

金沙江-红河富碱侵入岩带斑岩型 铜、金矿床的成矿流体研究

王 蝶^{1,2}, 毕献武^{1*}, 卢焕章^{1,3}, 刘张荣⁴

(1.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, 贵州 贵阳 550002; 2.昆明理工大学 国土资源工程学院, 云南 昆明 650093; 3.魁北克大学, 加拿大 魁北克 G7H 2B1; 4.鹤庆北衙矿业有限公司, 云南 大理 671507)

摘 要: 对金沙江-红河富碱侵入岩带内的玉龙、北衙、铜厂-长安冲三个斑岩型铜、金矿床的流体包裹体进行了详细研究。三个矿床成矿阶段的流体包裹体类型主要有 H₂O-NaCl 气液两相包裹体, 含钠盐、钾盐/方解石、金属子晶多相包裹体以及 H₂O-CO₂ 包裹体。成矿期流体均一温度多在 250~500 °C 之间, 高者可达 650 °C 及以上, 盐度多在 10%~50%NaCl_{eq} 之间, 成矿流体都具有高温、高盐度、富 K、富 CO₂ 的特点, 显示典型的岩浆热液特征。并且, 单个流体包裹体的成分分析也显示流体中除含有较高的成矿元素 Cu、Mo、Pb、Zn 等外, 还含较高的 K、Rb、Sr 等元素, 进一步证明成矿流体源自岩浆分异流体, 且经历过从高温高盐度到高温中低盐度的演化。结合该区流体包裹体中广泛存在沸腾包裹体群的事实, 进一步证实沸腾作用在斑岩型矿床中的普遍存在, 并且说明其很可能是这些矿床金属元素沉淀的重要机制。

关键词: 金沙江-红河富碱侵入岩带; 斑岩矿床; 流体包裹体; 成矿流体

中图分类号: P612 文献标志码: A 文章编号: 1001-1552(2017)01-0091-017

0 引 言

与斑岩型铜、金矿床有关的富碱侵入岩主要产于两大构造环境, 一种是汇聚板块边缘的岛弧和大陆弧环境, 另一种是大陆内部环境(Sillitoe, 1972; Hou et al., 2003, 2006)。在前一种背景下常形成大型-巨型斑岩铜矿带, 且含矿斑岩岩浆起源与大洋板块的俯冲作用有关。如太平洋东岸陆缘弧环境的 Bajo de la Alumbrera, Bingham Canyon, Pebble Copper, 太平洋西岸岛弧环境的 Grasberg, Ok Tedi 等世界级的斑岩型铜、金矿床都在环太平洋成矿带(Cooke et al., 2005)。这种环境下形成的斑岩铜矿,

其岩浆起源、演化、流体成矿作用研究较为详细, 主要是俯冲板片脱水交代地幔楔产生了富含金属元素和流体的岩浆并导致成矿(Richard, 2003)。后一种背景下形成的斑岩铜矿床规模普遍比前一种小, 但是其矿床资源量却不可小觑。这类矿床在我国较为发育, 尤其是西南“三江”地区的金沙江-红河富碱侵入岩带(Hu et al., 1998, 2004; Hou et al., 2003), 在全球独具特色。产于大陆内部活动带的富碱侵入岩, 其成因与大陆内部大型走滑和伸展等动力过程诱导的岩浆活动有关, 岩浆作用主要通过软流圈上涌、地幔的部分熔融、玄武岩浆底侵, 以及加厚地壳的熔融作用等不同方式产生(Sillitoe, 2002), 其动力学背

收稿日期: 2015-02-03; 改回日期: 2015-12-07

项目资助: 国家自然科学基金重点项目(41130423)、国家自然科学基金青年项目(41502087)和云南省人才培养项目(KKSY201421029)联合资助。

第一作者简介: 王蝶(1984-), 女, 讲师, 矿物岩石矿床专业。Email: wangdie@kmust.edu.cn

通信作者: 毕献武(1967-), 女, 研究员, 矿床地球化学专业。Email: bixianwu@vip.gyig.ac.cn

景与大洋板块俯冲诱导的弧岩浆活动完全不同。然而,有关大陆内部形成的斑岩型铜金矿床的特征与认识尚不完全清晰。

金沙江-红河富碱侵入岩带产出众多与新生代富碱岩浆有关的斑岩型铜、金矿床,是大陆内部富碱岩浆成矿作用的典型区域。该带处于印度-亚洲大陆主碰撞带西缘,呈 NW-NWW 向分布,带内发育许多与铜、金、钼矿化有关的矿床,如北段玉龙铜金矿床、中段马厂箐铜钼矿床、北衙金多金属矿床、南段铜厂-长安冲铜钼矿床等。这些矿床的形成具有相同的构造背景和相似地球化学特征,成矿年龄都介于 40~30 Ma 之间,与大陆内部大型走滑-伸展作用近于同期(张玉泉等, 1987; 毕献武等, 1999; Chung et al., 2003; Hou et al., 2003)。本文重点对该成矿带上与斑岩型铜、金矿床有关的成矿流体进行了测温、单个流体包裹体的成分研究,用以探讨该类矿床成矿流体与岛弧型斑岩矿床的差异。

1 区域地质和矿床地质

1.1 区域地质特征

金沙江-红河富碱侵入岩带位于印度-亚洲大陆主碰撞带西侧,大致呈 NW-NWW 向分布在云南和西藏境内,延伸>1000 km,宽约 50~80 km。带内分布众多呈小岩基和岩株产出的富碱侵入岩体,岩石类型主要为碱性花岗(斑)岩、正长斑岩和二长斑岩,并伴有一些碱性镁铁质岩石的产出。带内与硅铝质富碱侵入岩有关的铜、金矿床(点)星罗棋布,主要包括玉龙斑岩型铜(金、钼)矿床、马厂箐斑岩型铜(金、钼)矿床、铜厂-长安冲斑岩型铜(钼、金)矿床,以及北衙斑岩-浅成低温热液型金多金属矿床和姚安斑岩型金(铜)矿床等。这些矿床成岩与成矿时代高度一致,主要集中在 43~34 Ma(王登红等, 2004; 姜耀辉等, 2006; Liang et al., 2007; Xu et al., 2012),是板内岩浆活动的产物(张玉泉等, 1987; Hou et al., 2003)。这些富碱斑岩的全岩化学成分具有富碱高钾、准铝质-过铝质的特征,主要属于钾玄岩系列,类似于 A 型花岗岩,而铜、金矿床的形成主要与富碱岩浆分异出的岩浆流体(后期有大气成因流体加入)有关(Hu et al., 1998, 2004; 毕献武等, 1999; Xu et al., 2007)。同位素和微量元素特征指示成岩物质具壳幔混合特征(张玉泉等, 1987; 毕献武等, 1999; Chung et al., 2003; Hou et al., 2003; 姜耀辉等, 2006)。

1.2 玉龙铜(金、钼)矿床

玉龙斑岩型铜(金、钼)矿床位于金沙江-红河富碱侵入岩带北段(图 1),由扎那尔、莽总、多霞松多、马拉松多、夏日多、恒星错等 20 多个矿化点共同组成了玉龙斑岩铜矿带,其中玉龙矿床是带内规模最大的一个,其铜储量约 6.22 Mt(0.99%)、钼储量约 0.15 Mt(0.028%)、金储量约 100 t(0.35 g/t)(Hou et al., 2006),是一个以铜为主,同时伴生大量钼、金等的超大型多金属矿床。目前该带还进行铁、硫、铅、锌等矿产的开采。

二长花岗斑岩是矿区的主要含矿岩体,地表出露面积约 0.64 km²,岩体平面上呈梨形,向深部陡倾并向南侧伏,侵位于晚三叠世碎屑岩和碳酸盐岩地层中。岩石中的造岩矿物以斜长石、钾长石、黑云母为主,含少量石英和角闪石,副矿物主要为磁铁矿、榍石、磷灰石和锆石,其次有金红石,偶见褐帘石。

岩石具有高 SiO₂(69.56%)、高 K₂O(7.32%)、高 K₂O/Na₂O 比值(2.9)和碱含量(K₂O+Na₂O=9.8%),属钾玄岩系列(胥磊落, 2011)。斑岩体锆石 U-Pb 定年为 43.2±0.25 Ma(胥磊落, 2011),是印度与亚洲大陆碰撞造山的产物,其成因与晚碰撞阶段走滑断裂系统有关(Hou et al., 2006)。Sr-Nd-Pb、He-Ar 等同位素研究结果显示,岩石形成于造山带环境(胥磊落, 2011),其原始岩浆的形成很可能来自加厚下地壳(Hou et al., 2006)或者壳幔混合作用(Hu et al., 2004; 胥磊落, 2011)。

矿区内发育大量与岩浆侵位作用有关褶皱、断裂、裂隙、角砾岩带和层间破碎带等同生构造,同时也是主要的控矿构造。如区内最大的恒星错-甘龙拉背斜就是控制矿化岩体的侵位和成矿流体流动的主要构造(唐菊兴等, 2006)。玉龙含矿斑岩以及近矿的上三叠统均受到强烈蚀变,主要呈面状排布,成矿元素也存在着以岩体为核心的水平分带,从岩体中心向外依次发育钾硅化、绢英岩化、黏土-泥化以及近围岩中发育黏土化、矽卡岩化、硅化、青磐岩化、角岩化等。矿石组合有黄铜矿、辉钼矿、黄铁矿、铜蓝、辉铜矿、黝铜矿、金、银以及含钨矿物,矿体呈层状、透镜状、管状,矿石结构主要是细脉状、浸染状、角砾状等(Hou et al., 2006)。

1.3 北衙金多金属矿床

北衙斑岩-浅成低温热液型金矿床位于金沙江-红河富碱侵入岩带中段(图 1),地理位置处于云南省鹤庆县境内。矿床包括北衙向斜西侧的金沟坝、红泥

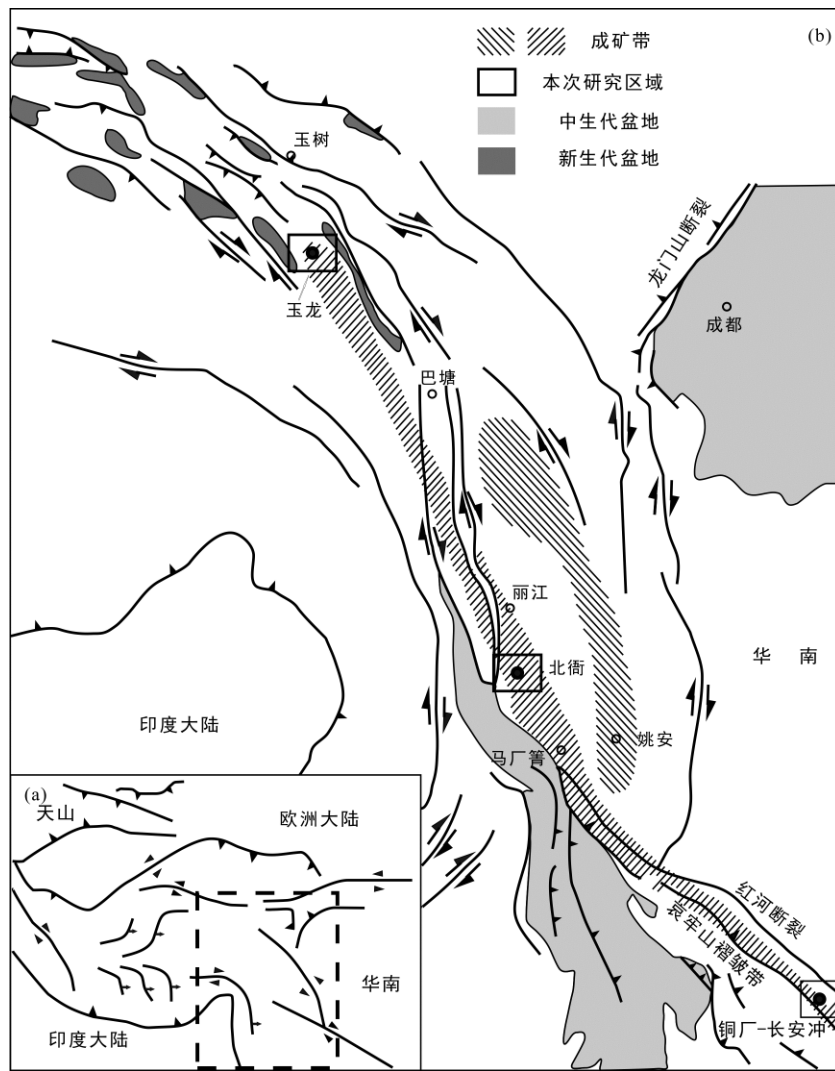


图 1 研究区区域地质简图(据 Hou et al., 2006)

Fig.1 Simplified geological map showing the Cenozoic tectonic framework and the distribution of porphyry Cu-Au deposits in the Jinshajiang-Red River alkaline igneous belt

塘、万砾山矿段以及向斜东侧的锅盖山、笔架山、桅杆坡矿段。笔者的研究集中于万砾山矿段和红泥塘矿段。目前对北衙 Au 资源量远景估计超过 100 t, 同时开采的还有 Cu、Ag、Fe、Pb、Zn 等, 属于以 Au 为主的多金属矿床。

与成矿有关的岩体主要是石英正长斑岩。岩体蚀变较强, 主要的矿物组合为斜长石、正长石、石英、黑云母, 副矿物主要是磷灰石和少量锆石。岩石具有高 SiO₂(68.24%)、高 K₂O(5.9%)、高 K₂O/Na₂O 比值(1.5)和富碱(K₂O+Na₂O=10%)的特征, 属于钾玄岩系列(胥磊落, 2011)。黑云母 ³⁹Ar/⁴⁰Ar 定年显示年龄为 25~33 Ma(徐兴旺等, 2006), 岩体侵位时间相当于印度-亚洲大陆碰撞造山的晚碰撞阶段(Hou et al., 2006)。Pb 和 He-Ar 等同位素研究结果显示成岩成矿物质主要来自地幔源区(Hu et al., 2004; Xu et

al., 2007)。

北衙金多金属矿床矿区构造形态为一近南北向的复式向斜, NEE 和 NNW 向两组断裂不仅控制了斑岩体侵入, 也是本区主要的控矿构造。矿区的蚀变类型有钾硅酸盐化、绢云母化、绿泥石化和矽卡岩化等, 矿石矿物组合有金、黄铜矿、磁铁矿、黄铁矿、赤铁矿, 矿体呈细脉状、透镜状、层状, 矿石构造有带状、细脉状、浸染状等(Hou et al., 2006)。

1.4 铜厂-长安冲铜(钼、金)矿床

铜厂-长安冲斑岩型铜(钼、金)矿床属于金沙江-红河富碱侵入岩带南段(图 1), 地理位置处于云南省金平县。铜厂和长安冲两个矿床相距仅 4.5 km, 矿化类型极为相似, 因此常被作为一个矿区来进行研究和勘探。目前铜厂已探获 Cu 0.8621 Mt(1.24%)、Mo 1.706 Mt(0.21%)、Au 100 kg (0.13 g/t); 长安冲探

获 Cu 2.9337 Mt(1.48%)、Mo 1.331 Mt(0.13%)、Au 409 kg(0.25 g/t)(胥磊落, 2011), 整体属于以 Cu、Mo 为主伴生 Au 等元素的小型多金属矿床。

与矿化有关的主要是石英正长斑岩, 侵位于中志留统灰质白云岩中。两个矿床石英正长斑岩地表出露面积分别为 0.025 km²、0.18 km²。岩石具斑状结构, 主要由正长石、斜长石、石英、角闪石和黑云母组成, 副矿物有楣石、磷灰石、锆石等。岩石具有高 SiO₂(两个岩体分别为 67.02%, 66.19%)、高 K₂O(两个岩体分别为 4.8%和 5.8%)、高 K₂O/Na₂O 比值(1.5)和富碱(K₂O+Na₂O>9.5%)特征, 属钾玄岩系列(胥磊落, 2011)。锆石 U-Pb 定年显示铜厂和长安冲石英正长斑岩的成岩年龄分别为 35.79±0.22 Ma 和 36.34±0.28 Ma(Xu et al., 2012), 也属于印度与亚洲大陆碰撞造山晚碰撞阶段。Sr-Nd-Pb、He-Ar 等同位素研究显示, 岩石形成于造山带环境, 成岩成矿物质均具有壳幔混合的特征(Hu et al., 2004; 胥磊落, 2011)。

控制该区岩体的侵位和矿床产出的构造主要是白马寨倒转背斜和 NE、NW、SN 向断裂。铜厂和长安冲斑岩有相似的蚀变矿化特征, 分别形成钾硅化、绢英岩化、矽卡岩化。矿石矿物主要是黄铜矿和少量辉铜矿、斑铜矿, 呈块状或浸染状分布, 另外还发育大量块状磁铁矿矿化。

2 流体包裹体岩相学

流体包裹体的研究对象主要是与辉钼矿、黄铜矿和黄铁矿共生的脉石矿物石英, 另外还对玉龙矿床富碱斑岩中的斑晶石英中的流体包裹体进行了研究。先将样品磨制成双面抛光包裹体片, 然后在偏光显微镜下观察包裹体的类型和形貌特征。

本文将这些矿物中的包裹体分为四大类: 熔体包裹体、简单 NaCl-H₂O 流体包裹体、富 CO₂ 流体包裹体和含子晶多相包裹体。每一类中又根据差异进一步细分出 a、b、c 等亚类。玉龙、北衙和铜厂—长安冲三个研究区代表性的包裹体类型见图 2。

类为熔体包裹体: 研究区内的熔体包裹体均为结晶质熔体包裹体: 包裹体较小, 普遍在 15 μm 以下, 呈椭圆形、方形或者不规则形态, 由部分透明或不透明的熔体或结晶出的硅酸盐子矿物组成, 常温下难以观察到气泡或者液相。此类型包裹体在本文中不作为重点研究对象。

类为简单 NaCl-H₂O 包裹体: 这类包裹体常呈椭圆形或者不规则形, 少量呈负晶型。其中 a 类为富液相流体包裹体, 填充度>80%; b 类为气液

两相包裹体, 填充度介于 20%~80%之间; c 类为富气相流体包裹体, 液体填充度<20%。

类为富 CO₂ 流体包裹体: 其中 a 类为 H₂O-CO₂ 三相包裹体; b 类为 H₂O-CO₂ 且含金属子晶的多相包裹体。

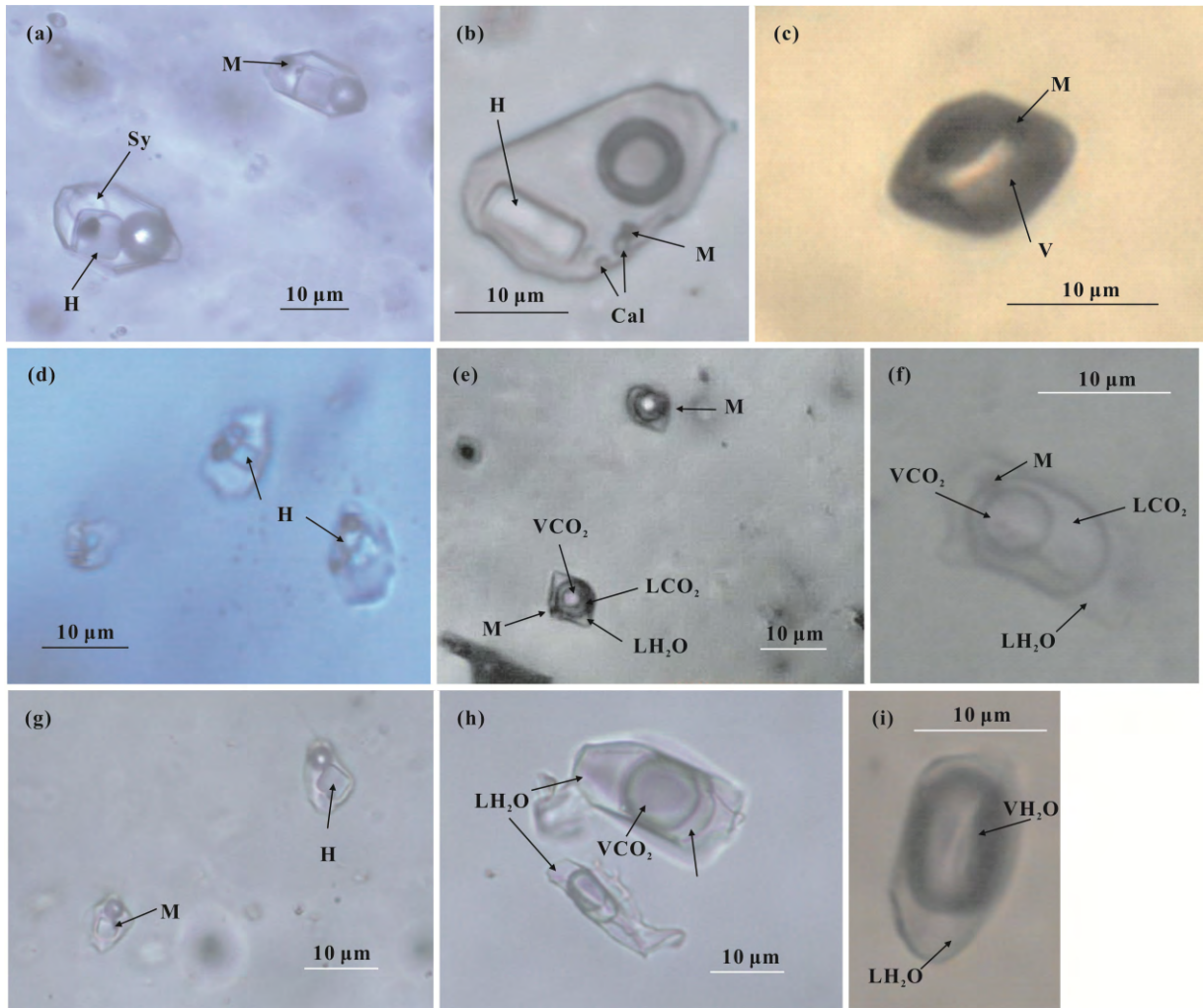
类为含子晶多相包裹体: 其中 a 类为富液相、含钠盐子晶包裹体, 一般呈现负晶型形态; b 类为含钠盐和金属子晶包裹体, 多为负晶型, 少数显示不规则形或椭圆形; c 类为含钠盐、钾盐/方解石、金属子晶等多子晶包裹体, 多数为负晶型, 少数显示不规则形或椭圆形; d 类为富气相/纯气相含金属子晶包裹体, 多呈现负晶型形态。

2.1 玉龙铜(金、钼)矿床的流体包裹体岩相学

由于玉龙矿床地表样品风化严重, 笔者主要是从岩心中获取样品, 然后按照矿物组合来研究, 主要有与黄铁矿共生的石英、与辉钼矿—黄铜矿—黄铁矿共生的石英以及富碱斑岩中的斑晶石英。这些石英中的包裹体包括 类熔体包裹体, 类 NaCl-H₂O 包裹体、类含子晶多相包裹体。其中以 类包裹体较为典型, 子矿物类型丰富, 有钠盐、钾盐、方解石和金属矿物子晶。这些包裹体大小多在 10~25 μm 之间, 负晶型, 利于对包裹体内部各种相态的观察。经激光拉曼和显微测温分析气相成分主要是 H₂O 和 CO₂, 其中 CO₂ 含量较少, 在常温下几乎不显三相特征。金属子矿物在透射光下呈黑色, 一般为三角形或四方形。前人用电子探针测试确定为黄铜矿(谢玉玲等, 2005)。类流体包裹体也较为常见, 但主要在与黄铁矿共生的石英中, 另外含少量的类结晶质熔体包裹体。在玉龙矿床, 常常能在一个视域见到高盐度富液相包裹体与中等盐度富气相包裹体、低盐度纯气相包裹体共存, 且这三种类型包裹体中都含有金属硫化物子晶, 证明石英形成时所捕获的流体性质为沸腾相成矿流体, 见图 3。

2.2 北衙金多金属矿床的流体包裹体岩相学

北衙矿床与矿石矿物共生的脉石矿物石英中主要的包裹体类型是 类 NaCl-H₂O 气液两相包裹体和 a 类 H₂O-CO₂ 三相包裹体, 包裹体大小多在 10~30 μm 之间。而在富碱斑岩的斑晶矿物石英中, 除了出现这两类包裹体外, 还存在大量 a 富液相含钠盐子晶包裹体, 以及 b 类含钠盐和金属子晶包裹体和 c 类含钠盐、钾盐、金属子晶等多子晶包裹体, 包裹体大小多在 6~15 μm 之间, 金属子矿物在透射光下呈黑色, 一般为三角形或四方形, 估计为黄铁矿或/和黄铜矿子矿物(图 4)。



(a) 负晶型含钠盐、钾盐和金属硫化物子晶包裹体(玉龙); (b) 椭圆形含钠盐、方解石和金属硫化物子晶包裹体(玉龙); (c) 负晶型富气相含硫化物金属子晶包裹体(玉龙); (d) 不规则状含多个钠盐子晶包裹体(铜厂-长安冲); (e) CO₂三相含金属硫化物子晶包裹体(铜厂-长安冲); (f) CO₂三相含金属硫化物子晶包裹体(北衙); (g) 负晶型含钠盐和金属硫化物子晶包裹体(铜厂-长安冲); (h) CO₂三相包裹体(北衙); (i) 富气相含 CO₂ 两相包裹体(北衙)。M. 金属硫化物子晶; H. 钠盐子晶; Sy. 钾盐子晶; Cal. 方解石子晶。

图 2 三个研究区中代表性流体包裹体类型
Fig.2 Typical fluid inclusions of three deposits

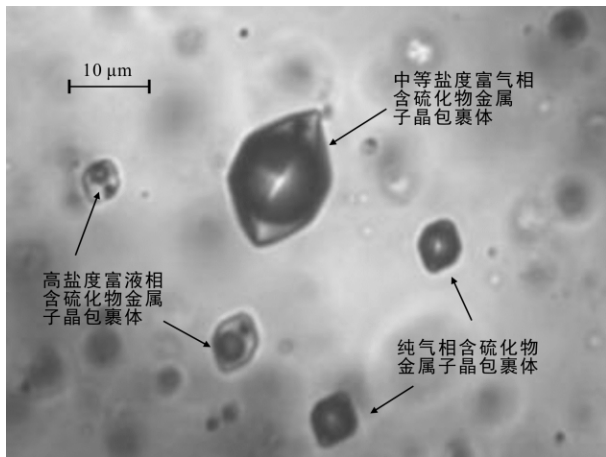


图 3 沸腾相流体包裹体组合(来自玉龙矿床的样品)
Fig.3 Fluid inclusion assemble of boiling

2.3 铜厂-长安冲铜(钼、金)矿床的流体包裹体岩相学

铜厂-长安冲虽然为小型的斑岩矿床,但其流体包裹体研究却具有特别的意义。矿区主要的包裹体类型有: a 类 NaCl-H₂O 气液两相包裹体, a 类富液相含钠盐子晶包裹体, d 类富气相含金属子晶包裹体, b 类含钠盐和金属子晶包裹体, c 类含钠盐、方解石、金属子晶等多子晶包裹体, a 类 H₂O-CO₂ 三相包裹体, 以及 b 类 H₂O-CO₂ 且含金属子晶的多相包裹体。但该矿区的各种类型包裹体较小, 普遍小于 10 μm, 分析测试难度较大。金属子矿物在透射光下呈黑色, 一般为三角形或四方形, 估计为黄铁矿或/和黄铜矿子矿物。

3 流体包裹体显微测温分析

测试工作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流体包裹体实验室 Linkam THMSG 600 型冷热台上进行。仪器温度标定采用标准物质(KNO₃、CCl₄)以及人工配制的 NaCl 标准溶液。测温范围-196~600 °C, 冷冻数据和加热数据精

度分别为±0.1 °C 和±2 °C。水溶液冰点、初熔温度、CO₂ 笼合物熔化温度和 CO₂ 气-液均一温度测定时, 升温速度由开始时的 30~15 °C/min 逐渐降低, 临近相变点时降到 0.5~0.1 °C/min。完全均一温度测定时, 开始时的升温速率为 10~20 °C/min, 临近相变时降到 1 °C/min。每个研究区的流体包裹体岩相学观察和测温结果分别见表 1、2、3。

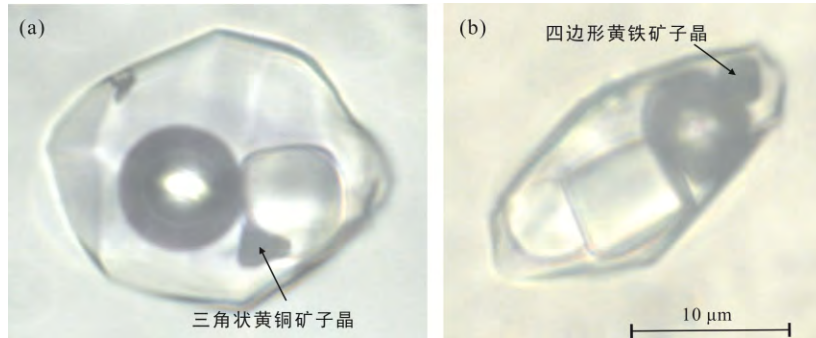


图 4 流体包裹体中的金属子矿物

Fig.4 Daughter minerals in fluid inclusions

表 1 玉龙斑岩铜矿床流体包裹体测温结果

Table 1 Characteristics and microthermometry results for the fluid inclusions from the Yulong porphyry Cu deposit

样品号	包裹体类型	形状	大小 (μm)	$T_{\text{m, CO}_2}$	$T_{\text{m, Cal}}$	$T_{\text{h, CO}_2}$	$T_{\text{m, ice}}/T_{\text{m, NaCl}}$	$T_{\text{m, KCl}}$	爆裂	T_{h}	盐度 (%NaCl _{eq})
				($^{\circ}\text{C}$)	($^{\circ}\text{C}$)	($^{\circ}\text{C}$)	($^{\circ}\text{C}$)	($^{\circ}\text{C}$)			
YL914	L+V	三角	7				-5.6			295	8.68
YL914	L+V	负晶形	13.4	-55.7	3.4					343	11.43
YL914	L+V	椭圆					-2.8			367	4.65
YL913	L+V	负晶形	18.2		7.4					290	5.05
YL913	L+V	长条形	23.5	-55.7	3.8	8.9				356	10.87
YL904-1	L+V	负晶形	22×14	-55.3	8	20.9					3.95
YL914	L+V+M	椭圆	11.3×9.6							>450	
YL914	L+V+M	椭圆	9.3×9							>450	
YL914	L+V+M	方形	11.3×8.8							>450	
YL913	L+V+M	负晶形	18.2×10.6		3.1	19.2				>370	11.84
YL913	L+V+M	椭圆	23.7	-55.8	7.5	20.6				458	4.87
YL913	L+V+M	负晶形		-55.7	-2.2						17.51
YL913	L+V+M	负晶形		-55.7	5.2				481		8.77
YL909-2	L+V+M	椭圆	8.7		5.9					421	7.64
YL909-2	L+V+M	椭圆	8.7	-55.7	6.5	20.6				354	6.63
YL909-2	L+V+M	椭圆								360	
YL909-2	L+V+M	椭圆								370	
YL909-2	L+V+M	负晶形	15×10		0.9						14.56
YL904-1	L+V+M	负晶形	15×13	-55.5	5.6						8.13
YL904-1	L+V+M	椭圆		-55.3	0.8	20.9					14.67
YL904-1	L+V+M	椭圆	17×9	-55.1	5.8						7.81
YL904-1	L+V+M	负晶形	17×11	-54.9	8.9					379	2.22
YL904-1	L+V+M	椭圆	22.7×19.9		5.9		131			439	13.68
YL904-1	L+V+M	负晶形	22×18								

续表 1:

样品号	包裹体类型	形状	大小 (μm)	$T_{\text{m, CO}_2}$	$T_{\text{m, CaI}}$	$T_{\text{h, CO}_2}$	$T_{\text{m, ice}}/T_{\text{m, NaCl}}$	$T_{\text{m, KCl}}$	爆裂	T_{h}	盐度 (%NaCl _{eq})
				()							
YL904-1	L+V+M	半自形	13.7	-55.9			-11.7		>550		15.67
YL912	L+V+M	负晶形	13	-55.9			-11.7		439		15.67
YL912	L+V+M	负晶形	16.8				-13.8			>600	17.61
YL912	L+V+M	负晶形	18.7				-14.7			>600	18.38
YL912	L+V+M	负晶形	16.7				-13.3			>600	17.17
YL911	L+V+M	负晶形	10.3				-15.1			>410	18.72
YL911	L+V+M	椭圆	6.2				-3.5			462	5.71
YL911	L+V+M	椭圆	10	-55.6			-7			368	10.49
YL911	L+V+M	长条					-17.6			>550	20.67
YL911	L+V+M	负晶形	26×27				-6.1			419	9.34
YL911	L+V+M	椭圆		-55.7			-11.4		<500		15.37
YL911	L+V+M	三角	23.3				-6.9			407	10.36
YL911	L+V+M	负晶形	13.3	-55.7			-12.4		>442		16.34
YL905	L+V+M	负晶形	14.2	-55.7			-13				16.89
YL905	L+V+M	方形	20×10	-55.3	7						5.77
YL905	L+V+M	长条	13.2				-2.7			336	4.49
YL905	L+V+M	它形	8				-13.5			346	17.34
YL905	L+V+M	它形	40×15.3				-4.5			238	7.17
YL904-1	L+V+NaCl+M	椭圆	15.4×14.7				187			>550	31.24
YL904-1	L+M	负晶形	12.2×9.3				-21.8		20	-3.5	
YL904-1	L+M	负晶形	13×11				-21.1			-4.2	23.11
YL912	L+V+NaCl	负晶形	22.9×10.3				193			>370	31.53
YL912	L+V+NaCl	负晶形					310			310	38.95
YL904-1	L+V+NaCl+M	负晶形	14.4×9.0				287				37.19
YL904-1	L+V+NaCl+M	半自形	10.8×5.6				267			293	35.78
YL904-1	L+V+NaCl+M	负晶形	10.5×7.7				302				38.32
YL914	L+V+NaCl+M	长条	17.7				283			383	36.9
YL914	L+V+NaCl+M	长条	9.1				278			325	36.54
YL914	L+V+NaCl+M	负晶形	8				287			287	37.19
YL914	L+V+NaCl+M	负晶形	7.9				289			289	37.33
YL914	L+V+NaCl+M	负晶形	11.7				320			320	39.76
YL914	L+V+NaCl+M	负晶形	8.5				241			337	34.13
YL914	L+V+NaCl+M	负晶形	7.8				327			327	40.35
YL914	L+V+NaCl+M	负晶形	9.8				316		>440	316	39.43
YL914	L+V+NaCl+M	负晶形	10.1				234		>440	371	33.71
YL914	L+V+NaCl+M	负晶形	10.8				210			383	32.38
YL914	L+V+NaCl+M	椭圆	14.5×12.9				242			347	34.19
YL911	L+V+NaCl+M	方形	16.2×12.1				174			421	30.65
YL911	L+V+NaCl+M	负晶形	8.7				200				31.87
YL911	L+V+NaCl+M	负晶形					199			256	31.82
YL911	L+V+NaCl+M	负晶形					239			382	34.01
YL913	L+V+NaCl+M	负晶形	9.1				329		480	329	40.52
YL913	L+V+NaCl+M	负晶形	7.5				328			328	40.44
YL913	L+V+NaCl+M	负晶形	7.8				266			266	35.72
YL913	L+V+NaCl+M	负晶形	7.5				306			306	38.63

续表 1:

样品号	包裹体类型	形状	大小 (μm)	$T_{\text{m, CO}_2}$	$T_{\text{m, Cal}}$	$T_{\text{h, CO}_2}$	$T_{\text{m, ice}}/T_{\text{m, NaCl}}$	$T_{\text{m, KCl}}$	爆裂	T_{h}	盐度 (%NaCl _{eq})
				()							
YL909-2	L+V+NaCl+M	负晶形	4				340		>400	348	41.49
YL909-2	L+V+NaCl+M	长条	12.6							347	
YL909-2	L+V+NaCl+M	负晶形	6				310			310	38.95
YL909-2	L+V+NaCl+M	三角					352			352	42.59
YL904-1	L+V+NaCl+M	负晶形	11.7				309			309	38.87
YL904-1	L+V+NaCl+M	负晶形	7.3				315			315	39.35
YL904-1	L+V+NaCl+M	负晶形	7.5				228			298	33.37
YL904-1	L+V+NaCl+M	负晶形	6.8							318	
YL904-1	L+V+NaCl+M	负晶形	13.6				313			328	39.19
YL904-1	L+V+NaCl+M	负晶形	8.6				155			344	29.86
YL904-1	L+V+NaCl+M	负晶形	16.1							334	
YL905	L+V+NaCl+M	负晶形	30.8				352			352	42.59
YL905	L+V+NaCl+M	负晶形	30.3				355			355	42.87
YL905	L+V+NaCl+M	负晶形					332			332	40.78
YL905	L+V+NaCl+M	长条	17×3.5				266			325	35.72
YL905	L+V+NaCl+M	方形	12×6				295			304	37.78
YL914	L+V+NaCl+KCl	负晶形	25.3×12.7				194	49		338	61.58
YL914	L+V+NaCl+KCl	负晶形	25.8×10.8				217	82		221	64.76
YL904-1	L+V+NaCl+KCl+M	负晶形	20.6×9.8				343	81		354	75.76
YL904-1	L+V+NaCl+KCl+M	负晶形	17.8×13.9				320	64		320	71.76
YL904-1	L+V+NaCl+KCl+M	负晶形	18.4×13.4				338	84		346	75.51
YL904-1	L+V+NaCl+KCl+M	负晶形	17.5×8.9				363	86		363	78.04
YL904-1	L+V+NaCl+KCl+M	负晶形	17.9×12.3				343	86		343	76.16
YL905	L+V+NaCl+KCl+M	负晶形	24.9×13.2				352	87		352	77.19
YL905	L+V+NaCl+KCl+M	负晶形	24.9×13.2				338	64	350	338	73.31
YL914	L+V+NaCl+KCl+M	负晶形	23.5×13.5				307	85		321	73.11
YL914	L+V+NaCl+KCl+M	方形	16.8×10.2				295	85		341	72.18
YL914	L+V+NaCl+KCl+M	负晶形	10.8				246	135		360	73.43
YL911	L+V+NaCl+KCl+M	负晶形	35				308	84		308	72.99
YL911	L+V+NaCl+KCl+M	负晶形	25.7				305	82		305	72.55
YL911	L+V+NaCl+KCl+M	负晶形	20.1				364	82		364	77.73
YL913	L+V+NaCl+Cal+M	负晶形	6.6				326		380		40.27
YL913	L+V+NaCl+Cal+M	负晶形	9.3				334		480	334	40.96
YL913	L+V+NaCl+Cal+M	负晶形					372			372	44.52

注: $T_{\text{m, CO}_2}$. CO_2 融化温度; $T_{\text{m, Cal}}$. CO_2 笼合物融化温度; $T_{\text{h, CO}_2}$. CO_2 三相均一温度; $T_{\text{m, NaCl}}$. NaCl 子矿物融化温度; $T_{\text{m, KCl}}$. KCl 子矿物融化温度; 爆裂. 爆裂温度; T_{h} . 完全均一温度; $T_{\text{m, ice}}$. 冰点温度。

3.1 玉龙铜(金、钼)矿床流体包裹体测温结果

从表 1, 图 5a 和图 6a, b 可以看出, 玉龙矿床流体包裹体均一温度主要在 280~380 之间, 少数样品在 380~480 之间, 此外, 一部

分富气相含金属子晶包裹体均一温度在 600 以上。流体盐度分为两个区间, 低盐度区间在 4%~20%NaCl_{eq} 之间, 高盐度区间在 30%~44%NaCl_{eq} 之间。

表 2 北衙斑岩金多金属矿床流体包裹体测温结果
Table 2 Characteristics and microthermometry results for the fluid inclusions from the Beiya deposit

样品号	包裹体类型	形状	大小 (μm)	$T_{\text{m, CO}_2}$	$T_{\text{m, cal}}$	$T_{\text{h, CO}_2}$	均一相	$T_{\text{m, ice}/T_{\text{m, NaCl}}}$	T_{h}	均一相	盐度 (%NaCl _{eq})
				()							
WDS11-25	L+V	椭圆	5.8×2.6					-2.1	318	L	3.55
WDS11-25	L+V	长条	20×5					-20.7	351	L	22.85
WDS11-25	L+V	长条	27×12					-14.7	303	L	18.38
WDS11-25	L+V	长条						-18.5	335	L	21.33
WDS11-25	L+V	椭圆						-13.4	313	L	17.26
WDS11-12-2	L+V	负晶形	13×10.9					-11.9	240	L	15.86
WDS11-1	L+V	负晶形	14.6×6.7		7.9				394	L	4.07
WDS11-12-2	L+V	椭圆	10.8×13					-9	287	L	12.85
WDS11-25	L+V	它形	35×22					-1.7	296	L	2.9
WDS11-25	富V	它形	10×8	-55.9	4.1			-6.8	391	临界	10.24
WDS11-25	富V	它形	18×14	-55.8				-17.8	387	临界	16.55
WDS11-25	含CO ₂ 三相	不规则	6×4	-56	5.4	30.3	V		342	临界	8.35
WDS11-25	含CO ₂ 三相	椭圆	9.6×5.1	-56	5.6	30.4	V		343	临界	8.03
WDS11-25	含CO ₂ 三相	椭圆	14×7.5	-56	6.8	30.6	V		343	临界	6.03
WDS11-25	含CO ₂ 三相	椭圆	18.7×8	-56	6.8	30.5	V		342	临界	6.03
WDS11-25	含CO ₂ 三相	椭圆	8.6×8.2	-56	6.9	30.6	V		342	临界	5.86
WDS11-26	含CO ₂ 三相	椭圆	8×7	-55.9	6.8	30.6	V		343	临界	6.03
WDS11-25	含CO ₂ 三相	椭圆	26×8	-56.1	4.4	30.5	V		329	临界	9.89
WDS11-25	含CO ₂ 三相	椭圆	37×25	-56	5.3	30.6	V	-10.3			8.51
WDS11-1	L+V+M?	椭圆形	6.6×5.0					-10.3	502	L	14.25
WDS11-1	L+V+NaCl	半自形	15.7×9					352	352	L	42.59
WDS11-1	L+V+NaCl	半自形	7×4.4					311	311	L	39.03
WDS11-1	L+V+NaCl	方形	8.1×5.9					286	286	L	37.11
WDS11-1	L+V+NaCl	方形	8.1×5.4					294	294	L	37.71
HNT11-1	L+V+NaCl+M	长条形	13.2×4					297	297	L	37.93
WDS11-1	L+V+NaCl+M	椭圆	6.9×6.9					271	338	V	36.06
WDS11-1	L+V+NaCl+M	椭圆形	8.2×4.1					248	342	V	34.56
WDS11-1	L+V+NaCl+M	椭圆	7.5×7.3					328	328	L	40.44
WDS11-1	L+V+NaCl+M	负晶形	7.0×5.8					347	347	L	42.13
WDS11-1	L+V+NaCl+M	负晶形	8.8×6.0					358	358	L	43.15
WDS11-1	L+V+NaCl+M	方形	9.8×5.9					246	402	V	34.43
WDS11-1	L+V+NaCl+M	它形	14.8×11					213		V	32.54
WDS11-1	L+V+NaCl+M	半自形	9.2×6.6					364	364	L	43.73

表 3 铜厂-长安冲斑岩铜矿床流体包裹体测温结果
Table 3 Characteristics and micro thermometry results for the fluid inclusions from the Tongchang-Chang'an chong

样品号	包裹体类型	形状	大小 (μm)	$T_{\text{m, CO}_2}$	$T_{\text{m, Cal}}$	$T_{\text{h, CO}_2}$	均一相	$T_{\text{m, ice}/T_{\text{m, NaCl}}}$	爆裂	T_{h}	均一相	盐度 (%NaCl _{eq})
				()								
CAC11-8	L+V	它形	12					-12.1		268		16.05
CAC11-8	L+V	方形	7.6					-11.8		370	临界	15.76
CAC11-5	L+V	椭圆形	9.1×4.4	-56.1	6.3					351	临界	6.88
CAC11-5	L+V	椭圆形	8.0×4.1	-56.1	5.7					354	临界	7.87
TC0904	L+V+M	负晶形	12.3	-55.9	7.1					350	L	5.51
TC0904	L+V+M	负晶形	13.5	-55.7	7.2					360	L	5.33

续表 3:

样品号	包裹体类型	形状	大小 (μm)	$T_{\text{m, CO}_2}$	$T_{\text{m, CaI}}$	$T_{\text{h, CO}_2}$	均一相	$T_{\text{m, ice}}/T_{\text{m, NaCl}}$	爆裂	T_{h}	均一相	盐度 (%NaCl _{eq})
				()								
TCD0814	L+V+M	负晶形	11.6		7.5					380	L	4.8
TCD0814	L+V+M	椭圆	20.4	-55.8				-10.4		390	L	14.36
CAC11-8	L+V+NaCl	方形	8					362	368	>368	L	43.54
CAC11-8	L+V+NaCl	方形	8					277	347	>347	L	36.47
CAC11-8	L+V+NaCl	椭圆	9					250		250	L	34.68
CAC11-8	L+V+NaCl	椭圆	6					289		289	L	37.33
CAC11-5	L+V+NaCl	椭圆	8					206		321	L	32.18
CAC11-5	L+V+NaCl	椭圆	5					203		302	L	32.02
CAC11-5	L+V+NaCl	负晶形	12.4×5.9					287		364	L	37.19
CAC11-8	L+V+NaCl+M	负晶形	10.3					327		327	L	40.35
CAC11-8	L+V+NaCl+M	负晶形	8.2					360		360	L	43.35
CAC11-8	L+V+NaCl+M	负晶形	7					350		350	L	42.4
CAC11-8	L+V+NaCl+M	负晶形	9.6					304		304	L	38.47
TC0904	L+V+NaCl+M	负晶形	7.3					314		314	L	39.27
TC0904	L+V+NaCl+M	负晶形	11.3					319		319	L	39.68
TC0904	L+V+NaCl+M	它形	6					197			L	31.73
TCD0814	L+V+NaCl+M	自形	9					319			L	39.68
CAC11-5	L+V+NaCl+M	负晶形	17.7×7.8					274		353	L	36.26
CAC11-8	L+V+NaCl+CaI+M	它形	8.2					315		>491	L	39.35
CAC11-8	L+V+NaCl+CaI+M	它形	7.3					248		>393	L	34.55
TC0904	L+V+NaCl+CaI+M	它形	7.4					359		443	L	43.25
TC0904	L+V+NaCl+CaI+M	它形	11.8					248		389	L	34.55
CAC11-8	L+V+NaCl+CaI+M	方形	13.6					358		358	L	43.15
CAC11-5	L+V+NaCl+CaI+M	负晶形	11.5×10.4					376		376	L	44.92
CAC11-8	LCO ₂ +VCO ₂	它形	8	-56		30.8	L			30.8	L	0
CAC11-8	LCO ₂ +VCO ₂	椭圆	9	-55.8		29.9	L			29.9	L	0
CAC11-8	LCO ₂ +VCO ₂	它形	8.7	-55.9		30.8	L			30.8	L	0
CAC11-8	LCO ₂ +VCO ₂ +LH ₂ O	它形	9.2	-55.7	4.4	29	V			390	L	9.99
CAC11-8	LCO ₂ +VCO ₂ +LH ₂ O	椭圆	9.9	-55.8	-7.8	30.3	V		315	>315	L	20.29
CAC11-8	LCO ₂ +VCO ₂ +LH ₂ O	椭圆	11.1	-55.8	-0.1	29.9	V			448	L	15.62
CAC11-8	LCO ₂ +VCO ₂ +LH ₂ O	椭圆	10	-55.9		30.4	V				L	
TC0904	LCO ₂ +VCO ₂ +LH ₂ O	椭圆	8	-55.9	-1.2				404	>404	L	16.67
TC0904	LCO ₂ +VCO ₂ +LH ₂ O	圆形	9		5.5					293	L	8.29
TC0904	LCO ₂ +VCO ₂ +LH ₂ O	椭圆	12	-55.9	-8.5	25.8	V			378	L	20.4
TCD0814	LCO ₂ +VCO ₂ +LH ₂ O	它形	10	-55.9	-0.8	24.9	V	-11.3	407	>407	L	16.31
TCD0814	LCO ₂ +VCO ₂ +LH ₂ O	椭圆	12	-55.9	-8.5	25.8	V			378	L	20.4
CAC11-5	LCO ₂ +VCO ₂ +LH ₂ O	方形	11	-56.1	6.8	30.5	L			308	L	6.12
CAC11-5	LCO ₂ +VCO ₂ +LH ₂ O	椭圆形	10.3×7.2	-56	8.6	30.6	L			318	L	2.81
CAC11-5	LCO ₂ +VCO ₂ +LH ₂ O	椭圆形	11.3×7.3	-56.1	7.1	31.1	临界		390	378	L	5.59
CAC11-5	LCO ₂ +VCO ₂ +LH ₂ O	负晶形	10.9×6.7	-56.1	7.4	31	临界		390	375	L	5.05
CAC11-5	LCO ₂ +VCO ₂ +LH ₂ O	负晶形	10.8×6.8	-56.1	7.5	30.8	临界		390	381	L	4.87
CAC11-5	LCO ₂ +VCO ₂ +LH ₂ O	椭圆形	5×4	-56	5.8	30.6	V			339	L	7.81
CAC11-8	LH ₂ O+LCO ₂ +VCO ₂ +M	三角形	8.5×7.4	-56	2.1	30.5	V			377	L	13.14
CAC11-8	LH ₂ O+LCO ₂ +VCO ₂ +M	方形	7.8×6.4	-56.1	3.4	30.9	临界		371	369	L	11.43
CAC11-8	LH ₂ O+LCO ₂ +VCO ₂ +M	负晶形	12.2			28.7	L				L	

续表 3:

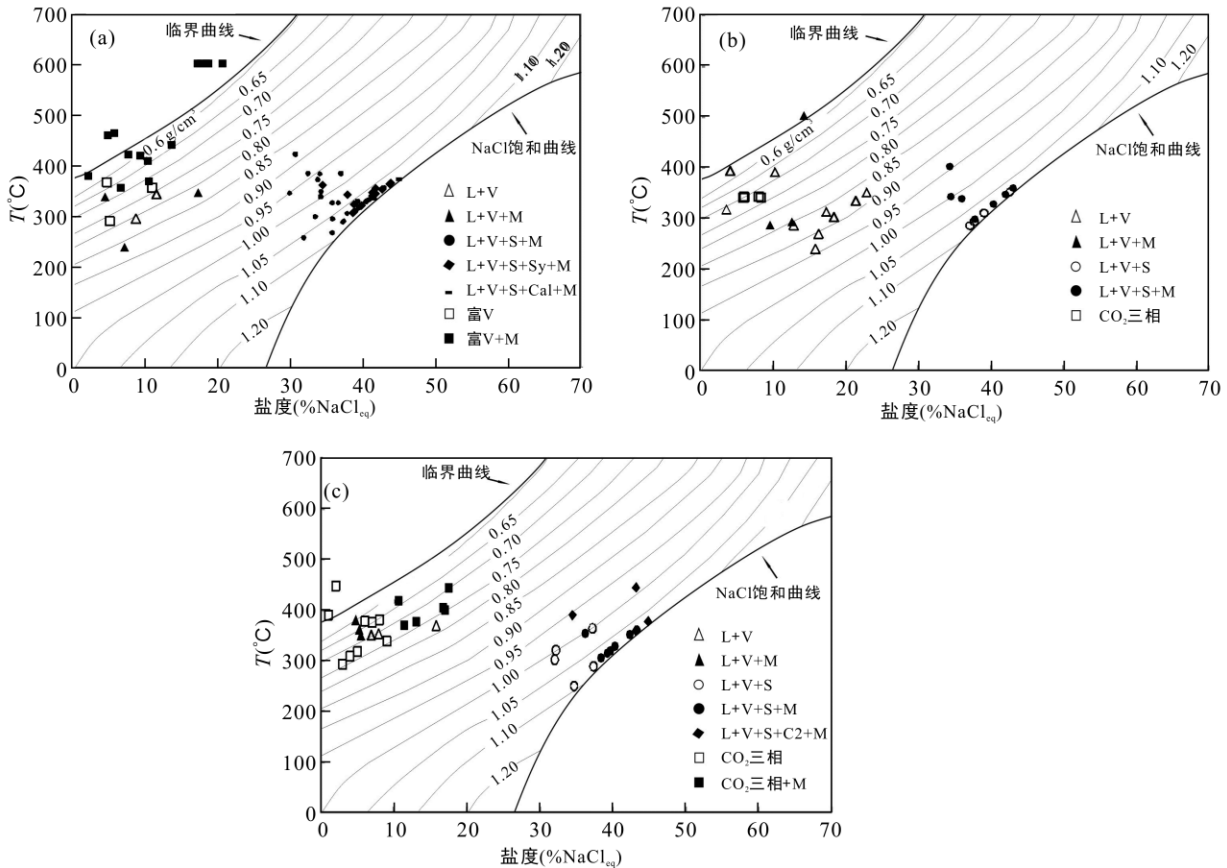
样品号	包裹体类型	形状	大小 (μm)	T_{m, CO_2}	$T_{m, \text{Cal}}$	T_{h, CO_2}	均一相		$T_{m, \text{ice}}/T_{m, \text{NaCl}}$	爆裂	T_h	均一相	盐度 (%NaCl _{eq})
							()	()					
TC0904	LH ₂ O+LCO ₂ +VCO ₂ +M	它形	8.1	-55.9		30.8	L					L	
TC0908	LH ₂ O+LCO ₂ +VCO ₂ +M	它形	14	-55.9		30.9	L					L	
TC0904	LH ₂ O+LCO ₂ +VCO ₂ +M	它形	6.2	-55.9	-2.3	28.6	V			443	L	L	17.59
TCD0814	LH ₂ O+LCO ₂ +VCO ₂ +M	它形	8.2	-55.9	-3.1	25.6	V			>500	L	L	18.18
TCD0814	LH ₂ O+LCO ₂ +VCO ₂ +M	它形	12.4	-55.8	4.3	30.5	V		230	>230	L	L	10.14
TCD0814	LH ₂ O+LCO ₂ +VCO ₂ +M	它形	10.6	-55.7	3.9	29.7	V			417	L	L	10.72
TCD0814	LH ₂ O+LCO ₂ +VCO ₂ +M	它形	7.6	-55.5	-1.4	21	V			403	L	L	16.85
CAC11-5	LH ₂ O+LCO ₂ +VCO ₂ +M	它形	7.8	-55.6	-1.6	29.3	V			398	L	L	17.02
CAC11-5	LH ₂ O+LCO ₂ +VCO ₂ +M	方形	10	-55.9	-9.8	29.1	V	-21.5	382	>382	L	L	20.47
CAC11-5	LH ₂ O+LCO ₂ +VCO ₂ +M	它形	26.2							142	L	L	
CAC11-5	LH ₂ O+LCO ₂ +VCO ₂ +M	它形	30	-55.8	-8.6						L	L	21.1

3.2 北衙金多金属矿床流体包裹体测温结果

从表 2, 图 5b 和图 6c, d 中可以看出, 北衙矿床流体包裹体均一温度主要在 280~360 之间, 少数样品在 380~420 之间。流体盐度分为两个区间, 低盐度区间在 2%~24%NaCl_{eq} 之间, 高盐度区间在 32%~44%NaCl_{eq} 之间。

3.3 铜厂-长安冲铜(钼、金)矿床流体包裹体测温结果

从表 3, 图 5c 和图 6e, f 中可以看出, 铜厂-长安冲矿区流体包裹体均一温度一般在 280~460 之间。流体盐度分为两个区间, 低盐度区间在 2%~ 22%NaCl_{eq} 之间, 高盐度区间在 30%~46%NaCl_{eq} 之间。



L. 液相; V. 气相; S. 钠盐; Sy. 钾盐; Cal. 方解石; C2. 未知透明子晶; M. 金属子晶。

图 5 玉龙(a)、北衙(b)、铜厂-长安冲(c)斑岩型矿床流体包裹体 $T-W_{\text{NaCl}}-p$ 图(底图据 Bordnar, 1983)
Fig.5 $T-W_{\text{NaCl}}-p$ of ore fluids in the Yulong (a), Beiya (b) and Tongchang-Chang'anchong (c) deposits

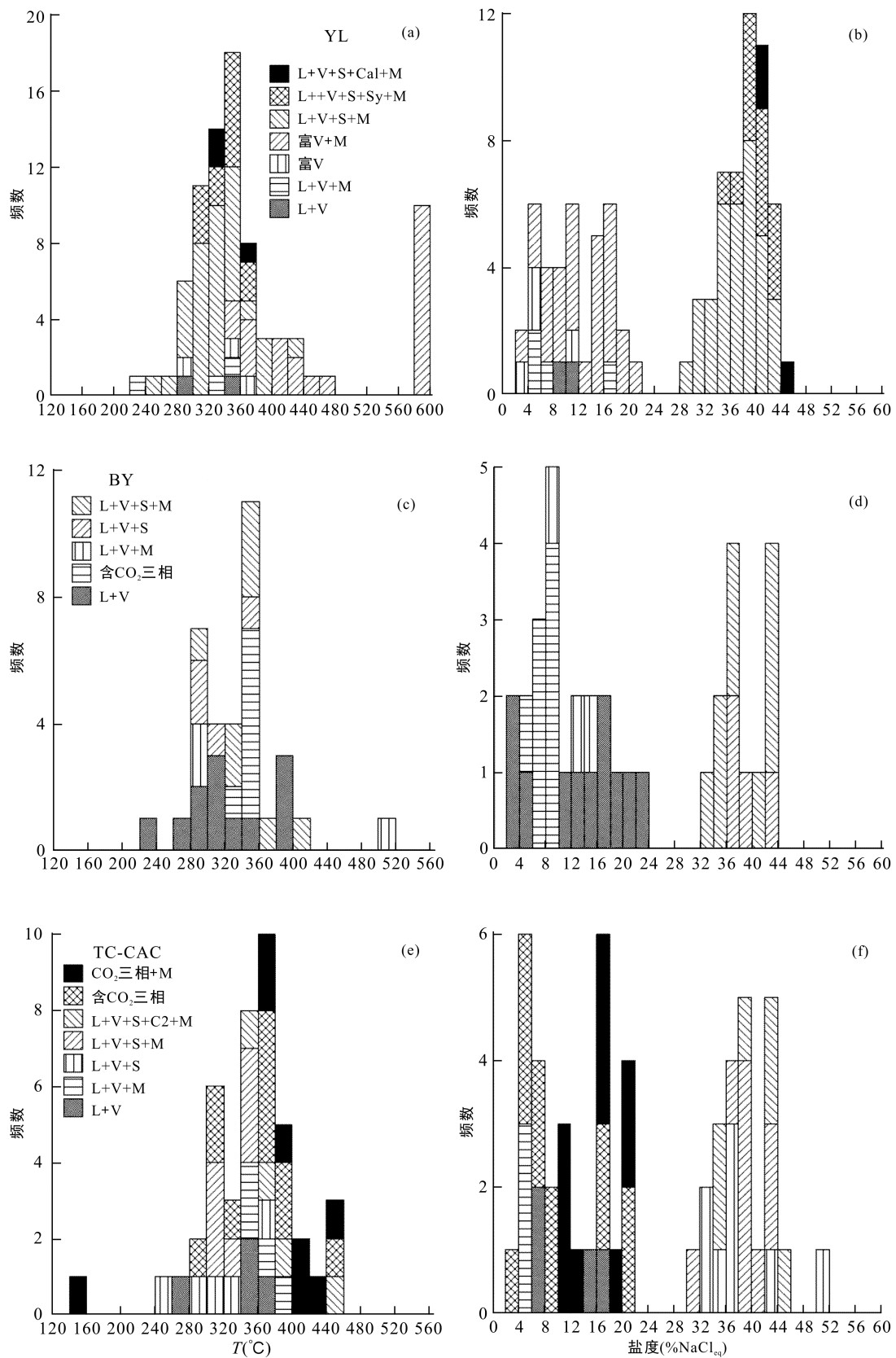


图 6 玉龙、北街、铜厂-长安冲铜、金矿床流体包裹体均一温度(a, c, e)和盐度(b, d, f)分布直方图

Fig.6 Temperature (a, c, e) and salinity (b, d, f) of ore fluids in the Yulong, Beiya and Tongchang-Chang'anchong deposits

4 单个流体包裹体的 SR-XRF 分析

单个包裹体的微区同步辐射 X 荧光分析 (SR-XRF) 在中国科学院上海应用物理研究所同步辐射实验室进行, 束斑大小 $2.5 \mu\text{m}$ 。由于铜厂-长安冲矿区发育的包裹体个体较小, 本次主要对玉龙斑岩型铜-钼矿床和北衙金多金属矿床石英斑晶中的流体包裹体以及北衙脉石矿物石英中的流体包裹体进行了微区 SR-XRF 分析。结果如图 7、8 所示。

玉龙二长花岗斑岩石英斑晶中高盐度含金属离子晶包裹体的微区 SR-XRF 谱线中探测到 Mo、K、Sn、Ni、Cu、Zn、As、Pb、Rb、Sr 等元素的特征峰(图 7)。在流体包裹体中测试出 K、Rb、Sr 等元素, 暗示了成矿流体可能来自于岩浆分异的流体。另外, 值得注意的是, 谱线中能够见到 Sn、Ni、As、Pb 和 Zn 的峰值, 尤其 Zn 含量较高。根据矿区资料, 玉龙斑岩铜钼矿床除 Au、Cu、Mo 外, 同时伴生了 As 等有用元素, 在矿床外围也有 Pb、Zn 的异常甚至矿化。而在玉龙矿床高盐度流体包裹体中检测出 Pb、Zn 的高计数, 也暗示 Pb、Zn 与 Cu、Mo 等为同一来源, 都可能与岩浆分异的流体有关。

北衙矿床中流体包裹体的微区 SR-XRF 分析如图 8 所示。北衙矿床主成矿期的包裹体也检测出 K、Rb、Sr 等元素, 同样暗示了成矿流体与岩浆分异流体的亲缘关系。而成矿晚期石英脉中的流体包裹体中 K、Rb、Sr 则急剧减少, 但仍能检测出较高的 Zn、Mn 等。据 Su et al. (2009) 运用 LA-ICPMS 对贵州水银洞等金矿床单个流体包裹体的测试显示, 即便是主成矿期的流体, 其中 Au 含量也仅有几~十几

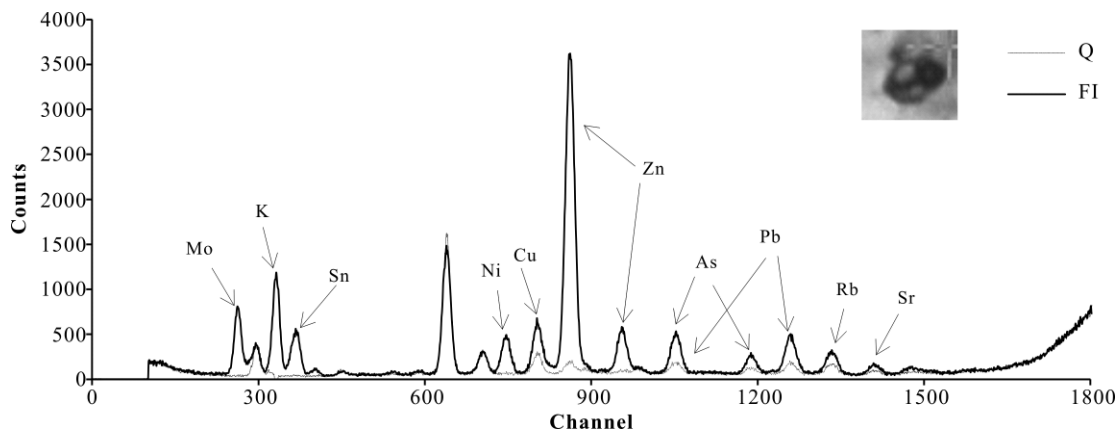
克/吨; 故本次测试北衙矿床单个包裹体无明显的 Au 峰值, 而只能看到主成矿元素 Cu 和 Mo 的特征峰也属正常。

5 讨 论

5.1 金沙江-红河富碱侵入岩带铜、金矿床成矿流体差异性对比

对金沙江-红河成矿带北段的玉龙斑岩铜-金-钼矿床、中段北衙斑岩-浅成低温热液型金多金属矿床以及南段铜厂-长安冲斑岩型铜-金-钼矿床石英中的流体包裹体的研究显示, 这三个矿床(区)流体包裹体记录的成矿流体都具有斑岩型矿床高温高盐度的特点。从图 6 可以看到, 每个地区的盐度都具有两个峰值, 即使在同一个温度段的流体也具有高密度和低密度两相共存的特征, 结合流体包裹体岩相学的研究, 表明成矿流体具有两种不混溶流体的特点。本次对玉龙、北衙和铜厂-长安冲矿区流体包裹体岩相学和测温研究显示, 该类型矿床普遍发生了沸腾作用, 而沸腾作用很可能是这些矿床金属元素沉淀的重要机制之一。

另外, 结合 CO_2 的 T - ρ 的相图(Roedder, 1984), 大致投出含 CO_2 的流体包裹体的密度, 并作出三个矿区 CO_2 流体的均一温度和密度分布频度图(图 9), 由图 9 可以看出, 北部的玉龙矿床 CO_2 密度最小 ($<0.2 \text{ g/cm}^3$), 中段北衙矿床 CO_2 密度中等且分布区间较小 ($0.3\sim0.35 \text{ g/cm}^3$), 南段铜厂-长安冲矿区 CO_2 密度最大且有较大的分布区间 ($0.2\sim0.65 \text{ g/cm}^3$)。指示金沙江-红河富碱侵入岩带上的流体包裹体普遍含有 CO_2 的特点, 并且从北段到南段, 流体中的 CO_2 密度增大。



虚线为寄主矿物石英的谱线, 实线为包裹体的谱线。

图 7 玉龙矿床流体包裹体(FI)和寄主矿物石英(Q)的微区 SR-XRF 测试结果
Fig.7 SR-XRF spectra of single fluid inclusion and quartz in the Yulong deposit

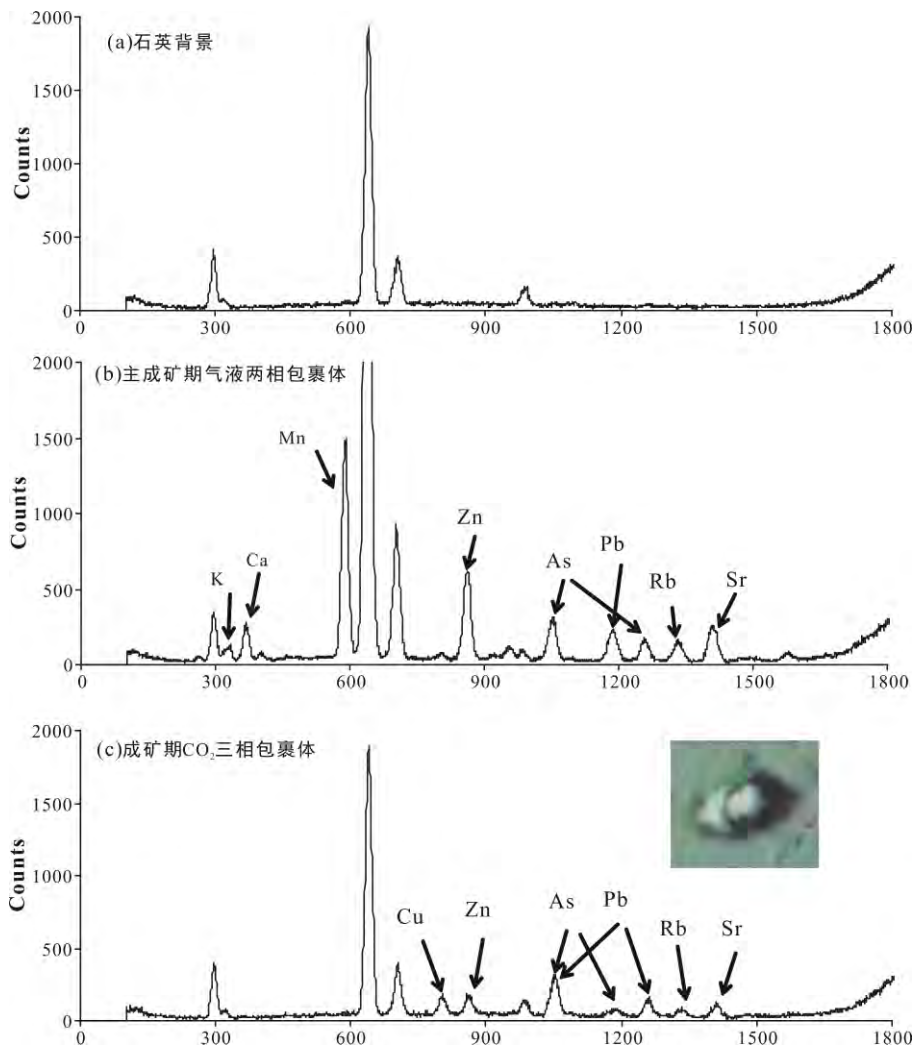


图 8 北衙矿床流体包裹体的微区 SR-XRF 分析图
Fig.8 SR-XRF spectra of single fluid inclusion in the Beiya deposit

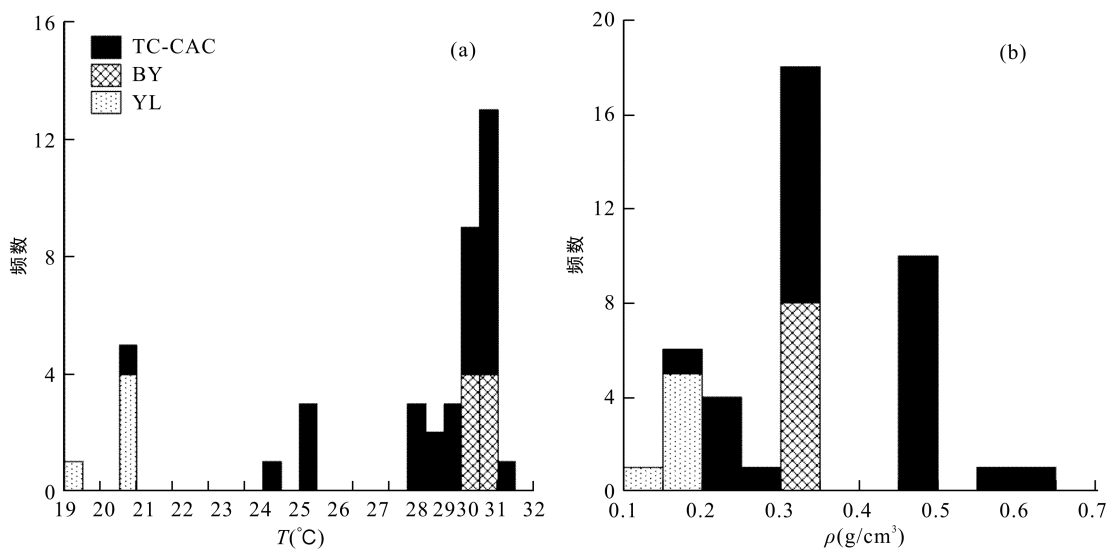


图 9 CO₂ 部分均一温度(a)和密度直方图(b)

Fig.9 Homogenization temperature (T_{h,CO_2}) (a) and density of CO₂ (b) in ore fluids of the Yulong, Beiya and Tongchang-Chang'anong deposits

5.2 金沙江-红河富碱侵入岩带与弧环境斑岩型铜、金矿床成矿流体异同对比

对本文研究区以及王蝶等(2011)报道的其他大陆内部环境的斑岩铜矿床的流体包裹体与弧环境斑岩型铜、金矿床流体包裹体的数据统计表明, 两类斑岩型矿床都普遍发育气液两相包裹体、富气相包裹体和含子晶多相包裹体, 并且包裹体中的子晶类型丰富, 有钠盐、钾盐、石膏, 和金属矿物(黄铁矿、黄铜矿、赤铁矿)。气相挥发分以 H_2O 为主, 部分矿区含 CO_2 及少量 CH_4 。显微测温表明, 斑岩型铜、金矿床成矿期流体均一温度多在 250~500 之间, 高者可达 650 及以上, 盐度多在 10%~50% $NaCl_{eq}$ 之间, 高的可达 70% $NaCl_{eq}$ 以上。另外, 两类斑岩型铜金矿床的成矿流体在演化过程中都出现过沸腾作用, 在包裹体岩相学上表现为高盐度富液相包裹体与低盐度富气相包裹体共存。这是两种不混溶流体在包裹体中的表现。王蝶等(2011)对大多数与大型-超大型斑岩铜矿床有关的岩浆热液研究指示, 在高温阶段, 岩浆流体具有相近的温度, 然而却有截然不同的盐度值: 在同一温度段出现了 5%~20% $NaCl_{eq}$ 之间低盐度和在 35%~60% $NaCl_{eq}$ 之间高盐度的两个盐度值范围(图 10)。这种现象与各个研究区流体包裹体岩相学观察一致证明, 斑岩型铜金矿床的成矿流体普遍经历过沸腾作用过程, 而造成流体沸腾的原因可能主要与减压作用有关。

然而, 金沙江-红河斑岩成矿带流体包裹体与弧环境流体包裹体也有一些差异, 其中最大的差异是大陆内部的斑岩铜金矿床的流体包裹体中富含大

量 CO_2 。金沙江-红河富碱侵入岩带内岩浆中高 CO_2 含量很可能同时继承了富碳酸盐的地层(陈衍景和李诺, 2009)和/或富 CO_2 的地幔源区(Hu et al., 1998, 2004; 毕献武等, 1999; Xu et al., 2012)。另外, 本次研究在铜厂-长安冲矿区发现了富 CO_2 且含金属子晶流体包裹体, 它们与高盐度含金属子晶流体包裹体共存。陈衍景(2011)、Lai and Chi (2007)也发现了此类流体包裹体, 后者进一步说明了 CO_2 存在的意义。他们用激光拉曼测试了这种富 CO_2 且含金属子晶流体包裹体中的 H_2S 含量, 认为金属元素在富 CO_2 流体中通过 HS^- 络合物的形式迁移, 在流体中有一定量络合物存在的情况下, 富 CO_2 的流体也可以迁移大规模的 Cu 等金属元素。

6 结 论

(1) 金沙江-红河富碱侵入岩带内斑岩型铜、金矿床的成矿流体具有高温、高盐度特点, 显示了典型的岩浆热液特征, 与弧环境斑岩型铜、金矿床成矿流体特征较为一致。然而, 金沙江-红河富碱侵入岩带上的流体包裹体普遍具有富 K、富 CO_2 的特点, 且从北段到南段, 流体中的 CO_2 密度增大, 这与弧环境斑岩型铜、金矿床低 K、低 CO_2 的成矿流体形成鲜明对比。

(2) 单个流体包裹体的成分分析显示成矿流体中除含有较高的成矿元素 Cu、Mo、Pb、Zn 等外, 还含有较高的 K、Rb、Sr 等元素, 进一步证明成矿流体主要与岩浆分异作用有关。

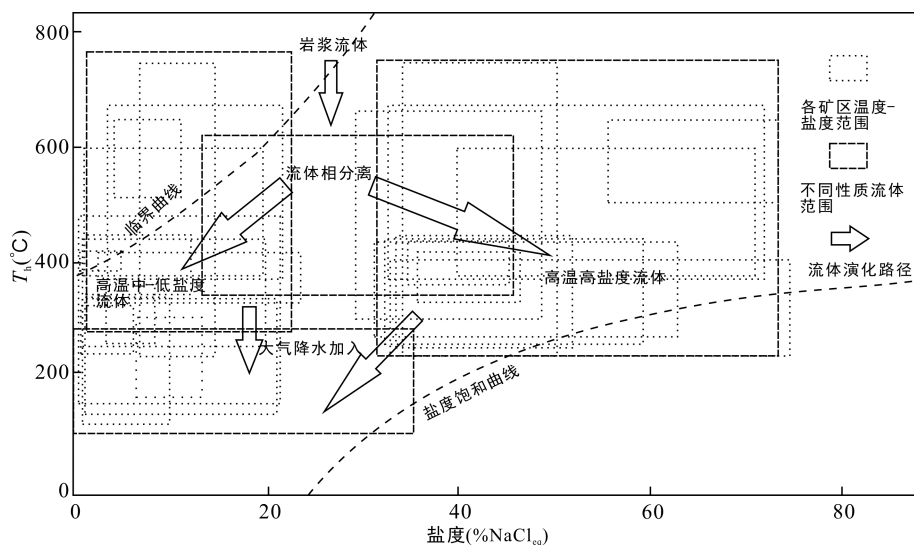


图 10 Cu 的岩浆-成矿流体演化路径(据王蝶等, 2011)

Fig.10 Evolution of ore forming fluids in the porphyry Cu deposits

(3) 成矿流体的演化经历了高温中低盐度到高温高盐度与高温低盐度的演化, 指示沸腾作用在斑岩型矿床中的普遍存在, 且很可能是金属元素沉淀的重要机制之一。

致谢: 特别感谢中国科学院上海应用物理研究所同步辐射光源提供光时进行单个包裹体的成分测试以及 BL15U1 站线工作人员的热心帮助。感谢中国地质大学(北京)喻学惠教授和另一位匿名审稿人提出的宝贵修改建议!

参考文献(References):

- 毕献武, 胡瑞忠, 叶造军, 邵树勋. 1999. A型花岗岩类与铜成矿关系研究——以马厂箐铜矿为例. *中国科学(D辑)*, 29(6): 489-495.
- 陈衍景. 2011. 第五届全国成矿理论与找矿方法学术讨论会. 昆明: 口头报告.
- 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.
- 姜耀辉, 蒋少涌, 凌洪飞, 戴宝章. 2006. 陆-陆碰撞造山环境下含铜斑岩岩石成因——以藏东玉龙斑岩铜矿带为例. *岩石学报*, 22(3): 697-706.
- 唐菊兴, 张丽, 李志军, 陈建平, 黄卫, 王乾. 2006. 西藏玉龙铜矿床——鼻状构造圈闭控制的特大型矿床. *矿床地质*, 25(6): 654-662.
- 王登红, 屈文俊, 李志伟, 应汉龙, 陈毓川. 2004. 金沙江-红河成矿带斑岩铜钼矿的成矿集中期: Re-Os同位素定年. *中国科学(D辑)*, 34(4): 345-349.
- 王蝶, 卢焕章, 毕献武. 2011. 与花岗质岩浆系统有关的石英脉型钨矿和斑岩型铜矿成矿流体特征比较. *地学前缘*, 18(5): 121-131.
- 谢玉玲, 侯增谦, 徐九华, 杨志明, 徐文艺, 何建平. 2005. 藏东玉龙斑岩铜矿床多期流体演化与成矿的流体包裹体证据. *岩石学报*, 21(5): 1409-1415.
- 胥磊落. 2011. 金沙江-红河斑岩Cu(Mo、Au)成矿系统成岩成矿年代学和岩浆氧逸度特征研究. 中国科学院研究生院博士学位论文: 1-181.
- 徐兴旺, 蔡新平, 宋保昌, 张宝林, 应汉龙, 肖骑彬, 王杰. 2006. 滇西北衙金矿区碱性斑岩岩石学、年代学和地球化学特征及其成因机制. *岩石学报*, 22(3): 631-642.
- 张玉泉, 谢应雯, 涂光炽. 1987. 哀牢山-金沙江富碱侵入岩及其与裂谷构造关系初步研究. *岩石学报*, 3(1): 17-25.
- Bodnar R J. 1983. Philosophy of fluid inclusion analysis // De Vivo B and Frezzotti M L. *Fluid Inclusions in Minerals, Methods and Applications*. Blacksburg: Virginia Tech: 1-6.
- Chung S L, Liu D Y, Ji J Q, Chu M F, Lee H Y, Wen D J, Lo C H, Lee T Y, Qian Q and Zhang Q. 2003. Adakites from continental collision zones: Melting of thickened lower crust beneath southern Tibet. *Geology*, 31(11): 1021-1024.
- Cooke D R, Hollings P and Walsh J L. 2005. Giant porphyry deposits: Characteristics, distribution, and tectonic controls. *Economic Geology*, 100(5): 801-817.
- Hou Z Q, Ma H W, Zaw K, Zhang Y Q, Wang M J, Wang Z, Pan G T and Tang R L. 2003. The Himalayan Yulong porphyry copper belt: Product of large-scale strike-slip faulting in eastern Tibet. *Economic Geology and the Bulletin of the Society of Economic Geologists*, 98(1): 125-145.
- Hou Z Q, Zeng P S, Gao Y F, Du Audo and Fu D M. 2006. Himalayan Cu-Mo-Au mineralization in the eastern Indo-Asian collision zone: Constraints from Re-Os dating of molybdenite. *Mineralium Deposita*, 41: 33-45.
- Hu R Z, Burnard P G, Bi X W, Zhou M F, Pen J T, Su W C and Wu K X. 2004. Helium and argon isotope geochemistry of alkaline intrusion-associated gold and copper deposits along the Red River-Jinshajiang fault belt, SW China. *Chemical Geology*, 203(3-4): 305-317.
- Hu R Z, Burnard P G, Turner G and Bi X W. 1998. Helium and Argon isotope systematics in fluid inclusions of Machangqing copper deposit in west Yunnan province, China. *Chemical Geology*, 146: 55-63.
- Lai J Q and Chi G X. 2007. CO₂-rich fluid inclusions with chalcopyrite daughter mineral from the Fenghuangshan Cu-Fe-Au deposit, China: Implications for metal transport in vapor. *Mineralium Deposita*, 4(23): 293-299.
- Liang H Y, Campbell I H, Allen C M, Sun W D, Yu H X, Xie Y W and Zhang Y Q. 2007. The age of the potassic alkaline igneous rocks along the Ailao Shan-Red River shear zone: Implications for the onset age of left-lateral shearing. *The Journal of Geology*, 115(2): 31-242.
- Richards J P. 2003. Tectono-magmatic precursors for porphyry Cu-(Mo-Au) deposit formation. *Economic Geology and the Bulletin of the Society of Economic Geologists*, 98(8): 1515-1533.
- Roedder E. 1984. Fluid inclusions. *Reviews in Mineralogy*, 12: 1-644
- Sillitoe RH. 1972. A plate tectonic model for origin of porphyry copper deposits. *Economic Geology*, 67(2):

184–197.

Sillitoe RH. 2002. Some metallogenic features of gold and copper deposits related to alkaline rocks and consequences for exploration. *Mineralium Deposita*, 37: 4–13.

Su W C, Heinrich C A, Pettke T, Zhang X C, Hu R Z and Xia B. 2009. Sediment-Hosted Gold Deposits in Guizhou, China: Products of wall-rock sulfidation by deep crustal fluids. *Economic Geology*, 104(1): 73–93.

Xu L L, Bi X W, Hu R Z, Zhang X C, Su W C, Qu W J, Hu Z

C and Tang Y Y. 2012 Relationships between porphyry Cu-Mo mineralization in the Jinshajiang-Red River metallogenic belt and tectonic activity: Constraints from zircon U-Pb and molybdenite Re-Os geochronology. *Ore Geology Reviews*, 48: 460–473.

Xu X W, Cai X P, Xiao Q B and Peter S G. 2007. Porphyry Cu-Au and associated polymetallic Fe-Cu-Au deposits in the Beiya Area, Western Yunnan Province, South China. *Ore Geology Reviews*, 31(1): 224–246.

Study of Ore-forming Fluid Associated with Alkali-rich Porphyries in the Jinshajiang-Red River in Continental Tectonic Setting

WANG Die^{1,2}, BI Xianwu^{1*}, LU Huanzhang^{1,3} and LIU Zhangrong⁴

(1. State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, Guizhou, China; 2. Faculty of Land and Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, Yunnan, China; 3. University of Quebec, Chicoutimi, Quebec G7H 2B1, Canada; 4. Heqing Beiya Mining Company Limited, Dali 671507, Yunnan, China)

Abstract: The Jinshajiang-Red River alkali-rich intrusive belt and the abundant associated porphyry Cu-Au deposits is a representative belt of magmatic ore mineralization in continental tectonic setting. Petrographic observation, microthermometry, and Laser Raman Microprobe analyses were carried out on fluid inclusions in phenocryst quartz and quartz vein in the Yulong, Beiya and Tongchang-Chang'an chong deposits in the belt. Different kinds of inclusions were observed in three deposits, including two phase H₂O-NaCl fluid inclusions and multi-phase fluid inclusions with daughter minerals, and rich in CO₂ fluid inclusions. The ore forming fluids in quartz associated with porphyry copper mineralization belong to the H₂O-NaCl-KCl±CO₂ system with high temperature (250–500 °C) and high salinity (10%–50%NaCl_{eq}), indicative of typical magmatic hydrothermal origin. In addition, the SR-XRF test of single fluid inclusion showed that the fluids are enriched in K, Rb, Sr, which is also consistent with the characteristics of magmatic hydrothermal fluid. Furthermore, the fluid inclusion petrography and microscopic temperature measurement indicate that boiling and phase-separation are common in the porphyry copper deposits, which demonstrated that boiling and phase-separation may have played important roles in the transport and deposition of copper.

Keywords: Jinshajiang-Red River alkali-rich intrusive belt; porphyry deposit; fluid inclusion; ore-forming fluid