

# 西藏甲玛铜多金属矿床成因研究

——来自流体包裹体的证据

周云<sup>1,2)</sup>, 唐菊兴<sup>3,4)</sup>, 秦志鹏<sup>1)</sup>, 彭惠娟<sup>3)</sup>

1) 成都理工大学地球科学学院, 四川成都 610059;

2) 中国地质调查局武汉地质调查中心, 湖北武汉 430205;

3) 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037;

4) 国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 北京 100037

**摘要:** 甲玛铜多金属矿床位于西藏冈底斯斑岩铜矿带东段, 是近年来勘探发现的超大型斑岩-矽卡岩型铜多金属矿床。通过冷热台显微观察与测温、扫描电镜、激光拉曼探针测试, 对甲玛矿床各成矿阶段典型矿物的流体包裹体研究表明, 成矿流体富含挥发分, 临界相均一的流体来自岩浆超临界流体出溶, 主成矿阶段具有沸腾包裹体组合特征, 有机质包裹体荧光效应显著。显微测温结果显示, 岩浆-热液阶段斑岩中石英斑晶的流体包裹体均一温度范围为 250 ~ 540℃, 含石盐子晶高盐度包裹体盐度范围为 35 ~ 61 (wt%)NaCl<sub>eq</sub>, 中等盐度的临界均一的气液包裹体盐度范围为 3 ~ 29 (wt%)NaCl<sub>eq</sub>, 岩浆期后热液阶段斑岩、角岩中石英脉的流体包裹体均一温度范围为 210 ~ 410℃, 盐度范围为 33 ~ 41 (wt%)NaCl<sub>eq</sub>, 与其不混溶共生的中低盐度气液两相流体包裹体盐度范围为 5 ~ 25 (wt%)NaCl<sub>eq</sub>, 矽卡岩阶段矿物均一温度范围为 130 ~ 360℃, 盐度范围为 3 ~ 41 (wt%)NaCl<sub>eq</sub>, 从岩浆热液过渡阶段到石英-硫化物阶段均一温度与盐度呈阶梯式降低趋势。斑岩体石英的流体包裹体中含有较多黄铜矿子矿物, 岩浆结晶分异过程中已经具成矿元素的富集。激光拉曼探针测试结果显示, 成矿早期至主成矿期矿物流体包裹体气相成分主要为 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>, 各阶段矿物流体包裹体气相成分具有继承性。成矿流体为高温度高盐度, 富含 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub> 的流体。成矿流体主要源于岩浆, 后期混有大气降水。当岩浆热液上升时因压力的突然释放造成高温含矿热流体发生减压沸腾, CO<sub>2</sub> 和 CH<sub>4</sub> 等气体大量逃逸, 导致成矿物质快速沉淀。矿床在成因上与岩浆-热液成矿作用密切相关。

**关键词:** 流体包裹体; 特征; 矿床成因; 甲玛; 冈底斯成矿带; 西藏

中图分类号: P588.13; P594.1 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2012.04.09

## A Study of Fluid Inclusions and Their Constraints on the Genesis of the Jiama(Gyama) Copper Polymetallic Deposit in Tibet

ZHOU Yun<sup>1,2)</sup>, TANG Ju-xing<sup>3,4)</sup>, QIN Zhi-peng<sup>1)</sup>, PENG Hui-juan<sup>3)</sup>

1) College of Earth Science, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059;

2) Wuhan Center of Geological Survey, Wuhan, Hubei 430205;

3) Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037;

4) MLR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Resource Assessment, Beijing 100037

**Abstract:** The Jiama(Gyama) copper polymetallic deposit in Tibet, which is located in the eastern part of the Gangdise porphyry copper belt, is a superlarge porphyry-skarn deposit explored in recent years. A study of fluid inclusions in typical minerals of the mineralization stage from the Jiama(Gyama) deposit through heating/freezing system TEM and Laser Raman analysis shows that the ore-forming fluid was full of volatiles. Fluid

homogenization of the critical phase originated from the exsolution of fluid supercritical fluid. The fluid inclusions of the main stage were assemblages of boiling inclusions. Fluorescent effect of organic inclusions are notable. Microthermometry shows that the homogenization temperature of fluid inclusions in quartz phenocrysts from the magmatic-hydrothermal stage was 250–540°C, the salinity concentration of fluid inclusions with halite minerals was 35–61 (wt%)NaCl.eq, the salinity concentration of fluid inclusions of homogeneous phase was 3–29(wt%)NaCl.eq, the homogenization temperature in quartz vein from porphyry and hornfels after the magmatic stage was 210–410°C, the salinity concentration was 33–41 (wt%)NaCl.eq, the salinity concentration of fluid inclusions in unmixing association with them was 5–25 (wt%)NaCl.eq. Homogenization temperature of skarn minerals was 130–360°C, the salinity concentration was 3–41 (wt%)NaCl.eq. The homogenization temperatures and salinity decreased step by step from the magmatic-hydrothermal transition stage to the quartz-sulfide stage. There were abundant chalcopyrite daughter minerals in fluid inclusions from quartz phenocrysts, suggesting the enrichment of metallogenic elements at the magma crystallization and differentiation stage. The results of Laser Raman show that the gas compositions were mainly CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub> in fluid inclusions from the early mineralization stage to the main mineralization stage. The gas compositions of fluid inclusions in minerals of various stages had close succession. Ore-forming fluids had high temperature and high salinity and were enriched in CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub>. The ore-forming fluids came from magma and were subsequently mixed with atmospheric water. When the magma-hydrothermal solution rose, high temperature ore-forming fluid experienced decompression and boiling due to the sudden release of pressure. Lots of CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> escaped, magmatic fluid was mixed with atmospheric water, causing the deposition of metallogenic elements. The deposit was genetically related to magmatic-hydrothermal mineralization.

**Key words:** fluid inclusion; characteristic; genesis; Jiama(Gyama); Gangdese metallogenic belt; Tibet

西藏甲玛铜多金属矿床位于西藏墨竹工卡县, 中国地质科学院矿产资源研究所从 2008 年起对该矿床进行了全面的地质勘探与详细系统的研究工作, 取得了重大找矿突破, 是冈底斯成矿带上目前已探明的超大型铜多金属矿床(唐菊兴等, 2009, 2010, 2012), 受到了地质界的广泛关注。

甲玛铜多金属矿床作为冈底斯成矿带一个重要的代表性矿床, 前人对其进行了大量研究, 提出的成因观点主要有: (1)海底沉积喷流成因(杜光树等, 1998; 潘凤雏等, 2002); (2)岩浆热液充填交代成因(冯孝良等, 2001; 李光明等, 2005; 余宏全等, 2006)。近年来, 唐菊兴等(2009, 2010)、应立娟等(2009)、郑文宝等(2010)、秦志鹏等(2011, 2012)通过矿床勘探和综合研究认为矿床属“岩浆热液充填交代成因”的典型的斑岩-矽卡岩型铜多金属矿。斑岩成矿系统中岩浆体系演化为热液体系, 成矿流体在出溶和演化过程中伴随着金属元素的富集和成矿(Shinohara, 1994; Webster, 1997; Davidson et al., 2001; Simon et al., 2004; Halter et al., 2004; Landtwing et al., 2005; Hezarkhani, 2009), 本文拟通

过对甲玛铜多金属矿床流体包裹体的显微岩相鉴定, 冷热台显微测温、扫描电镜分析、激光拉曼光谱分析, 研究流体包裹体从岩浆热液阶段演化到石英硫化物阶段的特征变化, 找到矿床成因在流体包裹体方面的“岩浆热液充填交代成因”证据, 探讨甲玛铜多金属矿化与岩浆热液活动的关系, 这对甲玛矿床的成因研究及指导找矿必将具有重要意义。

## 1 矿床地质特征

甲玛铜多金属矿床位于喜马拉雅-冈底斯微板块, 冈底斯-念青唐古拉板片中南部的冈底斯火山岩浆弧带内, 展布于雅鲁藏布江缝合带北侧, 是目前冈底斯成矿带中东段具代表性的斑岩-矽卡岩型铜多金属矿床。

矿区出露地层主要为下白垩统林布宗组(K<sub>1</sub>l)的灰、暗灰色砂岩与板岩互层, 灰黑色粉砂岩夹碳质泥页岩, 黑色的斑点板岩及灰白色的绢云母板岩, 上侏罗统多底沟组(J<sub>3</sub>d)灰黑色中厚层灰岩, 少量沿沟谷分布的第四系冰水冲洪积物和沿坡分布的残坡

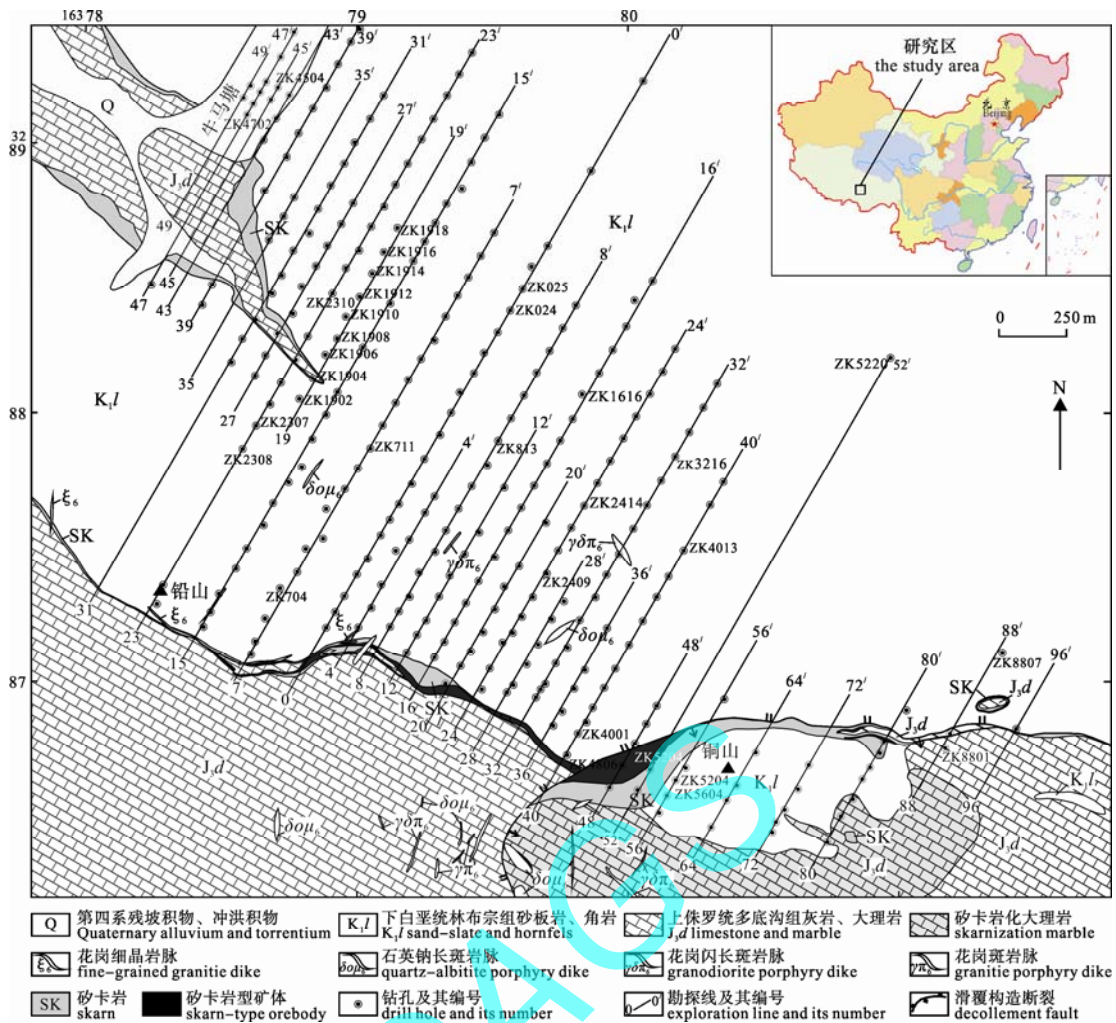


图 1 Geological map of the Jiama(Gyama) mining area(from HU Zheng-hua et al., 2011)

积物构成一套被动陆缘期碎屑-碳酸盐岩系。矿区的构造由红-塔背斜、牛马塘背斜和夏工普向斜、推覆滑覆构造及层间构造构成(图 1)。

矿区出露的侵入岩主要有花岗斑岩、花岗闪长斑岩、石英闪长玢岩等。矿区内的侵入体分布于林布宗组及多底沟组地层中。矿体在平面上呈北西西走向, 倾向北北东, 总体为半隐伏-隐伏矿体。本矿床矿石类型按工业类型可分为砂卡岩型铜铅锌多金属矿石、角岩型铜钼矿石以及斑岩型钼铜矿石(唐菊兴等, 2010), 以砂卡岩型矿体为主体。砂卡岩型矿体呈层状产于下白垩统林布宗组砂板岩、角岩(矿体顶板)与上侏罗统多底沟组灰岩、大理岩(矿体底板)的推覆-滑覆构造引起的扩容空间内。角岩型矿体赋存于砂卡岩矿体、斑岩型矿体之上, 产在林布宗组角岩内。砂卡岩、角岩、斑岩是本矿床主要的容矿岩石类型, 矿石构造以浸染状和细脉网脉状为主, 团块状构造和角砾状构造次之。

矿石矿物以斑铜矿、黄铜矿、黝铜矿、辉钼矿、方铅矿、闪锌矿为主, 其次为辉铜矿、蓝铜矿、蓝辉铜矿、硫铋铜矿、铜蓝、孔雀石等, 脉石矿物以砂卡岩矿物为主, 包括石榴子石、硅灰石、透辉石等, 其次为石英、方解石、绿帘石、绿泥石、透闪石、石膏、萤石等。矿区围岩蚀变发育, 主要围岩蚀变有硅化、砂卡岩化、角岩化、大理岩化等(唐菊兴等, 2009; 周云等, 2011; 胡正华等, 2011)。

根据甲玛铜多金属矿床地质特征, 可分为 4 个成矿期次, 分别为岩浆期、砂卡岩-角岩期、热液期、表生期。矿区范围内发育广泛的热液蚀变, 其中脉状或细网脉状硅化与矿化关系密切。斑岩中的石英斑晶多呈溶蚀港湾状(图 2A), 属岩浆热液过渡现象, 其流体代表了岩浆出溶后的早期流体。在斑岩岩体中、岩体接触带的角岩以及砂卡岩中均不同程度地发育铜钼矿化石英脉与无矿化的网状石英细脉(图 2)。其中, 无矿化的网状石英细脉多是成矿期后的岩

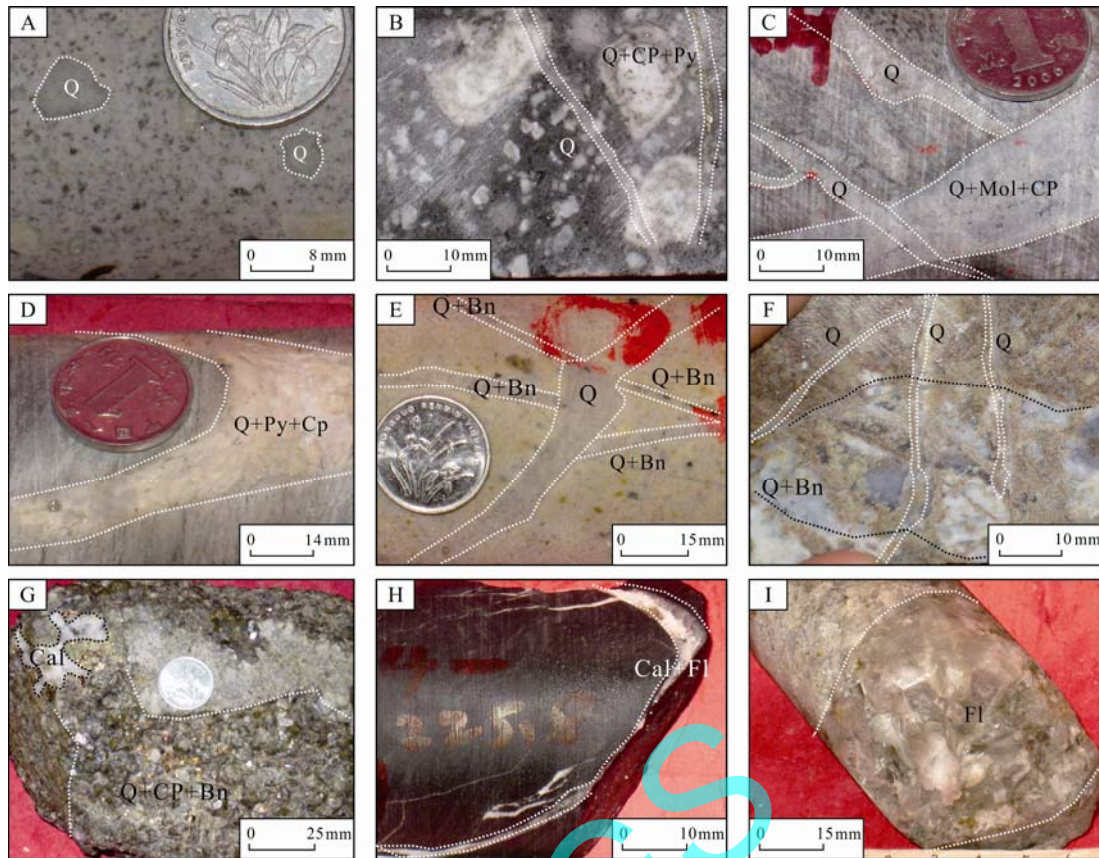


图 2 甲玛铜多金属矿床脉体特征

Fig. 2 Photographs of various generations of veins from the Jiama (Gyama) copper polymetallic deposit

A-花岗闪长斑岩中的石英斑晶; B-石英闪长玢岩中的黄铜矿-黄铁矿化石英脉与无矿化晚期石英脉; C-石英闪长玢岩中的辉钼矿-黄铜矿化石英脉与无矿化晚期石英脉; D-角岩中的黄铁矿-黄铜矿化石英脉; E-硅灰石砂卡岩中的斑铜矿化石英脉与晚期无矿化石英脉; F-硅灰石石榴子石砂卡岩中的斑铜矿化石英脉与晚期无矿化石英脉; G-石榴子石砂卡岩中的斑铜矿-黄铜矿化石英脉与晚期无矿化方解石脉; H-角岩化大理岩中的晚期无矿化方解石脉与萤石脉; I-硅灰石砂卡岩中的晚期无矿化萤石脉;

Q-石英; Cal-方解石; Fl-萤石; Py-黄铁矿; Cp-黄铜矿; Bn-斑铜矿; Mol-辉钼矿

A-quartz phenocryst in granodiorite porphyry; B-chalcopyrite and pyrite mineralization and barren quartz vein in quartz diorite porphyry; C-molybdenite and chalcopyrite mineralization and later barren quartz vein in quartz diorite porphyry; D-chalcopyrite and pyritized quartz vein in hornfels; E-bornitized and later barren quartz veins in grammite of skarn; F-bornitized and later barren calcite veins in garnet of skarn; G-bornite and calcopyritized and later barren calcite veins in garnet of skarn; H-later barren calcite vein and fluorite vein in marble; I-later fluorite-poor vein in grammite skarn;

Q-quartz; Cal-calcite; Fl-fluorite; Py-pyrite; Cp-chalcopyrite; Bn-bornite; Mol-molybdenite

浆气液产物, 比矿化石英脉晚形成。花岗斑岩的矿化特点是以石英-辉钼矿-黄铜矿脉为主, 石英闪长斑岩中的矿化以石英-黄铜矿-黄铁矿脉为主, 在热液期的石英-硫化物阶段, 脉体矿物组合可大致分为 2 种类型, 即具斑铜矿化、黄铜矿化的石英脉(图 2E, F, G), 与斑岩、角岩中的辉钼矿-黄铜矿化石英脉基本属于同一阶段(图 2B, C, D), 及无矿化的晚期矿物组合, 如细网脉状的石英、方解石、萤石等, 属于最晚一期脉体(图 2E, F, G, H, I), 与斑岩、角岩中的无矿化网脉状石英属于同一期次。

## 2 样品制备及测试方法

本文主要研究岩浆-热液过渡期、砂卡岩阶期、

砂卡岩退变质期、石英-方解石硫化物期成矿流体特征, 样品主要覆盖甲玛铜多金属矿床近 32 个钻孔中, 基本上涵盖整个成矿阶段中与矿化有关的所有岩石类型与脉体、蚀变类型。岩性包括花岗斑岩、花岗闪长斑岩、石英闪长玢岩、砂卡岩与角岩。将上述岩石与矿石样品制成双面抛光的包裹体片, 然后在光学显微镜上观察流体包裹体的显微特征。流体包裹体的基础研究均按照镜下鉴定照相冷冻加热流程进行, 对体系较为特殊的包裹体进行重复实验, 并选择有代表性的样品进行激光拉曼探针分析。流体包裹体的岩相学和显微测温研究实验在宜昌地质矿产研究所中南实验检测中心和长江大学地球化学实验室完成, 所使用的仪器包括: 德国产

ZEISS Axioskop40 型正交偏反光显微镜, 放大倍数为 100~800 倍, 英国产 Linkam THMSG600 地质型显微冷热台(2002 年), 配备有荧光仪的 MDS 显微冷热台(2005 年), 600~0 的精度为  $\pm 2$ , 0~-196 的精度为  $\pm 0.5$ 。部分流体包裹体中不明子矿物的鉴定在成都地质矿产研究所测试中心完成, 测试仪器是日本 HITACHI 冷场发射扫描式电子显微镜及能量散布光谱仪, 型号: S-4800, 仪器参数: 加速电压 20 kV, 加速电流 10  $\mu$ A。分析样品为已在显微镜下确定有多相包裹体的矿物。将包裹体片镀膜后固定于载物台上, 在样品表面耐心地寻找子矿物。单个流体包裹体的激光拉曼分析在西安地质矿产研究所实验测试中心进行, 分析仪器为英国 Renshaw 公司 inVia 型激光拉曼探针, 仪器编号为 SX-02。实验条件为: Ar+激光器, 波长 514.5 nm, 激光功率 40 mw, 扫描速度 10 秒/6 次叠加, 光谱仪狭缝 10  $\mu$ m。测试对象为各成矿阶段代表性样品, 岩石类型包括花岗斑岩、闪长玢岩、角岩、矽卡岩。

### 3 流体包裹体特征

#### 3.1 流体包裹体的类型

流体包裹体岩相学研究显示, 甲玛矿床斑晶石英、脉状石英、脉状方解石、硅灰石、萤石均捕获有丰富的流体包裹体, 石榴石、绿帘石中的流体包裹体不发育。根据流体包裹体在室温时的相态特征, 主要划分为富液相流体包裹体(L 类)、富气相流体包裹体(V 类)和含子晶多相流体包裹体(S 类)。L 类在石英斑晶、石英脉及矽卡岩矿物中均大量发育, 气液比变化大, 大小在 3~20  $\mu$ m 之间, 圆形、椭圆形、米粒状、负晶形, 加热后多均一为液相(图 3A; 图 4C, D, G), 部分气相充填度在 40%~60%左右(图 3D), 加热后均一为临界相, 发育于花岗斑岩的斑晶石英中, 来源于岩浆超临界流体的出溶, 是岩浆热液过渡的标志, 为成矿流体的母流体。V 类在石英斑晶和矿化石英脉中均较发育, 大小为 10~50  $\mu$ m, 呈负晶形、椭圆形、不规则状, 加热后均一为气相(图 3B, C; 图 4H)。部分富气相流体包裹体在配备荧光仪的光学显微镜下, 可观察到荧光效应。蓝荧光下显示为黄色, 紫荧光下显示为蓝灰色, 流体包裹体中气相部分荧光现象表现明显, 大部分有机质分布于包裹体气相中的环边区域(图 3G, H, I)。S 类分布普遍, 在石英斑晶、矿化石英脉与早期矽卡岩矿物中大量发育, 大小为 5~40  $\mu$ m, 呈负晶形、椭圆或不规则状。子晶以石盐为主, 还有钾盐子晶和不透明子矿物(图 3E, F; 图 4A, B, E, I)。含石盐子晶包裹体分布的数

量随着成矿作用的进行, 在斑晶石英、矿化石英脉、矽卡岩矿物中依次减少。

本矿床流体包裹体的一个显著特点是沸腾包裹体组合较发育, 在石英斑晶及矿化石英脉中均有分布, 流体包裹体悬殊较大的气液比和相近的均一温度即可作为证据之一(图 3J)。另外, 在石榴石中可观察到较多的次生包裹体(20%)(图 4F), 约有 10%发生了卡脖子, 晚期热液活动。此类包裹体多产于石榴石的裂隙中, 均一温度为 100~300, 冰点为 -0.2~1.0, 可能是捕获了晚期热液流体。

#### 3.2 显微测温特征

对甲玛矿床不同成岩成矿阶段的矿物中的流体包裹体进行显微测温, 各阶段温度与盐度特征如下(表 1; 图 5, 6, 7):

在岩浆热液(过渡)阶段, 斑岩中石英斑晶中的流体包裹体均一温度范围为 250~540, 平均 394, 含石盐子晶高盐度包裹体盐度范围为 35%~61%, 平均为 46%NaCl.eq。除含石盐子晶的高浓度流体包裹体外, 还有中低盐度气液两相流体包裹体不混溶共生, 包括中等盐度的临界均一的气液包裹体, 其盐度范围为 3%~29%(图 5)。岩体中岩浆期后热液阶段主要的研究对象为斑岩中的矿化石英脉。石英脉中流体包裹体均一温度范围为 210~410, 平均 354, 盐度范围为 33%~41%NaCl.eq, 平均为 37%NaCl.eq(图 5), 与其不混溶共生的中低盐度气液两相流体包裹体盐度范围为 5%~25%NaCl.eq。矿化角岩中石英脉的流体包裹体温度和盐度特征与斑岩中石英脉的流体包裹体温度盐度特征基本相似, 不再赘述。

矽卡岩早阶段主要发育石榴石, 透辉石等矽卡岩矿物, 其均一温度范围为 320~360, 平均为 341。盐度为 28%~41%NaCl.eq。

矽卡岩退变质阶段主要发育绿帘石等湿矽卡岩矿物, 主要研究对象为绿帘石。绿帘石中均一温度为 230~330, 平均 293, 盐度为 5%~35%NaCl.eq。在石英-硫化物阶段, 主要发育石英、方解石、萤石等矿物。

石英脉一般沿近垂直方向平行分布, 各矿物中均一温度一般为 130~244, 平均为 198, 盐度为范围为 3%~17%(图 6)。部分岩浆-热液阶段及矽卡岩早阶段矿物中 V 类包裹体的气相内不同程度地含有 CO<sub>2</sub> 和 CH<sub>4</sub>, 这些包裹体在室温及冷冻、升温过程中相态特征表现不明显。富 CO<sub>2</sub> 包裹体形态多样, 多呈菱型、椭圆形、不规则状, 个体变化较大, 直径约 5~25  $\mu$ m, 常温下表现为单相, 可见

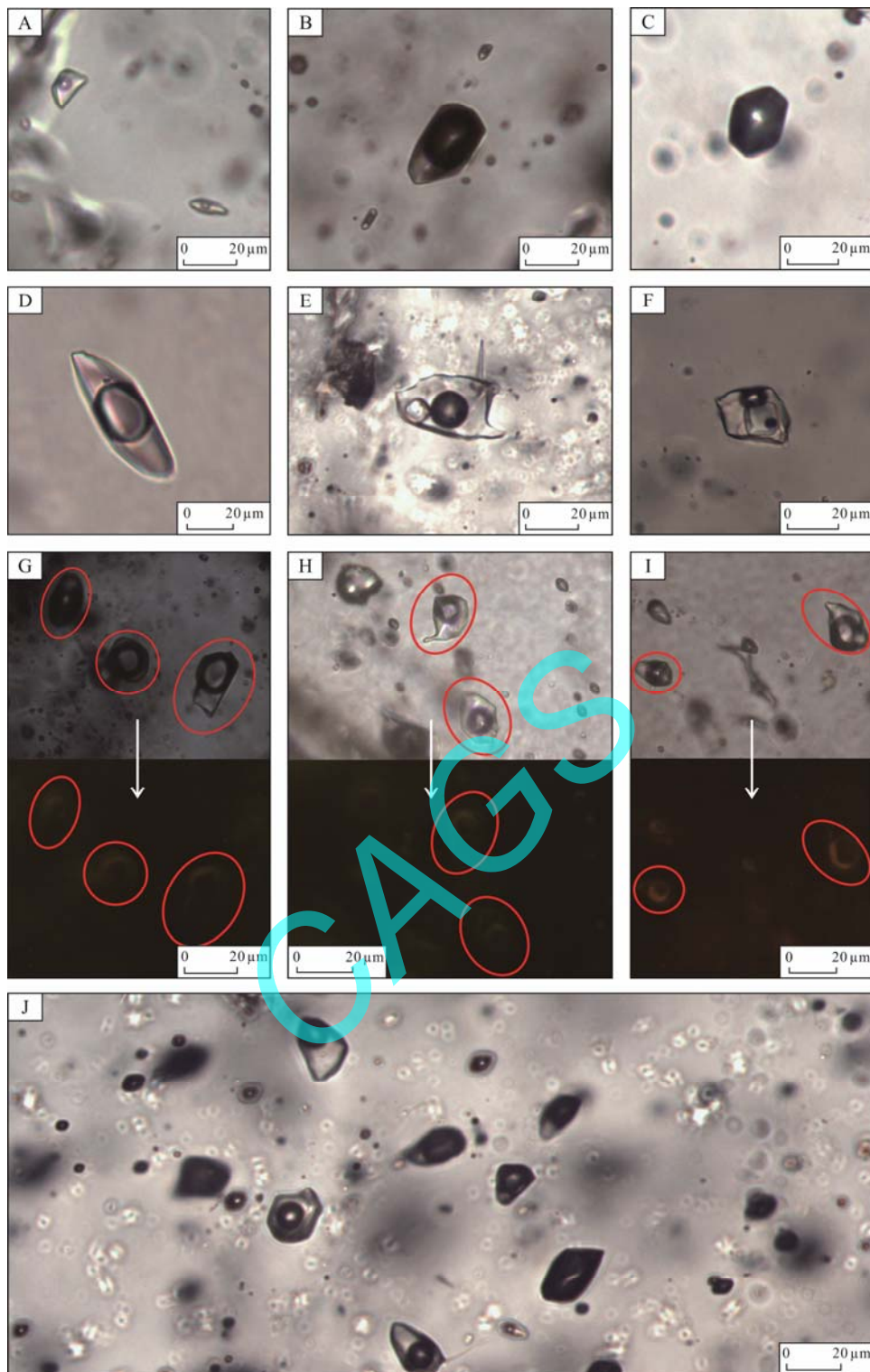


图3 甲玛铜多金属矿床斑岩矿物中的两类流体包裹体及有机质荧光效应

Fig. 3 Two types of fluid inclusions and their organic fluorescence effect in porphyry minerals from the Jiama(Gyama) copper polymetallic deposit

A-石英脉中充填度在5%~15%左右的液相包裹体; B-石英斑晶中充填度在60%~80%左右的液相包裹体; C-岩石英斑晶中气相充填度几乎达100%的气相包裹体; D-花岗斑岩的石英斑晶中气相充填度在40%~60%左右的气液相临界包裹体; E-石英斑晶中流体包裹体的石盐子晶溶化温度小于气液相均一温度, 含不透明子矿物; F-石英脉中流体包裹体石盐子晶溶化温度大于气液相均一温度;

G, H, I-花岗斑岩石英斑晶中的流体包裹体及其在蓝色荧光下的荧光效应; J-石英斑晶中的沸腾包裹体群

A-5%~15% gas filling fluid inclusion in quartz vein; B-60%~80% gas filling fluid inclusion in quartz phenocryst; C-100% gas filling fluid inclusion in quartz phenocryst; D-40%~60% gas filling critical fluid inclusion in quartz phenocryst; E-daughter salt crystal melting temperature lower than gas homogeneous temperature, with non-transparent daughter mineral;

F-fluid inclusions' daughter salt crystal melting temperature higher than gas homogeneous temperature;

G, H, I-blue fluorescence effects of fluid inclusion in quartz phenocryst; J-boiling inclusions in quartz phenocryst

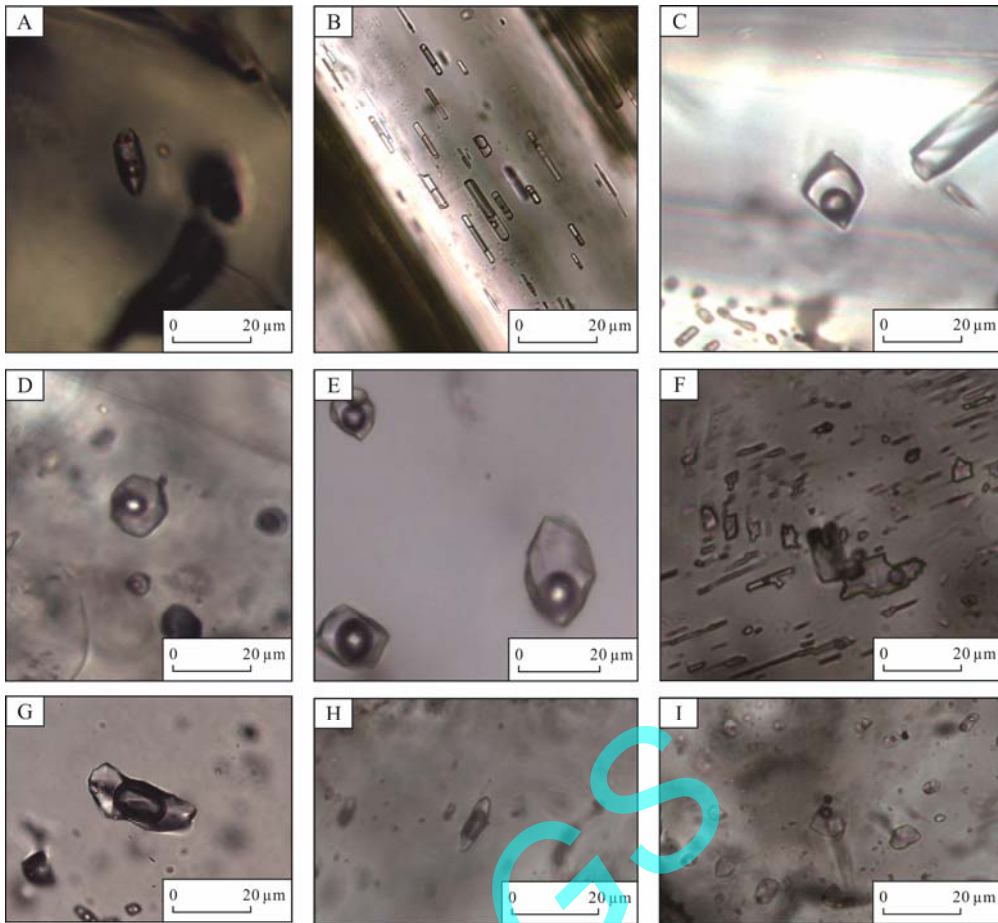


图 4 甲玛铜多金属矿床矽卡岩/角岩矿物中的流体包裹体

Fig. 4 Fluid inclusions in skarn and hornfels minerals from the Jiama(Gyama) copper polymetallic deposit

A-矽卡岩石榴子石中充填度在 10%左右的含石盐三相包裹体; B-硅灰石中充填度在 10%左右的含石盐三相包裹体; C-矽卡岩中方解石充填度在 40%~50%左右的两相流体包裹体; D-矽卡岩中石英脉的两相流体包裹体; E-萤石中含不溶子矿物的两(三)相流体包裹体; F-石榴石中的次生流体包裹体; G-角岩中石英脉中充填度为 40%左右的两相流体包裹体; H-角岩中石英脉中充填度为 60%左右的两相流体包裹体; I-角岩中石英脉中的三相流体包裹体

A-10% gas filling and salt bearing fluid inclusion which is three phases in garnet of skarn; B-10% gas filling and salt bearing fluid inclusion which is three phases in grammite of skarn; C-40%-50% gas filling fluid inclusion in calcite of skarn; D-fluid inclusion which is two phases in quartz vein of skarn; E-fluid inclusion which is two/three phases in fluorite; F-second fluid inclusions in garnet; G-40% gas filling fluid inclusion in quartz vein in hornfel; H-60% gas filling fluid inclusion in quartz vein in hornfel; I-three phases of fluid inclusions in quartz vein in hornfel

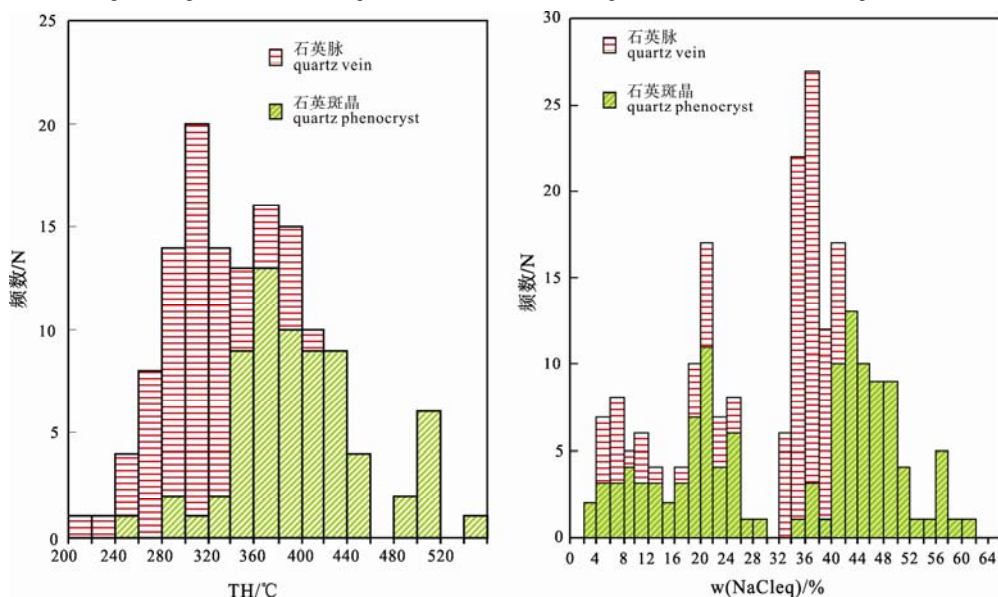


图 5 斑岩中石英斑晶与石英脉中的流体包裹体均一温度与盐度直方图

Fig. 5 Homogenization temperatures and salinity histograms of fluid inclusions in porphyry minerals

表 1 典型样品流体包裹体显微测温结果  
Table 1 Microthermometric determinations of fluid inclusions

样品编号	样品名称	矿物	包裹体类型	气泡消失温度/			子矿物消失温度/		w(NaCleq)/%	
				范围	测试数	均值	范围	均值	范围	均值
JM812-139	黑云母花岗斑岩	石英斑晶	L/V	282-416	12	340.2			13.3-29.5	21.9
JM812-139	黑云母花岗斑岩	石英斑晶	S	216-314	9		293-397	337.7	37.4-45.7	40.8
JM2010-481.4	石英闪长玢岩	石英斑晶	L/V	330-540	8	395.4			14.8-27.6	20.4
JM2010-481.4	石英闪长玢岩	石英斑晶	S	257-369	11		321-537	395.3	40.1-60.6	46.0
JM2010-481.4	石英闪长玢岩	石英斑晶	V	317-457	8	389.2			3.3-14.2	8.6
JM1618-409.4	石英闪长玢岩	石英斑晶	S	254-418	7	348.7	230-352	304.3	33.5-41.6	37.5
JM2010-493.8	花岗斑岩	石英斑晶	S	310-367	6	343.8	287-352	324.9	37.0-41.6	38.9
JM2006-237.2	石英闪长玢岩	脉石英	V	279-356	7	337.4			7.7-15.6	10.4
JM2006-237.2	石英闪长玢岩	脉石英	S	321-436	9		280-395	353.6	36.5-45.5	41.7
JM2002-197.2	硅化角岩	脉石英	L	234-346	14	297.6			12.4-19.8	17.7
JM2002-197.2	硅化角岩	脉石英	S	303-358	5		345-409	375.6	41.1-46.9	43.2
ZK1606-7-1	石榴石砂卡岩	石榴石	L	294-363	10	332.4			24-37	29.7
ZK1606-7-1	石榴石砂卡岩	石榴石	S	297-328	10		323-377	338.3	27-42	40.4
JM409-77	硅灰石砂卡岩	硅灰石	S	225-331	13		257-353	297	26.2-34.5	29.8
JM2312-58.3	绿帘石化硅灰石砂卡岩	绿帘石	L	216-337	9	287.4			9.7-18.6	14.9
JM1609-1	含石英脉砂卡岩	脉石英	L	102-247	21	198.4			3.2-17.4	9.4
JM1609-2	含方解石脉砂卡岩	方解石	L	111-243	14	179.2			4.3-13.7	7.6
DFY-1	萤石化硅灰石砂卡岩	萤石	L	220-350	8	257.6			4.9-6.4	5.2

注: 盐度计算方法据刘斌等(1999)。

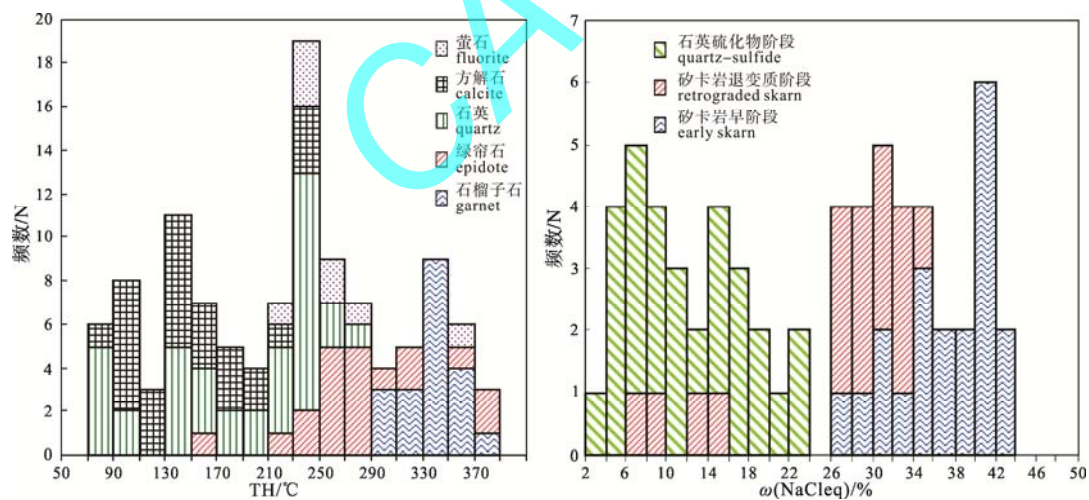


图 6 砂卡岩阶段矿物流体包裹体均一温度-盐度直方图

Fig. 6 Homogenization temperatures and salinity histograms of fluid inclusions in skarn minerals

萤石、方解石、石英属石英硫化物阶段; 绿帘石属砂卡岩退变质阶段; 石榴石属砂卡岩早阶段

fluorite, calcite and quartz belong to quartz-sulfide stage; epidote belongs to retrograded skarn stage; garnet belongs to early skarn stage

不明显三相, 降温过程中不易观察到典型的三相结构。

### 3.3 子矿物特征

甲玛矿床各成岩成矿阶段矿物中基本均含子矿物, 在岩浆热液阶段的斑晶石英流体包裹体中主要

含大量石盐与钾盐子晶, 并含少量黄铜矿、黄铁矿、赤铁矿子矿物。岩浆期后高温热液阶段石英脉流体包裹体中除含大量石盐, 钾盐子晶外, 黄铜矿、黄铁矿含量比石英斑晶流体包裹体中更加富集。干砂卡岩阶段, 子矿物基本只有石盐子晶, 且石盐子晶粒



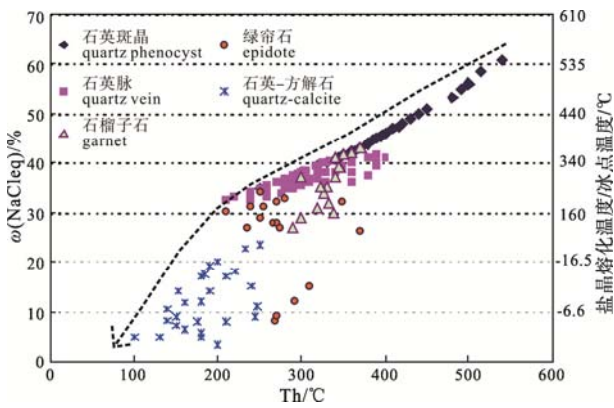


图 7 岩浆热液过渡阶段至石英硫化物阶段矿物流体包裹体均一温度-盐度-盐晶溶化温度/冰点温度演化图  
 Fig. 7 Homogenization temperatures-salinity-salt crystal melting temperatures/freezing temperatures of fluid inclusions in minerals of the magmatic to hydrothermal stage and the quartz-sulfide stage

度稍小, 溶化温度为 200 ~ 350 , 与岩浆热液阶段和岩浆期后高温热液阶段流体包裹体中石盐溶化温度相比较低。矽卡岩退变质阶段, 除绿帘石等矿物的流体包裹体含石盐外, 萤石中还含有方解石矿物。石英-方解石-硫化物阶段流体包裹体则含少量石盐子晶和石膏子矿物(图 8)。

部分流体包裹体中子矿物的鉴定是根据子矿物结晶习性、光学性质(均质/二轴晶及消光性质等)、冷冻/加热实验过程中的相变特征和流体体系推测的, 加热时, 石盐、钾盐均能溶化, 其溶化的先后顺序是钾盐 石盐, 其他子矿物加热均不溶化(卢焕章等, 2004), 各子矿物的基本特征见表 2。

3.4 激光拉曼特征

激光拉曼光谱分析结果表明(表 3; 图 9), 花岗岩与闪长玢岩石英斑晶中流体包裹体气液相成分以 H<sub>2</sub>O、CO<sub>2</sub> 和 CH<sub>4</sub>、H<sub>2</sub> 为主, 气相中含少量 N<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>S; 斑岩石英脉与角岩石英脉中流体包裹体气液

相成分以 H<sub>2</sub>O、CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub> 为主, 液相中有很微量的 H<sub>2</sub>S 气体; 矽卡岩中的石榴子石中的流体包裹体气液相成分为 H<sub>2</sub>O、CO<sub>2</sub> 和 N<sub>2</sub>; 矽卡岩中矿化石英脉流体包裹体气液相成分以 H<sub>2</sub>O、CO<sub>2</sub> 为主, 含少量 CH<sub>4</sub>、H<sub>2</sub> 和 H<sub>2</sub>S; 矽卡岩中萤石流体包裹体气液相成分则均为 H<sub>2</sub>O。测试结果显示 CH<sub>4</sub> 含量相对较高, 这与显微镜下观察到的石英斑晶中含 CH<sub>4</sub> 流体包裹体的荧光效应较一致。

4 矿床成因探讨

甲玛铜多金属矿床成矿流体具有高温、高盐度, 显微测温结果显示, 岩浆-热液过渡阶段斑岩中石英斑晶的流体包裹体均一温度范围为 250 ~ 540 °C, 含石盐子晶高盐度包裹体盐度范围为 35 ~ 61 (wt%)NaCl.eq, 中等盐度的临界均一的气液包裹体盐度范围为 3 ~ 29 (wt%)NaCl.eq, 斑岩、角岩中石英脉的流体包裹体均一温度范围为 210 ~ 410 °C, 盐度范围为 33 ~ 41 (wt%)NaCl.eq, 与其不混溶共生的中低盐度气液两相流体包裹体盐度范围 5 ~ 25 (wt%)NaCl.eq。矽卡岩型矿体中矿物均一温度范围为 130 ~ 360 °C, 盐度范围为 3 ~ 41 (wt%)NaCl.eq, 斑岩、角岩中的流体与矽卡岩型矿体中流体的均一温度与盐度均逐步下降, 从开始出溶的岩浆-热液过渡阶段到成矿晚期的石英-方解石-硫化物阶段, 均一温度和盐度呈阶梯式降低趋势(图 9), 各阶段温度与盐度数值降低系数接近, 这些特征反映了矿床在形成过程中流体活动存在着稳定的热驱动, 揭示出矿床与岩体之间紧密的继承关系。王可勇等(2011)研究黑龙江金厂金矿床流体包裹体得出含硫化物子矿物包裹体的大量发育揭示出岩浆活动为区内金、铜成矿作用提供了重要物质来源的结论, 本矿床岩浆结晶分异过程中已经有富含成

表 2 甲玛铜多金属矿床流体包裹体中子矿物的基本特征  
 Table 2 Daughter minerals in fluid inclusions from the Jiama(Gyama) copper polymetallic deposit

子矿物	基本特征
石盐	均质立方体, 中等突起, 在 170 ~ 540 范围内消失
钾盐	均质半自形-自形长方体, 浑圆状, 低突起, 在 50 ~ 200 范围内消失
黄铜矿	黑色他形、三角形粒状, 加热不溶化
黄铁矿	黑色他形不规则粒状, 加热不溶化
赤铁矿	红色半透明三角或片状矿物, 加热不溶化
方解石	菱形或粒状, 高突起, 对称消光, 高级干涉色, 加热不溶化
石膏	斜方菱-柱状、高突起, 平行消光, 中-高级干涉色, 不溶化

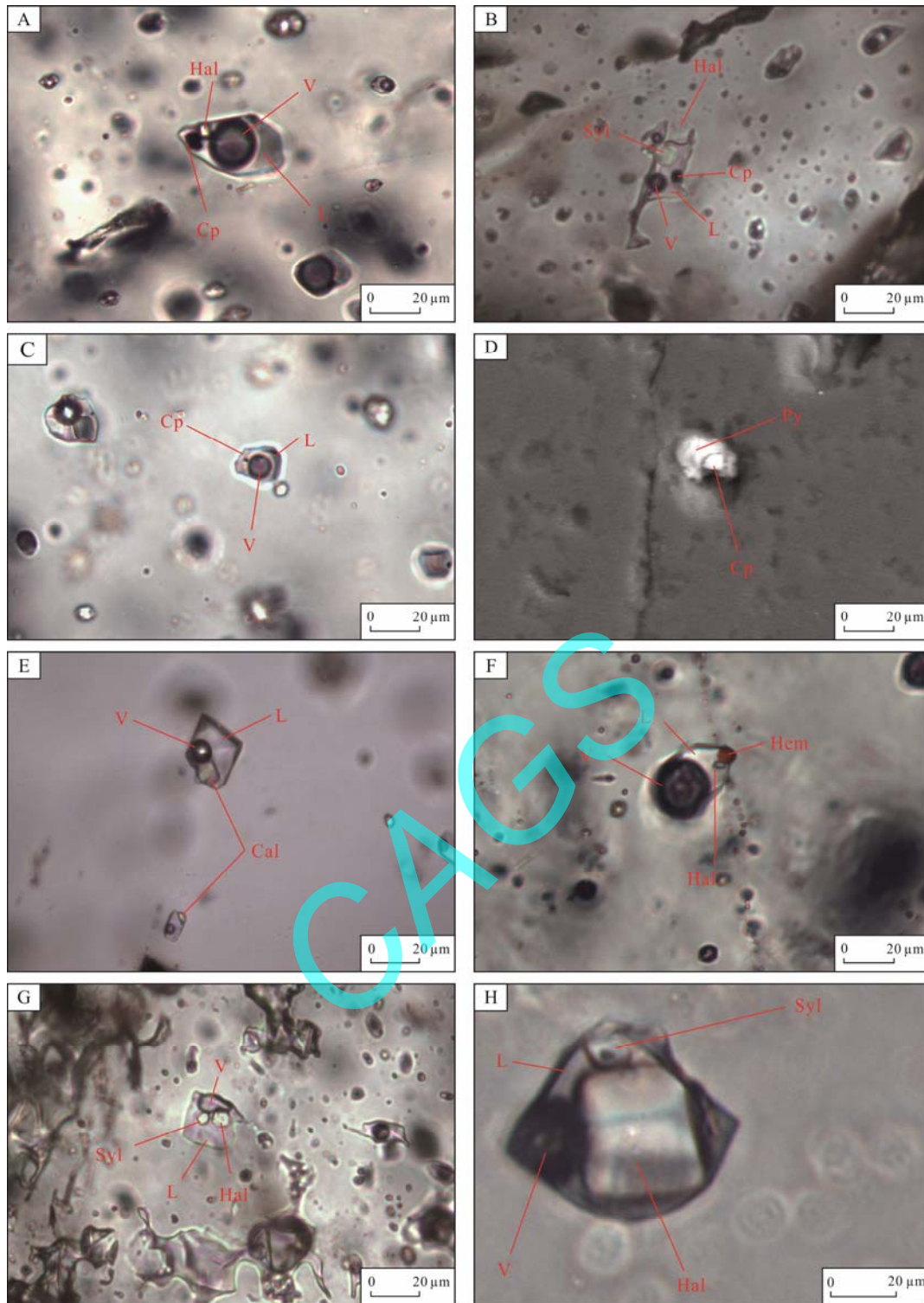


图 8 甲玛铜多金属矿床流体包裹体中的子矿物

Fig. 8 Daughter minerals in fluid inclusions from the Jiama(Gyama) copper polymetallic deposit

A-斑岩体石英斑晶中流体包裹体的石盐子晶与黄铜矿子矿物; B-斑岩体石英脉中流体包裹体的石盐子晶、钾石盐子晶、黄铜矿子矿物;

C-斑岩体石英斑晶中流体包裹体的细粒黄铜矿子矿物; D-斑岩体石英脉中流体包裹体的黄铜矿和黄铁矿子矿物扫描电镜照片;

E-萤石中流体包裹体的方解石子矿物; F-斑岩体石英斑晶中流体包裹体的石盐子晶与红色赤铁矿子矿物; G-石英脉中流体包裹体的石盐子晶与钾石盐子晶; H-斑岩体石英斑晶中流体包裹体的石盐子晶与钾石盐子晶;

L-液相; V-气相; Syl-钾石盐; Hal-石盐; Cp-黄铜矿; Py-黄铁矿; Cal-方解石; Hem-赤铁矿

A-halite and chalcopyrite bearing fluid inclusion in quartz phenocryst in porphyry; B-halite, sylvite and chalcopyrite bearing fluid inclusion in quartz vein in porphyry; C-chalcopyrite bearing fluid inclusion in quartz phenocryst; D-SEM photos of chalcopyrite and pyrite bearing fluid inclusion in quartz vein in porphyry; E-calcite bearing fluid inclusion in fluorite; F-halite and hematite bearing fluid inclusion in quartz phenocryst in porphyry; G-halite and sylvite bearing fluid inclusion in quartz vein; H-halite and sylvite bearing fluid inclusion in quartz phenocryst; L-liquid phase; V-gas phase; Syl-sylvite; Hal-halite; Cp-chalcopyrite; Py-pyrite; Cal-calcite; Hem-hematite

表 3 甲玛铜多金属矿床流体包裹体激光拉曼分析结果  
Table 3 Laser Raman spectra of fluid inclusions from the Jiama(Gyama) copper polymetallic deposit

样品编号	主矿物	气相(%)					液相(%)			
		CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> S	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> S	CH <sub>4</sub>	H <sub>2</sub> O
JM3204-1	石英斑晶	92.9	2.6	1.6	2.9		33.4			66.6
JM2807-89.6	石英斑晶			68.2		31.8			1.6	98.4
JM2004-47.1	脉石英	93.5		4.9	1.6		27.8			72.2
JM2314-113.1	脉石英	55.7		26	18.3		6.5	2.5	1.6	89.4
JM4012-748.8	石榴石	69.6			30.4		9.8			70.9
JM2320-665	晚期脉石英	85		8.7		6.3		3.4		96.6
JM4012-2	萤石									100

矿金属物质的流体存在, 通过镜下鉴定, 同时结合扫描电镜, 大量矿物流体包裹体中发现有黄铜矿等子矿物, 暗示了成矿物质同样来源于岩浆。

甲玛矿床流体包裹体激光拉曼光谱分析显示成矿流体富含 CO<sub>2</sub> 和 CH<sub>4</sub>, 岩体与矽卡岩、矿化石英脉中流体包裹体气液相成分具有一致性与继承性, 表明成矿深度大, 成矿压力高, 初始成矿流体来源于岩浆流体(徐九华等, 2003)。从岩浆-热液过渡阶段到石英-方解石-硫化物阶段, 寄主矿物流体包裹体中 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub> 和 H<sub>2</sub> 含量逐渐减少直至没有, 挥发分含量减少, 成矿流体从初始的 CO<sub>2</sub>-CH<sub>4</sub>-NaCl-H<sub>2</sub>O 体系演化为最后的 NaCl-H<sub>2</sub>O 体系。

成矿早-中期矿物具有沸腾包裹体组合特征, 流体包裹体悬殊较大的气液比和相近的均一温度即可作为证据(图 3J), 流体包裹体岩相学特征及成分分析结果显示成矿期后矿物则仅发育水溶液包裹体, 成矿流体从初始富含成矿元素的 CO<sub>2</sub>-CH<sub>4</sub>-NaCl-H<sub>2</sub>O 体系演化为成矿期后的 NaCl-H<sub>2</sub>O 体系, 成矿流体发生了减压沸腾作用。甲玛矿床矽卡岩矿物、石英单矿物的氢氧同位素(周云等, 2011)显示不仅岩浆流体是成矿流体的最直接来源, 成矿晚期系统中还具有大气降水的混入, 表明成矿流体与大气降水发生了流体混合作用, 导致流体成矿系统中的 CO<sub>2</sub> 和 CH<sub>4</sub> 大量逃逸, 挥发分锐减, 成矿流体浓缩并过饱和, 成矿物质快速沉淀(徐佳佳等, 2009; 陈华勇等, 2007), 这种混合作用发生于岩浆期后热液阶段, 与流体沸腾作用共同导致铜钼等金属元素的部分沉淀。流体的混合作用与沸腾作用相比, 在成矿物质沉淀中的重要作用越来越为我们所认识, 如西澳大利亚纳沃日金矿床中 CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O 流体与 CH<sub>4</sub> 流体的混合造成热液的 pH 及 fO<sub>2</sub> 的升高, 流体中的金-硫络合物分解, 金沉淀成矿(范宏瑞等, 2001), 长江中下游池州地区矽卡岩-斑岩型 W-Mo 矿床多因流体混合作用使得大量钨、钼、铅、锌等金属沉淀成矿(宋

国学等, 2010)。流体的混合作用是流体与流体的反应, 因而反应速度比流体-固体间的反应快得多, 造成的沉淀效果也显著得多, 同时混合作用多具有循环热液体系的特点, 因而影响范围大、持续时间长。流体混合的这种特点可能导致所有类型热液矿床矿物沉淀过程中都有混合作用参与, 也可能是大型-超大型矿床多与流体的混合作用有关的重要原因之一(张德会, 1997)。

笔者对花岗斑岩的斑晶石英和脉石英中的单个流体包裹体进行了金属元素的同步辐射 X 射线荧光 MAPPING(SR-XRF)分析, 分析结果显示 Cu、Pb、Zn 等元素在流体包裹体气相中较富集, 液相中的元素浓度较低, 岩浆在结晶过程中岩浆气液中的 Cu、Pb、Zn 等金属元素均强烈地选择进入挥发分气相中进行迁移(周云等, 2011)。通过岩体与角岩、矽卡岩、矿化石英脉中流体包裹体气液相成分的一致性与继承性特征分析, 认为携带成矿元素的岩浆气液上升时, 侵入于碳酸盐地层中经接触交代作用形成矽卡岩, 当热的上升溶液与冷的地表附近的水体相混合, 相对纯的水与盐度更高的流体混合, 两者混合引起的冷却作用、稀释作用、中和作用、氧化还原反应及液态不混溶作用导致热液系统物理化学条件突变, 从而引起矿石矿物向着沉淀反应进行, 造成硫化物大量沉淀(李晶等, 2007)。岩浆流体的减压沸腾, 岩浆流体与大气降水的混合是甲玛铜多金属矿床矿质沉淀的主要机制, 物理化学条件在空间上的变化导致金属元素的沉淀场所在空间上有规律地分布。

因此, 甲玛矿床在成因上与统一的斑岩-矽卡岩-浅成低温热液成矿系统中的岩浆-热液成矿作用有关, 成因类型复杂。携带成矿元素的岩浆热液-挥发分从岩浆房由高势能向低势能沿断裂运移, 不断与对流循环的大气降水混合。当侵入于碳酸盐地层中时, 所带来的富含成矿元素的岩浆热液及挥发分在碳酸盐围岩即多底沟组(J<sub>3d</sub>)灰岩的有利部位经接触

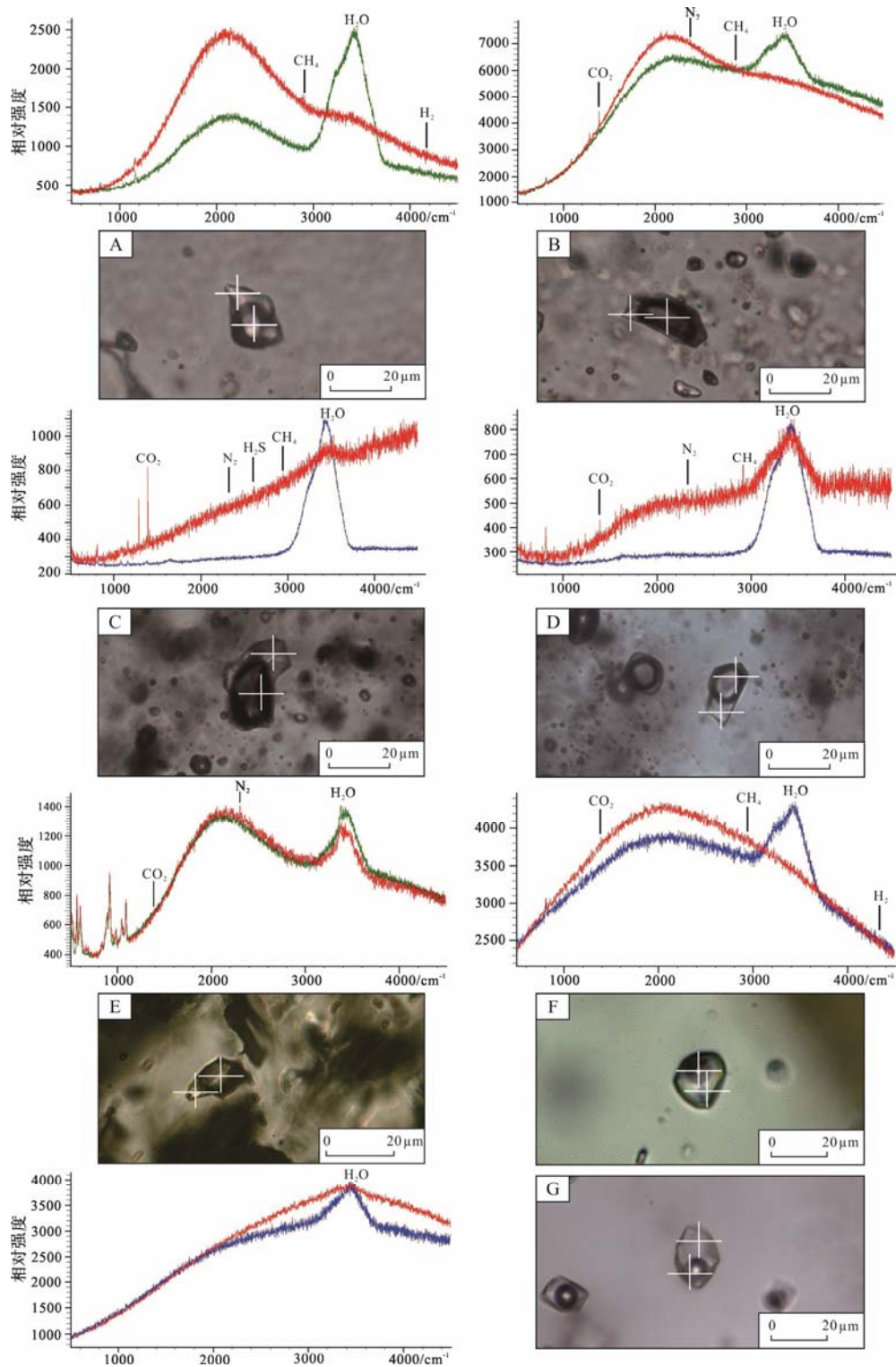


图9 甲玛铜多金属矿床各阶段流体包裹体的显微激光拉曼光谱图

Fig. 9 Laser Raman spectra of fluid inclusions from the Jiama(Gyama) copper polymetallic deposit

A-主矿物为闪长玢岩中石英斑晶(样品编号: JM2807-89.6); B-主矿物为角闪岩中石英脉(样品编号: JM2004-47.1); C-主矿物为花岗斑岩中石英斑晶(样品编号: JM3204-1); D-主矿物为花岗斑岩中石英粗脉(样品编号: JM2314-113.1); E-主矿物为石榴子石(样品编号: JM4012-748.8); F-主矿物为砂卡岩中石英脉(样品编号: JM2320-665); G-主矿物为萤石(样品编号: JM4012-2); 红色谱线代表包裹体气相成分, 绿色或蓝色谱线代表液相成分

A-the main mineral is quartz phenocryst in diorite porphyrite (sample number: JM2807-89.6); B-the main mineral is quartz vein in taconite (sample number: JM2004-47.1); C-the main mineral is quartz phenocryst in granite porphyry (sample number: JM3204-1); D-the main mineral is quartz vein in granite porphyry (sample number: JM2314-113.1); E-the main mineral is garnet (sample number: JM4012-748.8); F-the main mineral is quartz vein in skarn (sample number: JM2320-665); G-the main mineral is fluorite (sample number: JM4012-2); the red spectral line means gas composition of fluid inclusion, the green or blue spectral line means liquid composition

交代形成矽卡岩型铜多金属矿床, 部分气液沿断裂、裂隙及层间构造充填、交代形成外围岩浆热液充填交代成因角岩型/脉型多金属矿床。

前人研究证明甲玛矿区外围的花岗闪长斑岩成岩年龄和矿床成矿年龄与冈底斯后碰撞岩浆岩(18~12 Ma)及周边的驱龙、冲江、厅宫、拉抗俄等斑岩型铜矿床的形成年龄较为接近(侯增谦等, 2003; 曲晓明, 2003; 莫宣学等, 2005; 李奋其等, 2010; 赵元艺等, 2010)。因此甲玛多金属矿床应同属于冈底斯东段的后碰撞岩浆热液成矿系统。流体包裹体研究表明, 本矿床角岩型/矽卡岩型铜多金属矿化与斑岩型铜多金属矿化构成了统一的岩浆-热液成矿系统, 与处于冈底斯成矿带东段矿化集中区内的驱龙、冲江、厅宫等矿床具有相似的矿床地质特征、流体包裹体特征、成矿机理和近乎一致的成岩、成矿年龄, 这一类斑岩型-矽卡岩型-角岩型铜多金属矿床可能受控于统一的地球动力学背景。

## 5 结论

(1)甲玛矿床成矿流体具有高温、高盐度, 富含  $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$ 、 $\text{N}_2$ , 从岩浆热液过渡阶段到石英-硫化物阶段均一温度与盐度呈阶梯式降低趋势, 寄主矿物流体包裹体中  $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$ 、 $\text{N}_2$  和  $\text{H}_2$  含量逐渐减少直至没有, 成矿流体从早期  $\text{CO}_2$ - $\text{CH}_4$ - $\text{NaCl}$ - $\text{H}_2\text{O}$  体系演化为成矿期后的  $\text{NaCl}$ - $\text{H}_2\text{O}$  体系。成矿期流体包裹体内含有黄铜矿等子矿物, 岩浆结晶分异过程中已经有富含成矿金属物质的流体存在, 成矿流体来源于岩浆热液。

(2)成矿流体在演化过程中发生了减压沸腾, 并与不同性质流体混合。携带成矿元素的岩浆气液侵入碳酸盐地层, 在碳酸盐围岩的有利部位发生接触交代, 角岩型/脉型矿体为岩浆热液沿断裂、裂隙充填交代形成。岩浆流体的减压沸腾, 与大气降水的混合可能是甲玛铜多金属矿床矿质沉淀的主要机制。

(3)甲玛矽卡岩型/角岩型铜多金属矿化与斑岩型铜多金属矿化构成了统一的岩浆-热液成矿系统, 应同属于冈底斯东段的后碰撞岩浆热液成矿系统。

致谢: 审稿专家对稿件提出了较多建设性的修改意见, 对改进文章质量起到了重要作用, 在此表示衷心的感谢!

## 参考文献:

- 陈华勇, 陈衍景, 倪培, 张莉, 张增杰. 2007. 新疆萨瓦亚尔顿金矿流体包裹体成分、矿床成因和成矿预测[J]. 岩石学报, 23(9): 2189-2197.
- 杜光树, 姚鹏, 潘凤雏. 1998. 喷流成因矽卡岩与成矿—以西藏甲玛铜多金属矿床为例[M]. 成都: 四川科技出版社.
- 范宏瑞, GROVES D I, MIKUCKI E J, MCNUGHTON N J. 2010. 西澳大利亚纳沃日金矿流体混合与金的成矿作用[J]. 矿床地质, 20(1): 37-43.
- 冯孝良, 管仕平, 牟传龙, 侯增谦, 李胜荣. 2001. 西藏甲玛铜多金属矿床的岩浆热液交代成因: 地质与地球化学证据[J]. 地质地球化学, 29(4): 41-48.
- 侯增谦, 吕庆田, 王安建, 李晓波, 王宗起, 王二七. 2003. 初论陆-陆碰撞与成矿作用—以青藏高原造山带为例[J]. 矿床地质, 22(4): 319-334.
- 胡正华, 唐菊兴, 丁枫, 郑文宝, 邓世林, 杨毅, 张志, 王艺云, 林彬, 丁帅. 2011. 西藏甲玛铜多金属矿富银矿体地质特征、银赋存状态及富集机理研究[J]. 地球学报, 32(6): 668-680.
- 李奋其, 刘伟, 耿全如. 2010. 西藏冈底斯带那曲地区中生代火山岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄和地质意义[J]. 地球学报, 31(6): 781-790.
- 李光明, 芮宗瑶, 王高明, 林方成, 刘波, 余宏全, 丰成友, 屈文俊. 2005. 西藏冈底斯成矿带甲马和知不拉铜多金属矿床的 Re-Os 同位素年龄及其意义[J]. 矿床地质, 24(5): 4812-4897.
- 李晶, 陈衍景, 李强之, 赖勇, 杨荣生, 毛世东. 2007. 甘肃阳山金矿流体包裹体的地球化学和矿床成因类型[J]. 岩石学报, 23(9): 2144-2154.
- 刘斌, 沈昆. 1999. 流体包裹体热力学[M]. 北京: 地质出版社.
- 卢焕章, 范宏瑞, 倪培, 欧光习, 沈昆, 张文淮. 2004. 流体包裹体[M]. 北京: 科学出版社.
- 莫宣学, 董国臣, 赵志丹, 周肃, 王亮亮, 邱瑞照, 张风琴. 2005. 西藏冈底斯带花岗岩的时空分布特征及地壳生长演化信息[J]. 高校地质学报, 11(3): 281-290.
- 潘凤雏, 邓军, 姚鹏, 王庆飞, 刘玉祥. 2002. 西藏甲玛铜多金属矿床夕矽卡岩的喷流成因[J]. 现代地质, 16(4): 360-364.
- 秦志鹏, 多吉, 汪雄武, 刘鸿飞, 周云, 彭惠娟. 2012. 西藏甲玛铜多金属矿二长花岗斑岩岩浆-热液过渡特征及成矿意义[J]. 地球学报, 33(4): 501-509.
- 秦志鹏, 汪雄武, 唐菊兴, 唐晓倩, 周云, 彭惠娟. 2011. 西藏甲

- 玛过铝质花岗岩的地球化学特征及成因意义[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 38(1): 76-84.
- 曲晓明, 侯增谦, 李振清. 2003. 冈底斯铜矿带含矿斑岩的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄及其地质意义[J]. 地质学报, 77(2): 245-252.
- 余宏全, 丰成友, 张德全, 李光明, 刘波, 李进文. 2006. 西藏冈底斯铜矿带甲马夕砂卡岩型铜多金属矿床与驱龙斑岩型铜矿流体包裹体特征对比研究[J]. 岩石学报, 22(3): 6890-696.
- 宋国学, 秦克章, 李光明. 2010. 长江中下游池州地区砂卡岩-斑岩型 W-Mo 矿床流体包裹体与 H、O、S 同位素研究[J]. 岩石学报, 26(9): 2768-2782.
- 唐菊兴, 陈毓川, 多吉, 刘鸿飞, 杜欣, 张金树, 郑文宝, 高一鸣. 2009. 西藏冈底斯成矿带东段主要矿床类型、成矿规律和找矿评价[J]. 矿物学报, 29(S1): 476-478.
- 唐菊兴, 多吉, 刘鸿飞, 郎兴海, 张金树, 郑文宝, 应立娟. 2012. 冈底斯成矿带东段矿床成矿系列及找矿突破的关键问题研究[J]. 地球学报, 33(4): 393-410.
- 唐菊兴, 王登红, 汪雄武, 钟康惠, 应立娟, 郑文宝, 黎枫估, 郭娜, 秦志鹏, 姚晓峰, 李磊, 王友, 唐晓倩. 2010. 西藏甲玛铜多金属矿床地质特征及其矿床模型[J]. 地球学报, 31(4): 495-506.
- 王可勇, 卿敏, 张欣娜, 万多, 肖力. 2011. 黑龙江金厂金矿床流体包裹体特征及成矿作用研究[J]. 岩石学报, 27(5): 1275-1286.
- 徐佳佳, 赖勇, 崔栋, 常勇, 蒋林, 舒启海, 李文博. 2009. 内蒙古道伦达坝铜多金属矿床成矿流体特征及其演化[J]. 岩石学报, 25(11): 2957-2972.
- 徐九华, 谢玉玲, 王丽君, 朱和平, 王立权. 2003. 地幔矿物中 $\text{CO}_2$ 流体包裹体的微量元素特征[J]. 岩石学报, 19(2): 307-313.
- 应立娟, 唐菊兴, 王登红, 畅哲生, 屈文俊, 郑文宝. 2009. 西藏甲玛铜多金属矿床砂卡岩中辉钼矿-钨同位素定年及其成矿意义[J]. 岩矿测试, 28(3): 265-268.
- 张德会. 1997. 成矿流体中金属沉淀机制研究综述[J]. 地质科技情报, 16(3): 53-58.
- 赵元芝, 刘妍, 王瑞江, 崔玉斌, 宋亮, 吕立娜, 曲晓明. 2010. 西藏班公湖-怒江成矿带及邻区铋矿化带的发现与意义[J]. 地球学报, 31(2): 183-193.
- 郑文宝, 陈毓川, 唐菊兴, 宋鑫, 林彬, 桂晓根, 应立娟. 2010. 西藏甲玛铜多金属矿床铜矿化富集规律研究及应用[J]. 金属矿山, 40(2): 87-91.
- 周云, 汪雄武, 唐菊兴, 秦志鹏, 彭惠娟, 李爱国, 杨科, 王华, 李炯, 张继超. 2011. 西藏甲玛铜多金属矿床成矿流体来源及演化[J]. 矿床地质, 30(2): 231-248.

## References:

- CHEN Hua-yong, CHEN Yan-jing, NI Pei, ZHANG Li, ZHANG Zeng-jie. 2007. Chemical composition of fluid inclusions of the Sawayardun gold deposit, Xinjiang: Implications for oregenesis and prediction[J]. Acta Petrologica Sinica, 23(9): 2189-2197(in Chinese with English abstract).
- DAVIDSON P, KAMENENETSKY V S. 2001. Immiscibility and continuous felsic melt-fluid evolution within the Rio Blanco Porphyry System, Chile: evidence from inclusions in magmatic quartz[J]. Economic Geology, 96(8): 1921-1929.
- DU Guang-shu, YAO Peng, PAN Feng-chu. 1998. Summarine exhalative sedimentary skarn and mineralization[M]. Chengdu: Sichuan Science and Technology Press(in Chinese).
- FENG Xiao-liang, GUAN Shi-ping, MOU Chuan-long, HOU Zeng-qian, LI Sheng-rong. 2001. Geological characteristics and genesis of the Jiama copper-polymetallic deposit in Tibet[J]. Geology-Geochemistry, 29(4): 41-48(in Chinese with English abstract).
- HALTER W E, WEBSTER J D. 2004. The magmatic to hydrothermal transition and its bearing on ore-forming systems[J]. Chemical Geology, 210(1-4): 1-6.
- HEZARKHANI A. 2009. Hydrothermal fluid geochemistry at the Chah-Firuzeh porphyry copper deposit, Iran: Evidence from fluid inclusions[J]. Journal of Geochemical Exploration, 101(3): 254-264.
- HOU Zeng-qian, LU Qing-tian, WANG An-jian, LI Xiao-bo, WANG Zong-qi, WANG E. 2003. Continental Collision and Related Metallogeny: A Case Study of Mineralization in Tibetan Orogen[J]. Mineral Deposits, 22(4): 319-334(in Chinese with English abstract).
- HU Zheng-hua, TANG Ju-xing, DING Feng, ZHENG Wen-bao, DENG Shi-lin, YANG Yi, ZHANG Zhi, WANG Yi-yun, LIN Bin, DING Shuai. 2011. A Study of Features, Modes of Occurrence and Enrichment Mechanism of Silver-rich Ore Bodies in the Jiama Copper-Polymetallic Deposit of Tibet[J]. Acta Geoscientica Sinica, 32(6): 668-680(in Chinese with English abstract).
- LANDTWING M R, PETTKE T, HALTER W E, HEINRICH C A,

- REDMOND P B, EINAUDI M T, KUNZE K. 2005. Copper deposition during quartz dissolution by cooling magmatic-hydrothermal fluids: The Bingham porphyry[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 235(1-2): 229-243.
- LI Fen-qi, LIU Wei, GENG Quan-ru. 2010. Zircon LA-ICP-MS U-Pb Ages of the Mesozoic Volcanic Rocks in Nagqu Area of Gangdise in Tibet and Their Geological Significance[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 31(6): 781-790(in Chinese with English abstract).
- LI Guang-ming, RUI Zong-yao, WANG Gao-ming, LIN Fang-cheng, LIU Bo, SHE Hong-quan, FENG Cheng-you, QU Wen-jun. 2005. Molybdenite Re-Os dating of Jiama and Zhibula polymetallic copper deposits in Gangdese metallogenic belt of Tibet and its significance[J]. *Mineral Deposit*, 24(5): 482-487(in Chinese with English abstract).
- LI Jing, CHENG Yan-jing, LI Qiang-zhi, LAI Yong, YANG Rong-sheng, MAO Shi-dong. 2007. Fluid inclusion geochemistry and genetic type of the Yangshan gold deposit, Gansu, China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(9): 2144-2154(in Chinese with English abstract).
- LIU Bin, SHEN Kun. 1999. Thermodynamics of fluid inclusions[M]. Beijing: Geology Press(in Chinese).
- LU Huan-zhang, FAN Hong-rui, NI Pei, OU Guang-xi, SHEN Kun, ZHANG Wen-huai. 2004. Fluid inclusions[M]. Beijing: Science Press(in Chinese).
- MO Xuan-xue, DONG Guo-chen, ZHAO Zhi-dan, ZHOU Su, WANG Liang-liang, QIU Rui-zhao, ZHANG Feng-qin. 2005. Spatial and Temporal Distribution and Characteristics of Granitoids in the Gangdese, Tibet and Implication for Crustal Growth and Evolution[J]. *Geological Journal of China Universities*, 11(3): 281-290(in Chinese with English abstract).
- PAN Feng-chu, DENG Jun, YAO Peng, WANG Qing-fei, LIU Yu-xiang. 2002. The eruptive origins of copper and multi-metal deposits in the skarn in Jiama, Tibet[J]. *Geoscience*, 16(4): 360-364(in Chinese with English abstract).
- QIN Zhi-peng, Dorji, WANG Xiong-wu, LIU Hong-fei, ZHOU Yun, PENG Hui-juan. 2012. Characteristics and Significance of Magmatic-Hydrothermal Transition in Jiama(Gyama) Monzonite Granite-porphyry, Tibet[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 33(4): 501-509(in Chinese with English abstract).
- QIN Zhi-peng, WANG Xiong-wu, TANG Ju-xing, ZHOU Yun, PENG Hui-juan. 2011. Geochemical characteristics and their implications of peraluminous granite in the Jiama deposit, Tibet[J]. *Journal of Chengdu University of Technology(Science & Technology Edition)*, 38(1): 76-84(in Chinese with English abstract).
- QU Xiao-ming, OU Zeng-qian, LI Zhen-qing. 2003.  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  Ages of the Ore-bearing Porphyries of the Gangdese Porphyry Copper Belt and Their Geological Significances[J]. *Acta Geologica Sinica*, 77(2): 245-252(in Chinese with English abstract).
- SHE Hong-quan, FENG Cheng-you, ZHANG De-quan, LI Guang-ming, LIU Bo, LI Jin-wen. 2006. Study on the fluid inclusions from Jiama skarn copper polymetallic deposit and Qulong porphyry copper deposit in Gangdese copper belt, Tibet[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(3): 689-696(in Chinese with English abstract).
- SHINOHARA H. 1994. Exsolution of immiscible vapor and liquid phases from a crystallizing silicate melt: Implications for chlorine and metal transport[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 58(23): 5215-5221.
- SIMON A C, PETTKE T, CANDELA P A, PICCOLI P M, HEINRICH C A. 2004. Magnetite solubility and iron transport in magmatic-hydrothermal environments[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 68(23): 4905-4914.
- SONG Guo-xue, QIN Ke-zhang, LI Guang-ming. 2010. Study on the fluid inclusions and S-H-O isotopic compositions of skarn-porphyry-type W-Mo deposits in Chizhou area in the Middle-Lower Yangze Valley[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(9): 2768-2782(in Chinese with English abstract).
- TANG Ju-xing, CHEN Yu-chuan, DUO Ji, LIU Hong-fei, DU Xin, ZHANG Jin-shu, ZHENG Wen-bao, GAO Yi-ming. 2009. The main deposit type, metallogenic regularity and exploratory in Gangdese copper belt, Tibet[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 29(S1): 476-478(in Chinese).
- TANG Ju-xing, Dorji, LIU Hong-fei, LANG Xing-hai, ZHANG Jin-shu, ZHENG Wen-bao, YING Li-juan. 2012. Mineralogical Series of Ore Deposits in the East Part of the Gangdese Metallogenic Belt[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 33(4): 393-410(in Chinese with English abstract).

- TANG Ju-xing, WANG Deng-hong, WANG Xiong-wu, ZHONG Kang-hui, YING Li-juan, ZHENG Wen-bao, LI Feng-ji, GUO Na, QIN Zhi-peng, YAO Xiao-feng, LI Lei, WANG You, TANG Xiao-qian. 2010. Geological Features and Metallogenic Model of the Jiama Copper-Polymetallic Deposit in Tibet[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 31(4): 495-506(in Chinese with English abstract).
- WANG Ke-yong, QING Min, ZHANG Xin-na, WAN Duo, XIAO Li. 2011. Study on the characteristics of fluid inclusions and metallogenic evolution of Jinchang gold deposit, Heilongjiang Province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 27(5): 1275-1286(in Chinese with English abstract).
- WEBSTER J D. 1997. Exsolution of magmatic volatile phases from Cl-enriched mineralizing granitic magmas and implications for ore metal transport[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 61(5): 1017-1029.
- XU Jia-jia, LAI Yong, CUI Dong, CHANG Yong, JIANG Lin, SHU Qi-hai, LI Wen-bo. 2009. Characteristics and evolution of ore-forming fluids of the Daolundaba copper-poly-metal deposit, Inner Mongolia[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(11): 2957-2972(in Chinese with English abstract).
- XU Jiu-hua, XIE Yu-ling, WANG Li-jun, ZHU He-ping, WANG Li-quan. 2003. Trace elements in CO<sub>2</sub> fluid inclusions in mantle Iherzolite[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 19(2): 307-313(in Chinese with English abstract).
- YING Li-juan, TANG Ju-xing, WANG Deng-hong, CHANG Zhe-sheng, ZHENG Wen-bao. 2009. Re-Os Isotopic Dating of Molybdenite in Skarn from the Jiama Copper Polymetallic Deposit of Tibet and Its Metallogenic Significance[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 28(3): 265-268(in Chinese with English abstract).
- ZHANG De-hui. 2010. Overview of research on the ore depositional mechanisms in ore-forming fluid[J]. *Geological Science and Technology Information*, 16(3): 53-58(in Chinese with English abstract).
- ZHAO Yuan-yi, LIU Yan, WANG Rui-jiang, CUI Yu-bin, SONG Liang, LÜ Li-na, QU Xiao-ming. 2010. The Discovery of the Bismuth Mineralization Belt in the Bangong Co-Nujiang Metallogenic Belt of Tibet and its Adjacent Areas and Its Geological Significance[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 31(2): 183-193(in Chinese with English abstract).
- ZHENG Wen-bao, CHEN Yu-chuan, TANG Ju-xing, SONG Xin, LIN Bin, GUI Xiao-gen, YING Li-juan. 2010. Research and Application of Copper Mineralization Enrichment Regularity of Jiama Polymetallic Copper Deposit in Tibet[J]. *Metal Mine*, 404(2): 87-91(in Chinese with English abstract).
- ZHOU Yun, WANG Xiong-wu, TANG Ju-xing, QIN Zhi-peng, PENG Hui-juan, LI Ai-guo, YANG Ke, WANG Hua, LI Jiong, ZHANG Ji-chao. 2011. Origin and evolution of ore-forming fluids from Jiama copper polymetallic deposit in Tibet[J]. *Mineral Deposits*, 30(2): 219-236(in Chinese with English abstract).