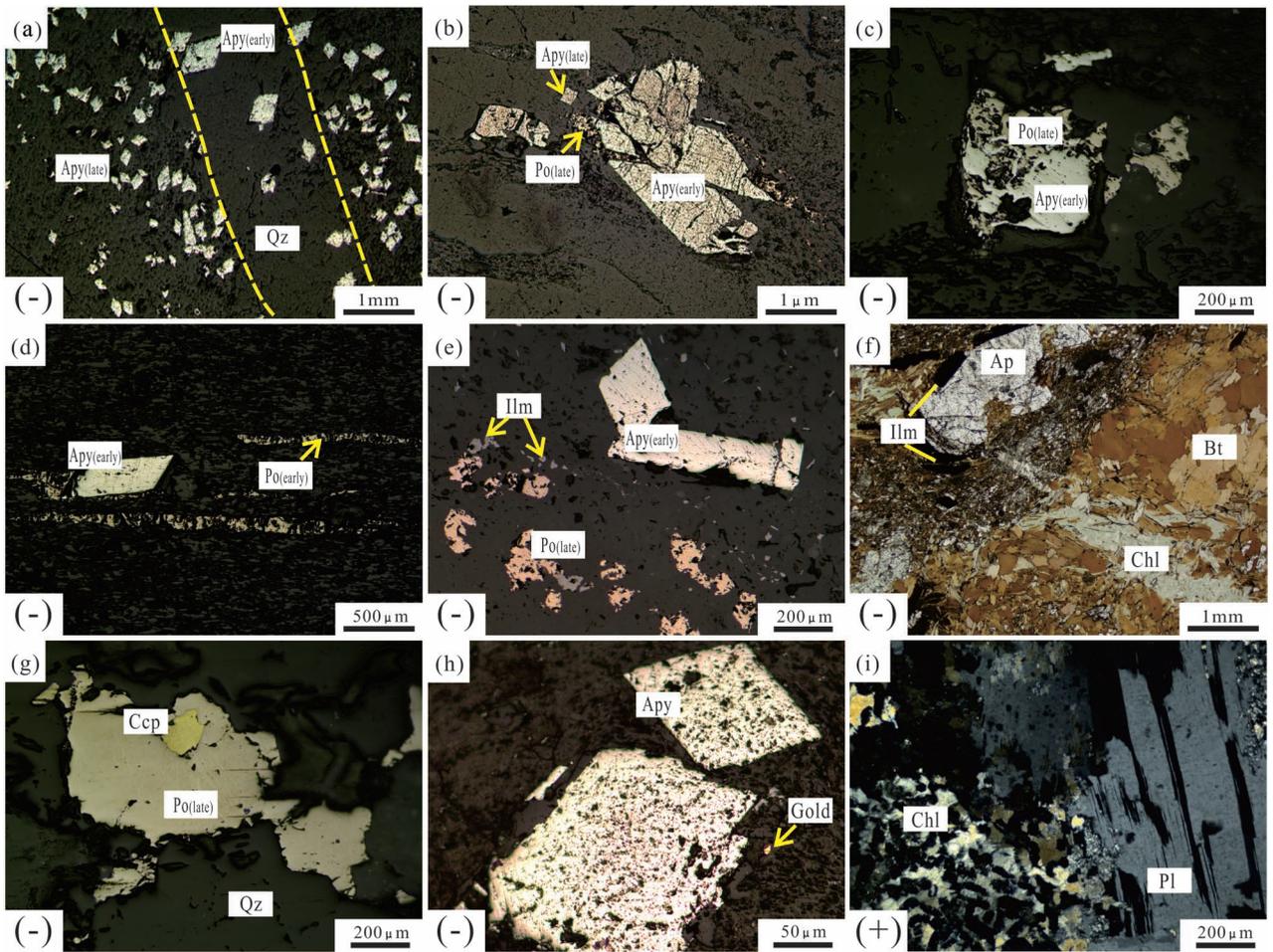


图5 湘中杏枫山金矿不同期次典型硫矿物及部分蚀变矿物镜下照片:(a)成矿期两个不同阶段形成的毒砂;(b)成矿早阶段形成的毒砂被晚阶段磁黄铁矿交代溶蚀;(c)成矿早阶段形成的毒砂被晚阶段的磁黄铁矿溶蚀形成交代残余结构;(d)成矿前发育细脉状磁黄铁矿沿千枚理方向定向排列;(e)成矿早阶段鳞片状钛铁矿被晚阶段的磁黄铁矿交代;(f)成矿早阶段黑云母与磷灰石、钛铁矿共生;(g)成矿晚阶段磁黄铁矿与黄铜矿共生;(h)成矿晚阶段以显微金形式产出的自然金;(i)成矿晚阶段发育斜长石—绿泥石化蚀变晕

Fig. 5 Microphotographs showing different-stage sulfides and altered minerals in the Xingfengshan gold deposit, central Hunan: (a) different-generation arsenopyrite in ores; (b) early arsenopyrite replaced by late pyrrhotite; (c) metasomatic—relict texture; (d) pre-ore pyrrhotite oriented along phyllitic foliation; (e) early scaly ilmenite replaced by late pyrrhotite; (f) biotite intergrown with apatite and ilmenite; (g) pyrrhotite intergrown with chalcopyrite in the late mineralization stage; (h) native gold occurring in the form of micro-gold in the late mineralization stage; (i) alteration of plagioclase—chlorite developed in the late mineralization stage

Apy—毒砂;Po—磁黄铁矿;Ccp—黄铜矿;Ilm—钛铁矿;Gold—自然金;Qz—石英;Chl—绿泥石;Ap—磷灰石;Bt—黑云母;Pl—斜长石  
Apy—Arsenopyrite;Po—Pyrrhotite;Ccp—Chalcopyrite;Ilm—Ilmenite;Gold—native gold;Qz—Quartz;Chl—Chlorite;  
Ap—Apatite;Bt—Biotite;Pl—Plagioclase

色,与矿化无关。围岩蚀变以白云母化、碳酸盐化为主,方解石主要沿破碎带或顺断层的层间滑动胶结角砾。

### 3 样品采集与测试方法

本次研究的样品采自杏枫山矿区不同中段、不

同期次的石英脉,实验共挑选25件具代表性石英样品(其中,成矿期石英18件以及成矿后石英7件),磨制成厚度约0.2 mm 双面抛光的包裹体片进行包裹体的岩相学观察,然后进行显微测温和激光拉曼探针分析。

流体包裹体的显微测温工作在中南大学地球科

学与信息物理学院流体包裹体实验室完成,显微测温仪器为 Linkam THMS-600 型冷热台,可操作温度范围为 $-196\sim 600^{\circ}\text{C}$ ,经校准,在温度为 $-196\sim 30^{\circ}\text{C}$ 时,仪器精度为 $0.1^{\circ}\text{C}$ ;温度为 $30\sim 600^{\circ}\text{C}$ 时,精度为 $1^{\circ}\text{C}$ 。冰点测定的精度 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ,均一温度的测试精度 $\pm 2^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 。测定包裹体的完全冷冻温度 $t_f$ ,完全均一温度 $t_h$ ,冰的最终熔化温度 $t_{m(\text{ice})}$ ,固态 $\text{CO}_2$ 的熔化温度 $t_{m(\text{CO}_2)}$ , $\text{CO}_2$ 相部分均一温度 $t_{h(\text{CO}_2)}$ ,笼合物的最终熔化温度 $t_{m(\text{cla})}$ 。本文采用 Brown 和 Lamb 的等式,利用 Brown (1989) 的 FLINCOR 程序对冰的最终熔化温度 $t_{m(\text{ice})}$ 进行了流体包裹体的盐度计算。

激光拉曼显微探针技术(LRM)作为非破坏性

微区分析技术,主要致力于测定单个包裹体中具有拉曼效应的气体组分和液相阴离子组分的定性—半定量分析。激光拉曼显微探针分析在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完成。使用的仪器为英国 Renishaw in Via Reflect 型显微共聚焦激光拉曼光谱仪,光源为 Spectra-Physics 氩离子激光器,波长 $514\text{ nm}$ ,激光功率 $20\text{ mW}$ ,空间分辨率为 $1\sim 2\ \mu\text{m}$ ,积分时间一般为 $60\text{ s}$ ,个别包裹体为 $180\text{ s}$ , $200\sim 4000\text{ cm}^{-1}$ 全波段一次取谱。

## 4 测试结果

### 4.1 流体包裹体的岩相学特征

根据 Roedder(1984)提出的流体包裹体分类准

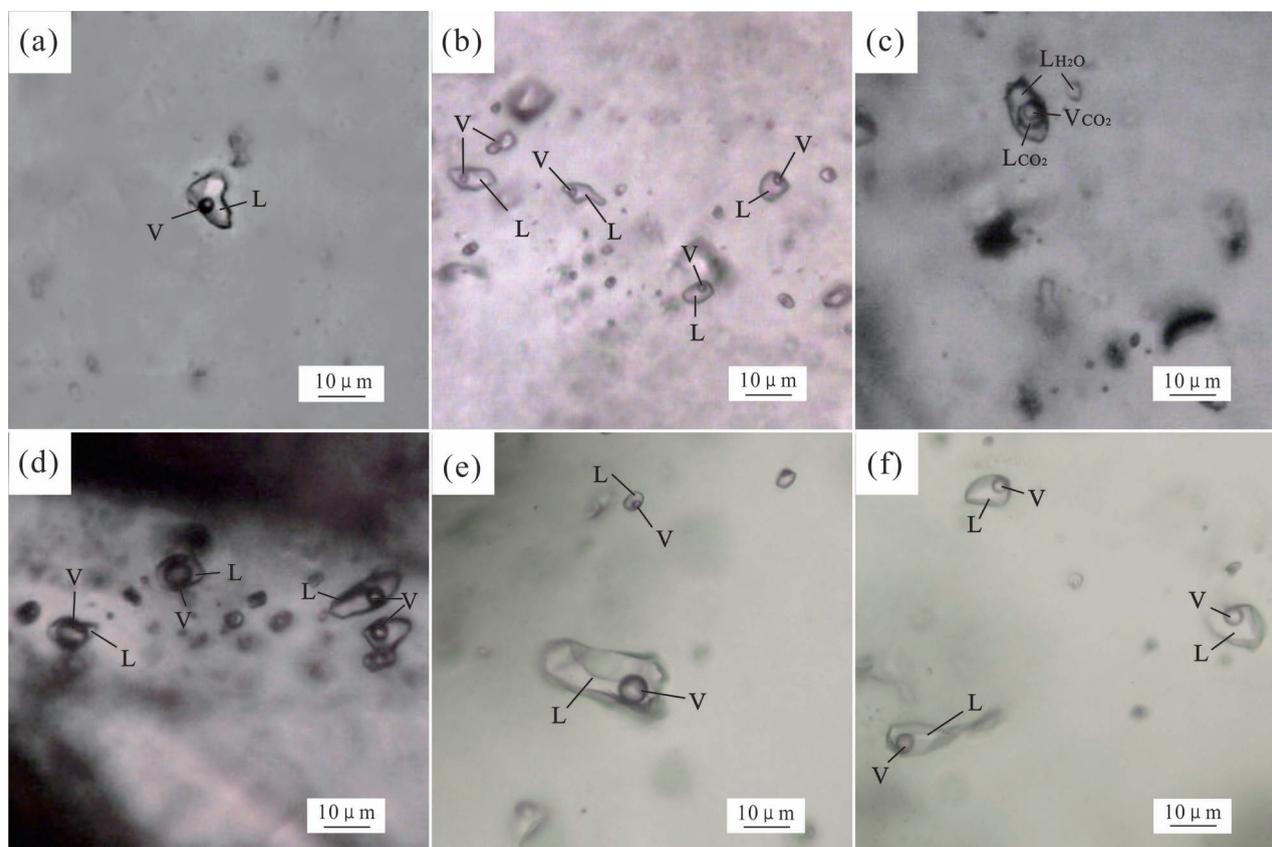


图6 湘中杏枫山金矿不同期次流体包裹体的显微特征:(a)成矿期石英中 $\text{I}_a$ 型包裹体;(b)成矿期 $\text{I}_a$ 型包裹体群生;(c)成矿期石英中 $\text{II}$ 型含 $\text{CO}_2$ 的三相包裹体;(d)成矿期石英中 $\text{I}_a$ 包裹体与 $\text{I}_b$ 包裹体共生;(e)成矿后石英中 $\text{I}_a$ 型包裹体;(f)成矿后 $\text{I}_a$ 型包裹体群生

Fig. 6 Microphotographs of fluid inclusions in different stages of the Xingfengshan Gold Deposit, central Hunan: (a) Type  $\text{I}_a$  inclusions in auriferous quartz; (b) Type  $\text{I}_a$  inclusions in group in auriferous quartz; (c) Type  $\text{II}$  inclusions in auriferous quartz; (d) Type  $\text{I}_b$  inclusions coexisting with Type  $\text{I}_a$  inclusions in auriferous quartz; (e) Type  $\text{I}_a$  inclusions in post-ore quartz; (f) Type  $\text{I}_a$  inclusions in groups in post-ore quartz

L—水溶液相;V—气相;LCO<sub>2</sub>—CO<sub>2</sub>液相;VCO<sub>2</sub>—CO<sub>2</sub>气相

L—Aqueous solution;V—Vapor;LCO<sub>2</sub>—CO<sub>2</sub> liquid;VCO<sub>2</sub>—CO<sub>2</sub> vapor

则及室温下(20℃)的相态特征,杏枫山金矿床石英中的流体包裹体大体可分为两类:

(1) 气液两相包裹体(Type I):常温下呈气、液两相产出,直径为3~35 mm,气液比变化范围为10%~80%,以25%~40%为主,多呈不规则状(图6a)、浑圆状或椭圆状(图6b—d)分布在石英中。根据其最终均一相态又可细分为 $I_a$ 及 $I_b$ 两个亚类, $I_a$ 类包裹体气相体积分数小于50%,最终均一至液相; $I_b$ 类包裹体气相体积分数大于50%,最终均一至气相。该类包裹体广泛分布,且存在于各个阶段,是杏枫山矿区最主要的包裹体类型。

(2) 含 $CO_2$ 包裹体(Type II):常温下呈水溶液相、气相 $CO_2$ 及液相 $CO_2$ 三相产出,可见其与Type I型包裹体共生。该三相包裹体有典型的“双眼皮”特征(图6c),形态以椭圆、负晶形为主,直径为10~15 mm,水溶液相占50%左右,加热后二氧化碳部分均一为液相,最终完全均一为水溶液相。该类包裹体数量较少,仅见于成矿期石英中。

岩相学研究发现,不同期次石英的包裹体类型、数量和大小等均存在一定差异。成矿期石英中发育有大量的Type I水溶液包裹体和少量的Type II  $CO_2$ 包裹体,主要呈不规则状、负晶形、菱形、椭圆形,大小在3~15 mm左右,气液比主要以25%~40%为主,以Type  $I_a$ 富液相包裹体为主,占该期包裹体总数的92%。其中,原生包裹体占30%,其余包裹体多呈线形排列,属次生或假次生包裹体,并发现有Type  $I_a$ 与Type  $I_b$ 包裹体,Type  $I_a$ 与Type II  $CO_2$ 包裹体共存的流体包裹体组合(图6d)。而成矿后石英中,仅发育Type  $I_a$ 富液相包裹体,大小为10~35 mm不等,多呈不规则状或负晶形(图6e—f),气液比为12%~50%。

## 4.2 显微测温结果

本次对成矿期和成矿后这两期石英的原生包裹体进行显微测温,共获得599个有效均一温度数据和452个盐度数据,测温结果如表1所示,不同期次的均一温度及盐度的统计结果如图7所示。

### 4.2.1 成矿期石英

选取18件含矿石英样品进行测试,共测得446组有效数据,以Type I包裹体最为发育,占本期包裹体总数的99%,Type II含 $CO_2$ 包裹体仅1%。

Type I包裹体:Type  $I_a$ 富液相包裹体的冷冻温度为-38.3~-50.8℃,冰的最终融化温度范围为-0.4~-8.2℃,盐度0.35%~11.94%  $NaCl_{eqv}$ (图7b)(Bodnar, 1993),最终均一为液相,均一温度变化较大,在219.5~412.0℃范围内呈明显的正态分布(图7a);测得27个Type  $I_b$ 富气相包裹体最后均一至气相,均一温度为305.5~420.2℃。

Type II  $CO_2$ 包裹体:包裹体冷冻温度为-99.8~-101.2℃,固相 $CO_2$ 融化温度为-59.4~-59.9℃,笼合物的融化温度为-8.2~-4.5℃。 $CO_2$ 相部分均一为液相,部分均一温度为4.2~16.4℃,升温过程中最终完全均一为水溶液相,均一温度为288.8~302.1℃。

### 4.2.2 成矿后石英

共测试7件石英样品,获得153组显微测温数据。该阶段包裹体极为发育,全部为Type  $I_a$ 富液相包裹体。比成矿期石英中的包裹体数量多、直径大。

包裹体冻结温度为-36.1~-46.5℃,冰的初熔温度为-22.7~-21.0℃,冰点温度介于-0.4~-4.2℃,盐度为0.71%~6.74%  $NaCl_{eqv}$ (表1,图7d)。均一温度变化范围为158.2~308.5℃,集中于180~

表1 湘中杏枫山金矿床不同期次石英中流体包裹体的显微测温结果

Table 1 Microthermometric data of the fluid inclusions in different-stage quartz in the Xingfengshan gold deposit, central Hunan

成矿期次	类型	均一温度 $t_h$ (°C) (测定数)	冰点 $t_{ice}$ (°C)	$CO_2$ 包裹体温度 (°C)			盐度 (% $NaCl_{eqv}$ ) (测定数)	均一方式
				$t_{m(CO_2)}$	$t_{m(ela)}$	$t_{hc}$		
成矿 晚阶段	$I_a$	219.5~412.0(417)	-0.4~-8.2	—	—	—	0.35~11.94(308)	液相
	$I_b$	305.5~420.2(27)	-1.0~-5.2	—	—	—	1.57~8.14(15)	气相
	II	288.8~302.1(2)	—	-59.4~-59.9	-8.2~-4.5	4.2~16.4	—	液相
成矿后	$I_a$	158.2~308.5(153)	-0.4~-4.2	—	—	—	0.71~6.74(126)	液相

注: $t_h$ —均一温度; $t_{m(ice)}$ —冰点温度; $t_{m(CO_2)}$ — $CO_2$ 初熔温度; $t_{m(ela)}$ — $CO_2$ 笼合物融化温度; $t_{hc}$ — $CO_2$ 部分均一温度。

note: $t_h$ —Total homogenization temperature, inclusions marked (C) homogenize to carbonic phase, non-marked ones homogenize to liquid phase; $t_{m(ice)}$ —Final melting temperature of ice; $t_{m(CO_2)}$ —Eutectic temperature of  $CO_2$ ;  $t_{m(ela)}$ —Melting temperature of  $CO_2$  clathrates;  $t_{hc}$ —Partial homogenization temperature of  $CO_2$ , inclusions marked (V) homogenize to gas phase, non-marked homogenize to liquid phase.

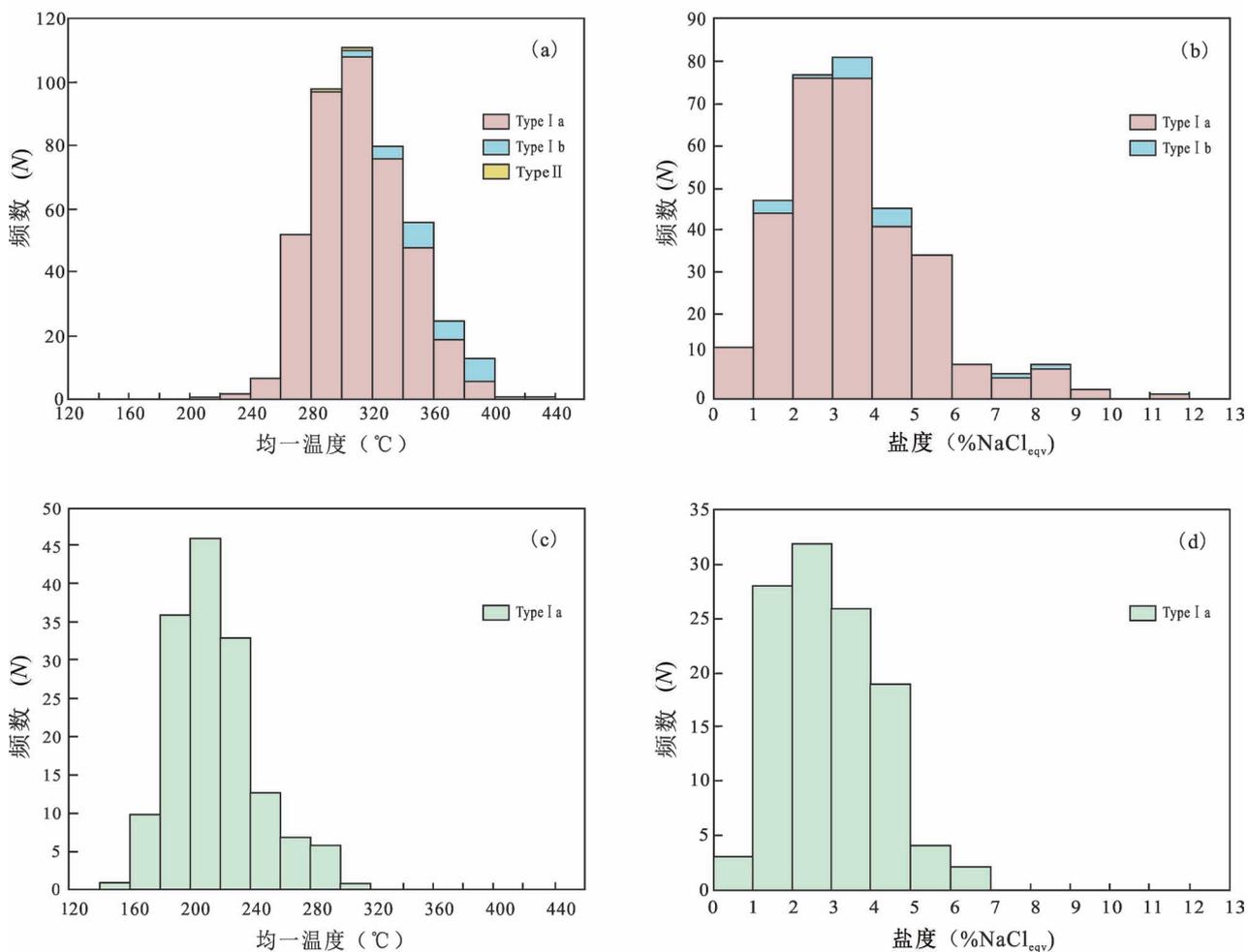


图7 湘中杏枫山金矿不同期次石英中的流体包裹体均一温度和盐度直方图:(a)成矿期均一温度直方图;(b)成矿期盐度直方图;(c)成矿后均一温度直方图;(d)成矿后盐度直方图

Fig. 7 Histograms of homogenization temperature and salinities of fluid inclusions hosted in different-stage quartz of the Kingfengshan gold deposit, central Hunan: (a) homogenization temperature in the late mineralization stage; (b) salinities in the late mineralization stage; (c) homogenization temperature in the post-ore stage; (d) salinities in the post-ore stage

240℃(图7c),最终均一为液相。

#### 4.3 激光拉曼成分分析

本次共选取8件石英样品进行测试,其中,成矿期的石英样品6件,成矿后石英样品2件。成矿期石英流体包裹体中气相成分主要为 $H_2O$ (特征峰值在 $3310\sim 3610\text{ cm}^{-1}$ 之间),另可见 $CO_2$ 特征峰值( $1282\text{ cm}^{-1}$ 、 $1386\text{ cm}^{-1}$ )、 $CH_4$ ( $2914\text{ cm}^{-1}$ )和 $N_2$ ( $2327\text{ cm}^{-1}$ )的特征谱峰(图8a、b、c)。因此,成矿期石英流体包裹体中气相成分除了 $H_2O$ ,还有少量 $CH_4$ 、 $CO_2$ 和 $N_2$ 。成矿后石英中流体包裹体的激光拉曼光谱中未见有 $CH_4$ 、 $CO_2$ 和 $N_2$ 的特征峰,其气相成分仅为 $H_2O$ (图8d)。

## 5 分析与讨论

### 5.1 成矿温度、成矿压力及深度

包裹体岩相学及测温结果表明,成矿期石英中发育大量 $I_a$ 富液相包裹体,偶见 $Type I_a$ 型与 $I_b$ 型、 $I_a$ 型与 $II$ 型包裹体同时捕获,测得其均一温度大体相近,表明了成矿流体存在沸腾现象(图6c)。由于体系内成矿流体处于沸腾状态时流体包裹体的均一温度即为捕获温度,无需压力校正,因此,杏枫山金矿床的成矿温度大约为 $420^\circ\text{C}$ 。

利用三相包裹体中 $CO_2$ 的部分均一温度与密度在 $CO_2-H_2O$ 体系的 $V-X$ 图解法(Diamond, 2001),可计算出杏枫山金矿成矿流体中的 $X_{CO_2}$ 含

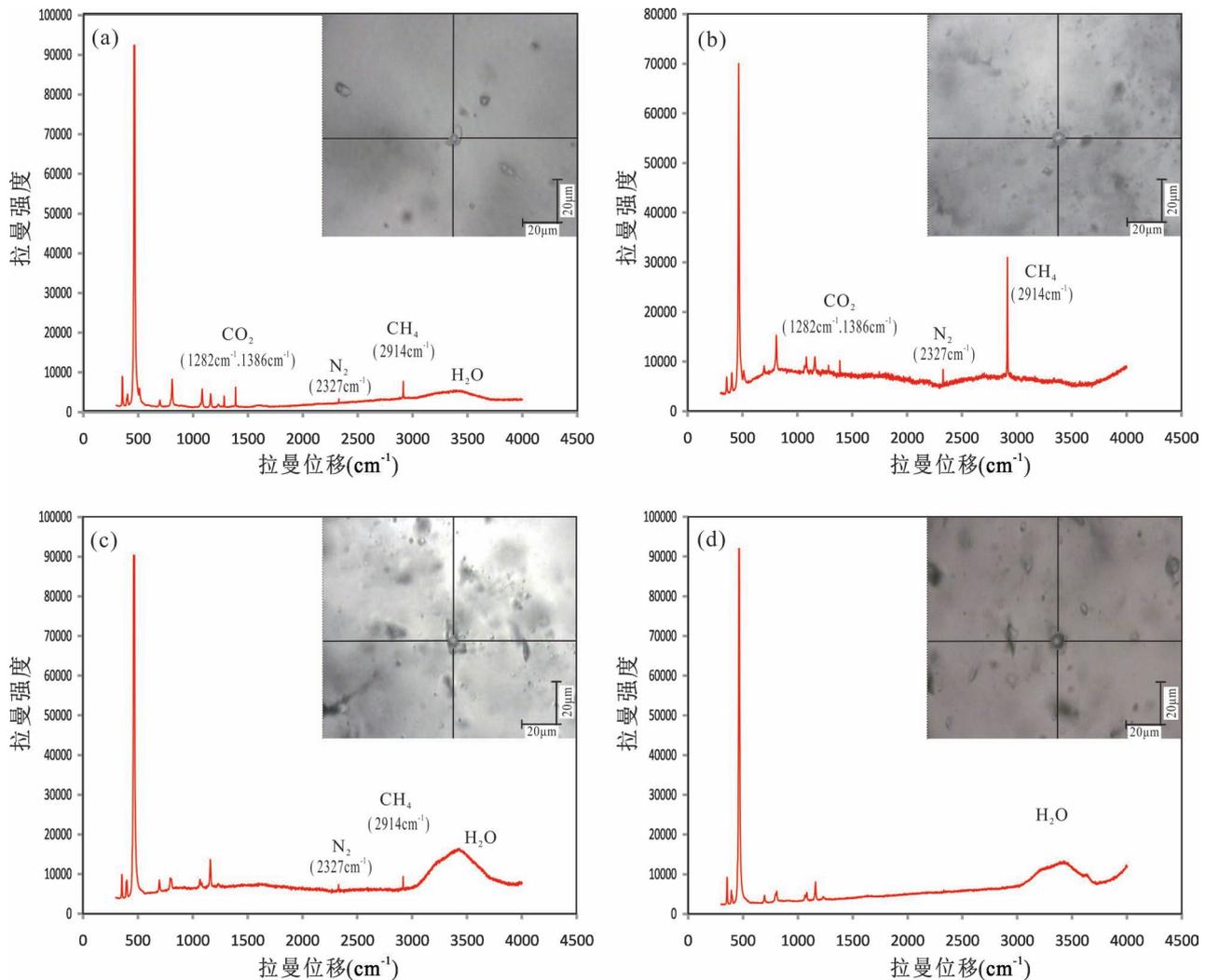


图8 湘中杏枫山金矿不同期次石英中流体包裹体激光拉曼分析结果:(a)、(b)、(c)成矿期石英中的流体包裹体;(d)成矿后石英中的流体包裹体

Fig. 8 Representative Raman spectra of fluid inclusions hosted in different-stage quartz of the Xingfengshan gold deposit, central Hunan: (a), (b), (c) fluid inclusions hosted in auriferous quartz; (d) fluid inclusions hosted in barren quartz

量约为0.08。结合所测得的均一温度和盐度范围,根据Frantz等(1992)提出的 $H_2O-CO_2-NaCl$ 体系特征曲线,求得该矿成矿时的压力为40~80 MPa(最低捕获压力)。由于杏枫山金矿床矿体产状较陡( $35^\circ \sim 62^\circ$ ),可假设其矿脉形成时主要承受静水压力,以10 MPa/km的静水压力进行计算,可得出其成矿深度大约为4~8 km。由于含盐水溶液中 $CO_2$ 含量与压力呈显著的正相关性(Messabeh et al., 2016),因此经计算所得的流体中的 $CO_2$ 含量与成矿压力范围相符,显示出杏枫山金矿床的成矿温度高,但成矿压力低、深度浅,这与造山型金矿的成矿条件不相称。

## 5.2 成矿流体的特征及其演化

包裹体岩相学研究表明,成矿期流体包裹体以水溶液为主,有少量 $CO_2$ 三相包裹体,成矿流体应为 $CO_2$ 含量较低的流体,这与其地质特征(成矿期碳酸盐化不发育)及激光拉曼分析结果一致。包裹体测温显示成矿期石英中流体包裹体的初熔温度大多数低于 $-21.2^\circ C$ ,导致这一结果可能是由于溶液中存在一定含量的KCl。固相 $CO_2$ 熔化温度为 $-59.4 \sim -59.9^\circ C$ ,略低于纯 $CO_2$ 的三相点,表明气相 $CO_2$ 组分中存在少量杂质,激光拉曼分析结果进一步证实了这些杂质气体为 $CH_4$ 和 $N_2$ 。 $CH_4$ 的存在暗示了成矿流体处于还原环境,有利于金的迁移,这与矿区内大量发育毒砂、磁黄铁矿以及含砷黄铁矿

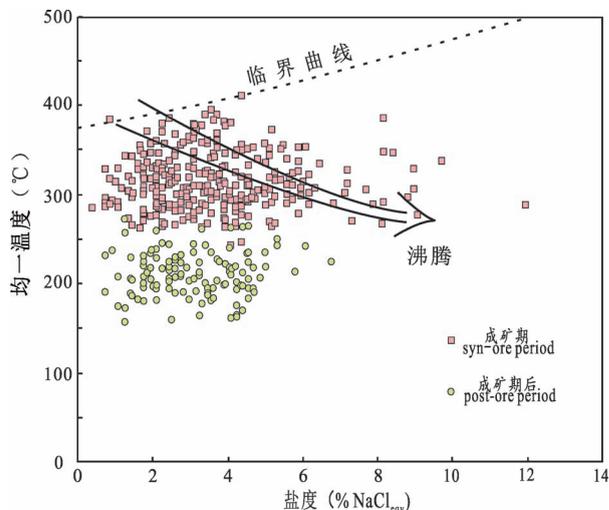


图9 不同期次石英中流体包裹体  
均一温度—盐度散点图

Fig. 9 Diagrams of homogenization temperatures versus salinities of fluid inclusions in different stages

等硫化物的地质事实相吻合。该阶段石英中流体的均一温度集中于 280 ~ 380℃, 盐度在 1% ~ 6%  $\text{NaCl}_{\text{eqv}}$  和 7% ~ 10%  $\text{NaCl}_{\text{eqv}}$  之间呈峰值变化, 利用刘斌 (2011) 的计算方法, 可计算出成矿流体的 pH 值为 5.6, Eh 值为 -0.203, 为偏酸性还原流体; 而成矿后石英流体包裹体的均一温度集中在 180 ~ 240℃ 区域, 盐度集中在 1% ~ 6%  $\text{NaCl}_{\text{eqv}}$ , pH 值为 6.2, Eh 值为 0.191, 明显不同于成矿流体。

综上, 杏枫山金矿床的成矿流体应为中高温、贫  $\text{CO}_2$  的还原性  $\text{H}_2\text{O}$ — $\text{NaCl}$  ( $\pm\text{KCl}$ )— $\text{CO}_2$ — $\text{CH}_4$ — $\text{N}_2$  系统, 且在成矿过程中经历了降温、pH 升高和氧化的过程。

### 5.3 金的沉淀机制

根据石英中流体包裹体均一温度和盐度的散点图 (图 9), 不难发现该区成矿流体的盐度随成矿温度的降低而略微升高, 表明成矿流体在成矿过程中发生了沸腾作用。

在产于变质地体中的石英脉型金矿床中, Au 主要以氯和硫的络合物这两种形式迁移 (谢广东, 1994; 黄诚等, 2013; 张德会, 2015)。当成矿温度较高 ( $>350^\circ\text{C}$ ), 在氧化、极酸性条件下,  $\text{AuCl}_2^-$  络合物占据主导地位; 中性—碱性热液中, Au

(HS) $_2^-$  是最主要的金络合物的存在形式; 而酸性条件下, Au 以  $\text{AuHS}$  络合物为主要迁移形式 (Gibert et al., 1998; 张德会, 2015)。上述结果显示, 杏枫山金矿床的成矿流体处于中高温、偏酸性的还原环境, 成矿体系中 Au 应主要以  $\text{AuHS}$  络合物的形式进行迁移。由于杏枫山金矿床的成矿温度较高, 这种高温条件下抑制了成矿流体中  $\text{AuHS}$  络合物的活性 (图 10a), 从而导致该矿中金的品位较低。

成矿早阶段, 高温热液与围岩相互作用下形成了早期毒砂, 硫化物的形成导致成矿体系中硫逸度降低。由于  $\text{AuHS}$  络合物在一定的温压范围内对温度和硫逸度的变化有较宽的承受区域 (图 10b), 使得这个阶段金并没有伴随毒砂等硫化物的沉淀而大量堆积。而在成矿晚阶段, 由于北西向断裂的发生使得整个成矿体系由封闭转变为开放, 瞬间的压力释放使得流体发生减压沸腾, 沸腾作用往往被视为浅部地壳矿石发生沉淀最有效的机制之一 (Wilkinson, 2001; Herrich, 2007)。沸腾作用造成热量散失而引起流体温度和压力降低, 大量充当缓冲剂作用的挥发份气体 (如  $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$ 、 $\text{H}_2\text{S}$  等) 从流体中逸出, 溶液变得极为敏感, 整个成矿体系中氧逸度和 pH 值都发生急剧改变, 最终造成  $\text{AuHS}$  络合物的溶解度呈数量级降低 (图 10c), 从而导致金发生沉淀、富集。

因此, 在杏枫山整个成矿体系中, 流体发生减压沸腾而导致的氧逸度、pH 值改变, 是导致其金发生沉淀的关键性因素。

### 5.4 矿床成因的探讨

由于湘中金矿床基本上都是赋存于前寒武纪浅

表 2 湘中金矿床与湘西典型金矿床流体包裹体均一温度与盐度对比

Table 2 Comparison of homogenization temperature and salinities of fluid inclusions between typical gold deposits in central—western Hunan

成矿带	金矿床	均一温度 (°C)		盐度 (% $\text{NaCl}_{\text{eqv}}$ )		数据来源
		范围	平均值	范围	平均值	
湘西雪峰山成矿带	阳湾团	165~221	195	2.10~4.40	3.80	彭建堂等, 1999
	沃溪	131~252	—	0.88~6.88	—	Zhu Yanan et al., 2015
	漠滨	120~222	171.2	1.5~5.0	2.78	余大龙, 1990
	淘金冲	130~230	—	3.0~9.0	—	阎明等, 1994
	平茶	155~223	186	2.25~4.40	3.42	彭建堂等, 1999
湘中成矿带	龙山	140~270	—	2.0~13.0	—	梁华英, 1991
	包金山	199~392	—	2.31~13.10	—	鞠培姣等, 2016
	古台山	168~328	221	0.82~14.0	—	李伟等, 2016
	铲子坪	157~402	259	2.24~13.72	—	曹亮等, 2015
	杏枫山	219~420	312	0.35~11.94	3.54	本文

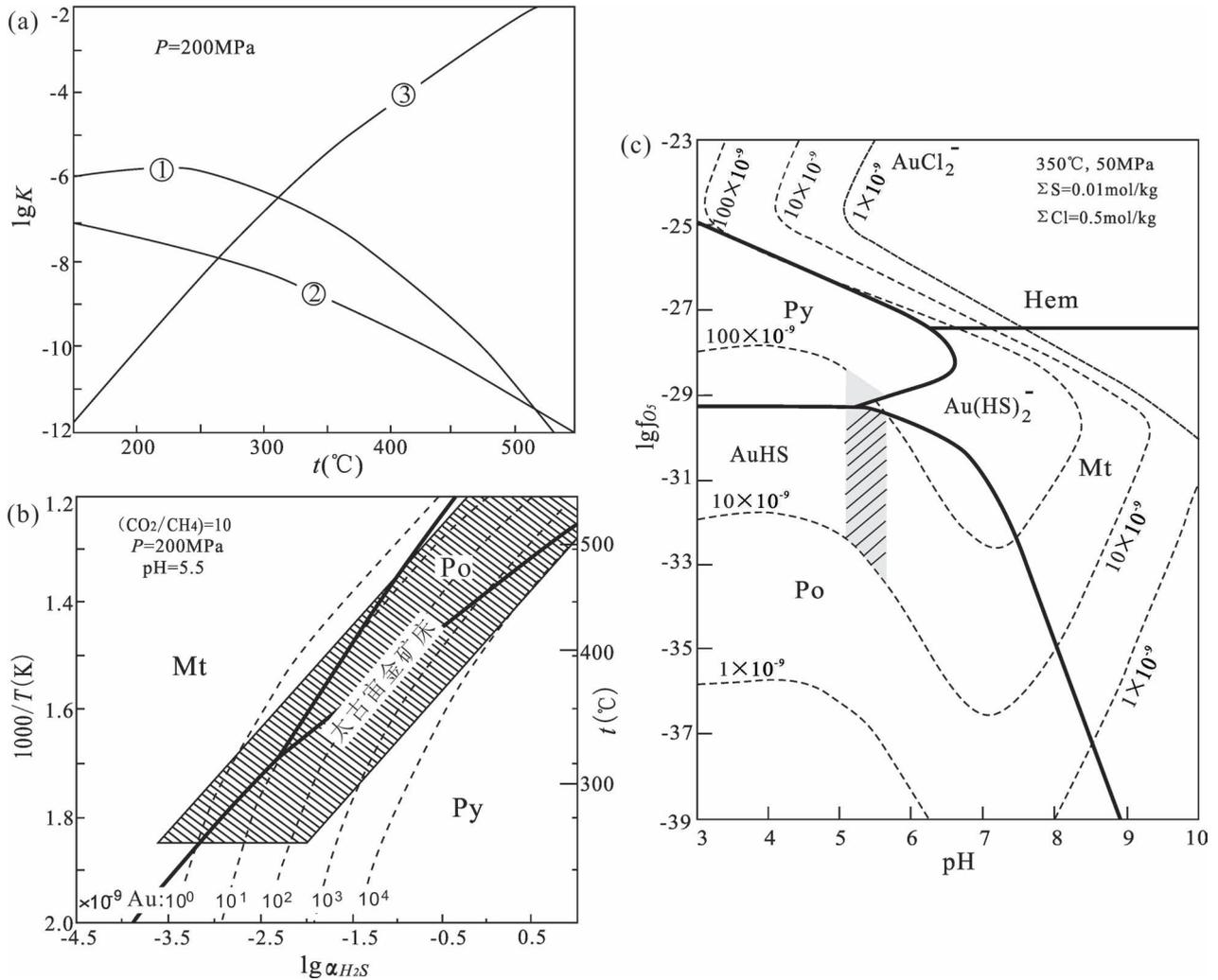


图 10 不同物理化学条件对 Au 溶解度及 Au 络合物稳定性图解

[图(a)、(b)据 Mikucki,1998;图(c)据 Gibert et al., 1998]

Fig. 10 Diagram showing physicochemical conditions controlling the gold solubility and stability of gold complex

[Fig. (a), (b) modified from Mikucki, 1998; Fig. (c) modified from Gibert et al., 1998]

K 为平衡常数,其方程式为:反应①: $Au(s) + H_2S = Au(HS)^0 + (1/2)H_2(g)$ ;反应②: $Au(s) + 2H_2S = Au(HS)_2^- + H^+ + (1/2)H_2(g)$ ;

反应③: $Au(s) + 2Cl^- + H^+ = AuCl_2^- + (1/2)H_2(g)$ 。Po—磁黄铁矿;Py—黄铁矿;Mt—磁铁矿;Hem—赤铁矿

K in Fig. 10a represent equilibrium constant, reaction equations of ①, ②, ③ in Fig. 10a are:  $Au(s) + H_2S = Au(HS)^0 + (1/2)H_2(g)$ ;  $Au(s) + 2H_2S = Au(HS)_2^- + H^+ + (1/2)H_2(g)$ ;  $Au(s) + 2Cl^- + H^+ = AuCl_2^- + (1/2)H_2(g)$ . Po— pyrrhotite; Py— pyrite; Mt— magnetite; Hem— hematite

变质岩中,因此,近年来,往往被人们视为造山型金矿床(李伟等,2016; Xu Deru et al., 2017)。但杏枫山金矿床的一些地质、地球化学特征明显有别于典型的造山型金矿床:

(1) 造山型金矿床的成矿热液通常以中低温、高  $CO_2$  含量为特征(Ridley and Diamond., 2000; 陈衍景等,2007),而杏枫山金矿床成矿温度高,而流体中  $CO_2$  含量低,明显与之不符。

(2) 杏枫山金矿床属于低压、高温的成矿体系,

且整个湘中金成矿带均处于湘中盆地的拉伸环境,这与造山型金矿形成的构造环境和成矿条件相悖。

(3) 该矿的成矿期碳酸盐化并不发育,然而在成矿过程中广泛发育碳酸盐化蚀变是造山型金矿的典型特征。

另外,将湘中金矿与湘西雪峰山一带造山型金矿进行了对比,也发现两者差别明显:雪峰山一带金矿的均一温度较低,一般低于  $200^\circ C$ ,成矿流体盐度

普遍偏低且变化范围很窄,但流体中  $\text{CO}_2$  含量高;而湘中白马山—紫云山一带金矿的成矿温度显著偏高,盐度变化范围很大,且很少见含  $\text{CO}_2$  的包裹体(表2),这也说明湘中金矿带的金矿床,并非造山型金矿床。

笔者将杏枫山金矿床,与国内外不同类型的金矿进行对比以后发现,该矿的地质特征与北美科迪列拉 Alaska—Yukon 一带金矿床非常类似。Groves 等(1998,2003)和 Goldfarb 等(2005)将后者称之为“与侵入岩有关的金矿体系”(Intrusion-Related Gold Systems, IRGS),这是一类区别于造山型金矿床,与区域上长英质岩浆活动有密切成因联系的金矿床总称(Lang et al., 2000; Lang and Baker, 2001; 谭运金, 2002; 胡朋等, 2006)。目前人们对这类金矿床的地质特征进行了较好的归纳总结(Thompson et al., 1999; Baker and Lang, 2001; Marsh et al., 2003; Goldfarb et al., 2004; Baker et al., 2006; Terry et al., 2007; Daniel and Kyser, 2011),但国内对于这类矿床的研究尚处于起步阶段。

杏枫山金矿床与 IRGS 型金矿相似的主要依据有:

(1) 杏枫山矿区的含金石英脉呈席状(sheeted-vein)产出,席状脉体被视为 IRGS 型金矿的判别性标志(Hart, 2006, 2007)。

(2) IRGS 型金矿品位较低,通常低于  $4 \times 10^{-6}$ ,杏枫山矿区金的品位为  $2 \times 10^{-6} \sim 3 \times 10^{-6}$ (罗鸣皋, 1993),通常小于  $2.5 \times 10^{-6}$ (陈武等, 2013)。

(3) IRGS 型金矿床中硫化物含量较低( $<5\%$ ),为一套具还原性特征的矿物组合,以毒砂、磁黄铁矿、黄铁矿为主,缺乏磁铁矿和赤铁矿,杏枫山矿区主要以毒砂、磁黄铁矿等还原性矿物组合为主,并有大量热液成因的钛铁矿出现,表现出相对还原的特征。

(4) IRGS 型金矿的成矿元素组合为  $\text{Au}+\text{Bi}+\text{W}+\text{As}+\text{Mo}+\text{Te} \pm \text{Sb}$  等亲石元素组合,杏枫山矿区已发现的毒砂、白钨矿、钛铁矿、辉钼矿等矿物,表明该矿床的成矿元素组合为一套亲石元素组合( $\text{Au}+\text{W}+\text{As}+\text{Mo}+\text{Ti}$ )等。

(5) IRGS 型金矿床中围岩蚀变范围窄,且蚀变微弱,席状石英脉体两侧往往有很窄的黑云母边,这种黑云母边在杏枫山矿区也非常明显,尤其是长石—绿泥石化蚀变晕,表现出典型岩浆热液成因的蚀变特征。

(6) 成矿流体为中高温、贫  $\text{CO}_2$  的还原性流体,

成矿条件属高温低压体系。另外,我们在该矿区确实找到了长英质岩浆参与成矿的证据,在矿区首次发现了大量的矽卡岩及高品位的矽卡岩型钨矿(彭建堂, 2019)。

因此,杏枫山金矿的地质特征与 IRGS 型金矿非常类似,其成矿与还原性长英质岩浆岩相关。

## 6 结论

(1) 杏枫山矿区石英脉体非常发育,含金石英脉呈 NW 向展布,成矿后的石英脉为 NE 向展布。

(2) 成矿期石英中的流体包裹体以富液相包裹体为主,含少数富气相包裹体和  $\text{CO}_2$  包裹体,均一温度在  $220 \sim 420^\circ\text{C}$  之间,通常高于  $280^\circ\text{C}$ ,盐度变化较大,为  $0.35\% \sim 11.94\%$   $\text{NaCl}_{\text{eqv}}$ 。成矿后石英中的包裹体为富液相包裹体,其均一温度为  $158.2 \sim 308.5^\circ\text{C}$ ,盐度为  $0.71\% \sim 6.74\%$   $\text{NaCl}_{\text{eqv}}$ ,均明显小于成矿期石英。

(3) 该矿床形成于一种高温、低压体系,其成矿流体具有中高温、贫  $\text{CO}_2$  的还原性特征;成矿流体的减压沸腾引发的 pH 和 Eh 的改变,是导致该区金发生沉淀、富集的关键因素。

(4) 杏枫山金矿的地质特征及成矿流体特征与 IRGS 型金矿类似,是与长英质侵入岩有关的金矿床。

**致谢:** 野外工作得到了湖南金杏矿业有限公司副总经理刘鹏程,地测部门的刘宏钦部长、刘佳工程师、肖鸿杰工程师等全体工作人员的支持与帮助;流体包裹体测试得到了中南大学龙永珍讲师的大力帮助;激光拉曼测试得到了中科院地球化学研究所秦朝建高级工程师的指导与帮助,在此一并致以衷心地感谢!

## 注 释 / Note

① 湖南省地质调查局. 2014. 湖南省区域地质[R].

## 参 考 文 献 / References

(The literature whose publishing year followed by a “&” is in Chinese with English abstract; The literature whose publishing year followed by a “#” is in Chinese without English abstract)

- 鲍振襄. 1994. 湘中白马山—龙山—醴陵锦金矿带矿床地质特征、成矿作用及成因. 黄金科学技术, 2(4): 29~35.
- 曹亮, 段其发, 彭三国, 周云. 2015. 雪峰山铲子坪金矿床流体包裹体特征及地质意义. 地质与勘探, 51(2): 212~224.
- 陈武, 张寿庭, 伦生平. 2013. 湖南省隆回县杏枫山金矿床地质特征及成矿模式探讨. 黄金, 34(2): 16~20.
- 陈武. 2013. 湖南省隆回县金山里地区金矿成矿规律与找矿预测研究. 导师: 张寿庭. 北京: 中国地质大学硕士学位论文: 1~82.

- 陈衍景,倪培,范宏瑞, Pirajno F, 赖勇, 苏文超, 张辉. 2007. 不同类型热液金矿系统的流体包裹体特征. 岩石学报, 23(9): 2085~2108.
- 陈佑纬, 毕献武, 付山岭, 董少花. 2016. 湘中地区龙山金锑矿床酸性岩脉 U-Pb 年代学和 Hf 同位素特征及其地质意义. 岩石学报, 32(11): 3469~3488.
- 陈佑纬, 高剑峰, 高龙刚, 汪殿钟. 2019. 湘中杏枫山金矿床毒砂矿物化学与成矿. 见: 第九届全国成矿理论与找矿方法学术讨论会论文集: 115.
- 付山岭, 胡瑞忠, 陈佑纬, 骆金诚. 2016. 湘中龙山大型金锑矿床成矿时代研究—黄铁矿 Re-Os 和锆石 U-Th/H 定年. 岩石学报, 32(11): 3507~3517.
- 黄诚, 张德会. 2013. 热液金矿成矿元素运移和沉淀机理研究综述. 地质科技情报, 32(4): 162~170.
- 胡朋, 聂凤军, 江思宏. 2006. 与侵入岩有关金矿床的研究现状, 存在问题及在中国的前景. 地质论评, 52(4): 539~549.
- 胡瑞忠, 付山岭, 肖加飞. 2016. 华南大规模低温成矿的主要科学问题. 岩石学报, 32(11): 3239~3251.
- 鞠培姣, 赖健清, 莫青云, 石坚, 谭辉跃, 陶诗龙. 2016. 湖南双峰县包金山金矿成矿流体与矿床成因. 中国有色金属学报, 26(12): 2625~2639.
- 李恒新. 1995. 湖南省花岗岩成因类型及其与金矿的关系. 贵金属地质, 4(4): 283~293.
- 李华芹, 王登红, 陈富文, 梅玉萍, 蔡红. 2008. 湖南雪峰山地区铲子坪和大坪金矿成矿作用年代学研究. 地质学报, 82(7): 900~905.
- 李惠纯, 尹显石, 成晟鑫, 李启兴, 江灿, 蔡兰兰, 孙金辉, 蒋蓓. 2016. 湖南杏枫山金矿地质特征及找矿方向. 矿产勘查, 7(42): 85~91.
- 李己华, 吴继承, 李永光. 2007. 湖南白马山—龙山金锑矿带控矿因素与成矿预测. 资源环境与工程, (S1): 33~36.
- 李伟, 谢桂青, 张志远, 张兴康. 2016. 流体包裹体和 C—H—O 同位素对湘中古台山金矿床成因制约. 岩石学报, 32(11): 3489~3506.
- 李智, 颜丹平, 陈文, 李林, 陈峰. 2019. 湘中盆地龙山穹窿构造样式及其成因机制. 地质学报, 93(11): 2742~2758.
- 梁栋, 戴建斌. 2007. 湖南大新金矿床地质特征及控矿因素分析. 黄金科学技术, 15(2): 1~8.
- 梁华英. 1991. 龙山金锑矿床成矿流体地球化学和矿床成因研究. 地球化学, 12(4): 342~350.
- 刘斌. 2011. 简单体系水溶液包裹体 pH 和 Eh 的计算. 岩石学报, 27(5): 1533~1542.
- 刘佳, 刘莎, 艾国梁, 肖鸿杰. 2018. 湘中杏枫山金矿床毒砂的矿物学研究. 矿产勘查, 9(59): 80~91.
- 伦生平, 谢亘. 2012. 湖南省隆回县包金山金矿成矿地质特征及成矿规律浅析. 四川地质学报, 32(S1): 33~39.
- 罗鸣皋. 1993. 湖南杏枫山金矿地质特征. 黄金地质科技, (2): 33~36.
- 罗献林. 1991. 湖南金矿床的成矿特征与成因类型. 桂林冶金地质学院学报, 11(1): 23~33.
- 骆学全. 1996. 湖南铲子坪金矿的矿物标型及其地质意义. 岩石矿物学杂志, 15(2): 169~179.
- 马东升, 潘家永, 解庆林, 何江. 2002. 湘中锑(金)矿床成矿物质来源—I. 微量元素及其实验地球化学证据. 矿床地质, 21(3): 366~376.
- 牛贺才, 马东升. 1991. 湘西南型金矿床流体包裹体的研究. 矿物学报, 11(4): 386~394.
- 彭建堂, 戴塔根. 1999. 湘西南金矿床成矿流体地球化学研究. 矿床地质, 18(1): 73~81.
- 彭建堂, 胡阿香, 肖静芸, 郭宁, 谢青. 2017. 湖南变质岩地体中两类金矿的成矿作用研究. 见: 第八届全国成矿理论与找矿方法学术讨论会论文集: 149.
- 彭建堂. 2019. 湖南杏枫山金矿区首次发现高品位的钨矿体. 地质论评, 65(3): 664~670.
- 孙际茂, 娄亚利, 高利军, 鲍振襄. 2007. 湘中前寒武系金矿地质及相关成矿问题探讨. 地质与资源, 16(3): 189~195.
- 孙骥, 周超, 陆文, 郭爱民, 肖荣, 魏含涛, 谭仕敏, 贾朋远. 2020. 湖南古台山金锑矿床成矿流体 He—Ar, Sr 同位素地球化学及深部找矿意义. 地球学报, 1~13.
- 谭运金. 2002. 与侵入岩有关的金矿体系. 矿产与地质, 16(3): 129~135.
- 王建, 李三忠, 金宠, 王岳军, 张国伟, 刘丽萍, 刘鑫. 2010. 湘中地区穹窿构造: 褶皱叠加期次和成因. 大地构造与成矿学, 34(2): 159~165.
- 吴继承, 王金荣, 欧建, 汪双双, 杨淑芬, 李己华. 2007. 湖南白马山—龙山金矿带包裹体—同位素地球化学及成矿流体特征. 矿产与地质, 21(6): 69~74.
- 谢广东. 1994. Au 的迁移形式及沉淀机制研究的某些进展. 现代地质, 8(3): 357~363.
- 阎明, 马东升, 刘英俊. 1994. 淘金冲金矿成矿流体地球化学和矿床成因研究. 矿床地质, 13(2): 156~162.
- 颜丹平, 邱亮, 陈峰, 李林, 赵磊, 杨文心, 张翼西. 2017. 华南地块雪峰山中生代板内造山带构造样式及其形成机制. 地学前缘, 25(1): 1~13.
- 余大龙. 1990. 漠滨金矿包裹体研究. 地球化学, (1): 72~80.
- 张德会. 2015. 成矿作用地球化学. 北京: 地质出版社: 1~481.
- 钟东球. 1990. 湖南金矿床类型和分布规律. 湖南地质, 9(1): 9~14.
- Baker T, Ebert S, Rombach C, Ryan C G. 2006. Chemical compositions of fluid inclusions in intrusion-related gold systems, Alaska and Yukon, using PIXE microanalysis. Econ. Geol., 101: 311~327.
- Baker T, Lang J R. 2001. Fluid inclusion characteristics of intrusion-related gold mineralization Tombstone—Tungsten magmatic belt, Yukon Territory, Canada. Miner. Deposita, 36: 563~582.
- Bao Zhenxiang. 1994. The geological features, Metallogensis of Baimashan—Longshan—Liling Gold—Stibium Belt and in central Hunan. Gold Science and Technology, 2(4): 29~35.
- Bodnar R J. 1993. Revised equation and table for determining the freezing point depression of H<sub>2</sub>O—NaCl solutions. Geochim. Cosmochim. Acta, 57: 683~684.
- Brown P E. 1989. FLINCOR: A microcomputer program for the reduction and investigation of fluid inclusion data. American Mineralogist, 74(11/12): 1390~1393.
- Brown P E, Lamb W M. 1989. P—V—T properties of fluids in the system H<sub>2</sub>O±CO<sub>2</sub>±NaCl: New graphical presentation and implications for fluid inclusion studies. Geochimica et Cosmochimica Acta, 53: 1209~1221.
- Cao Liang, Duan Qifa, Peng Sanguo, Zhou Yun. 2015. Characteristics of fluid inclusions in the Chanziping Gold Deposit in western Hunan Province and their geological implications. Geology and Prospecting, 51(2): 212~224.
- Chen Wu. 2013. Research on Metallogenic Regularity and Prediction of Gold Deposits of Jinshanli Area in Longhui County, Hunan Province. Dissertation Supervisor: Prof. Zhang Shouting. Beijing: master Thesis of China University of Geosciences: 1~82.
- Chen Wu, Zhang Shouting, Lun Shengping. 2013. Geological characteristics and metallogenic model of Xingfengshan gold deposit in Longhui County. Gold, 34(2): 16~20.
- Chen Yanjing, Ni Pei, Fan Hongrui, Pirajno F, Lai Yong, Su Wenchao,

- Zhang Hui. 2007&. Diagnostic fluid inclusions of different types hydrothermal gold deposits. *Acta Petrologica Sinica*, 23(9) : 2085 ~ 2108.
- Chen Youwei, Bi Xianwu, Fu Shanling, Dong Shaohua. 2016&. Zircon U-Pb dating and Hf isotope of the felsic dykes in the Longshan Au—Sb deposit in central Hunan Province and their geological significance. *Acta Petrologica Sinica*, 32(11) : 3469 ~ 3488.
- Chen Youwei, Gao Jianfeng, Gao Longgang, Wang Dianzhong. 2019#. Chemical mineralogy and metallogenic of arsenopyrite in Xingfengshan gold deposit, Hunan. In: Abstract of papers of the 9th National Conference on Metallogenic Theory and Prospecting Methods; 115.
- Daniel J, Kyser K K. 2011. A fluid inclusion and isotopic study of an intrusion-related gold deposit (IRGS) setting in the 380Ma South Mountain Batholith, Nova Scotia, Canada; Evidence for multiple fluid reservoirs. *Miner Deposita*, 46:337 ~ 367.
- Diamond L W. 2001. Review of the systematics of CO<sub>2</sub>—H<sub>2</sub>O fluid inclusions. *Lithos*, 55:69 ~ 99.
- Frantz J D, Popp R K, Hoering T C. 1992. The compositional limits of fluid immiscibility in the system H<sub>2</sub>O—NaCl—CO<sub>2</sub> as determined with the use of synthetic fluid inclusions in conjunction with mass spectrometry. *Chem. Geol.*, 69:235 ~ 244.
- Fu Shanling, Hu Ruizhong, Chen Youwei, Luo Jincheng. 2016&. Chronology of the Longshan Au—Sb deposit in central Hunan Province: Constraints from pyrite Re-Os and zircon U—Th/He isotopic dating. *Acta Petrologica Sinica*, 32(11) : 3507 ~ 3517.
- Gibert F, Pascal M L, Pichavant M. 1998. Gold solubility and speciation in hydrothermal solutions; experimental study of the stability of hydrosulphide complex of gold (AuHS) at 350 to 450 °C and 500 bars. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 62:2931 ~ 2947.
- Goldfarb R J, Ayuso R, Miller M L, Ebert S W, Marsh E E, Petsel S A, Miller L D, Bradley D, Johnson C, McClelland W. 2004. The Late Cretaceous Donlin Creek Gold Deposit, southwestern Alaska; Controls on epizonal ore formation. *Economic Geology*, 99: 643 ~ 671.
- Goldfarb R J, Baker T, Dube B, Groves D I, Hart C J R. 2005. Distribution, character, and genesis of gold deposits in metamorphic terranes. *Economic Geology*, 100:407 ~ 450.
- Groves D I, Goldfarb R J, Gebre-Mariam M, Hagemann S G, Robert F. 1998. Orogenic gold deposits; A proposed classification in the context of their crustal distribution and relationship to other gold deposit types. *Ore Geology Reviews*, 13:7 ~ 27.
- Groves D I, Goldfarb R J, Robert F, Hart C J R. 2003. Gold deposits in metamorphic belts: Overview of current understanding, Outstanding problems, future research and exploration significance. *Economic Geology*, 98:1 ~ 29.
- Hart C J R. 2006. Classifying, distinguishing and exploring for intrusion-related gold systems. *Gangue*, (87) : 1 ~ 9.
- Hart C J R. 2007. Reduced intrusion-related gold systems. In: Goodfellow W D. ed. *Mineral deposits of Canada*. Geological Association of Canada, Special Publication; (5) : 95 ~ 112.
- Heinrich C A. 2007. Fluid—fluid interactions in magmatic—hydrothermal ore formation. *Rev. Mineral Geochem*, 65:363 ~ 387.
- Huang Cheng, Zhang Dehui. 2013&. Mechanisms of gold transportation and deposition in hydrothermal gold deposits. *Geological Science and Technology Information*, 32(4) : 162 ~ 170.
- Hu Peng, Nie Fengjun, Jiang Sihong. 2006&. Intrusion-related gold deposits: current understanding, outstanding problems, and perspectives in China. *Geological Review*, 52(4) : 539 ~ 549.
- Hu Ruizhong, Fu Shanling, Xiao Jiafei. 2016&. Major scientific problems on low-temperature metallogenesis in South China. *Acta Petrologica Sinica*, 32(11) : 3239 ~ 3251.
- Ju Peijiao, Lai Jianqing, Mo Qingyun, Shi Jian, Tan Huiyue, Tao Shilong. 2016&. Ore-forming fluid characteristics and genesis of Baojinshan gold deposit in Shuangfeng County, Hunan Province, China. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 26(12) : 2625 ~ 2639.
- Lang J R, Baker T, Hart C J R. 2000. An exploration model for intrusion-related gold systems. *Soc. Econ. Geol. News*, 40(1) : 7 ~ 15.
- Lang J R, Baker T. 2001. Intrusion-related gold systems; The present level of understanding. *Miner. Deposita*, 36(6) : 477 ~ 489.
- Li Hengxin. 1995&. Relations with gold and genetic types of the granites in Hunan Province. *Journal of Precious Metallic Geology*, 4(4) : 283 ~ 293.
- Li Huaqin, Wang Denghong, Chen Fuwen, Mei Yupin, Cai Hong. 2008&. Study on chronology of the Chanziping and Daping gold deposit in Xuefeng Mountains, Hunan Province. *Acta Geologica Sinica*, 82(7) : 900 ~ 905.
- Li Huichun, Yin Xianshi, Cheng Shengxin, Li Qixing, Jiang Can, Cai Lanlan, Sun Jinhui, Jiang Xie. 2016&. Geological characteristics of Xingfengshan gold deposit and prospecting directions, Hunan. *Mineral Exploration*, 7(42) : 85 ~ 91.
- Li Jihua, Wu Jiecheng, Li Yongguang. 2007&. The ore-controlling factors of Baimashan—Longshan gold—stibium belt and metallogenic prognosis. *Resources Environment & Engineering*, (Supp. 1) : 33 ~ 36.
- Li Wei, Xie Guiqing, Mao Jingwen, Zhang Zhiyuan, Fu Bin, Lu Song. 2018. Muscovite <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar and in situ sulfur isotope analyses of the slate-hosted Gutaishan Au—Sb deposit, South China; Implications for possible Late Triassic magmatic—hydrothermal mineralization. *Ore Geology Reviews*, 101:839 ~ 853.
- Li Wei, Xie Guiqing, Zhang Zhiyuan, Zhang Xingkang. 2016&. Constraint on the genesis of Gutaishan gold deposit in central Hunan Province: Evidence from fluid inclusion and C—H—O isotopes. *Acta Petrologica Sinica*, 32(11) : 3489 ~ 3506.
- Li Zhi, Yan Danping, Chen Wen, Li Lin, Chen Feng. 2019&. The structural style and genetics mechanism of the Longshan dome in Xiangzhong basin, Xuefengshan orogenic belt. *Acta Geologica Sinica*, 93(11) : 2742 ~ 2758.
- Liang Dong, Dai Jianbin. 2007&. The geological features and controlled-deposit factors on Daxin gold deposits in Hunan. *Gold Science and Technology*, 15(2) : 1 ~ 8.
- Liang Huaying. 1991&. Geochemistry of ore fluids and genesis of Longshan Au—Sb deposit, west Hunan, China. *Geochimica*, 12(4) : 342 ~ 350.
- Liu Bin. 2011&. Calculation of pH and Eh for aqueous inclusions as simple system. *Acta Petrologica Sinica*, 27(5) : 1533 ~ 1542.
- Liu Jia, Liu Sha, Ai Guoliang, Xiao Hongjie. 2018&. Mineralogical study of arsenopyrite in Xingfengshan gold deposit, Hunan. *Mineral Exploration*, 9(59) : 80 ~ 91.
- Lun Shengping, Xie Gen. 2012&. Research on geological characteristics and metallogenic regularity of Jinshan gold deposits in Longhui County, Hunan Province. *Acta Geologica Sichuan*, 32(S1) : 33 ~ 39.
- Luo Minghao. 1993&. Geological characteristics of Xingfengshan gold deposits, Hunan Province. *Gold Geological and Technology*, (2) : 33 ~ 36.
- Luo Xianlin. 1991&. Main characteristics and genetic types of gold ore

- deposits in Hunan. *Journal of Guilin College of geology*, 11(1):23~33.
- Luo Xuequan. 1996. Typomorphic characteristics and geological implications of minerals from the Chanziping gold deposit, Hunan Province. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 15(2):170~179.
- Ma Dongsheng, Pan Jiayong, Xie Qinglin, He Jiang. 2002. Ore source of Sb (Au) deposits in central Hunan; I. Evidences of trace elements and experimental geochemistry. *Mineral Deposits*, 21(3):366~376.
- Marsh E E, Goldfarb R J, Hart C J R, Johnson C A. 2003. Geology and geochemistry of the Clear Creek intrusion-related gold occurrences, Tintina gold Province, Yukon, Canada. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 40(5):681~699.
- Messabeh H, Contamine F, Cezac P, Serin J P, Gaucher E C. 2016. Experimental measurement of CO<sub>2</sub> solubility in aqueous NaCl solution at temperature from 323.15 to 423.15 K and pressure of up to 20 MPa. *Journal of Chemical & Engineering Data*, 61(10):3573~3584.
- Mikucki E J. 1998. Hydrothermal transport and depositional processes in Archean lode—gold systems: A review. *Ore Geology Reviews*, 13(1~5):307~321.
- Niu Hecai, Ma Dongsheng. 1991. Fluid inclusion studies of Jiangnan-type gold deposits in western Hunan Province. *Acta Mineralogica Sinica*, 11(4):386~394.
- Peng Jiantang, Dai Tagen. 1999. Geochemical studies of ore-forming fluids in gold deposits southwestern Hunan. *Mineral Deposits*, 18(1):73~81.
- Peng Jiantang, Hu Axiang, Xiao Jingyun, Guo Ning, Xie Qing. 2017. Research of ore-forming processes between two types of gold deposits in metamorphic terranes. *Acta Mineralogica Sinica*, 149.
- Peng Jiantang. 2019. The first discovery of tungsten orebodies with high ore grades in the Xingfengshan Gold Deposit, Longhui County, Hunan Province. *Geological Review*, 65(3):664~670.
- Ridley J R, Diamond L W. 2000. Fluid chemistry of orogenic lode deposits and implications for genetic models. *SEG Reviews*, 13:141~162.
- Roedder E. 1984. Fluid inclusions; Reviews in mineralogy. Chantilly: Mineralogical Society of America, (12):1~644.
- Sun Ji, Zhou Chao, Lu Wen, Guo Aimin, Xiao Rong, Wei Hantao, Tan Shimin, Jia Pengyuan. 2020. He—Ar—Sr isotope geochemistry of ore-forming fluids in the Gutaishan Au—Sb deposit in Hunan Province and its significance for deep prospecting. *Acta Geoscientia Sinica*, 1~13.
- Sun Jimao, Lou Yali, Gao Lijun, Bao Zhengxiang. 2007. Geology and metallogenesis of Precambrian gold deposits in central Hunan Province. *Geology and Resources*, 16(3):189~195.
- Tan Yunjin. 2002. Intrusion-related gold systems. *Mineral Resources and Geology*, 16(3):129~135.
- Terry P M, Bastrakov E N, Zaw K, Wygralak A S, Wyborn L A I. 2007. Comparison of fluid inclusion data and mineralization processes for Australian orogenic gold and intrusion-related gold systems. *Acta Petrologica Sinica*, 23(1):21~32.
- Thompson J F H, Sillitoe R H, Baker T, Lang J R, Mortensen J K. 1999. Intrusion-related gold deposits associated with tungsten—tin provinces. *Mineralium Deposita*, 34:323~334.
- Wang Jian, Li Sanzhong, Jin Chong, Wang Yuejun, Zhang Guowei, Liu Liping, Liu Xin. 2010. Dome-and-Basin pattern in central Hunan Province: stages and genesis of fold superposition. *Geotectonica et Metallogenia*, 34(2):159~165.
- Wilkinson J J. 2001. Fluid inclusions in hydrothermal ore deposits. *Lithos*, 55:229~272.
- Wu Jicheng, Wang Jinrong, Ou Jian, Wang Shuangshuang, Yang Shufen, Li Yihua. 2007. Inclusion— isotope geochemistry of the Baimashan— Longshan gold metallogenic belt in Hunan and its ore-forming fluids characteristics. *Mineral Resources and Geology*, 21(6):69~74.
- Xie Guangdong. 1994. Research progresses on the transport forms and depositional mechanisms of gold. *Geoscience*, 8(3):357~363.
- Xu Deru, Deng Teng, Chi Guoxiang, Wang Zhilin, Zou Fenghui, Zhang Junling, Zou Shaohao. 2017. Gold mineralization in the Jiangnan Orogenic Belt of south China: Geological, geochemical and geochronological characteristics, ore deposit-type and geodynamic setting. *Ore Geology Reviews*, 88:565~618.
- Yan Danping, Qiu Liang, Chen Feng, Li Lin, Zhao Lei, Yang Wenxin, Zhang Yixi. 2017. Structural style and kinematics of the Mesozoic Xuefengshan intraplate orogenic belt, South China block. *Earth Science Frontiers*, 25(1):1~13.
- Yan Ming, Ma Dongsheng, Liu Yingjun. 1994. Ore-forming fluid geochemistry and genesis of the Taojinzhong gold deposit. *Mineral Deposits*, 13(2):156~162.
- Yu Dalong. 1990. Inclusion studies of gold ores from Mobin. *Geochimica*, (1):72~80.
- Zhang Dehui. 2015. Geochemistry of ore-forming processes. Beijing: Geological Press:1~481.
- Zhong Dongqiu. 1990. On the classification and distribution of gold deposits in Hunan Province. *Hunan Geology*, 9(1):9~14.
- Zhu Yanan, Peng Jiantang. 2015. Infrared microthermometric and noble gas isotope study of fluid inclusions in ore minerals at the Woxi orogenic Au—Sb—W deposit, western Hunan, south China. *Ore Geology Reviews*, 65:55~69.

## Characteristics of fluid inclusions of the Xingfengshan Gold Deposit, central Hunan, and its genetic implications

XIAO Jingyun<sup>1,2)</sup>, PENG Jiantang<sup>1,3)</sup>, HU Axiang<sup>1)</sup>, MU Lan<sup>3)</sup>

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

2) School of Chemical and Biological Engineering, Hechi University, Yizhou, Guangxi, 546300;

3) State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang, 550002

**Objectives:** The Xingfengshan lode gold deposit is a representative of gold deposits occurred in the

Xiangzhong Basin, central Hunan. The deposit, located in the external contact zone of Baimashan granitic pluton, is hosted by Neoproterozoic slate and phyllite rocks. This study devotes to ascertain the characteristics of ore-forming fluids and further understand the ore genesis of the Xingfengshan gold deposit.

**Methods:** Based on field investigation and indoor microscopic study, the petrographic observation, microthermometric measurements and laser Raman spectroscopy on the fluid inclusions hosted in different stage quartz from the Xingfengshan deposit, were systematically carried out in this study.

**Results:** The fluid inclusions hosted in sheeted quartz vein of the ore-forming stage mainly include liquid-rich aqueous inclusions, and a few of vapour-rich aqueous inclusions and less CO<sub>2</sub>-rich inclusions, its homogenization temperatures vary between 220°C and 420°C, and its salinities change from 0.35% to 11.94% NaCl<sub>eq</sub>; while the homogenization temperatures and salinities for the fluid inclusions in the quartz veins of post-ore-forming stage are obviously less than those of fluid inclusions in auriferous quartz. The ore-forming fluid in this study belongs to the meso- and hyper-thermal, CO<sub>2</sub>-poor and reduced H<sub>2</sub>O—NaCl (±KCl)—CO<sub>2</sub>—CH<sub>4</sub>—N<sub>2</sub> system, the change of *f*<sub>O<sub>2</sub></sub> and pH caused by decompression boiling is the key factor to gold precipitation.

**Conclusions:** The geological characteristics of the Xingfengshan deposit and its ore-forming fluid signatures with high-temperatures and the low-pressure are obviously different from the orogenic gold deposits. Combined with the type of wall rock alterations and its mineral assemblages, it can be concluded that the Xingfengshan gold deposit belongs to a typical one of the intrusion-related gold systems (IRGS).

**Keywords:** fluid inclusions; mineralization mechanism; ore genesis, Xingfengshan gold deposit, central Hunan

**Acknowledgements:** Special thanks for the staff of the Xingfengshan gold mine for their assistance during our field investigation. We are grateful to Dr. LONG Yongzhen from Central South University for her help during the microthermometric analyses on the fluid inclusions. We would like to thank Mr. QIN Chaojian from Institute of Geochemistry (CAS) for his help and guidance during the laser Raman analyses. In addition, we would like to express our great gratitude to two reviewers for their valuable revision suggestions

**First author:** XIAO Jingyun, female, born in 1992, a postgraduate of Central South University and majored in mineralogy, petrology, mineral deposits; Email: jingyun1013@126.com

**Corresponding author:** PENG Jiantang, male, born in 1968, a professor of Central South University, mainly engaged in ore deposit geochemistry; Email: jtpeng@126.com

Manuscript received on: 2019-12-04; Accepted on: 2020-05-16; Edited by: ZHANG Yuxu

**Doi:** 10.16509/j.georeview.2020.05.021