1000-0569/2011/027(05)-1425-38 *Acta Petrologica Sinica* 岩石学报

福建省紫金山矿田五子骑龙铜矿床流体包裹体研究*

陈静[1] 陈衍景[1,2**] 钟军[1] 孙艺[1] 李晶[3] 祁进平[3]

CHEN Jing[1], CHEN YanJing[1,2**], ZHONG Jun[1], SUN Yi[1], LI Jing[3] and QI JinPing[3]

1. 北京大学造山带与地壳演化重点实验室,北京 100871
2. 中国科学院广州地球化学研究所矿物学与成矿学重点实验室,广州 510640
3. 紫金矿业集团股份有限公司,上杭 364200

1. *Key Laboratory of Orogen and Crust Evolution*, *Peking University*, *Beijing* 100871, *China*
2. *Key Laboratory of Mineralogy and Metallogeny*, *Guangzhou Institute of Geochemistry*, *CAS*, *Guangzhou* 510640, *China*
3. *Zijin Mining Group*, *Shanghang* 364200, *China*

2010-10-01 收稿, 2011-03-25 改回.

Chen J, Chen YJ, Zhong J, Sun Y, Li J and Qi JP. 2011. Fluid inclusion study of the Wuziqilong Cu deposit in the Zijinshan ore field, Fujian Province. *Acta Petrologica Sinica*, 27(5):1425 – 1438

Abstract The Wuziqilong intrusion-related hypothermal Cu deposit locates in the northeast of the Zijinshan ore field. It is hosted by Zijinshan complex consisting of mainly Yanshanian biotite monzogranites. Disseminations, veinlets and stockworks are the main ore structures. Four stage veins can be distinguished from their mineralogical paragenesis and crosscutting relationships. The first stage is quartz ± feldspar vein system preserved in the sericite-dickite-quartz zone. The second and third are quartz-bornite-chalcopyrite-digenite-pyrite ± covellite and quartz-covellite-pyrite polymetallic sulfide stockworks, respectively, observed in sericitization-dickitization-silicification zone which is overprinted by alunitization-silicification. The stage 4 quartz ± gypsum ± calcite veinlets occur in alunitization-silificication zone. Stage 1 minerals contain CO_2-rich and aqueous fluid inclusions with variable vapor/liquid ratios, which are homogenized at 362 ~ 570℃, with salinity of 4% ~ 19.92% NaCleqv. In addition to the fluid inclusions observed in stage 1 crystals, daughter mineral-bearing fluid inclusions can be also observed in stage 2 minerals. These fluid inclusions are homogenized at 306 ~ 390℃, with salinity of 0.35% ~ 13.94% NaCleqv (daughter minerals are not included in estimation). Stage 3 minerals have both vapor-rich and liquid-rich two-phase aqueous fluid inclusions that yield homogenization temperature of 233 ~ 308℃ and salinity of 0.18% ~ 14.67% NaCleqv. Stage 4 minerals only contain liquid-rich aqueous fluid inclusions homogenized at 132 ~ 230℃, with salinity of 0.88% ~ 6.16% NaCleqv. Hence it can be drawn out that the fluids forming the Wuziqilong deposit evolved from initially-magmatic hypothermal NaCl-CO_2-H_2O system to finally-meteoric epithermal NaCl-H_2O system, and that during the evolution fluid boiling occurred, volatiles such as CO_2 escaped and metallic sulfides precipitated, followed by input of circulating meteoric water.

Key words Intrusion-related hypothermal deposit; Fluid inclusion; Fluid boiling; Wuziqilong Cu deposit; Zijinshan ore field; Fujian Province

摘 要 五子骑龙浆控高温热液型铜矿床位于紫金山矿田北东侧,产于紫金山复式花岗岩内,含矿岩体为燕山早期黑云母二长花岗岩。矿石构造类型主要有脉状和网脉状、浸染状。根据矿物组合与脉体穿插关系,将脉体分为4个阶段。阶段1为绢云母化-迪开石化-硅化蚀变带的石英±钾长石脉;阶段2为被明矾石化-硅化叠加的绢云母化-迪开石-硅化蚀变带的石英-斑铜矿-黄铜矿-蓝辉铜矿-黄铁矿脉±铜蓝;阶段3为石英-铜蓝-黄铁矿脉体;阶段4为明矾石化-硅化蚀变带中的石英±石膏±方解石脉。阶段1发育WV类、C类和少量WL包裹体,阶段2发育WV类、C类和WL类包裹体,阶段3发育WL类和少量WV类包裹体,阶段4只发育WL类包裹体。含子矿物多相包裹体(S型)仅见于隐爆角砾岩体中花岗闪长斑岩的石英斑晶

* 本文受国家科技支撑计划项目(2009BAB43B04)资助.

第一作者简介: 陈静,女,1988年生,硕士研究生,矿床学专业,E-mail: pkuchenjing@163.com

** **通讯作者**:陈衍景,男,教授,矿床学专业,E-mail: yjchen@pku.edu.cn, gigyjchen@126.com

中。阶段1均一温度集中在362~570℃之间,盐度为4%~19.92% NaCleqv,流体体系为NaCl-CO_2-H_2O体系。阶段2均一温度集中在306~390℃,盐度为0.35%~13.94% NaCleqv,流体沸腾现象显著,CO_2等挥发份逸失。阶段3均一温度集中在233~308℃,盐度为0.18%~14.67% NaCleqv。阶段4均一温度降至132~230℃,盐度降至0.88%~6.16% NaCleqv。总体而言,流体从初始的高温NaCl-CO_2-H_2O体系演化为最终的低温NaCl-H_2O体系,期间发生了流体沸腾作用、CO_2等挥发份逸失、金属硫化物沉淀、大气降水混入等。

关键词 浆控高温热液型矿床;流体包裹体;流体沸腾;五子骑龙铜矿床;福建紫金山矿田

中图法分类号 P618.41

福建紫金山是我国著名的大型铜金矿田,包括了紫金山高硫型铜金矿床、罗卜岭斑岩型铜钼矿床、悦洋低硫型银多金属矿床以及矿化类型不清或介于斑岩型-浅成低温热液型之间的五子骑龙铜矿、龙江亭铜矿等,是目前国内唯一的多种类型并存的斑岩-浅成热液成矿系统,也是世界范围内典型的多种矿化类型发育齐全的岩浆-流体成矿系统(华仁民等,2002)。因此,紫金山矿田的成因和流体系统时空变化特征备受国内外研究者重视(陈景河,1999;张德全等,2005)。

紫金山金矿体之下有着垂直厚度超过1000m的巨大铜矿体,形成独特的"上金下铜"的垂直矿化特征(余学东等,1995;陈景河,1999),前人通过对矿区的矿床地质、地球化学、矿物学、岩石学、成矿时代的研究表明深部可能出现斑岩型铜矿床(张德全等,1992, 2001, 2003, 2005;史长义等,1996;高天钧和黄仁生,1998;华仁民等,1998;邱小平等,2010)。张德全等(1996)认为,紫金山矿田的抬升-剥蚀程度自西南向东北增强。鉴于五子骑龙铜矿位于紫金山高硫型铜金矿床的东北部,可能反映紫金山铜金矿床深部情况,因此成为窥探紫金山深部成矿潜力的钥匙。

五子骑龙铜矿的地质勘探工作正在进行,目前已获(332+333+334)铜资源量13.59×10^4t,平均品位1.66%(福建省第八地质大队,2006①)。虽然目前获得的金属储量价值逊色于其西南部的紫金山高硫型浅成低温热液铜金矿床和东南部的罗卜岭斑岩型铜钼矿床(钟军等,2011),但其地质研究意义十分重要。然而,前人关于紫金山矿田的地质研究工作基本集中于紫金山铜金矿床,而五子骑龙铜矿被严重忽视,急需加强。

本文基于对五子骑龙铜矿系统矿床地质特征和流体包裹体的研究,进一步揭示成矿流体特征和演化规律,探讨成矿机制,厘定五子骑龙铜矿的成矿类型,从而提出其深部和紫金山铜金矿床深部具有寻找斑岩型铜或铜钼矿床的潜力。

1 区域地质和矿床地质

紫金山矿区位于武夷隆起与闽西南海西-印支拗陷的过渡带,东南沿海中生代火山活动带的西部,在北西向上杭早白垩世陆相火山-沉积盆地东北缘,北东向宣和复式背斜与北西向上杭-云霄深大断裂带的交汇部位。

矿区出露主要地层是震旦系楼子坝群、泥盆系天瓦岽组、桃子坑组、石炭系林地组和中生代火山-侵入岩系列(图1)。震旦系楼子坝群主要是一套浅变质碎屑岩,泥盆系和石炭系地层主要是一套浅海-滨海相碎屑岩。中生代的火山岩-侵入岩系列包括燕山早期的酸性侵入岩和燕山晚期的中酸性次火山-侵入岩。燕山早期的侵入岩岩性主要为碎裂中粗粒花岗岩、中细粒花岗岩和细粒花岗岩,构成了矿区的主要容矿岩体-紫金山复式花岗岩体。燕山晚期次火山-侵入岩岩性主要为花岗闪长岩、英安玢岩、花岗闪长斑岩和石帽山群火山岩。

区域内断裂构造发育,主要为北东向和北西向断裂。其中,北东向断裂主要是震旦-晚古生界地层构成的复背斜的轴向断裂及其次级断裂,具陡倾斜的逆冲性质,主要发育于白垩纪前,控制了晚侏罗世花岗岩的分布(张德全等,2003)。北西向断裂主要发育于白垩纪,是区域逐渐转入引张状态而出现的上杭-云霄深断裂的组成部分,在剖面上呈上陡下缓的铲式断裂,主要控制了早白垩世火山-侵入岩浆作用和成矿活动(王培宗等,1993;聂童春和朱根灵,2004)。燕山早期火山-花岗岩呈北东向,是挤压环境下与地壳重熔有关的岩浆作用产物(吴淦国等,2000;张德全等,2001;毛建仁等,2002b;王少怀等,2009)。从晚侏罗纪开始到白垩纪,受北西向深断裂控制的燕山晚期火山岩带叠加和交会于燕山早期火山-花岗岩带之上(毛建仁等,2002b;王德滋和周新民,2002)。这套燕山晚期火山岩是拉张环境下地幔起源的富钾基性岩浆与中下地壳物质部分熔融形成的花岗质混合岩浆,与成矿关系密切(张德全等,2001;王德滋和周新民,2002;毛建仁等,2004),成矿主要发生在伸展作用的初期(陈衍景和富士谷,1992; Chen *et al.*, 2007)。

五子骑龙矿区位于紫金山铜金矿床的北东部和罗卜岭(中寮)铜钼矿床的北西方向(图1)。四坊岩体被罗卜岭花岗闪长斑岩侵入,并形成了典型的斑岩型蚀变和矿化分带(毛建仁等,2002a;薛凯和阮诗昆,2008)。五子骑龙矿床被北东-北西向断裂围限在一个菱形地块单元中(图2a),北东向断裂早于北西向发育,是线性构造,由平行断裂组成,北西向是"上陡下缓"的铲式断层。五子骑龙矿床的主要赋矿围岩是燕山早期的紫金山复式岩体中的一套碎裂中细粒黑云母二长花岗岩(五龙子岩体),是矿区分布面积最大的侵入体(陈好寿,1996)。岩体呈北东向延伸,出露面积约7km^2,主

① 福建省第八地质大队.2006.福建省上杭县中寮矿区五子骑龙矿段铜矿详查地质报告

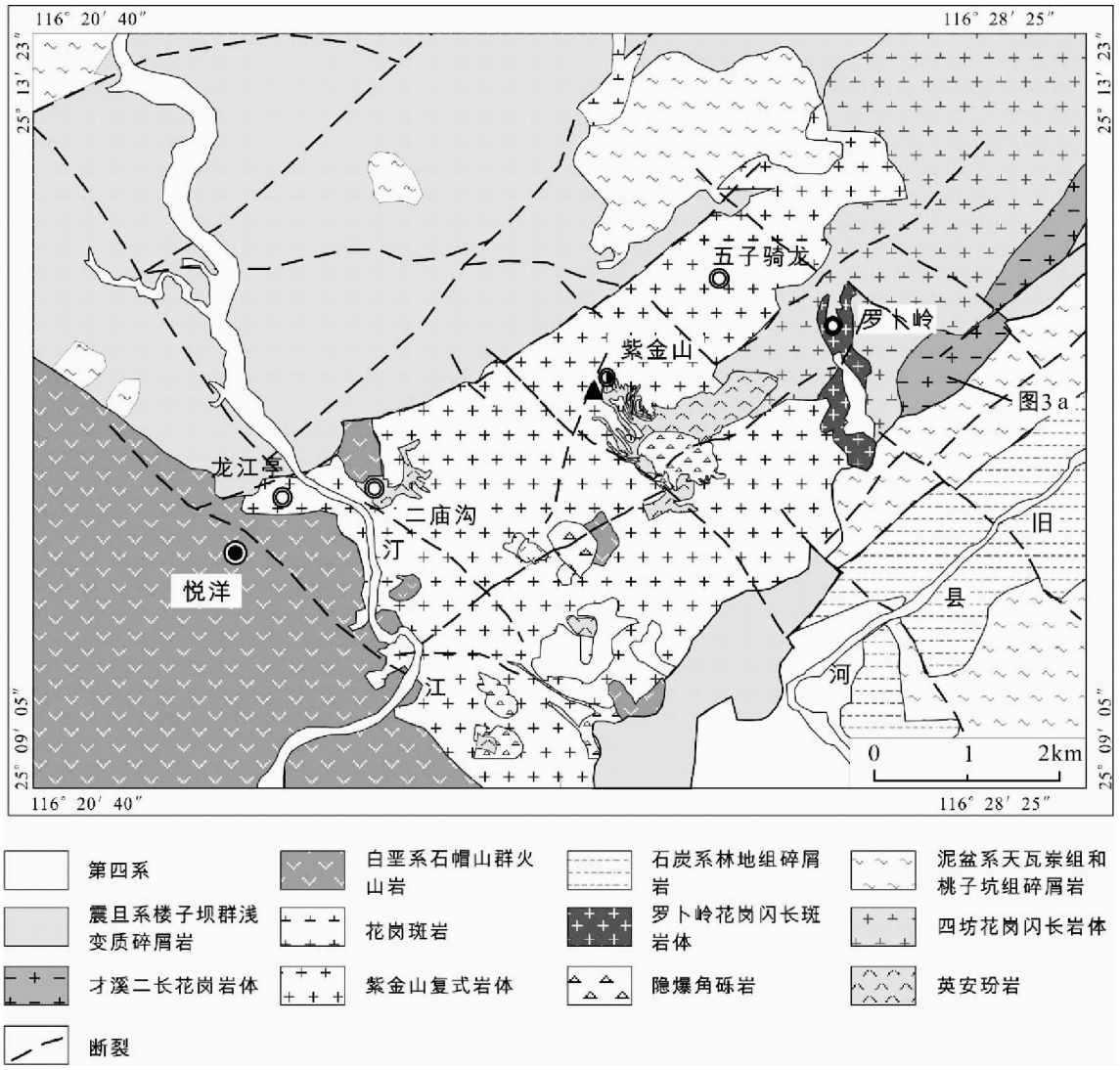


图 1 紫金山矿田区域地质图(引自钟军等,2011)

Fig. 1 Regional geological map of Zijinshan mine field (after Zhong *et al.*, 2011)

要由斜长石、石英、白云母和黑云母这些矿物组成,岩体年龄在 130 ~ 160Ma 之间(张德全等,2001;陈衍景,2002;赵希林等,2008;黄仁生,2008;王少怀等,2009),成矿年龄在 105 ~ 100Ma(张德全等,1996,2001;毛景文等,2003)。矿床内一系列北东向裂隙,与北西向断裂旁侧裂隙一起,形成两组短小而密集的裂隙群,裂隙中充填英安玢岩和隐爆角砾岩、矿脉等,是主要的容矿构造(图 2b)。矿段内矿体受矿脉分布控制,呈似层状、扁豆状、透镜状产出。在倾向上呈斜列分布,单个矿体规模小,矿体数量多,矿体与围岩自然边界不甚清楚(图 2b)。隐爆角砾岩脉中角砾分为 2 种,一种为中粗粒黑云母二长花岗岩,与含矿围岩一致,另一种为花岗闪长斑岩,与罗卜岭的花岗闪长斑岩相似。角砾直径 2 ~ 7cm,多呈尖棱状、次棱角状,经历了不同程度的蚀变,蚀变类型主要为绢云母化和硅化,少数为明矾石化,其中的石英斑晶直径多在 1 ~ 4mm 左右,胶结物主要为岩粉,裂隙不定向,角砾之间可拼合。

矿石矿物以黄铁矿、铜矿物为主,辉钼矿、黄锡矿、闪锌矿、方铅矿少量。其中铜矿物至少有 5 种,以铜蓝分布最广,次为蓝辉铜矿、斑铜矿、黄铜矿、硫砷铜矿;脉石矿物以石英、绢云母、迪开石为主。矿石结构类型主要有半自形-自形粒状、针状、板状结构、他形粒状结构、填隙结构、包含结构和交代残余结构,构造类型主要有脉状和少量脉状、浸染状构造。根据岩心编录记录,五子骑龙矿床下部蚀变带和罗卜岭矿床的同类蚀变带不但完全一致,而且可以相连(So *et al.*, 1998;张德全等,1996)。五子骑龙上部见到明矾石化-硅化叠加于绢云母-迪开石化-硅化带中,并伴有黄铁矿-硫砷铜矿-蓝辉铜矿-铜蓝矿化,与紫金山的酸性硫酸盐型浅成热液蚀变和铜矿化的特征一致。五子骑龙钻孔深部揭露的英安玢岩与充填于紫金山矿床火山管道中的英安玢岩完全一致。五子骑龙矿床与紫金山矿床和罗卜岭矿床不仅在空间上相近,在

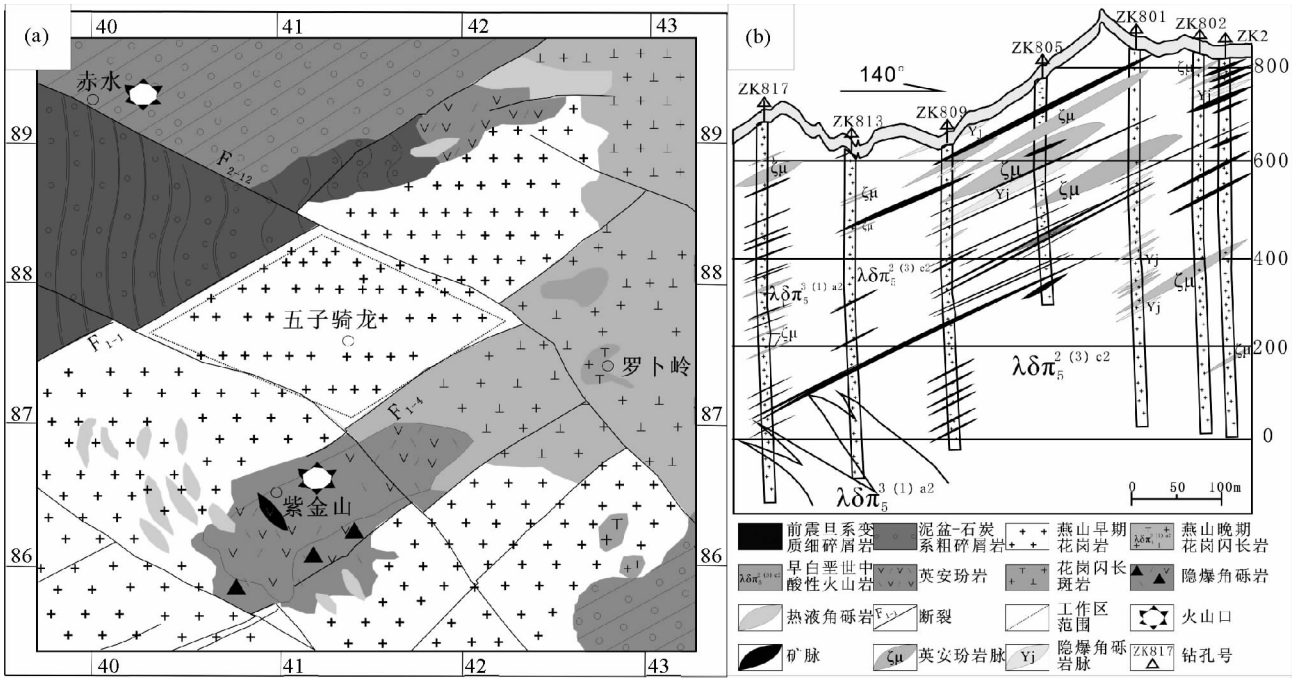


图 2 五子骑龙铜矿床地质图(a)及 8 号勘探线剖面图(b)(据福建省第八地质大队, 2006)

Fig. 2 Geological map of the Wuziqilong Cu deposit (a) and geological profiles for prospecting line No. 8 (b)

成因在也有密切关系。

矿区内发育多种细脉和细网脉,根据脉体的穿插关系和共生组合可以确定其生成顺序:(1)早期无矿石英脉,由乳白色石英组成,未见其他矿物,脉体宽度在 0.5 ~ 1cm 左右,见于岩体中心位置,常见被后期硅化和含金属硫化物的脉体交代,是形成最早的脉体(图 3a);(2)石英-斑铜矿-黄铜矿-蓝辉铜矿-黄铁矿脉,脉体宽度在 0.5 ~ 3cm 左右,主要由石英、斑铜矿、蓝辉铜矿、黄铁矿组成,所有的斑铜矿都或多或少被蓝辉铜矿或者黄铜矿交代,亦有斑铜矿中出溶的蓝辉铜矿和黄铜矿,部分含有少量的硫砷铜矿,通常呈交代残余结构,铜蓝或有或无。从手标本上看,这类脉体宽度较大,金属硫化物通常呈极好的脉状分布,石英含量少,以斑铜矿、蓝辉铜矿为主的硫化物含量居多,黄铁矿大都呈交代残余结构(图 3b, g);(3)石英-铜蓝-多金属硫化物脉,主要有石英、铜蓝、蓝辉铜矿、闪锌矿和方铅矿组成,脉宽 0.5 ~ 1cm。该类脉体通常较细,金属硫化物多分散在脉中,种类多,含量少(图 3c, h);(4)晚期石英-石膏-黄铁矿脉,黄铁矿晶形极好,发育有明显的环带结构,且核部有明显蚀变交代的结构,显示了流体多期演化的特征。石英和石膏矿物的晶形俱佳,脉宽 1cm 以上,可见其切穿早期脉体,是形成最晚的脉体(图 3d)。

根据脉体类型与成矿的关系,将流体成矿作用分为 4 个阶段:阶段 1 主要形成无矿石英脉,钾长石或有或无,与绢英岩化关系密切(图 3e),偶见叶腊石化叠加,表明早阶段流体发育在较深的位置(Sillitoe, 2010);阶段 2 主要形成石英-斑铜矿-黄铜矿-蓝辉铜矿-黄铁矿脉,几乎全部在被明矾石化叠加的绢英岩化-迪开石化-硅化带(图 3e)中,阶段 3 与明矾石化-硅化(图 3f)关系密切,主要发育石英-铜蓝-多金属硫化物脉,细脉中发育少量的金属硫化物沉淀。阶段 4 不成矿,只有很少量的黄铁矿,脉体中主要为石英,晶形发育较好,石膏、方解石或有或无,主要见于明矾石化带。

2 样品和测试

样品主要采自五子骑龙矿区钻孔 ZK401, ZK1201, ZK1213,涵盖了各个蚀变带和主要成矿阶段。从 27 件包裹体薄片优选出不同阶段脉体样品 10 件和石英斑晶样品 1 件进行了详细的流体包裹体显微测温及激光拉曼研究。

包裹体显微测温主要在中国科学院地质与地球物理研究所流体包裹体实验室完成,仪器为 Linkam THMSG 600 型冷热台,温度控制范围为 -196 ~ 600℃,在 -120 ~ -70℃温度区间的测定精度为 ±0.5℃之间, -70 ~ +100℃区间精度为 ± 0.2℃, 100 ~ 500℃区间精度为 ± 2℃。利用美国 FLUIDINC 公司提供的人工合成流体包裹体样品对冷热台进行温度标定。测试过程中,升温速率为 0.2 ~ 5℃ · min^{-1},相变点附近速率降为 0.2 ~ 1℃ · min^{-1},含 CO_2 包裹体的升温速率为 0.1 ~ 0.2℃ · min^{-1},水溶液包裹体相变附近点的升温速率为 0.2 ~ 0.5℃ · min^{-1},基本上保证了相变温度数据的准确性。

单个包裹体的激光拉曼显微探针分析是在北京大学造山带与地壳演化教育部重点实验室完成的,测试仪器为 RM-1000 型拉曼光谱仪,使用 514.5nm 氩激光器,计数时间为

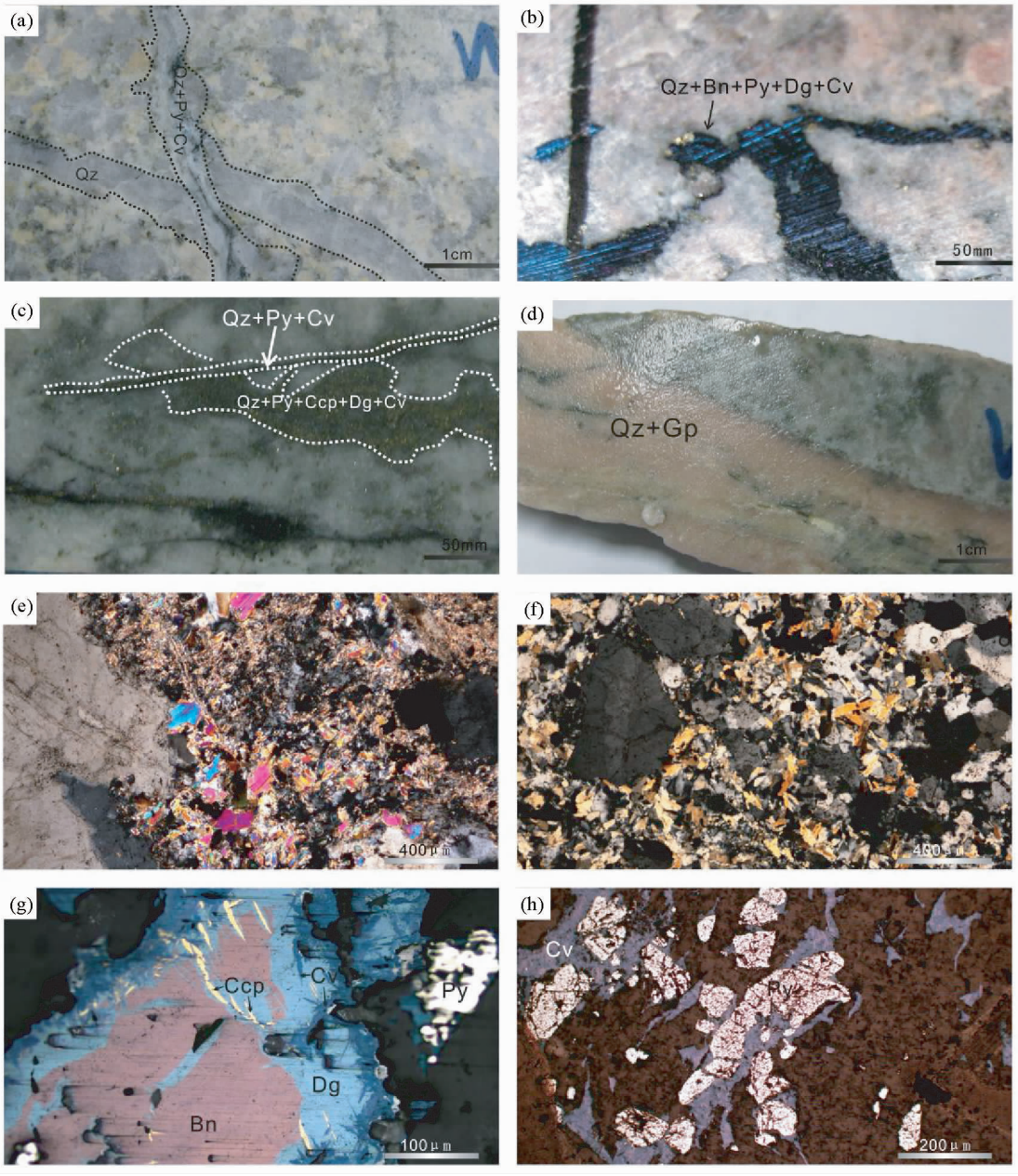


图 3　五子骑龙铜矿床脉系、蚀变及矿石岩相学特征

(a)-阶段 1 无矿石英脉被阶段 3 石英-黄铁矿-铜蓝脉体切穿(样品 3-1,采自钻孔 ZK401 海拔 +846m);(b)-阶段 2 石英-斑铜矿-黄铁矿-蓝辉铜矿-铜蓝脉(样品 1-21,采自钻孔 ZK1201 海拔 +567m);(c)-阶段 2 石英-黄铁矿-黄铜矿-蓝辉铜矿-铜蓝脉被阶段 3 石英-黄铁矿-铜蓝脉体切穿(样品 2-14,采自钻孔 ZK1213 海拔 +273m);(d)-明矾石化-硅化带中的阶段 4 石英-石膏脉体(样品 3-17,采自钻孔 ZK401 海拔 +392m);(e)-绢云母化-硅化;(f)-明矾石化-硅化;(g)-阶段 2 脉体中的斑铜矿-黄铜矿-蓝辉铜矿-叶片状铜蓝(出溶)-黄铁矿;(h)-阶段 3 脉体中的黄铁矿-铜蓝. 图中矿物缩写: Qz-石英; Py-黄铁矿; Cv-铜蓝; Bn-斑铜矿; Dg-蓝辉铜矿; Ccp-黄铜矿; Gp-石膏

Fig. 3　Photographs showing ore paragenesis, alteration and texture of the Wuziqilong Cu deposit

(a)-the covellite-bearing pyrite-quartz vein of stage 3 crosscutting the barren quartz vein of stage 1 in the phyllic alteration zone (sample 3-1, from drill hole ZK401, at the altitude of 846m); (b)-the quartz containing bornite-pyrite-digenite-covellite of stage 2 in the phyllic alteration zone (sample 1-21, from drill hole ZK1201, at the altitude of 567m); (c)-the stage 2 pyrite-chalcopyrite-digenite-covellite vein cut by the stage 3 pyrite-covellite-quartz vein (sample 2-14, from drill hole ZK1213, at the altitude of 273m); (d)-the stage 4 calcite-bearing barren gypsum-quartz vein in the alunitization-silicification zone (sample 3-17, from drill hole ZK401, at the altitude of 392m); (e)-typical phyllic alteration; (f)-the alunitization-silicification zone; (g)-the bornite-pyrite-chalcopyrite-digenite-covellite in stage 2 vein; (h)-the quartz-pyrite- covellite vein of stage 3. Abbreviation: Qz-quartz; Py-pyrite; Cv-covellite; Bn-bornite; Dg-digenite; Ccp-chalcopyrite; Gp-gypsum

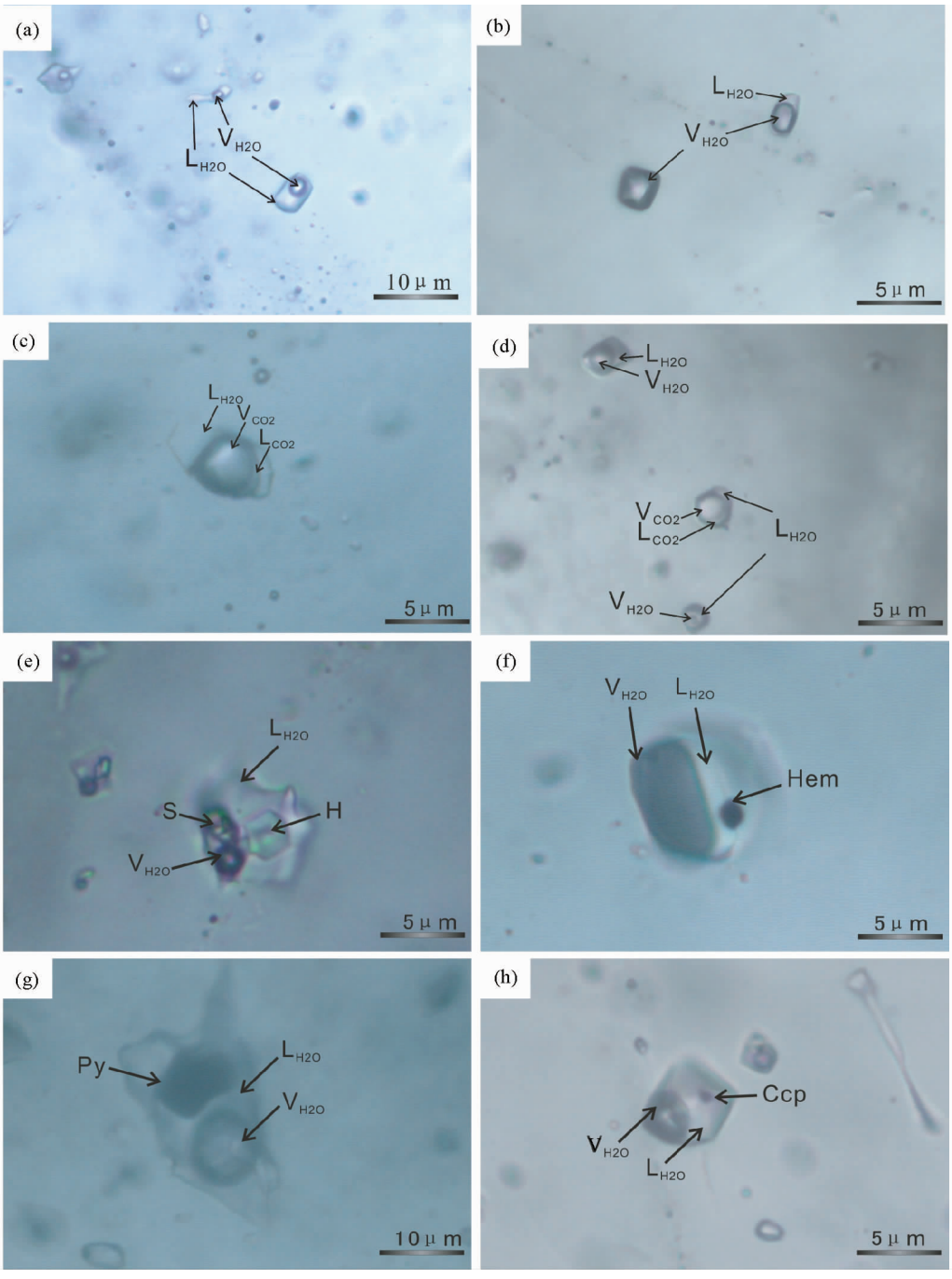


图 4　五子骑龙铜矿床流体包裹体岩相学照片

(a)-阶段 4 石英中的 WL 类包裹体(样品 3-17,采自钻孔 ZK401 海拔 +392m);(b)-阶段 1 石英中的 WV 类包裹体(样品 2-21,采自钻孔 ZK1213 海拔 +88m);(c)-阶段 1 无矿石英脉中 C 类包裹体(样品 3-24,采自钻孔 ZK401 海拔 +144m);(d)-阶段 2 石英中的沸腾包裹体组合,WL 类、WV 类和 C 型包裹体共存(样品 1-21,采自钻孔 ZK1201 海拔 +567m);(e)-石英斑晶中的含石盐、钾盐子晶包裹体(样品 3-13,采自钻孔 ZK401 海拔 +497m);(f)-阶段 3 中含赤铁矿子矿物的 S 型包裹体(样品 3-2,采自钻孔 ZK401 海拔 +811m);(g)-阶段 2 石英中含黄铁矿子矿物的 S 型包裹体(样品 1-7,采自钻孔 ZK1201 海拔 +239m);(h)-阶段 2 石英中含黄铜矿子矿物的 S 型包裹体(样品 2-14,采自钻孔 ZK1213 海拔 +273m). 图中缩写: V_{H_2O}-气相 H_2O; L_{H_2O}-液相 H_2O; V_{CO_2}-气相 CO_2; L_{CO_2}-液相 CO_2; S-钾盐; H-石盐; Hem-赤铁矿; Py-黄铁矿; Ccp-黄铜矿

Fig. 4　Photomicrographs of various types of fluid inclusions in the Wuziqilong Cu deposit

(a)-WL-type fluid inclusion in stage-4 quartz (sample 3-17, from drill hole ZK401 at the altitude of 392m); (b)-WV-type fluid inclusion in stage-1 quartz (sample 2-21, from drill hole ZK1213 at the altitude of 88m); (c)-C-type fluid inclusion in the early barren quartz vein of stage 1 (sample 3-24, from drill hole ZK401 at the altitude of 144m); (d)-the boiling fluid inclusion assemblage in stage-2 mineral, consisting of WV-, WL- and C-type fluid inclusions (sample 1-21, from drill hole ZK1201 at the altitude of 567m); (e)-the halite- and sylvite-bearing S-type fluid inclusion in quartz phenocryst (sample 3-13, from drill hole ZK401 at the altitude of 497m); (f)-hematite-bearing S-type fluid inclusion of stage 3 (sample 3-2, from drill hole ZK401 at the altitude of 811m); (g)-pyrite-bearing S-type fluid inclusion of stage 2 (sample 1-7, from drill hole ZK1201 at the altitude of 239m); (h)-chalcopyrite-bearing S-type fluid inclusion of stage 2 (sample 2-14, from drill hole ZK1213 at the altitude of 273m). Abbreviation: V-vapor; L-liquid; S-sylvite; H-halite; Hem-hematite; Py-pyrite; Ccp-chalcopyrite

10s，每 1cm^{-1}（波数）计数一次，100～4000cm^{-1}全波段一次波峰，激光斑束大小为 2μm，光谱分辨率为 ±2cm^{-1}。激光器发射功率为 20mW，样品接收功率为 5mW。

应用 Bodnar（1993）提出的低盐度 H_2O-NaCl 体系的盐度-冰点关系表计算了中低盐度的包裹体盐度；利用 Hall *et al.*（1988）总结的石盐熔化温度和盐度的关系式获得高盐度包裹体的盐度；利用 Flincor 软件（Brown，1989）计算水溶液包裹体的密度和捕获压力。

3 流体包裹体研究

3.1 流体包裹体分类

石英脉体和斑晶中包裹体类型丰富（图 4），根据包裹体成分进行类型划分（陈衍景等，2007），再据室温（21℃）相态及其在冷冻回温过程中的相变进行亚类划分（卢焕章等，2004），可将流体包裹体分为 3 个大类：

（1）水溶液包裹体（W 型）。这类包裹体形状多样，呈负晶形、长条形、正方形、纺锤形、圆形以及不规则形，大小一般 5～25μm，室温下呈气液两相（L_{H_2O} + V_{H_2O}）。根据 V_{H_2O}/（L_{H_2O} + V_{H_2O}）比值进一步分为富液相（WL）和富气相（WV）两类。前者 V_{H_2O}/（L_{H_2O} + V_{H_2O}）<50vol%（图 4a，d），升温过程中多均一到液相，在阶段 1 较少，阶段 2、3 普遍；后者 V_{H_2O}/（L_{H_2O} + V_{H_2O}）>50vol%，甚至为纯气相（图 4b），升温过程中向气相均一，阶段 1 和阶段 2 普遍，阶段 3 和阶段 4 很少出现。

（2）CO_2-H_2O 型包裹体（C 型）。多呈椭圆形、负晶形产出，一般 5～20μm。室温下多表现为两相或三相（L_{H_2O} + L_{CO_2} ± V_{CO_2}；图 4c，d），CO_2 一般在 40vol% 以上，该类包裹体在阶段 1、2 常见，阶段 3、4 不发育。

（3）含子晶包裹体（S 型）。多呈负晶形、正方形或不规则形状产出，5～12μm，子矿物种类丰富，包裹体中含一个或多个子矿物，最常见的是含硫化物（黄铁矿、黄铜矿）和赤铁矿的包裹体，多为富气相含硫化物子晶包裹体，气相所占比例大（图 4f-h），在阶段 1、2 常见，阶段 3、4 少见。隐爆角砾岩中的花岗闪长斑岩石英斑晶中，此类包裹体的子晶一般为石盐或钾盐，罕见硫化物（图 4e）。

3.2 显微测温

流体包裹体显微测温结果总结于表 1 和图 5，下面分别介绍各阶段的结果：

阶段 1 的不含矿石英 ± 钾长石脉体中以 WV、WL、C 类为主，有含硫化物子晶的 S 型包裹体，未见含石盐或钾盐子晶包裹体。WV 类包裹体含量约在 65%，长轴为 5～18μm；冰点介于 -2.4～-16.6℃之间，盐度 3.39%～19.92% NaCleqv；均一到气相，少数临界均一，均一温度集中在 362.2～570℃，密度 0.47～0.79g·cm^{-3}。WL 类包裹体含量相对

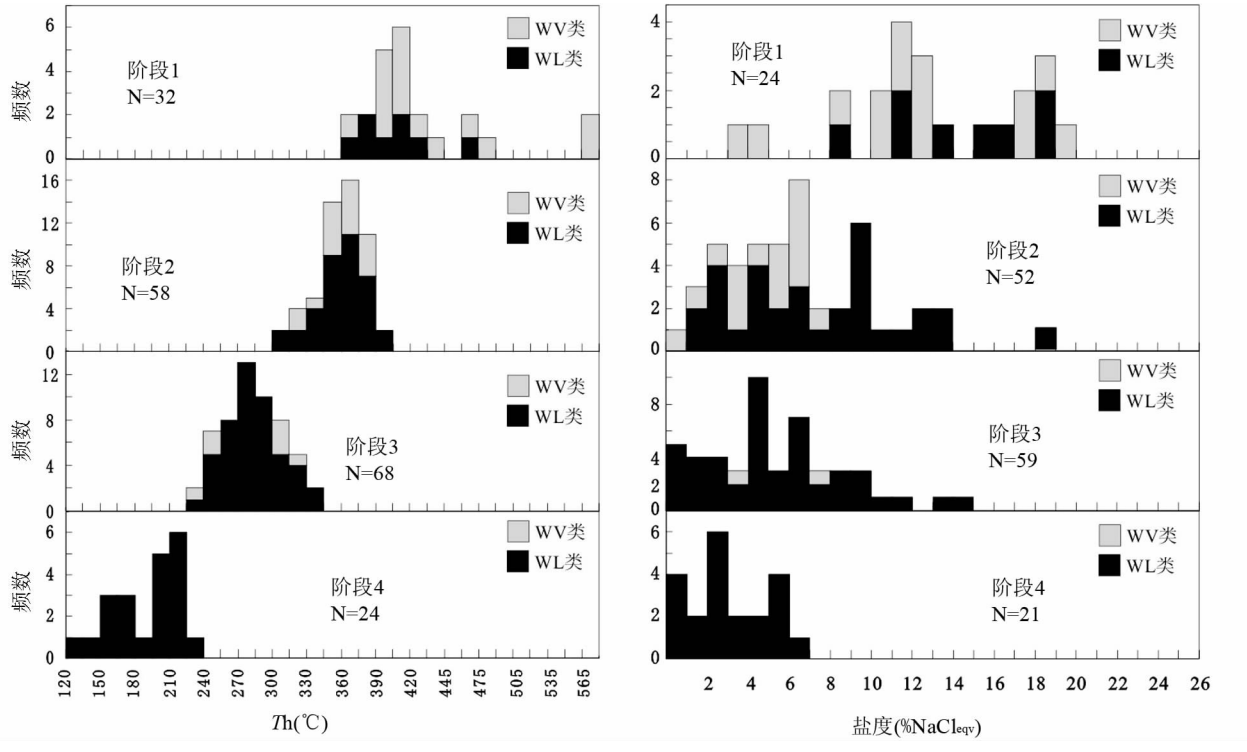


图 5 五子骑龙铜矿床不同阶段均一温度和盐度直方图

Fig. 5 Histograms of homogenization temperatures and salinities of fluid inclusions in different stage minerals from the Wuziqilong Cu deposit

表 1 五子骑龙铜矿床显微测温结果

Table 1 Microthermometric data of fluid inclusions at the Wuziqilong Cu deposit

成矿阶段	包裹体类型	包裹体数	包裹体含量(%)	均一温度(℃)	冰点(℃)	笼合物消失(℃)	盐度(wt% NaCleqv)	密度(g·cm^{-3})
	WV	20	65	362.2~570	-2.4~-16.6	—	3.39~19.92	0.47~0.79
阶段1	WL	12	15	365.7~412.2	-5.5~-15.0	—	8.55~18.63	0.61~0.84
	C	3	20	269.5~289	—	6.3~7.3	5.14~6.88	0.8~0.88
	WV	20	30	329.8~355.2	-0.6~-10	—	1.06~18.94	0.53~0.75
阶段2	WL	38	70	306.8~389.7	-0.2~-5	—	0.35~7.86	0.5~0.86
	WV	3	5	245~308	-2.3~-10.73	—	3.87~7.02	0.78~0.84
阶段3	WL	65	95	233~337.5	-0.1~-10.7	—	0.18~14.67	0.68~0.92
阶段4	WL	24	100	132~229.4	-0.5~-3.8	—	0.88~6.16	0.84~0.95

注:阶段2也有少量含 CO_2 包裹体,但因个体小未能获得测温数据,未列入表格

较少,约占15%,长轴为6~10μm;冰点介于-5.5~-15.0℃之间,盐度8.55%~18.63% NaCleqv;均一到液相,均一温度介于365.7~412.2℃之间,密度0.61~0.84g·cm^{-3}。C类包裹体个体偏小,少数长轴大于10μm,其 CO_2 相均一温度为6.3~7.3℃,向液相均一,盐度5.14%~6.88% NaCleqv,完全均一温度集中在269.5~289℃,密度为0.8~0.88g·cm^{-3}。

阶段2是主要成矿阶段,脉体普遍发育斑铜矿、黄铜矿、蓝辉铜矿和铜蓝等矿物,蓝辉铜矿和铜蓝略晚于斑铜矿和黄铜矿,但总体表现为共生特征。脉体主要包裹体类型为WL类、WV类,偶见C类包裹体。WV类包裹体含量约在30%,长轴6~30μm;冰点-0.6~-10℃之间,盐度1.06%~18.94% NaCleqv;均一到气相,均一温度介于329.8~355.2℃之间,密度0.53~0.75g·cm^{-3}。WL类包裹体含量约为65%,长轴6~18μm;冰点-0.2~-5℃之间,盐度0.35%~7.86% NaCleqv;均一到液相,均一温度介于306.8~389.7℃之间,密度0.5~0.86g·cm^{-3}。同一颗石英颗粒中可见WL、WV和C类包裹体共生,包裹体形态相似、大小相近、均一温度相近,为明显的沸腾包裹体组合(图4d)。此外,尚常见同一石英颗粒中充填度相差很大、均一方式不同、均一温度相近、盐度相差悬殊的包裹体组合,也表现为沸腾包裹体的特点。

阶段3是主成矿阶段的后期,WV类包裹体大量减少,WL类包裹体占主要地位。WV类包裹体只占5%左右,长轴5~13μm;冰点为-2.3~-10.73℃,盐度3.87%~7.02% NaCleqv;均一到气相,均一温度245~308℃,密度0.78~0.84g·cm^{-3}。WL类包裹体占95%左右,长轴5~18μm;冰点-0.1~-10.7℃之间,盐度0.18%~14.67% NaCleqv;均一到液相,均一温度233~337.5℃,密度0.68~0.92g·cm^{-3}。

阶段4矿物只含WL类包裹体,长轴5~15μm;冰点温度介于-0.5~-3.8℃,盐度介于0.88%~6.61% NaCleqv;向液相均一,均一温度介于132~229.4℃,密度0.84~0.95g·cm^{-3}。

需要指出,含石盐子晶的包裹体多集中在深部隐爆角砾岩体的花岗岩角砾中或硅化的石英颗粒中,盐度介于27%~34% NaCleqv,均一温度在280~350℃之间,可能反映了深部流体的特征和演化。另外,考虑到岩浆热液成矿系统演化至中晚阶段时往往混入大气降水热液,致使中晚阶段的包裹体不能有效地反映流体性质和矿床成因(陈衍景,2010),因此,根据流体包裹体组合(FIA)的原理(池国祥和卢焕章,2008),我们对所获数据进行了有效性限制,对于叠加于较早阶段矿物的晚阶段流体包裹体数据进行了删除,或者归并到晚阶段。

3.3 激光拉曼显微探针分析

激光拉曼显微探针分析结果显示,早阶段脉体中的WV类、WL类包裹体的气液相成分均显示一个宽泛的水峰,显示成分主要为 H_2O(图6a)。

C类包裹体具有明显的 CO_2 特征峰(图6b, c),即1285cm^{-1}和1388cm^{-1},在此类包裹体中,还能检测出液相 H_2O 成分(图6c)。

S类包裹体气相成分有 CO_2 和 H_2O 两种,不透明子矿物主要有赤铁矿(图6d)、黄铁矿(图6e)、黄铜矿(图6f)等。

深部隐爆角砾岩的花岗闪长斑岩角砾中的石英斑晶内的包裹体含有多种透明子晶,主要为石盐和钾盐子晶。

3.4 流体成矿压力及深度估算

根据阶段1的 H_2O-CO_2-NaCl 包裹体部分均一温度、均一方式、部分均一时 CO_2 相所占比例和完全均一温度,利用Flincor软件(Brown, 1989)和Brown-Lamb公式(Brown and Lamb, 1989),计算获得阶段1的压力为70~114MPa。考虑 CO_2 的影响会使估计的捕获压力偏低(Hedenquist and Henley, 1985),同时阶段1的 H_2O-NaCl 包裹体并非沸腾包

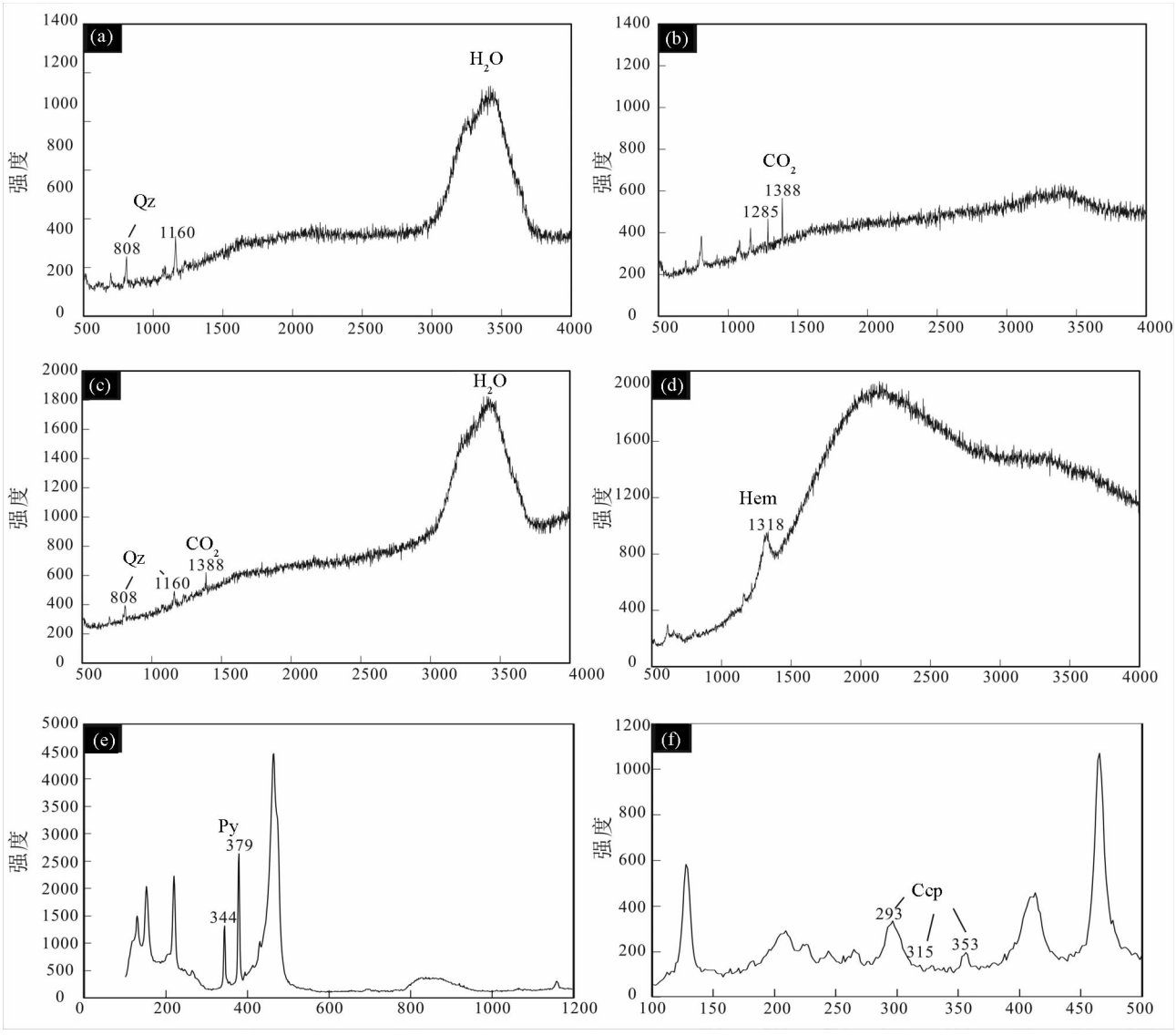


图 6　流体包裹体的激光拉曼(LRM)图谱

(a)-阶段 2 石英中 WL、WV 类包裹体中的宽泛的水峰(样品 3-7,采自钻孔 ZK401 海拔 +635m);(b)-阶段 1 石英中 C 类包裹体中的 CO_2(样品 3-24,采自钻孔 ZK401 海拔 +144m);(c)-阶段 2 石英中 C 类包裹体中的 H_2O 和 CO_2(样品 1-21,采自钻孔 ZK1201 海拔 +567m);(d)-阶段 3 中石英中 S 类包裹体中的 H_2O 和赤铁矿(Hem)子矿物(样品 3-2,采自钻孔 ZK401 海拔 +811m);(e)-阶段 3 石英中 S 类包裹体中的黄铁矿(Py)子矿物(样品 1-7,采自钻孔 ZK1201 海拔 +239m);(f)-阶段 1 石英中的 S 类包裹体中的黄铜矿(Ccp)子矿物(样品 3-24,采自钻孔 ZK401 海拔 +144m)

Fig. 6　The Laser Raman spectra of fluid inclusions

(a)-H_2O of the WL- and WV- type fluid inclusion in the quartz of stage 2 (sample 3-7, from drill hole ZK401 at the altitude of 635m); (b)-CO_2 of the C-type fluid inclusion in stage-1 quartz (sample 3-24, from drill hole ZK401 at the altitude of 144m); (c)-H_2O and CO_2 of the C-type fluid inclusion in the stage-2 quartz (sample 1-21, from drill hole ZK1201 at the altitude of 567m); (d)-H_2O and daughter hemitite of the S-type fluid inclusion in the stage-3 quartz (sample 3-2, from drill hole ZK401 at the altitude of 811m); (e)-daughter pyrite of the S-type fluid inclusion in the stage-3 quartz (sample 1-7, from drill hole ZK1201 at the altitude of 239m); (f)-daughter chalcopyrite of the S-type fliud inclusion in the stage-1 quartz (sample 3-24, from drill hole ZK401 at the altitude of 144m)

裹体组合,只能估算包裹体最小捕获压力(Bouzari and Clark, 2006),因而认为早阶段包裹体捕获压力大于所估算的压力。阶段 2 发育沸腾包裹体组合,以其 H_2O-NaCl 包裹体估算出的压力可代表实际捕获压力(Roedder, 1984;卢焕章等, 2004)(图 7)。

综合获得阶段 1 包裹体的最小捕获压力为 30 ~

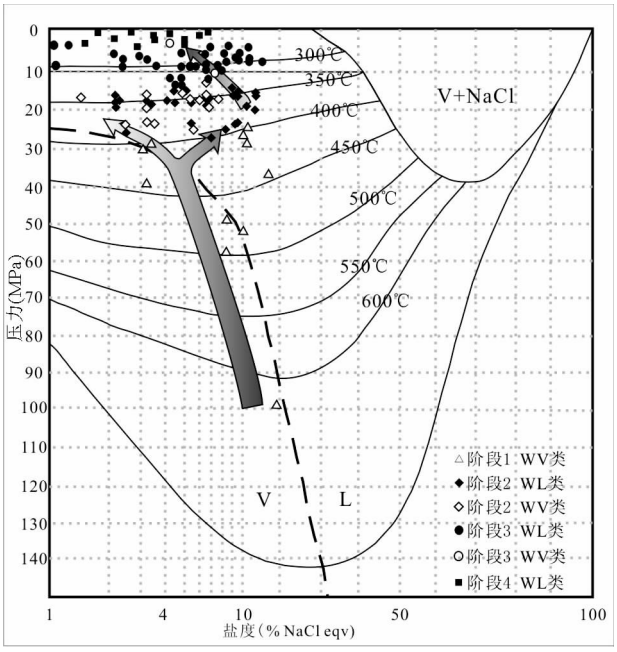


图 7 五子骑龙铜矿流体包裹体压力估计及其演化(底图据 Bouzari and Clark, 2006)

Fig. 7 Pressure estimates for fluid inclusions at the Wuziqilong Cu deposit (after Bouzari and Clark, 2006)

114MPa;阶段 2 捕获压力为 10 ~ 30MPa;阶段 3 和阶段 4 的捕获压力 1 ~ 10MPa。岩浆流体系统沸腾之前往往处于超静岩压力或静岩压力(Fournier, 1999; Chen and Wang, 2011; Fan *et al.*, 2000, 2011; 陈衍景等,2007;陈衍景和李诺,2009),沸腾期及沸腾后为静岩压力-静水压力交替的流体系统。设矿区岩石(花岗岩类)的密度不大于 2.85g · cm^{-3},则所测样品成矿时的最大深度不大于 4.1km,阶段 1、2 的成矿深度应在 3km 左右,而阶段 3、4 的流体作用深度应小于 1km。可见,前 2 个阶段与后 2 个阶段的成矿深度相差悬殊,原因可能是成矿时地壳发生了快速抬升,或者是 2 次不同类型的成矿作用的叠加,即前者为岩浆热液矿床成矿系统(斑岩型或爆破角砾岩型),后者属于典型的近地表的浅成低温热液型。应该说,这种解释与不同阶段流体包裹体的成分类型发育特征,矿石矿物和蚀变矿物的组合特征(高天钧,1999;鄢云飞等,2007),以及五子骑龙矿床与紫金山铜金矿床的时空关系等似乎可以较好地吻合。

4 成矿流体性质及演化

阶段 1 无矿石英脉中存在大量富气相包裹体和含 CO_2 包裹体,少量富液相包裹体,盐度中等,可以认为阶段 1 是 H_2O-CO_2-NaCl 体系的流体,此时流体温度较高(362.2 ~ 570℃)。实验过程中观察到阶段 1 的一些富气相包裹体出现临界均一的现象,表明早阶段流体可能处于超临界态(Fan *et al.*, 2003)。在岩浆向流体演化过程中,岩浆中的挥发份、盐水溶液和超临界流体可以进入流体体系,演化为成矿初始岩浆流体(Lowenstern, 2000, 2001; Heinrich, 2005; Rusk *et al.*, 2008; Li *et al.*, 2011; 李诺等,2009)。挥发份和超临界流体携带成矿物质的能力较强,尤其是携带铜的能力显著(Williams-Jones and Heinrich, 2005);在超临界态流体和盐水分异过程中,铜优先富集在超临界态部分(Audétat *et al.*, 1998; Ulrich *et al.*, 1999; Ulrich and Günther, 2002; Kouzmanov *et al.*, 2010; Pokrovski, 2010;尚林波等,2004)。这种中低盐度流体主要以气相形式向上运移(杨永飞等,2009),而与之不混溶的高盐度流体则留在深部继续演化,造成了我们所观测到的隐爆角砾岩的花岗闪长斑岩角砾之石英斑晶含大量 S 型包裹体(Chen *et al.*, 2009; Li *et al.*, 2011)。当流体到达浅部时,由于构造裂隙的发育导致压力突然降低,造成了原始流体的减压沸腾。在五子骑龙矿床,主要表现为在 380 ~ 450℃之间,超临界态流体跨过临界曲线,明显分成中盐度的气相和液相不混溶的流体(图 7、图 8),并在此过程中卸载所携带的大量成矿物质(李诺等,2007)。同时,阶段 2(306 ~ 390℃)矿物发育均一温度相近、盐度相差较大的 WV、WL 和 C 类包裹体共生组合,表明流体发生沸腾;而且,与阶段 1 相比,C 类包裹体在脉体中的丰度明显变小,因而流体可能经历了 CO_2 等气体成分的逸失。经

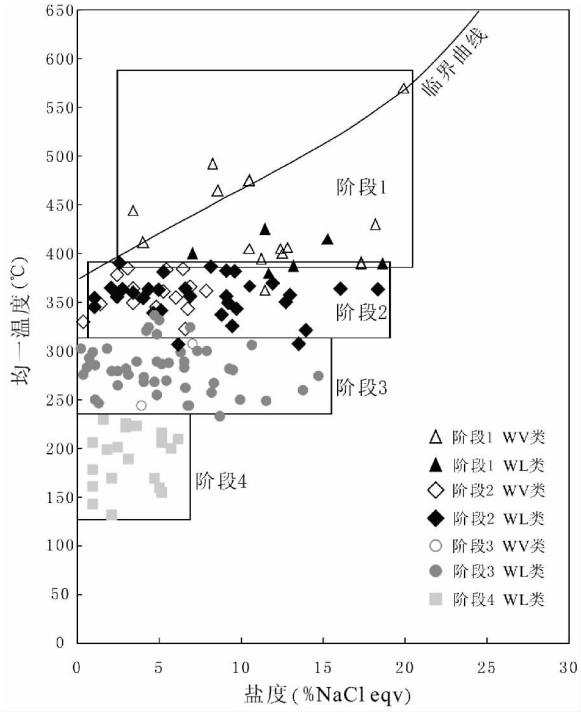


图 8 五子骑龙铜矿流体包裹体均一温度-盐度分布图(底图据 Bodnar,1983)

Fig. 8 Homogenization temperatures vs. salinities of fluid inclusions at the Wuziqilong Cu deposit (modified after Bodnar, 1983)

历流体沸腾和矿质大量沉淀之后，流体演化为阶段 3 的 H_2O-NaCl 体系，随温度和压力进一步降低（所测均一温度为 230～300℃），气体成分逸失，物质沉淀，流体盐度减小，因此富气相包裹体明显减少，并普遍向液相均一。晚阶段流体总体表现为大气降水热液的特征，温度和盐度均较低。

阶段 1 和阶段 2 的流体在温度和盐度上具有明显的岩浆流体的特征，是 H_2O-CO_2-NaCl 体系的流体。隐爆角砾岩的石英斑晶中的流体也代表了深部岩浆流体的进一步演化。同时，阶段 1 和阶段 2 的成矿深度与旁侧的罗卜岭斑岩型铜钼矿在同一深度（钟军等，2011），暗示流体可能是来自罗卜岭花岗闪长斑岩，但也可能来自紫金山复式岩体深部的岩体。相比于罗卜岭斑岩型铜钼矿的成矿流体，阶段 3、4 的流体温度、盐度具有明显下降，成矿流体压力的下降更为显著，可能代表了大气降水的混入（范宏瑞等，2000）。同时，阶段 3 和阶段 4 的明矾石化蚀变与紫金山铜金矿床广泛发育的明矾石化蚀变一致，表明阶段 3 和阶段 4 的流体与紫金山铜金矿床的流体具有一致性。因而，可以得出，流体早期为 H_2O-CO_2-NaCl 体系的高温岩浆热液，在时间和空间上经历了高硫型浅成低温热液的改造和叠加，演化为 H_2O-NaCl 体系的流体。五子骑龙矿床总体属于浆控高温热液型，是斑岩型和高硫型浅成低温热液型矿床的“过渡型”，其深部和紫金山矿床深部具有寻找斑岩型矿床的潜力。

5 结论

（1）矿区内发育各种类型热液脉体，成矿过程分为 4 个阶段，从早到晚分别为绢云母化-迪开石化-硅化蚀变带的石英 ± 钾长石脉，被明矾石化-硅化叠加的绢云母化-迪开石-硅化蚀变带的石英-斑铜矿-黄铜矿-蓝辉铜矿-黄铁矿脉 ± 铜蓝和石英-铜蓝-黄铁矿脉体，以及最后的明矾石化-硅化蚀变带中的石英 ± 石膏 ± 方解石脉。

（2）成矿系统可见富气相包裹体（WV 类）、富液相包裹体（WL 类）、含 CO_2 包裹体（C 型）和含子晶包裹体（S 型）。阶段 1 发育 WV、C 和少量 WL 型包裹体，阶段 2 发育 WV、C 和 WL 类包裹体，阶段 3 发育 WL 和少量 WV 类包裹体，阶段 4 只发育 WL 类包裹体。从早到晚，包裹体均一温度从高温演变为低温，流体盐度和 CO_2 含量逐渐降低，指示大气降水逐步混入。

（3）阶段 2 流体沸腾作用强烈，矿质大量沉淀，CO_2 等挥发份逸失，流体温度、压力快速降低，可能伴随了地壳快速隆升。

（4）五子骑龙铜矿床是总体属于浆控高温热液型，成矿深度为 3km 左右，晚期遭受岩浆驱动的大气降水热液矿化或叠加，深度小于 1km。

致谢 野外地质工作得到紫金矿业集团东南地勘分公司的大力支持和广州地球化学研究所梁华英研究员、包志伟、张莉副研究员和中国科学院地质与地球物理所范宏瑞研究员的指导，北京大学王玉国、王增振、广州地球化学研究所黄文婷协助采样，实验及成文过程中得到了江晓晖、李晓春、李诺、邓小华、倪智勇、杨永飞、钟日晨、舒启海等同学的帮助，谨此致谢！

References

Audétat A, Günther D and Heinrich CA. 1998. Formation of a magmatic-hydrothermal ore deposit: Insights with LA-ICP-MS analysis of fluid inclusions. Science, 279: 2091 – 2094

Bodnar RJ. 1983. A method of calculating fluid inclusion volumes based on vapor bubble diameters and *P-V-T-X* properties of inclusion fluids. Economic Geology, 78:535 – 542

Bodnar RJ. 1993. Revised equation and table for determining the freezing point depression of H_2O-NaCl solutions. Geochimica et Cosmochimica Acta, 53: 683 – 684

Bouzari F and Clark AH. 2006. Prograde evolution and geothermal affinities of a major porphyry copper deposit: The Cerro Colorado hypogene protore, I region. Northern Chile. Economic Geology, 101: 95 – 134

Brown PE. 1989. FLNCOR: A microcomputer program for the reduction and investigation of fluid-inclusion data. American Mineralogist, 74: 1390 – 1393

Brown PE and Lamb WM. 1989. *P-T-V* properties of fluids in the system CO_2 ± H_2O ± NaCl: New graphical presentations and implications for fluid inclusion studies. Geochimica et Cosmochimica Acta, 53: 1290 – 1221

Chen HS. 1996. The research on the mineralization chronology and isotopic exploration assessment for Zijinshan copper-gold deposit. Geotectonica et Metallogenia, 20(4): 348 – 360 (in Chinese with English abstract)

Chen JH. 1999. The metallogenic mode of Zijinshan copper (gold) deposit. Gold, 20(7): 6 – 11 (in Chinese with English abstract)

Chen YJ and Fu SG. 1992. Gold Mineralization in West Henan, China. Beijing: Seismological Press, 234 (in Chinese)

Chen YJ. 2002. Several important problems in study of regional metallogenesis in China: Their relationship to continental collision. Earth Science Frontiers, 9(4): 319 – 328 (in Chinese with English abstract)

Chen YJ, Chen HY, Zaw K, Pirajno F and Zhang ZJ. 2007. Geodynamic settings and tectonic model of skarn gold deposits in China: An overview. Ore Geology Review, 31: 139 – 169

Chen YJ, Ni P, Fan HR, Pirajno F, Lai Y, Su WC and Zhang H. 2007. Diagnostic fluid inclusions of different types hydrothermal gold deposits. Acta Petrologica Sinica, 23(9): 2085 – 2108 (in Chinese with English abstract)

Chen YJ and Li N. 2009. Nature of ore-fluids of intracontinental intrusion-related hypothermal deposits and its difference from those in island arcs. Acta Petrologica Sinica, 25(10): 2477 – 2508 (in Chinese with English abstract)

Chen YJ, Pirajno F, Li N, Guo DS and Lai Y. 2009. Isotope systematics and fluid inclusion studies of the Qiyugou breccia pipe-hosted gold deposit, Qinling orogen, Henan Province, China: Implications for

ore genesis. Ore Geology Reviews, 35: 245 – 261

Chen YJ. 2010. On epizonogenism and genetic classification of hydrothermal deposit. Earth Science Frontiers, 17(2): 27 – 34 (in Chinese with English abstract)

Chen YJ and Wang Y. 2011. Fluid inclusion study of the Tangjiaping Mo deposit in Dabie Shan, Henan Province: Implications for the nature of porphyry systems of post-collisional tectonic settings. International Geology Review, 53: 635 – 655

Chi GX and Lu HZ. 2008. Validation and representation of fluid inclusion microthermometric data using the fluid inclusion assemblage (FIA). Acta Petrologica Sinica, 24(9): 1945 – 1953 (in Chinese with English abstract)

Fan HR, Xie YH, Zhao R and Wang YL. 2000. Dual origins of Xiaoqinling gold-bearing quartz veins: Fluid inclusion evidence. China Science Bulletin, 45: 1424 – 1429

Fan HR, Xie YH, Zheng XZ and Wang YL. 2000. Ore-forming fluids in hydrothermal breccia-related gold mineralization in Qiyugou, Henan Province. Acta Petrologica Sinica, 16: 559 – 563 (in Chinese with English abstract).

Fan HR, Zhai MG, Xie YH and Yang JH. 2003. Ore-forming fluids associated with granite-hosted gold mineralization at the Sanshandao deposit, Jiaodong gold province, China. Mineralium Deposita, 38: 739 – 750

Fan HR, Hu FF, Wilde SA, Yang KF and Jin CW. 2011. The Qiyugou gold-bearing breccia pipes, Xiong'ershan region, Central China: Fluid inclusion and stable-isotope evidence for an origin from magmatic fluids. International Geology Review, 53: 25 – 45

Fournier RO. 1999. Hydrothermal processes related to movement of fluid from plastic into brittle rock in the magmatic-epithermal environment. Economic Geology, 99: 1193 – 1211

Gao TJ and Huang RS. 1998. Comparison of typical characters of Zijinshan copper gold silver deposit, Shanghang, Fujian Province. Volcanology and Mineral Resources, 19(4): 283 – 294 (in Chinese with English abstract)

Gao TJ. 1999. Comparison of the Zijinshan copper-gold deposit and circum-Pacific epithermal deposits. Geology of Fujian, 18(4): 167 – 177 (in Chinese with English abstract)

Hall DL, Sterner SM and Bodnar RJ. 1988. Freezing point depression of NaCl-KCl-H_2O solutions. Economic Geology, 83: 197 – 202

Hedenquist J and Henley R. 1985. The importance of CO_2 on freezing point measurements of fluid inclusions: Evidence from active geothermal systems and implications for epithermal ore deposition. Economic Geology, 80: 1379 – 1406

Heinrich CA. 2005. The physical and chemical evolution of low-salinity magmatic fluids at the porphyry to epithermal transition: A thermodynamic study. Mineralium Deposita, 39: 864 – 889

Hua RM, Hu JH, Huang YS and Li ZM. 1998. Fluid migration-reaction model of Zijinshan deposit as traced by variation of oxygen isotope compositions. Geochimica, 27(2): 187 – 195 (in Chinese with English abstract)

Hua RM, Lu JJ, Chen PR, Li XF, Liu XD and Zhang WL. 2002. The Late Mesozoic porphyry-epithermal gold (copper) system and its ore-forming fluid in the east of China. Progress in Natural Science, 12(3): 240 – 244 (in Chinese with English abstract)

Huang RS. 2008. Igneous series and epithermal porphyry Cu-Au-Ag mineralization system in the Zijinshan ore field, Fujian Province. Journal of Geomechanics, 14(1): 74 – 86 (in Chinese with English abstract)

Kouzmanov K, Thomas P and Heinrich CA. 2010. Direct analysis of ore-precipitating fluids: Combined IR microscopy and LA-ICP-MS study of fluid inclusions in opaque ore minerals. Economic Geology, 105: 351 – 373

Li N, Chen YJ, Lai Y and Li WB. 2007. Fluid inclusion study of the Wunugetushan porphyry Cu-Mo deposit, Inner Mongolia. Acta Petrologica Sinica, 23(9): 2177 – 2188 (in Chinese with English abstract)

Li N, Chen YJ, Ni ZY and Hu HZ. 2009. Characteristics of ore-forming fluids of the Yuchiling porphyry Mo deposit, Songxian Country, Henan Province, and its geological significance. Acta Petrologica Sinica, 25(10): 2509 – 2522 (in Chinese with English abstract)

Li N, Carranza EJM, Ni ZY and Guo DS. 2011. The CO_2-rich magmatic-hydrothermal fluid of the Qiyugou breccia pipe, Henan Province, China: Implication for breccia genesis and gold mineralization. Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis, in press

Lowenstern JB. 2000. A review of the contrasting behavior of two magmatic volatiles: Chlorine and carbon dioxide. Journal of Geochemical Exploration, 69 – 70: 287 – 290

Lowenstern JB. 2001. Carbon dioxide in magmas and implications for hydrothermal systerms. Mineralium Deposita, 36:490 – 502

Lu HZ, Fan HR, Ni P, Ou GX, Shen K and Zhang WH. 2004. Fluid Inclusion. Beijing: Science Press, 1 – 487 (in Chinese)

Mao JR, Tao KY, Li JY, Xie FG and Xu NZ. 2002a. Geochronology and geochemical characteristics in Late Mesozoic Sifang pluton, southwestern Fujian, and their significance. Acta Petrologica Sinica, 18(4): 449 – 458 (in Chinese with English abstract)

Mao JR, Tao KY, Li JY and Xie FG. 2002b. Characteristic of Mesozoic granodioritic rocks in southwestern Fujian and their tectonic evolution. Acta Petrologica et Mineralogica, 21(2): 135 – 142 (in Chinese with English abstract)

Mao JR, Xu NZ, Hu Q, Xing GF and Yang ZL. 2004. The Mesozoic rock-forming and ore-forming processes and tectonic environment evolution in Shanghang-Datian region, Fujian. Acta Petrologica Sinica, 20(2): 285 – 296 (in Chinese with English abstract)

Mao JW, Li XF, Zhang ZH, Wang YT, Li HM and Hu HB. 2003. Geology, distribution, types and tectonic settings of Mesozoic epithermal gold deposits in East China. Geological Journal of China Universities, 9(4): 620 – 637 (in Chinese with English abstract)

Nie TC and Zhu GL. 2004. On the characteristics and evolution of geological structures in the intermediate section of the Zhenghe-Dapu deep faulted zone. Geology of Fujian, 23(4): 186 – 194 (in Chinese with English abstract)

Pokrovski GS. 2010. Enhanced vapor-phase transport of tin in hydrothermal systems or experimental artifacts? Journal of Volcanology and Geothermal Research, 194: 63 – 66

Qiu XP, Lan YZ and Liu Y. 2010. The key to the study of deep mineralization and the evolution of ore-prospecting potential in the Zijinshan gold and copper deposit. Acta Geoscientica Sinica, 31(2): 209 – 215 (in Chinese with English abstract)

Roedder E. 1984. Fluid inclusions. Reviews in Mineralogy, 12: 646

Rusk BG, Reed MH and Dilles JH. 2008. Fluid inclusion evidence for magmatic-hydrothermal fluid evolution in the porphyry copper-molybdenum deposit at Butte, Montana. Economic Geology, 103:

307 – 334

Shang LB, Hu RZ and Fan WL. 2004. Advance in the experimental study of vapor-transport of ore metal. Advance in Earth Sciences, 19 (2): 245 – 249 (in Chinese with English abstract)

Shi CY, Zhang JH and Huang XM. 1996. Regional geological geochemical anomaly structural model of the Zijinshan continental volcanic copper-gold orefield. Geophysical and Geochemical Exploration, 20(3): 180 – 188 (in Chinese with English abstract)

Sillitoe RH. 2010. Porphyry copper systems. Economic Geology, 105: 3 – 41

So CS, Zhang DQ, Yun ST and Li DX. 1998. Alteration mineralization zoning and fluid inclusions of the high sulfidation epithermal Cu-Au mineralization at Zijinshan, Fujian Province, China. Economic Geology, 93: 961 – 980

Ulrich T, Günther D and Heinrich CA. 1999. Gold concentrations of magmatic brines and the metal budget of porphyry copper deposits. Nature, 399: 676 – 679

Ulrich T and Günther D. 2002. Evolution of a porphyry Cu-Au deposit: Based on LA-ICP-MS analysis of fluid inclusions, Bajo de la Alumbrera, Argentina. Economic Geology, 97: 1888 – 1920

Wang DZ and Zhou XM. 2002. Petrogenesis and Crust Evolution of Late Mesozoic Granitic Volcanic-Intrusive Complexes in Southeast China. Beijing: Science Press, 219 – 229 (in Chinese)

Wang PZ, Chen YA, Cao BT, Pan JD and Wang CY. 1993. Crust-upper-mantle structure and deep structural setting of Fujian Province. Geology of Fujian, 12(2): 79 – 158 (in Chinese with English abstract)

Wang SH, Pei RF, Zeng XH, Qiu XP and Wei M. 2009. Metallogenic series and model of the Zijinshan mining field. Acta Geologica Sinica, 83(2): 145 – 157(in Chinese with English abstract)

Williams-Jones AE and Heinrich CA. 2005. Vapor transport of metals and the formation of magmatic-hydrothermal ore deposits. Economic Geology, 100: 1287 – 1312

Wu GG, Zhang D, Chen BL and Wu JS. 2000. Transformation of Mesozoic tectonic domain and its relation to mineralization in southern China: An evidence of southwestern Fujian Province. Earth Science, 25(4): 390 – 396 (in Chinese with English abstract)

Xue K and Ruan SK. 2008. Geological characteristics and genesis of the Luoboling copper (molybdenum) deposit in Zijinshan orefield, Fujian. Resources Environment and Engineering, 22(5): 491 – 496 (in Chinese with English abstract)

Yan YF, Tan J, Li YH and Ruan SK. 2007. Geological characteristics of epithermal gold deposits and status of researches in China. Resources Environment and Engineering, 21(1): 7 – 11 (in Chinese with English abstract)

Yang YF, Li N and Yan Y. 2009. Fluid inclusion study of the Nannihu porphyry Mo-W deposit, Luanchuan County, Henan Province. Acta Petrologica Sinica, 25(10): 2550 – 2562 (in Chinese with English abstract)

Yu XD, Shao Y and Li YG. 1995. The geological-geochemical prospecting model of the Zijinshan copper-gold deposit and its application. Geological and Geochemical Exploration, 19(5): 321 – 331 (in Chinese with English abstract)

Zhang DQ, Li DX, Zhao YM, Chen JH, Li ZL and Zhang KY. 1992. Alteration and Mineralization Zoning of the Zijinshan Copper-Gold Deposit. Beijing: Geological Publishing House, 1 – 77 (in Chinese)

Zhang DQ, Li DX, Zhao YM, Wang WG and Gu GX. 1996. The Wuziqilong deposit-the reformed upper part of a porphyry copper deposit. Mineral Deposits, 15(2): 109 – 122 (in Chinese with English abstract)

Zhang DQ, She HQ, Yan SH and Xu WY. 2001. Geochemistry of Mesozoic magmatites in the Zijinshan region and implication on regional tectonic inversion. Geological Review, 47(6): 608 – 615 (in Chinese with English abstract)

Zhang DQ, She HQ, Li DX and Feng CY. 2003. The porphyry-epithermal metallogenic system in the Zijinshan region, Fujian Province. Acta Geologica Sinica, 77(2): 253 – 261 (in Chinese with English abstract)

Zhang DQ, Feng CY, Li DX, She HQ and Dong YJ. 2005. The evolution of ore-forming fluid in the porphyry-epithermal metallogenic system of Zijinshan area. Acta Geoscientica Sinica, 26(2): 127 – 136 (in Chinese with English abstract)

Zhao XL, Mao JR, Chen R and Xu NZ. 2008. SHRIMP zircon dating of the Zijinshan pluton in southwestern Fujian and its implications. Geology in China, 35(4): 590 – 597 (in Chinese with English abstract)

Zhong J, Chen YJ, Chen J, Li J, Qi JP and Dai MC. 2011. Fluid inclusion study of the Luoboling porphyry Cu-Mo deposit in the Zijinshan ore field, Fujian Province. Acta Petrologica Sinica, 27 (5): 1410 – 1424 (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

陈好寿. 1996. 紫金山铜金矿床成矿年代及同位素找矿评价研究. 大地构造与成矿学, 20(4): 348 – 360

陈景河. 1999. 紫金山铜(金)矿床成矿模式. 黄金, 20(7): 6 – 11

陈衍景, 富士谷. 1992. 豫西金矿成矿规律. 北京:地震出版社, 234

陈衍景. 2002. 中国区域成矿研究的若干问题及其与陆-陆碰撞的关系. 地学前缘, 9(4): 319 – 328

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. 岩石学报, 25(10): 2477 – 2508

陈衍景. 2010. 初论浅成作用和热液矿床成因分类. 地学前缘, 17 (2): 27 – 34

池国祥, 卢焕章. 2008. 流体包裹体组合对测温数据有效性的制约及数据表达方法. 岩石学报, 24(9): 1946 – 1953

范宏瑞, 谢奕汉, 郑学正, 王英兰. 2000. 河南祁雨沟热液角砾岩体型金矿床成矿流体研究. 岩石学报, 16(4): 559 – 563

高天钧, 黄仁生. 1998. 福建省上杭紫金山矿田铜金银矿床类型及对比. 火山地质与矿产, 19(4): 283 – 294

高天钧. 1999. 福建紫金山铜金矿床类型与环太平洋浅成低温矿床的比较. 福建地质, 18(4): 167 – 177

华仁民, 胡金化, 黄耀生, 李振敏. 1998. 福建紫金山矿床流体运移-反应模式及其氧同位素示踪研究. 地球化学, 27(2): 187 – 195

华仁民, 陆建军, 陈培荣, 李晓峰, 刘晓东, 张文兰. 2002. 中国东部晚中生代斑岩-浅成热液金(铜)矿体系及其成矿流体. 自然科学进展, 12(3): 240 – 244

黄仁生. 2008. 福建紫金山矿田火成岩系列与浅成低温热液-斑岩铜

金银成矿系统. 地质力学学报, 14(1): 74 – 86
李诺, 陈衍景, 赖勇, 李文博. 2007. 内蒙古乌努格吐山斑岩铜钼矿床流体包裹体研究. 岩石学报, 23(9): 2177 – 2188
李诺, 陈衍景, 倪智勇, 胡海珠. 2009. 河南省嵩县鱼池岭斑岩钼矿床成矿流体特征及其地质意义. 岩石学报, 25(10): 2509 – 2522
卢焕章, 范宏瑞, 倪培, 欧光习, 沈昆, 张文淮. 2004. 流体包裹体. 北京:科学出版社, 1 – 487
毛建仁, 陶奎元, 李寄嵎, 谢方贵, 许乃政. 2002a. 闽西南晚中生代四方岩体同位素年代学、地球化学及其构造意义. 岩石学报, 18(4): 449 – 458
毛建仁, 陶奎元, 李寄嵎, 谢方贵. 2002b. 闽西南地区中生代花岗闪长质岩石的特征及其构造演化. 岩石矿物学杂志, 21(2): 135 – 142
毛建仁, 许乃政, 胡青, 邢光福, 杨祝良. 2004. 福建省上杭-大田地区中生代成岩成矿作用与构造环境演化. 岩石学报, 20(2): 285 – 296
毛景文, 李晓峰, 张作衡, 王义天, 李厚民, 胡华斌. 2003. 中国东部中生代浅成热液金矿的类型、特征及其地球动力学背景. 高校地质学报, 9(4): 620 – 637
聂童春, 朱根灵. 2004. 政和-大埔深(大)断裂带中段地质构造特征及其演化探讨. 福建地质, 23(4): 186 – 194
邱小平, 蓝岳彰, 刘羽. 2010. 紫金山金铜矿床深部成矿作用研究和找矿前景评价的关键. 地球学报, 31(2): 209 – 215
尚林波, 胡瑞忠, 樊文苓. 2004. 元素在气相中迁移的实验研究进展. 地球科学进展,19(2): 245 – 249
史长义, 张金华, 黄笑梅. 1996. 福建紫金山陆相火山岩型 Cu-Au 矿区域地质地球化学异常结构模式. 物探与化探, 20(3): 180 – 188
王德滋, 周新民. 2002. 中国东南部晚中生代花岗质火山-侵入杂岩成因与地壳演化. 北京:科学出版社,219 – 229
王培宗, 陈耀安, 曹宝庭, 潘金滇, 王长炎. 1993. 福建省地壳-上地慢结构及深部构造背景的研究. 福建地质, 12(2):79 – 158
王少怀, 裴荣富, 曾宪辉, 邱小平, 魏民. 2009. 再论紫金山矿田成矿系列与成矿模式. 地质学报, 83(2): 145 – 157
吴淦国, 张达, 陈柏林, 吴建设. 2000. 中国东南大陆中生代构造域的转换及其与成矿的关系——以闽西南地区为例. 地球科学, 25(4): 390 – 396
薛凯, 阮诗昆. 2008. 福建紫金山矿田罗卜岭铜(钼)矿床地质特征及成因探讨. 资源环境与工程, 22(5): 491 – 496
鄢云飞, 谭俊, 李闫华, 阮诗昆. 2007. 中国浅成低温热液型金矿床地质特征及研究现状. 资源环境与工程, 21(1): 7 – 11
杨永飞, 李诺, 杨艳. 2009. 河南省栾川南泥湖斑岩型钼钨矿床流体包裹体研究. 岩石学报, 25(10): 2550 – 2562
余学东, 邵跃, 李应桂. 1995. 福建紫金山铜金矿床地质地球化学找矿模型及应用. 物探与化探, 19(5): 321 – 331
张德全, 李大新, 赵一鸣, 陈景河, 李子林, 张克尧. 1992. 紫金山铜金矿床蚀变及矿化分带. 北京: 地质出版社, 1 – 77
张德全, 李大新, 赵一鸣, 王文桂, 顾光先. 1996. 五子骑龙矿床-被改造的斑岩铜矿上部带. 矿床地质, 15(2): 109 – 122
张德全, 佘宏全, 阎升好, 徐文艺. 2001. 福建紫金山地区中生代构造环境转换的岩浆岩地球化学证据. 地质论评, 47(6): 608 – 615
张德全, 佘宏全, 李大新, 丰成友. 2003. 紫金山地区的斑岩-浅成热液成矿系统. 地质学报, 77(2): 253 – 261
张德全, 丰成友, 李大新, 佘宏全, 董英君. 2005. 紫金山地区斑岩-浅成热液成矿系统的成矿流体演化. 地球学报, 26(2): 127 – 136
赵希林, 毛建仁, 陈荣, 许乃政. 2008. 闽西南地区紫金山岩体锆石 SHRIMP 定年及其地质意义. 中国地质, 35(4): 590 – 597
钟军, 陈衍景, 陈静, 李晶, 祁进平, 戴茂昌. 2011. 福建省紫金山矿田罗卜岭斑岩型铜钼矿床流体包裹体研究. 岩石学报, 27(5): 1410 – 1424