

滇西北中甸普朗斑岩铜矿流体包裹体初步研究

王守旭^{1,2}, 张兴春^{1*}, 秦朝建¹, 石少华^{1,2}, 冷成彪^{1,2}, 陈衍景^{1,3}

(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. 中国科学院研究生院, 北京 100049; 3. 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871)

摘要: 普朗斑岩铜矿位于三江地区义敦岛弧南端的中甸弧, 是在晚三叠世甘孜-理塘洋盆向西俯冲过程中形成的一个大型-超大型矿床。通过显微测温学和激光拉曼光谱学研究, 发现普朗斑岩铜矿含石英脉中广泛发育富液相包裹体、含 CO₂ 三相/两相包裹体、含子晶多相包裹体。子晶种类复杂, 盐类矿物主要有石盐、钾盐、方解石、石膏, 金属矿物主要为黄铜矿和赤铁矿。流体包裹体中发现有 4 种流体, 即高盐度岩浆流体、含 CO₂ 低盐度流体、中等盐度流体以及少量低盐度水溶液。高盐度岩浆流体的均一温度范围 457 ~ 245 °C, 均一压力范围 (259.33 ~ 25.43) × 10⁵ Pa, 盐度为 34% ~ 54% NaCl, 密度为 1.12 ~ 1.07 g/cm³, 富含 Na、K、Ca、Cu、Fe、CO₂、Cl、S 等成分。原始岩浆流体可能是由中酸性岩浆上升至中间岩浆房后直接出溶而成, 并汇聚在岩浆房的顶部。在甘孜-理塘洋盆的俯冲过程中, 岩浆流体在流体内压和洋盆俯冲所产生的主压应力场的共同作用下, 可以间歇性地从岩浆房上涌, 为早期岩浆活动 (226 ± 3) ~ (228 ± 3) Ma 所形成的岩浆-热液系统提供了持续的矿质和热源。含 CO₂ 低盐度流体与高盐度岩浆流体的相分离作用是导致普朗斑岩铜矿主成矿期网脉状-浸染状矿化的主要原因。

关键词: 流体包裹体; 普朗斑岩铜矿; 中甸; 滇西北

中图分类号: P59; P61

文献标识码: A

文章编号: 0379-1726(2007)05-0467-12

Fluid inclusions in quartz veins of Pulang porphyry copper deposit, Zhongdian, northwestern Yunnan, China

WANG Shou-xu^{1,2}, ZHANG Xing-chun^{1*}, QIN Chao-jian¹, SHI Shao-hua^{1,2},
LENG Cheng-biao^{1,2} and CHEN Yan-jing^{1,3}

1. State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China;
2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3. School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China;

Abstract: The Pulang porphyry copper deposit is located in the northern part of the Sanjiang area. Tectonically, it is located in the Zhongdian arc of the southern part of the Yidun island arc. It is a large to superlarge deposit and was formed in the process of the westward subduction of the Ganzi-Litang oceanic basin in Late Triassic. Various types of fluid inclusions have been observed or identified in the quartz veins of the deposit through microthermometric study and Laser Raman microspectroscopic analysis. They include the aqueous liquid-rich inclusions, the CO₂-bearing three/two phase inclusions, and the daughter mineral-bearing multiphase inclusions basically. There are many kinds of daughter minerals, including halite, sylvinite, calcite, gypsum, chalcocopyrite and hematite. Four kind of fluids trapped in various inclusions have been observed, that is, high salinity magmatic hydrothermal fluid, low salinity CO₂-bearing fluid, intermediate salinity fluid and minor low salinity water. The high salinity magmatic hydrothermal fluid is characterized by homogenization temperatures of 457 - 245 °C, calculated homogenization pressure of (259.33 - 25.43) × 10⁵ Pa, high salinities of 34% - 54% NaCl equiv. (possibly up to 70% NaCl equiv.), density of 1.12 - 1.07 g/cm³, and high contents of Na, K, Ca, Cu, Fe, CO₂, S and Cl. It

收稿日期(Received): 2007-03-09; 改回日期(Revised): 2007-06-29; 接受日期(Accepted): 2007-07-17

基金项目: 国家自然科学基金(40372049); 国家重点基础研究发展计划项目(2002CB412605); 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX3-SW-125)。

作者简介: 王守旭(1979-), 男, 博士研究生, 从事矿床地球化学研究。

* 通讯作者(Corresponding author): ZHANG Xing-chun, E-mail: zhangxingchun@vip.gyig.ac.cn, Tel: +86-851-5895047

WANG Shou-xu et al.: Fluid inclusions in quartz veins of Pulang porphyry copper deposit

is believed that the original magmatic fluid could be formed in the magma chamber due to the evolution of the intermediate-acidic magma, and then concentrated in the top part of the magma chamber. In the westward subduction process of the Ganzi-Litang oceanic basin, the magmatic fluid could be pulsatively upwelling, from the chamber under the fluid internal pressure and the main compressive force of the oceanic basin subduction, to provide continuous supply of ore-forming materials and heat source for the magmatic hydrothermal fluid system which was formed in the early magmatic movement during 226 ± 3 to 228 ± 3 Ma. It is also believed that the phase unmixing of the high salinity and CO_2 -bearing magmatic fluid could be the main reason resulted in the main mineralization in forms of quartz-sulfide veinlet stockwork and dissemination in the Pulang porphyry copper deposit.

Key words: fluid inclusions; Pulang porphyry copper deposit; Zhongdian; northwestern Yunnan

0 引 言

脉石矿物中的流体包裹体是矿物在结晶生长过程中捕获的成矿介质,是研究原始成矿流体的最直接样品。斑岩型矿床因其独特的岩石和矿石结构(发育大量的石英斑晶和密集的石英细脉),非常适宜运用流体包裹体研究方法探讨成矿流体与成矿过程的内在关系。因此,斑岩铜钼矿床的研究进展一直与流体包裹体的研究密切相关^[1-5]。普朗斑岩铜矿是1999年在西南三江地区发现的一个大型甚至超大型矿床,目前已圈定了6个工业矿体,其中主矿体(KT1)预测资源量达400万吨^[6]。本文拟重点对普朗斑岩铜矿含石英脉中的流体包裹体进行显微测温工作,并对其中一些具有代表性的单个包裹体进行激光拉曼光谱分析,以期研究和探讨成矿作用与成矿流体之间的关系提供依据。

1 矿床地质概况

普朗斑岩铜矿位于云南省香格里拉(中甸)东北36 km的格咱乡。大地构造位置处于义敦岛弧南端的中甸弧,其东部和南部是甘孜-理塘结合带,西部是近SN向展布的乡城-格咱深大断裂。区域断裂构造发育,NW向断裂规模较大,发育较早,与区域主构造线方向一致;NE向断裂规模较小,发育较晚,常错开NW向断裂。区内广泛发育印支期斑岩体,岩体分布明显受控于NW向断裂。区内北部出露有燕山期花岗岩,南部和中部地区出露少量的喜马拉雅期富碱斑岩。三期岩浆活动均伴有不同程度的铜多金属矿化,其中印支期斑岩体与成矿关系尤其密切^[6-10]。

中甸地区在早三叠世处于甘孜-理塘洋盆西侧

的被动陆缘;晚三叠世,甘孜-理塘洋盆向西俯冲,中甸褶皱带东缘由被动陆缘转为活动陆缘,沿俯冲方向依次发育岛弧和弧后盆地;晚三叠世末,甘孜-理塘洋盆闭合,经短暂的残留海发育阶段,最后碰撞造山^[11-13]。这一构造体制的完成,奠定了中甸地区从三叠纪末至今的基本构造格局。

普朗铜矿区出露的地层为上三叠统图姆沟组二、三段(T_3t^{2-3}),岩性为砂板岩夹安山岩,地层总体构成一个穹状背斜。普朗复式岩体呈不规则状,NW向展布,地表出露面积约为9 km²。岩体具多次侵位特征,早期为石英闪长玢岩和二长闪长玢岩,中期为石英二长斑岩和花岗闪长斑岩,晚期为闪长玢岩。早期和中期岩体均叠加有后期石英细脉或石英-钾长石细脉,并伴有不同程度的硫化物矿化。晚期玢岩多呈岩脉状穿插于早期和中期岩体中,无矿化现象。石英二长斑岩和花岗闪长斑岩构成中心相,约占1/5;石英闪长玢岩和二长闪长玢岩构成边缘相,约占4/5。岩体蚀变强烈,具典型的斑岩铜矿蚀变分带特征,自内向外依次为:硅化钾化带→绢英岩化带→青磐岩化带,外围为角岩化砂板岩和未蚀变砂岩。含矿岩体及围岩主要为石英二长斑岩和石英闪长玢岩及少量花岗闪长斑岩和二长闪长玢岩,矿体与围岩呈渐变关系,无明显界限。矿化类型主要为细脉浸染状、网脉状、浸染状、斑块状和星点状等。矿石结构主要有半自形-他形粒状结构、交代溶蚀结构、包含结构和镶嵌结构等。金属矿物主要有黄铜矿、黄铁矿、磁黄铁矿、辉钼矿及少量磁铁矿、辉铜矿和斑铜矿,脉石矿物有斜长石、钾长石、石英、角闪石、黑云母、绿泥石、绢云母、绿帘石和方解石等,次生矿物有孔雀石、褐铁矿和石膏等,副矿物有锆石和磷灰石等。

普朗铜矿床区矿化斑岩和无矿化斑岩的锆石离子探针年龄为(226 ± 3)~(228 ± 3) Ma(另文发表),矿化斑岩的黑云母 Ar-Ar 坪年龄为(214.58 ± 0.91)~

(216 ± 1) Ma, 石英-硫化物脉中辉钼矿的 Re-Os 等时线年龄为 (213.0 ± 3.8) Ma^[10]。各种方法获得的定年结果一致表明成岩作用和成矿作用都是在晚三叠世甘孜-理塘洋盆的俯冲过程中形成的。

2 含矿石英脉特征

石英是普朗斑岩铜矿床中最为发育的透明脉石矿物, 主要以不同宽度的石英-硫化物脉或石英-方解石-硫化物脉的形式产出。本次研究样品采自钾化带和绢英岩化带中的含矿石英脉。根据含矿石英脉的产出特征大致划分为如下几类。

①石英-硫化物脉: 在石英二长斑岩和石英闪长玢岩中广泛发育, 岩体矿化呈细脉浸染状。脉宽约为 0.4~2 cm。硫化物主要为黄铜矿、黄铁矿, 其次为辉钼矿, 主要沿脉壁或裂隙生长, 或者呈团斑状、星点状与石英共生(图 1a)。

②张性石英-硫化物脉: 主要发育于强烈钾化的石英二长斑岩中, 岩体呈细脉浸染状矿化。石英脉宽度较小, 约 0.4~1 cm。脉体中的裂隙一般经过多次张裂, 硫化物呈贯入式生长于裂隙中(图 1b), 部分硫化物沿脉壁生长。硫化物主要为黄铜矿、黄铁矿, 其结晶时间明显晚于石英。

③石英- (方解石)- 硫化物粗脉: 主要发育于硅化强烈的石英二长斑岩中, 岩体微裂隙较发育, 裂隙面多已绿泥石化。脉体宽度较大, 约 2~4 cm, 脉壁常见绿帘石和绿泥石。有的脉体中常发育孔隙, 孔隙中又常发育晶形很好的石英或方解石。黄铜矿、黄铁矿等硫化物主要呈团斑状与石英、方解石共生(图 1c)。

上述 3 类石英-硫化物脉的生成顺序大致为: ①类和②类(张性)石英-硫化物脉生成较早, ③类石英- (方解石)- 硫化物粗脉生成较晚。其中: ①类和②类没有明显的先后关系, 且许多石英-硫化物脉兼具二者特征, 常常表现为一段脉体具多次张裂特征, 而另一段则不具有张裂特征。

3 流体包裹体研究

3.1 流体包裹体的显微特征

本次研究主要以脉状石英中的原生流体包裹体

为研究对象。将上述石英脉样品制成双面抛光包裹体光薄片, 然后在光学显微镜上观察, 以确定不同阶段、不同类型的包裹体。根据室温条件下流体包裹体的相态种类和充填度特征, 可划分为如下几类(表 1)。

表 1 普朗斑岩铜矿石英脉的流体包裹体特征

Table 1 Characteristics of fluid inclusions in quartz veins of Pulang porphyry copper deposit

类型	个体形态	长轴大小(μm)	分布状态	充填度
I	椭圆状、近圆状、长条状、菱状	5~10	群状、孤立状	0.95~0.7
II	椭圆状、长条状、不规则状	4~20	孤立状、群状	0.9~0.5
III	不规则状、椭圆状	2~10	孤立状、群状	0.95~0.7
IV	椭圆状、不规则状	5~10	孤立状	0.3~0.1

I 类富液相包裹体(L+V, 图 1d), 在各类石英脉中最为发育。主要分布在石英脉中的硫化物周围, 分布较为密集, 包裹体形态亦较为规则, 常与含 CO₂ 的三相包裹体、含子晶的多相包裹体密切共生。在均一化过程中, 多数包裹体均一至液相, 仅个别包裹体均一至气相。

II 类含 CO₂ 三相/两相包裹体(L+L_{CO₂}+V_{CO₂}, 图 1e-1f), 多数分布于硫化物周围, 包裹体个体较大, 形态规则。除个别包裹体均一至气相外, 多数包裹体均一至液相。部分 CO₂ 充填度较大的包裹体在均一化过程中发生爆裂, 显示其内压较大。

III 类含子晶多相包裹体(L+V+S, 图 1g-1k), 多沿石英脉中的硫化物密集分布。子晶种类主要有石盐、钾盐、黄铜矿和赤铁矿等。单个包裹体中所含子晶数目不等, 多数含 1~2 个子晶, 个别含 4 个以上子晶。部分包裹体同时含有盐类子晶和金属矿物子晶(图 1j)。也有包裹体同时包含石盐、钾盐子晶(图 1g)。其中石盐子晶颗粒较大, 晶形很好, 呈立方体状; 钾盐子晶颗粒较小, 呈浑圆状, 颜色较暗。

IV 类富气相包裹体, 轮廓呈黑色, 中间为亮白点, 显示包裹体为低密度的蒸气相。部分包裹体室温条件下显示为气液两相, 但气泡体积很大。富气相包裹体在上述各类石英脉中随机分布, 经常与 I 类富液相包裹体共生(图 1l), 指示在包裹体捕获时可能发生过流体的沸腾作用, 或者有两种流体的不混溶作用存在。

3.2 流体包裹体的均一温度、盐度及密度

流体包裹体的测温工作在中国科学院矿床地球化学国家重点实验室的流体包裹体室完成, 测试仪

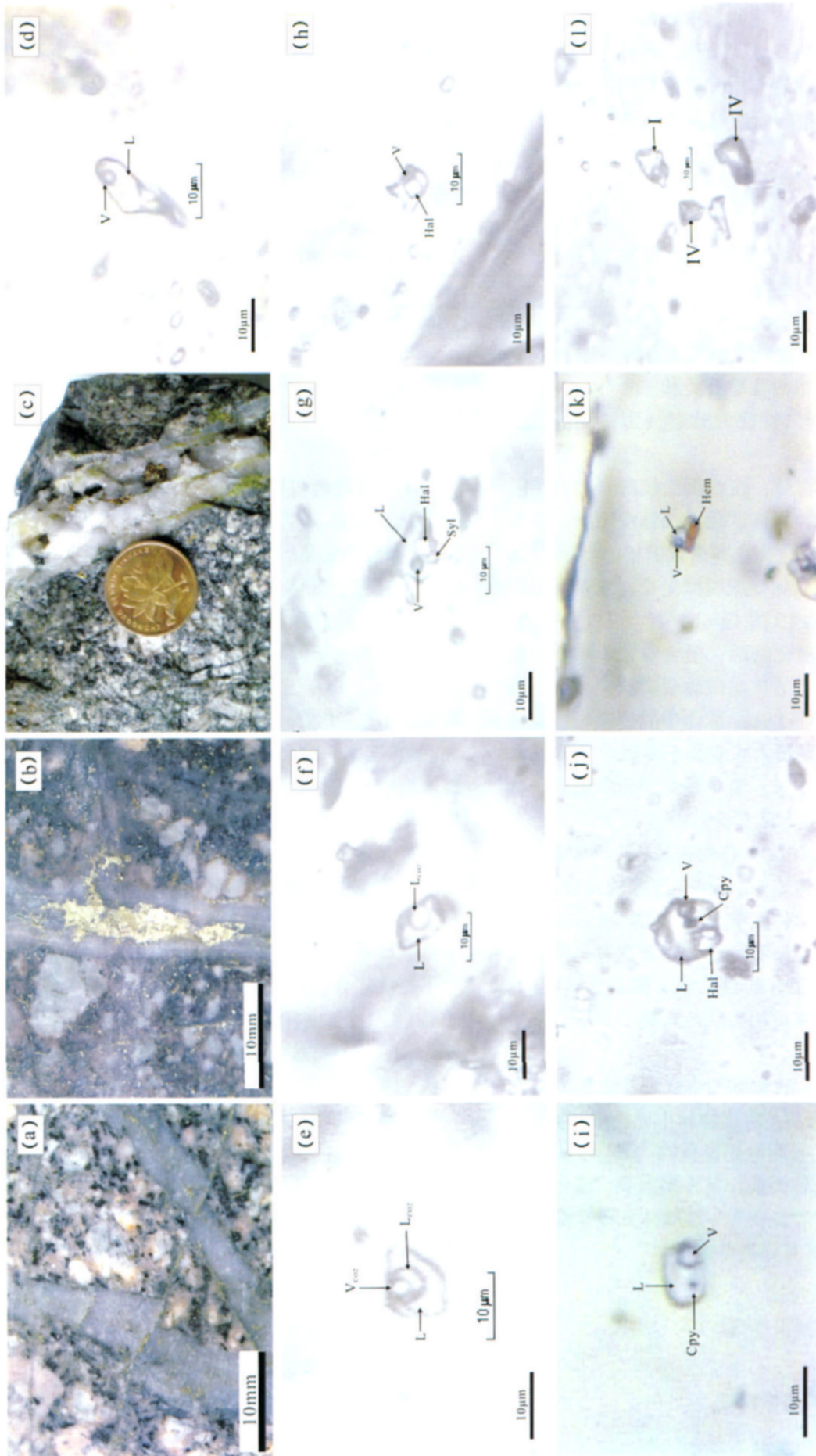


图 1 普朗斑岩铜矿床石英英脉及流体包裹体显微照片

Fig. 1 Micrographs of quartz veins and fluid inclusions in quartz veins of Pulang porphyry copper deposit

a - 石英 - 硫化物脉; b - 张性石英 - 硫化物脉; c - 石英 - 方解石 - 硫化物脉; d - 硫化物包裹体; e - 富液相包裹体; f - 常温下显示为两相态的含 CO₂ 包裹体; g - 含有石盐和钾盐子晶的包裹体; h - 含有黄铜矿子晶的包裹体; i - 含有石盐和黄铜矿子晶的包裹体; j - 含有石盐和赤铁矿的包裹体; k - 含有赤铁矿的包裹体; l - 包裹体水溶液; V - 包裹体气相; Lco₂ - 液态二氧化碳; Lveo - 气态二氧化碳; Syl - 钾盐子晶; Cpy - 黄铜矿子晶; Hem - 赤铁矿。

器为 Linkam THMSG 600 型冷热台，测温范围为 -196 ~ 600 °C，冷冻数据和加热数据精度分别为 ±0.1 °C 和 ±2 °C。在水溶液冰点 ($t_{m,ice}$)、CO₂ 笼合物熔化温度 ($t_{m,cla}$) 和 CO₂ 气-液均一温度 (t_{h,CO_2}) 的测定时，升温速率由开始时的 10 °C/min 逐渐降低为 5 °C/min 和 2 °C/min，临近相变点时降到 1 °C/min。在完全均一温度 (t_{tot}) 的测定时，开始时的升温速率为 20 °C/min，临近相变时降到 1 °C/min。流体包裹体的显微测温结果见表 2。

由表 2 可见，当冰点大于 -21.2 °C 时，I 类富液相包裹体的盐度可根据流体包裹体的冰点与盐度的关系表^[14]获得；当冰点小于 -21.2 °C 时，其盐度可根据 Linkam THMSG 600 型冷热台配带的 PVTX 计算软件获得。II 类含 CO₂ 三相/两相包裹体的盐度可根据 CO₂ 笼合物熔化温度与盐度的关系表^[14]获得。III 类含子晶多相包裹体的盐度，则可根据石盐熔化和盐度的经验公式^[15]计算获得。I 类、II 类和 III 类包裹体的流体密度，可根据刘斌等^[16]推导的公式经计算获得。

显微测温结果表明，含石英英脉的流体包裹体均一温度范围 154 ~ 457 °C，不同类型包裹体的温度范围和峰值温度差异很大 (图 2)。含子晶包裹体的峰值温度最高，含 CO₂ 三相/两相包裹体次之，富液

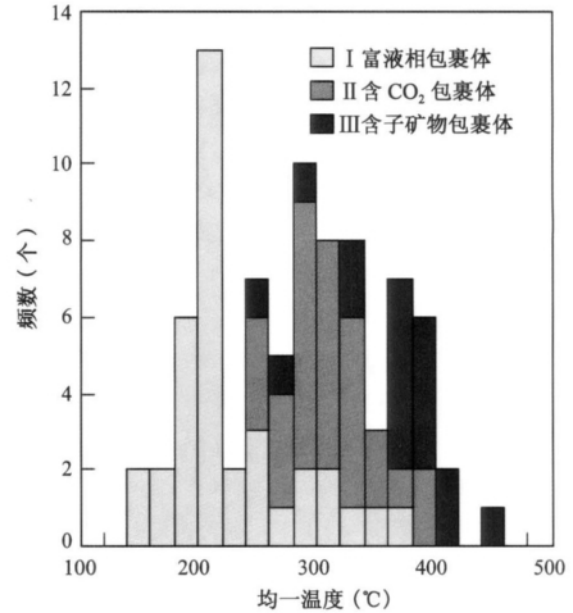


图 2 流体包裹体的均一温度直方图
Fig. 2 Histogram of homogenization temperatures

相包裹体的峰值温度最低，反映了不同类型的包裹体可能是在不同成矿阶段捕获的，因此成矿温度由早期至晚期是一个相对连续的变化过程。下文将根据包裹体的类型综合分析各类包裹体的均一温度、盐度和密度特征。

表 2 普朗铜矿包裹体显微测温结果

Table 2 Microthermometric data of the fluid inclusions in the quartz veins of Pulang porphyry copper deposit

样号	类型	$t_{m,ice}$ (°C)	$t_{m,cla}$ (°C)	t_{m,CO_2} (°C)	$t_{h,tot}$ (°C)	盐度% NaCl	流体总密度 (g/cm ³)
PL04-10 脉型③	II		8.1 ~ 9.4 (15)	4.7 ~ 28.2 (L) 26.3 (G)	286.8 ~ 305.9 (4)	3.71 ~ 1.22	0.90 ~ 0.99
PL04-11 脉型③	I	-16.1 ~ -3.3 (6)			166.5 ~ 291.5 (2)	19.53 ~ 5.41	0.78 ~ 1.05
PL04-11 脉型③	II		5.1 ~ 10.1 (17)	21.5 ~ 30.0 (L)	276.6 ~ 361.4 (8)	4.07 ~ 0.02	0.85 ~ 0.98
PL04-11 脉型③	IV				301 (1)		
PL04-12 脉型③	I	-3.6 ~ -2.2 (2)			225.4 (1)	5.86 ~ 3.71	0.88
PL04-12 脉型③	II		5.5 ~ 5.7 (2)		250.9 (1)	8.19 ~ 7.87	
PL04-13 脉型③	I	-6.9 ~ -5.7 (6)			158.9 ~ 303.1 (5)	10.36 ~ 8.81	0.82 ~ 0.97
PL04-13 脉型③	II		-3.5 ~ 7.8 (7)	29.3 ~ 30.1 (L) 29.6 (G)	242.1 ~ 307.2 (6)	18.45 ~ 4.26	0.88 ~ 1.09
PL04-26 脉型①	I	-17.8 ~ -6.5 (18)			190.9 ~ 348 (14)	20.82 ~ 9.47	0.80 ~ 1.04
PL04-26 脉型①	II		-2.4 ~ 8.3 (6)	29.6 (L) 30.8 ~ 31.4 (G)	301 ~ 322.1 (4)	17.67 ~ 6.37	0.89 ~ 1.02
PL04-26 脉型①	III				279 ~ 399 (7)	47.35 ~ 36.61	1.07 ~ 1.10
PL04-38 脉型①	I	-24.2 ~ -3.5 (15)			154 ~ 367.2 (13)	25.01 ~ 5.71	0.88 ~ 1.10
PL04-38 脉型①	III				368 ~ 393 (2)	44.13 ~ 46.70	1.07 ~ 1.08
PL04-38 脉型①	IV				351.8 (1)		
PL05-12 脉型①②	II		-2.5 ~ 7.5 (11)	28.7 ~ 29.8 (L) 30.7 ~ 31.8 (G)	326 ~ 400 (6)	17.75 ~ 4.80	0.70 ~ 0.99
PL05-12 脉型①②	III				245 ~ 457 (8)	54.17 ~ 34.37	1.07 ~ 1.12

注：括号内数字表示测试数，L 表示均一至液相，G 表示均一至气相。

WANG Shou-xu et al.: Fluid inclusions in quartz veins of Pulang porphyry copper deposit

3.2.1 富液相包裹体

均一温度范围 154 ~ 367 °C, 冰点范围 -24.2 ~ -2.2 °C。根据冰点的分布特征, 可以分为 2 个冰点区间 (图 3a)。

I-1, 冰点范围 -24.2 ~ -15.8 °C ($n = 29$), 盐度为 25.01% ~ 19.29% NaCl。均一温度范围 154 ~ 367.2 °C ($n = 23$), 集中于 181.8 ~ 217.4 °C ($n = 17$)。流体密度为 0.88 ~ 1.10 g/cm³ ($n = 23$)。部分包裹体在冷冻回温过程中, 显示较低的共结点温度, 一般在 -45 ~ -35 °C 之间出现清晰的颗粒状外貌, 说明原始流体不是简单的 H₂O-NaCl 体系, 可能是 H₂O-NaCl-CaCl₂ 体系。

I-2, 冰点范围 -10.7 ~ -2.2 °C ($n = 16$), 盐度为 14.67% ~ 3.71% NaCl。均一温度为 158.9 ~ 323 °C ($n = 11$), 流体密度为 0.78 ~ 0.97 g/cm³ ($n = 11$)。

3.2.2 含 CO₂ 三相/两相包裹体

CO₂ 三相点温度为 -59.8 ~ -56.6 °C (部分测试值大于 -56.6 °C, 最高为 -56.0 °C, 经校正后为 -56.6 °C), 表明一部分包裹体的气相为纯 CO₂ 相, 还有一部分包裹体中气相成分除 CO₂ 外, 还有其他气体存在。对此类单个包裹体进一步进行了激光拉曼探针分析, 分析结果将在后面叙述。

CO₂ 笼合物的熔化温度范围 -3.5 ~ 10.1 °C ($n = 58$) 集中于 8.1 ~ 9.4 °C ($n = 29$, 图 3b)。相应的盐度范围为 18.45% ~ 0.02% NaCl, 集中于 3.71% ~ 1.22% NaCl 之间。表明多数含 CO₂ 包裹体的盐度很低。少数包裹体的盐度较高, 其笼合物熔化温度为 -3.5 ~ 2.2 °C ($n = 7$), 相应的盐度为 18.45% ~ 12.94% NaCl。还有少数含 CO₂ 三相包裹体室温条件下显示为气液两相 (图 1f), 其中一个包裹体实测的 CO₂ 三相点温度为 56.6 °C, 推测为纯 CO₂ 相; 在冷冻回温过程中, 测得其笼合物熔化温度为 8.3 °C, 气泡复原后随即消失; 再次冷冻至三相态出现后, 回温测得其 CO₂ 气-液均一温度为 4.7 °C (均一至液相), 表明有高密度 CO₂ 相包裹体的存在, 指示了流体被捕获时可能发生过不混溶作用^[14]。

包裹体的 CO₂ 气-液均一方式有 2 种: ①均一至液态 CO₂, 温度为 4.7 ~ 30.1 °C, 根据 Touret *et al.*^[17] 的经验公式获得含碳相密度为 0.61 ~ 0.90 g/cm³ ($n = 33$); ②均一至气态 CO₂, 温度为 26.3 ~ 31.8 °C, 根据 Touret *et al.*^[17] 的经验公式获得含碳相密度为 0.25 ~ 0.57 g/cm³ ($n = 11$)。包裹体的完全均一范围 400 ~ 242.1 °C ($n = 29$), 流体总密度为 0.70 ~ 1.09 g/cm³ ($n = 44$)。

3.2.3 含子晶多相包裹体

均一温度范围 245 ~ 457 °C ($n = 17$), 盐度为 34.37% ~ 54.17% NaCl, 密度为 1.12 ~ 1.07 g/cm³。均一化过程中, 多数包裹体首先是气泡消失, 最后通过石盐消失而均一至液相。还有部分包裹体是一种子晶首先消失, 其次是气泡消失, 再其次是另一种子晶消失, 最后才均一至液相。部分颜色暗淡、浑圆状子晶, 在超过 450 °C 时仍不溶解, 表明这类子晶不是钾盐, 很可能是碳酸盐矿物。其中有一个含多种子晶的包裹体, 升温至 530 °C 以上时, 仅有 1 个子晶消失, 说明其流体盐度很高, 推测其盐度可能达到 70% NaCl 左右, 这暗示原始成矿流体主要是岩浆热液。

3.3 流体包裹体的激光拉曼探针分析

单个包裹体的激光拉曼探针成分分析是在中国科学院矿床地球化学国家重点实验室的激光拉曼光谱实验室完成的。测试仪器为 Renishaw 公司生产的 InVia Reflex 型显微共焦激光拉曼光谱仪, 光源为

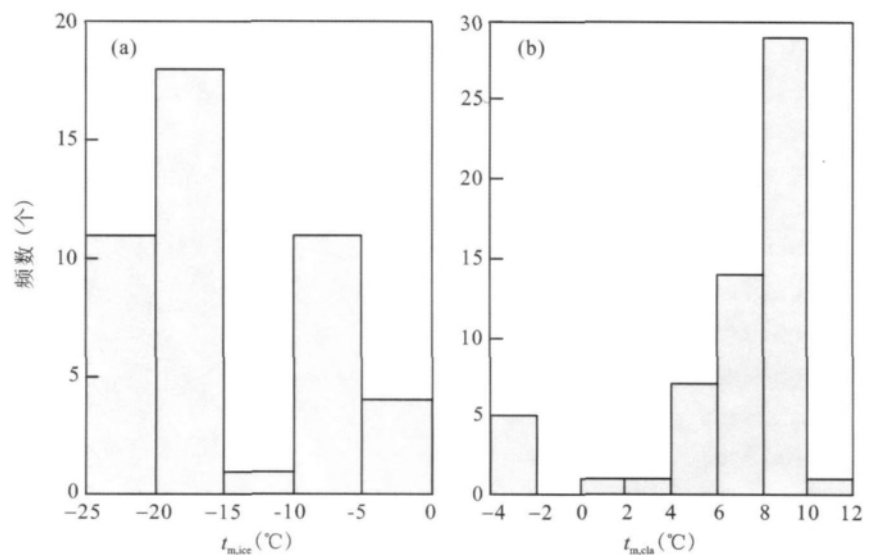


图 3 流体包裹体的冰点及 CO₂ 笼合物熔化温度直方图

Fig. 3 Histograms of freezing points of fluid inclusions (a) and melting temperatures of clathrate (b)

Spectra-Physics 氩离子激光器, 波长 514 nm, 激光功率 20 mW, 空间分辨率为 1 ~ 2 μm , 积分时间一般为 30 s, 局部测试积分时间适当延长, 100 ~ 4000 cm^{-1} 全波段一次取谱。

分析结果表明, 各类流体包裹体的液相成分主要是水溶液, I 类富液相包裹体的气相成分主要是水蒸气。II 类含 CO_2 三相/两相包裹体的 CO_2 相成分主要是 CO_2 , 部分含有少量的 N_2 , 不含 CH_4 (图 4a)。III 类含子晶多相包裹体的气相成分依所含子晶的不同而有较大的差异。根据子晶的晶形判断, 其透明矿物主要是石盐, 次为钾盐。但激光拉曼分析证明, 透明矿物还有大量的方解石和少量石膏 (图 4d - 4e)。

含方解石子晶的包裹体, 其气相成分主要是 H_2O (图 4b), 个别包裹体的气相有少量 CO_2 。根据方解石的化学式 (CaCO_3), 推测原始成矿流体富含 Ca^{2+} , 并且溶解了大量的 CO_2 。包裹体被捕获后, 在降温演化过程中, Ca^{2+} 和 CO_3^{2-} 结合形成方解石子晶, 从而导致包裹体的气相中缺乏 CO_2 。这亦从另一角度证实成矿流体中存在 $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}-\text{CaCl}_2$ 体系。含石盐或钾盐子晶的包裹体, 其气相成分主要是 H_2O 或 ($\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2$) 的混合物 (图 4c), 部分含有少量 N_2 , 少数包裹体在室温条件下显示 $\text{L} + \text{NaCl} + \text{L}_{\text{CO}_2} + \text{V}_{\text{CO}_2}$ 的组合特征。

包裹体中黄铜矿子晶多呈浑圆状, 有的黄铜矿因颗粒很小而呈黑点状, 是包裹体中最为普遍的不透明矿物 (图 1i - 1j), 在包裹体中所占的体积百分比约为 1%, 常沿包裹体边缘生长, 或沿其他子晶和气泡生长。在激光拉曼探针分析过程中, 其特征拉曼谱峰 (356 和 321) 非常显著 (图 4f)。黄铜矿子晶容易迁移。根据上述现象推测, 黄铜矿是在成矿流体被主矿物 (石英) 捕获后由于温度下降而结晶形成的, 而不是机械捕获物。包裹体中的红色不透明矿物为赤铁矿, 也是包裹体中较为发育的不透明矿物, 多呈长板状, 颗粒大小不一, 最大者可达 10 μm (图 1k), 其特征拉曼谱峰为 1316 和 609 (图 4g)。值得提及的是, 我们还在一个流体包裹体中发现金红石 (TiO_2) 和透明矿物为石盐两种子晶共生的现象 (图 4h)。该包裹体长轴约 10 μm , 其中的金红石子晶略呈楔状, 紧靠石盐子晶和气泡生长。推测两种子晶共生可能为非均匀捕获的产物。

普朗斑岩铜矿含矿石英脉中的流体包裹体包含丰富的子晶矿物, 是成矿流体具有复杂成分的重要证据, 这表明成矿流体富含 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 等离子和

Cu 、 Fe 等成矿元素以及 CO_2 、 Cl 、 S 等矿化剂。

4 讨 论

4.1 成矿流体特征

本次研究共获得 75 组均一温度 - 盐度数据对, 其中富液相包裹体 34 组, 含 CO_2 三相/两相包裹体 24 组, 含子晶包裹体 17 组。在均一温度对盐度的图解中 (图 5) 显示, 普朗斑岩铜矿含矿石英脉中存在 4 种不同性质的成矿流体 (即流体 A、流体 B、流体 C、流体 D)。

其中流体 A 基本沿石盐饱和曲线分布, 盐度高 (34% ~ 54% NaCl), 密度大 (1.12 ~ 1.07 g/cm^3), 富含 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 等离子和 Cu 、 Fe 等成矿元素, 并且富含 CO_2 、 S 、 Cl 等矿化剂, 当属岩浆流体。均一温度变化幅度大, 并经历了大幅度的降压过程。根据饱和盐水溶液的压力公式^[18], 获得其均一压力范围 (259.33 ~ 25.43) $\times 10^5$ Pa, 反映了流体可能处于开放的构造空间。

流体 B 的主要特征是含有一定的 CO_2 , 盐度低 (2.77% ~ 6.37% NaCl), 密度较低 (0.80 ~ 0.95 g/cm^3), 均一温度稳定 (260 ~ 360 $^{\circ}\text{C}$), 根据刘斌等^[16] 的公式, 获得其 CO_2 摩尔含量为 0.04 ~ 0.25。这类包裹体在石英 - 硫化物脉和石英 - (方解石) - 硫化物粗脉中广泛分布。我们分析了 3 件脉状方解石的碳氧同位素, $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 为 -3.0‰ ~ -5.29‰, $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ 为 16.8‰ ~ 10.76‰。假设包裹体中的 CO_2 和脉状方解石具有同一碳源, 则说明 CO_2 亦来源于岩浆流体。前已述及, 高盐度岩浆流体富含 CO_2 , 因而, 我们推测含 CO_2 低盐度流体是高盐度岩浆流体演化至一定阶段的产物。这种流体由于密度较低, 可能更容易迁徙, 延续到石英 - (方解石) - 硫化物粗脉阶段, 为脉状方解石的结晶提供了充足的 CO_3^{2-} 。

流体 C 主要为 $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}-\text{CaCl}_2$ 体系, 中等盐度 (19% ~ 25% NaCl), 密度较大 (1.00 ~ 1.10 g/cm^3), 均一温度较低 (250 ~ 150 $^{\circ}\text{C}$)。根据 Haas^[19] 推导的经验公式, 获得其均一压力为 (4.42 ~ 33.34) $\times 10^5$ Pa。中等盐度流体的成因可能有 3 种: ①原始的流体; ②两种不同盐度的流体混合而成; ③高盐度流体通过某种作用导致其盐度下降而成。我们注意到, 这类包裹体主要发育于石英 - 硫化物脉中, 结合网脉状矿物的蚀变特征 (钠长石化、绢云母化、钠黝帘石化、绿帘石化及绿泥石化等^[6]), 笔者倾向认为中

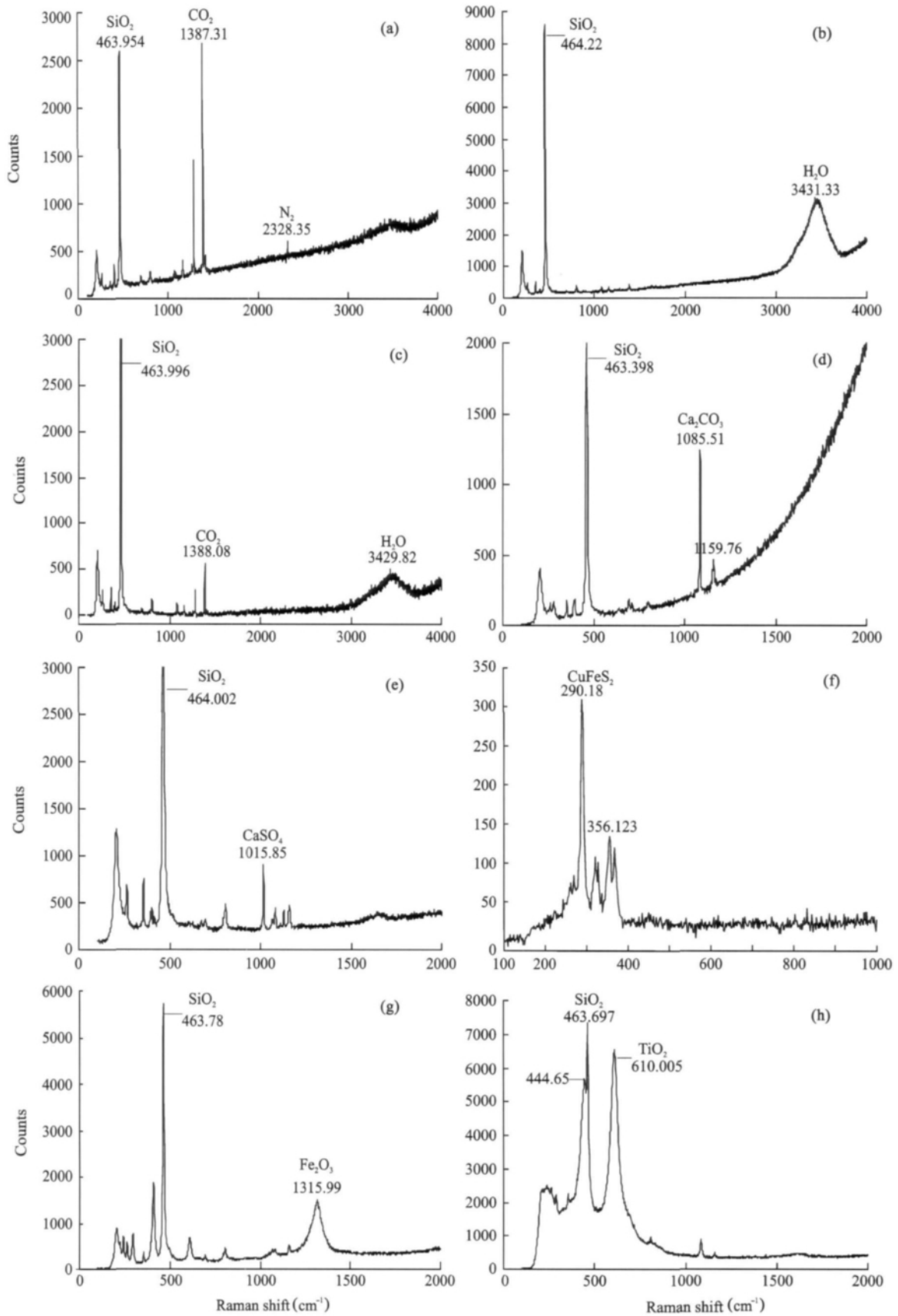


图 4 流体包裹体不同相的激光拉曼光谱

Fig. 4 Laser Raman spectra of various phases of fluid inclusions

a - 含 CO₂ 相包裹体的气相成分; b - 含方解石子晶包裹体的气相成分; c - 含石盐子晶包裹体的气相成分; d - 方解石子晶光谱; e - 石膏子晶光谱; f - 黄铜矿子晶光谱; g - 赤铁矿光谱; h - 金红石光谱。

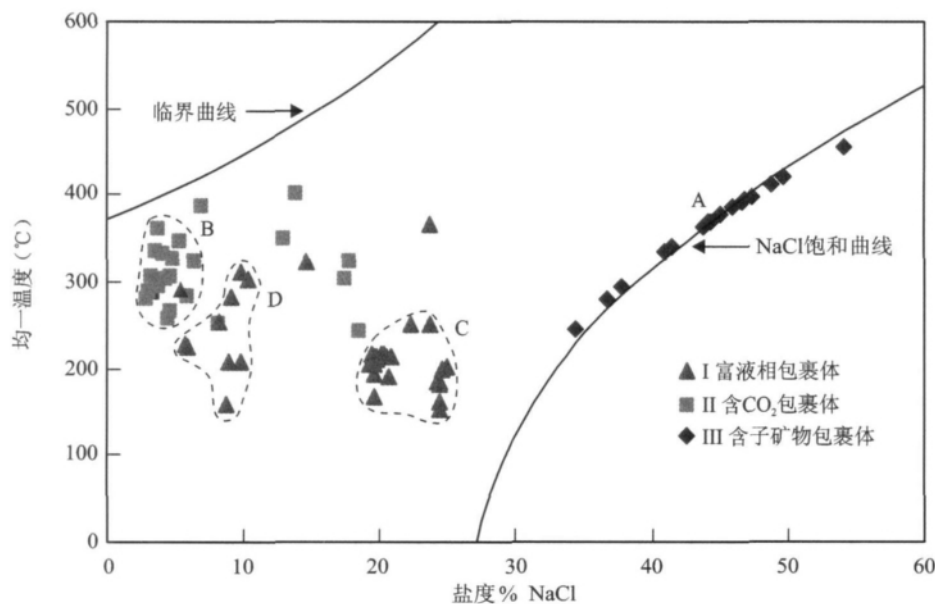


图5 流体包裹体的均一温度 - 盐度分布图

Fig. 5 Homogenization temperatures vs. salinities of fluid inclusions of Pulang porphyry deposit

盐度流体可能是高盐度岩浆流体通过对斑岩体的蚀变作用,消耗了成矿流体中的 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 等离子,致使其盐度和温度降低而形成的。

流体 D 的主要特征是盐度低 ($<10\%$ NaCl),密度较低 ($0.80 \sim 0.97 \text{ g/cm}^3$),均一温度约为 $310 \sim 150 \text{ }^\circ\text{C}$,根据 Haas^[19] 推导的经验公式,获得其均一压力为 $(5.85 \sim 92.56) \times 10^5 \text{ Pa}$ 。这类包裹体在含石英英脉中随机分布,发育较少,说明低盐度水溶液对成矿作用影响可能有限。显然上述研究结果与前人^[20-30] 对斑岩型铜钼矿床流体包裹体和同位素的研究结果一致,即斑岩型铜钼矿床中的流体包裹体含有丰富的子矿物如石盐、钾盐、方解石、硬石膏、黄铜矿和赤铁矿等,原始成矿流体主要为岩浆流体。

4.2 成矿作用分析

斑岩铜矿中的高盐度岩浆流体具有很强的携带成矿元素的能力^[31]。前人研究表明^[32-37] 这种高盐度流体的形成机制可能有下列三种:①直接在岩浆的温度条件下(中酸性岩浆一般为 $700 \sim 900 \text{ }^\circ\text{C}$)产生,岩浆房中的中酸性岩浆通过一定程度的结晶分离作用(结晶出斑晶矿物),使岩浆中的挥发分达到饱和或过饱和状态,并进一步分异出独立的高盐度的流体相;②由中低盐度热液通过液态不混溶作用或减压沸腾作用形成;③岩浆浅成侵位时,在其结晶演化的晚期阶段,从残浆中出溶而成。Cline *et al.*^[35] 的研究表明,岩浆出溶流体的盐度是不同压力下岩

浆结晶程度的函数,含有 2.5% 的水及 $\text{Cl}/\text{H}_2\text{O}$ 值为 0.1 的硅酸盐岩浆,在 $2 \times 10^8 \text{ Pa}$ 的压力条件下,结晶程度为 59% 时达到水饱和,最初出溶流体盐度最高,可达 53.4% NaCl,随着结晶程度的增大,最后出溶流体盐度最低;而在 $0.5 \times 10^8 \text{ Pa}$ 的压力条件下,结晶程度为 8% 时达到水饱和,最初出溶流体盐度最低,仅为 1.1% NaCl,随着结晶程度的增大,最后出溶流体的盐度可达 80% NaCl 以上。如果高盐度岩浆流体是由沸腾作用形成的,则含子晶包裹体

将与富气相包裹体密切共生,并且这两种包裹体应具有相似的均一温度^[16]。普朗铜矿床的含石英英脉中明显缺乏共生的含子晶包裹体与富气相包裹体群,并且富气相包裹体发育概率低,远小于含子晶包裹体的出现概率。所测包裹体都是通过子晶消失而均一至液相的,说明包裹体是在液体稳定场内被捕获的^[30, 32]。因此,流体沸腾作用不是高盐度流体的主要成因。前已述及普朗斑岩铜矿床的成岩年龄和蚀变矿化年龄存在很大的时差 ($> 10 \text{ Ma}$),说明复式岩体浅成侵位时出溶流体亦不可能是高盐度岩浆流体的主要成因。因此,我们推测形成网脉状矿化的高盐度流体可能是由中酸性岩浆上升至中间岩浆房时直接出溶而成,并汇聚在岩浆房的顶部。杨志明等^[33] 通过对西藏冈底斯斑岩铜矿带厅宫铜矿床的流体包裹体研究,亦认为通过石盐消失而均一至液相的包裹体指示了有些成矿流体可能直接来源于深部岩浆的出溶作用。但这种岩浆流体的具体出溶机制和物理化学条件还需要做进一步的研究。在甘孜-理塘洋盆的俯冲过程中,原始岩浆流体在流体内压和洋盆俯冲所产生的主压应力场的共同作用下,可以间歇性地从岩浆房上涌,从而为早期岩浆侵位 (226 ± 3) \sim (228 ± 3) Ma 所形成的岩浆-热液系统提供了持续的矿质和热源。

前人研究指出^[21, 27, 38],铜在流体中主要以 $\text{CuCl}_{(\text{aq})}$ 、 CuCl_2^- 等氯络合物形式存在和迁移,Cu 的溶解度与 Cl 的浓度成正比关系,温度下降,压力减

小 pH 值升高, 盐度降低有利于黄铜矿的沉淀。斑岩型铜钼矿床主要硫化物的沉淀温度为: 黄铁矿 450~150 °C, 辉钼矿 420~250 °C, 黄铜矿 350~250 °C; 斑铜矿 350~250 °C^[28]。图 5 显示, 在 457~250 °C 的温度区间内, 成矿流体主要是高盐度岩浆流体, 经历了大幅度的降温降压过程。该温度区间基本与斑岩型铜钼矿床主要硫化物的沉淀温度范围对应, 说明温度和压力的降低是导致普朗斑岩铜矿床网脉状矿化的重要原因。在 250~150 °C 的温度区间内, 成矿流体已演化为以中等盐度流体和低盐度水溶液为主, 流体中 Cl 的浓度已经大为降低, 可能标志着成矿作用已基本结束。前已述及, 含 CO₂ 低盐度流体是高盐度岩浆流体演化至一定阶段的产物。其形成原因可能是由于高盐度岩浆流体处于开放的构造空间, 压力下降导致流体中的 CO₂ 溶解度降低, 从而逐渐形成独立的含 CO₂ 低盐度流体相。需要说明的是, 图 5 中含 CO₂ 中等盐度包裹体 (8.45%~12.94% NaCl), 主要发育于石英-硫化物脉中, 常与含子晶包裹体和含 CO₂ 低盐度包裹体共生, 可能是上述相分离过程的一个派生物。流体包裹体研究证明^[14, 34], 流体相分离作用是引起斑岩型矿床金属硫化物沉淀的重要机制。含 CO₂ 低盐度流体的形成, 必然导致岩浆流体中的酸性组分 (CO₂、H₂S、SO₂ 等) 浓度降低, 使其 pH 值升高, 并进一步促使流体的温度和压力降低, 最终导致流体内金属络合物的分解和硫化物溶解度的降低, 从而沉淀成矿。因此流体相分离作用是普朗斑岩铜矿床主成矿期的网脉状矿化的主要原因。同时, 高盐度岩浆流体对斑岩体的蚀变作用, 亦可以进一步提高流体的 pH 值, 降低流体盐度及络合物的稳定性, 有利于成矿物质的沉淀^[14, 27]。

5 结 论

(1) 普朗斑岩铜矿的含矿石英脉中广泛发育富液相包裹体、含 CO₂ 三相/两相包裹体、含子晶包裹体。子晶种类复杂, 主要有石盐、钾盐、方解石、石膏、黄铜矿和赤铁矿等。

(2) 普朗斑岩铜矿的流体包裹体中存在 4 种流体, 即高盐度岩浆流体、含 CO₂ 低盐度流体、中等盐度流体以及低盐度水溶液 (富 H₂O 流体)。

(3) 原始岩浆流体可能是由中酸性岩浆上升至中间岩浆房时直接出溶而成, 以高盐度 (34%~54% NaCl), 高密度 (1.12~1.07 g/cm³), 富含 Na、K、Ca、Cu、Fe、CO₂、S、Cl 等成分为主要特征。含 CO₂ 低盐度

流体与岩浆流体的相分离作用是导致主成矿期网脉状矿化的主要原因。

野外工作期间得到了云南地勘局第三地质大队杨朝志、王外全、张世权、谭康华、范玉华等同志的指导和帮助; 审稿专家对本文提出了许多中肯而细致的意见, 作者在此表示感谢。

参考文献 (References):

- [1] 芮宗瑶, 黄崇轲, 齐国明, 徐珏, 张洪涛. 中国斑岩铜(钼)矿床[M]. 北京: 地质出版社, 1984: 1-350.
Rui Zong-yao, Huang Chong-ke, Qi Guo-ming, Xu Jue, Zhang Hong-tao. Porphyry Copper (Molybdenum) Deposits of China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1984: 1-350 (in Chinese).
- [2] Candela P A, Holland H D. A mass transfer model for copper and molybdenum in magmatic hydrothermal systems: The origin of porphyry-type ore deposits[J]. *Econ Geol*, 1986, 81(1): 1-19.
- [3] Hemley J J, Cygan G L, Fein J B, Robinson G R, d'Angelo W M. Hydrothermal ore-forming processes in the light of studies in rock-buffered systems: I. Iron-copper-zinc-lead sulfide solubility relations[J]. *Econ Geol*, 1992, 87(1): 1-22.
- [4] Hemley J J, Hunt J P. Hydrothermal ore-forming processes in the light of studies in rock-buffered systems: II. Some general geologic applications[J]. *Econ Geol*, 1992, 87(1): 23-43.
- [5] Ulrich T, Günther D, Heinrich C A. The evolution of a porphyry Cu-Au deposit, based on LA-ICP-MS analysis of fluid inclusions: Bajo de la Alumbrera, Argentina[J]. *Econ Geol*, 2001, 96(8): 1743-1774.
- [6] 范玉华, 李文昌. 云南普朗斑岩铜矿床地质特征[J]. *中国地质*, 2006, 33(2): 352-362.
Fan Yu-hua, Li Wen-chang. Geological characteristics of the Pulang porphyry copper deposit, Yunnan[J]. *Geol China*, 2006, 33(2): 352-362 (in Chinese with English abstract).
- [7] 赵准. 中甸地区与印支期斑岩有关的铜钼矿床成矿模式[J]. *云南地质*, 1995, 14(4): 342-349.
Zhao Zhun. Model of Indosinian porphyry Cu-Mo deposits in Zhongdian[J]. *Yunnan Geol*, 1995, 14(4): 342-349 (in Chinese).
- [8] 杨岳清, 侯增谦, 黄典豪, 曲晓明. 中甸弧碰撞造山作用和岩浆成矿系统[J]. *地球学报*, 2002, 23(1): 17-24.
Yang Yue-qing, Hou Zeng-qian, Huang Dian-hao, Qu Xiao-ming. Collision orogenic process and metallogenic system in Zhongdian arc[J]. *Acta Geosci Sinica*, 2002, 23(1): 17-24 (in Chinese with English abstract).
- [9] 曾普胜, 莫宣学, 喻学惠, 侯增谦, 徐启东, 王海平, 李红, 杨朝志. 滇西北中甸斑岩及斑岩铜矿[J]. *矿床地质*, 2003, 20(4): 393-400.
Zeng Pu-sheng, Mo Xuan-xue, Yu Xue-hui, Hou Zeng-qian, Xu Qi-dong, Wang Hai-ping, Li Hong, Yang Chao-zhi. Porphyries and porphyry copper deposits in Zhongdian area, northwestern Yunnan [J]. *Mineral Deposit*, 2003, 22(4): 393-400 (in Chinese with English abstract).

- [10] 曾普胜, 李文昌, 王海平, 李红. 云南普朗印支期超大型斑岩铜矿床: 岩石学及年代学特征 [J]. 岩石学报, 2006, 22(4): 989 - 1000.
Zeng Pu-sheng, Li Wen-chang, Wang Hai-ping, Li Hong. The Indosinian Pulang superlarge porphyry copper deposit in Yunnan, China: Petrology and chronology [J]. Acta Petrol Sinica, 2006, 22(4): 989 - 1000 (in Chinese with English abstract).
- [11] 张世涛, 冯庆来. 中甸地区三叠系的沉积混杂作用 [J]. 云南地质, 2000, 19(1): 1 - 7.
Zhang Shi-tao, Feng Qing-lai. The Triassic melange sedimentation of Zhongdian area [J]. Yunnan Geol, 2000, 19(1): 1 - 7 (in Chinese with English abstract).
- [12] 黄建国, 张留清. 中甸晚三叠世图姆沟组岩石化学和构造环境 [J]. 云南地质, 2005, 24(2): 186 - 192.
Huang Jian-guo, Zhang Liu-qing. The petrochemistry and tectonics of Late Triassic Tumugou Formation in Zhongdian [J]. Yunnan Geol, 2005, 24(2): 186 - 192 (in Chinese with English abstract).
- [13] 尹光侯, 刘星, 邓志祥, 肖玲. 云南中甸五村 - 移山晚三叠世沉积及盆地特征 [J]. 云南地质, 2005, 24(1): 58 - 66.
Yin Guang-hou, Liu Xing, Deng Zhi-xiang, Xiao Ling. An analysis of Late Triassic sediment and basin of Wucun-Yishan area in Zhongdian, Yunnan [J]. Yunnan Geol, 2005, 24(1): 58 - 66 (in Chinese with English abstract).
- [14] 卢焕章, 范宏瑞, 倪培, 欧光习, 沈昆, 张文淮. 流体包裹体 [M]. 北京: 科学出版社, 2004: 1 - 444.
Lu Huan-zhang, Fan Hong-rui, Ni Pei, Ou Guang-xi, Shen Kun, Zhang Wen-huai. Fluid Inclusions [M]. Beijing: Science Press, 2004: 1 - 444 (in Chinese).
- [15] Hall D L, Sterner S M, Bodnar R J. Freezing point depression of NaCl-KCl-H₂O solutions [J]. Econ Geol, 1988, 83(1): 197 - 202.
- [16] 刘斌, 沈昆. 流体包裹体热力学 [M]. 北京: 地质出版社, 1999: 1 - 290.
Liu Bin, Shen Kun. Fluid Inclusion Thermodynamics [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1999: 1 - 290 (in Chinese).
- [17] Touret J, Bottinga Y. Equation of state for carbon dioxide: Application to carbonic inclusions [J]. Bull Mineral, 1979, 102 (5/6): 577 - 583.
- [18] Bischoff J L. Densities of liquids and vapors in boiling NaCl-H₂O solutions: A PVTx summary from 300 °C to 500 °C [J]. Am J Sci, 1991, 291(4): 309 - 338.
- [19] Haas J L. Physical properties of the coexisting phases and thermodynamic properties of the H₂O component in boiling NaCl solutions [J]. US Geol Surv Bull, 1976, 1421A: 1 - 73.
- [20] 李荫清, 芮宗瑶, 程莱仙. 玉龙斑岩铜(钼)矿床的流体包裹体及成矿作用研究 [J]. 地质学报, 1981, 55(3): 216 - 231.
Li Yin-qing, Rui Zong-yao, Cheng Lai-xian. Fluid inclusions and mineralization of the Yulong porphyry copper (molybdenum) deposit [J]. Acta Geol Sinica, 1981, 55(3): 216 - 231 (in Chinese with English abstract).
- [21] 孟祥金, 侯增谦, 李振清. 西藏冈底斯三处斑岩铜矿床流体包裹体及成矿作用研究 [J]. 矿床地质, 2005, 24(4): 398 - 408.
Meng Xiang-jin, Hou Zeng-qian, Li Zhen-qing. Fluid inclusions and ore-forming processes of three porphyry copper deposits in Gangdese belt, Tibet [J]. Mineral Deposit, 2005, 24(4): 398 - 408 (in Chinese with English abstract).
- [22] 孟祥金, 侯增谦, 李振清. 西藏驱龙斑岩铜矿 S、Pb 同位素组成: 对含矿斑岩与成矿物质来源的指示 [J]. 地质学报, 2006, 80(4): 554 - 560.
Meng Xiang-jin, Hou Zeng-qian, Li Zhen-qing. Sulfur and lead isotope compositions of the Qulong porphyry copper deposit, Tibet: Implications for the sources of plutons and metals in the deposit [J]. Acta Geol Sinica, 2006, 80(4): 554 - 560 (in Chinese with English abstract).
- [23] 张绮玲, 曲晓明, 徐文艺, 侯增谦, 陈伟十. 西藏南木斑岩铜钼矿床的流体包裹体研究 [J]. 岩石学报, 2003, 19(2): 251 - 259.
Zhang Qi-ling, Qu Xiao-ming, Xu Wen-yi, Hou Zeng-qian, Chen Wei-shi. Study of the fluid inclusions from Nanmu porphyry Cu-Mo deposit in Tibet [J]. Acta Petrol Sinica, 2003, 19(2): 251 - 259 (in Chinese with English abstract).
- [24] 陈培荣, 陈小明, 倪培, 王汝成, 沈渭洲, 徐士进. 盐源斑岩铜矿流体包裹体中黄铜矿子矿物的发现 [J]. 科学通报, 1996, 41(7): 633 - 635.
Chen Pei-rong, Chen Xiao-ming, Ni Pei, Wang Ru-cheng, Shen Wei-zhou, Xu Shi-jin. Discovery of chalcopyrite daughter mineral in polyphase fluid inclusions from Yanyuan porphyry copper deposit, Sichuan Province [J]. Chinese Sci Bull, 1996, 41(15): 1281 - 1283.
- [25] 陈培荣, 徐士进, 王汝成, 陈小明, 沈渭洲, 倪培. 四川盐源西范坪斑岩铜矿富铜流体物理-化学特征和成因 [J]. 地球化学, 1997, 26(5): 54 - 61.
Chen Pei-rong, Xu Shi-jin, Wang Ru-cheng, Chen Xiao-ming, Shen Wei-zhou, Ni Pei. Physico-chemical characteristics and genesis of highly copper-rich fluid in the Xifanping porphyry copper deposit, Yanyuan county, Sichuan Province [J]. Geochemica, 1997, 26(5): 54 - 61 (in Chinese with English abstract).
- [26] 徐士进, 沈渭洲, 王汝成, 陆建军, 林雨萍, 倪培, 骆耀南, 李立生. 四川盐源西范坪斑岩铜矿特征和成因 [J]. 矿物学报, 1997, 17(1): 56 - 62.
Xu Shi-jin, Shen Wei-zhou, Wang Ru-cheng, Lu Jian-jun, Lin Yu-ping, Ni Pei, Luo Yao-nan, Li Li-sheng. Characteristics and origin of Xifanping porphyry copper deposit, Yanyuan county, Sichuan Province [J]. Acta Mineral Sinica, 1997, 17(1): 56 - 62 (in Chinese with English abstract).
- [27] 朱训, 黄崇轲, 芮宗瑶, 周耀华, 朱贤甲, 胡淙声, 梅占魁. 德兴斑岩铜矿 [M]. 北京: 地质出版社, 1983: 1 - 336.
Zhu Xun, Huang Chong-ke, Rui Zong-yao, Zhou Yao-hua, Zhu Xian-jia, Hu Cong-sheng, Mei Zhan-kui. The Geology of Dexing Porphyry Copper Ore Field [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1983: 1 - 336 (in Chinese with English abstract).
- [28] 芮宗瑶, 李荫清, 王龙生, 王义天. 从流体包裹体研究探讨金属矿床成矿条件 [J]. 矿床地质, 2003, 22(1): 13 - 23.
Rui Zong-yao, Li Yin-qing, Wang Long-sheng, Wang Yi-tian. Approach to ore-forming conditions in light of ore fluid inclusions [J]. Mineral Deposit, 2003, 22(1): 13 - 23 (in Chinese with English abstract).

- English abstract).
- [29] 余宏全, 李进文, 丰成友, 马东方, 潘桂棠, 李光明. 西藏多不杂斑岩铜矿床高温高盐度流体包裹体及其成因意义[J]. 地质学报, 2006, 80(9): 1434 - 1447.
- She Hong-quan, Li Jin-wen, Feng Cheng-you, Ma Dong-fang, Pan Gui-tang, Li Guang-ming. The high-temperature and hypersaline fluid inclusions and its implications to the metallogenesis in Duobuza porphyry copper deposit, Tibet[J]. Acta Geol Sinica, 2006, 80(9): 1434 - 1447 (in Chinese with English abstract).
- [30] 张德会, 张文淮, 刘伟. 江西银山多金属矿床高盐度包裹体及其成因意义[J]. 岩石学报, 2003, 19(1): 173 - 180.
- Zhang De-hui, Zhang Wen-huai, Liu Wei. The high salinity fluid inclusions and its significance in ore origin in the Yinshan polymetallic deposit[J]. Acta Petrol Sinica, 2003, 19(1): 173 - 180 (in Chinese with English abstract).
- [31] Vanko D A, Bonnin-Mosbah M, Philippot P, Roedder E, Sutton S R. Fluid inclusions in quartz from oceanic hydrothermal specimens and the Bingham, Utah porphyry-Cu deposit: A study with PIXE and SXRF[J]. Chem Geol, 2001, 173(1-3): 227 - 238.
- [32] 张德会, 张文淮, 许国建. 岩浆热液出溶和演化对斑岩成矿系统金属成矿的制约[J]. 地学前缘, 2001, 8(3): 193 - 202.
- Zhang De-hui, Zhang Wen-huai, Xu Guo-jian. Exsolution and evolution of magmatic hydrothermal fluids and their constraints on the porphyry ore-forming system [J]. Earth Sci Front, 2001, 8(3): 193 - 202 (in Chinese with English abstract).
- [33] 杨志明, 谢玉玲, 李光明, 徐九华, 王葆华. 西藏冈底斯斑岩铜矿带厅官铜矿床流体包裹体研究[J]. 矿床地质, 2005, 24(6): 584 - 594.
- Yang Zhi-ming, Xie Yu-ling, Li Guang-ming, Xu Jiu-hua, Wang Bao-hua. Study of fluid inclusions from Tingong porphyry copper deposit in Gangdese belt, Tibet[J]. Mineral Deposit, 2005, 24(6): 584 - 594 (in Chinese with English abstract).
- [34] 徐文艺, 曲晓明, 侯增谦, 陈伟十, 杨竹森, 崔艳合. 西藏冈底斯中段雄村铜金矿床流体包裹体研究 [J]. 岩石矿物学杂志, 2005, 24(4): 301 - 310.
- Xu Wen-yi, Qu Xiao-ming, Hou Zeng-qian, Chen Wei-shi, Yang Zhu-sen, Cui Yan-he. Fluid inclusion studies of the Xiongcu copper-gold deposit in central Gangdese, Tibet [J]. Acta Petrol Mineral, 2005, 24(4): 301 - 310 (in Chinese with English abstract).
- [35] Cline J S, Bodnar R J. Can economic porphyry copper mineralization be generated by a typical calc-alkaline melt? [J]. J Geophys Res, 1991, 96(B5): 8113 - 8126.
- [36] Bodnar R J. Synthetic fluid inclusions: XII. The system H₂O-NaCl. Experimental determination of the halite liquidus and isochores for a 40wt% NaCl solution[J]. Geochim Cosmochim Acta, 1994, 58(3): 1053 - 1063.
- [37] Shinohara H, Hedenquist J W. Constraints on magma degassing beneath the Far Southeast porphyry Cu-Au deposit, Philippines [J]. J Petrol, 1997, 38(12): 1741 - 1752.
- [38] Candela P A, Holland H D. A mass transfer model for copper and molybdenum in magmatic hydrothermal systems: The origin of porphyry-type ore deposits[J]. Econ Geol, 1986, 81(1): 1 - 19.