

滇西北衙金多金属矿床流体包裹体研究

肖晓牛¹, 喻学惠^{1,*}, 莫宣学¹, 杨贵来^{1,2}, 李勇¹, 黄行凯¹

1. 中国地质大学 地质过程与矿产资源国家重点实验室; 岩石圈构造、深部过程及探测技术教育部重点实验室, 北京 100083

2. 云南省地矿资源股份有限公司, 云南 昆明 650215

Xiao Xiaoni¹, Yu Xuehui^{1,*}, Mo Xuanxue¹, Yang Guilai^{1,2}, Li Yong¹, Huang Xingkai¹

1. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources; Key Laboratory of Lithosphere Tectonics and Lithoprobeing Technology of Ministry of Education, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

2. Yunnan Geology & Mineral Resources Co. LTD, Kunming 650215, China

Xiao Xiaoni, Yu Xuehui, Mo Xuanxue, et al. A study of fluid inclusions from Beiya gold-polymetallic deposit in Western Yunnan, *Earth Science Frontiers*, 2009, 16(2): 250-261

Abstract: The Beiya gold-polymetallic deposit is one of the typical deposits related to the alkali-rich intrusion of the Cenozoic period in western Yunnan. This paper studies the fluid inclusions from quartz vein, quartz porphyroblast of alkali-rich porphyry and calcite vein in the mining area. We investigated their types, temperatures, salinities, densities, pressures, the analytical data of liquids and gases, and the results of Laser Raman Microprobe Analysis. Based on above study, we made further discussions on the characteristics and sources of fluids. The research shows that the ore forming fluids are of NaCl-H₂O types; the homogenization temperatures range from 132 °C to 550 °C (individual is more than 550 °C); the salinities are in the range of 1.9%-61.1% (NaCl_{eq}). There exist three types of fluids, namely, the high temperature and high salinity fluids; the medium-high temperature and high salinity fluids; the medium-low temperature and low salinity fluids. The fluid-inclusion observations and microthermometric data suggest that the high salinity fluids were not produced by aqueous fluid immiscibility or boiling; they were directly formed in the magma chamber owing to the evolution of intermediate-acidic magma, or from a shallow crystallized melt at the final stage. The high salinity fluid inclusions containing daughter minerals especially chalcopyrite have been found in the blocks of Hongnitang and Nadaping, indicating that these inclusions were formed from magmatic fluids before the incursion of meteoric water and magmatic water. The evidences from this study imply that the alkali-rich intrusion has the great potential for forming porphyry deposit and the further research should be concentrated on the porphyry type of gold-copper deposit in Beiya.

Key words: fluid inclusion; chalcopyrite; magmatic hydrothermal fluids; alkali-rich porphyry; Beiya in Western Yunnan

摘要: 北衙金多金属矿是与滇西新生代富碱斑岩有关的典型代表之一。通过对矿区石英脉、富碱斑岩中的石英斑晶以及方解石脉中流体包裹体的类型、特征、温度、盐度、成矿压力以及流体包裹体中气液相成分分析和包裹体的激光拉曼探针分析,探讨了流体性质、来源。研究表明,该区存在高温高盐度流体、中高温高盐度

收稿日期: 2008-12-09; 修回日期: 2008-12-19

基金项目: 国家重点基础研究发展计划“973”项目(2004CB412603)

作者简介: 肖晓牛(1980—), 男, 博士研究生, 矿物学、岩石学、矿床学专业, 主要从事矿床学和岩石学方面的研究。E-mail: xiaoni1980@yahoo.com.cn

* 通讯作者简介: 喻学惠(1944—), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事岩石学和矿床学方面的教学和科研。E-mail: xhyu@cugb.edu.cn

流体、中低温低盐度流体 3 种流体。流体总体属于 $\text{NaCl-H}_2\text{O}$ 体系, 均一温度范围在 $132\sim 550\text{ }^\circ\text{C}$ (个别大于 $550\text{ }^\circ\text{C}$), 盐度范围在 $1.9\%\sim 61.1\%$ (NaCl_{eq})。高盐度流体不是由热水溶液的不混溶作用或沸腾作用形成的, 而是由中酸性岩浆在深部岩浆房中通过结晶分异作用形成, 和/或在浅条件下于岩浆结晶的最后阶段从浅部岩浆中直接出溶形成的。红泥塘、南大坪两矿段石英斑晶中金属矿物特别是黄铜矿的发现, 暗示早期来自岩浆的热液流体金属含量较高, 形成于大气降水与岩浆热液混合之前。上述特征表明北衙地区富碱斑岩具有巨大成矿潜力。

关键词: 流体包裹体; 黄铜矿矿物; 岩浆热液; 富碱斑岩; 滇西北衙

中图分类号: P618.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2321(2009)02-0250-12

流体包裹体是保存在矿物中成矿流体的直接样本, 利用流体包裹体的研究不仅可获得有关成矿流体的温度、压力、成分等重要信息, 对研究矿床成因、成矿物质来源及其演化规律也具有重要的意义^[1]。斑岩型矿床因其独特的岩石和矿石结构(发育大量的斑晶石英和密集的石英细脉), 非常适宜运用流体包裹体方法来探讨成矿流体与成矿过程的内在关系^[2]。北衙金多金属矿床作为滇西北地区与新生代富碱斑岩有关的成矿作用的典型代表之一, 一直是学者们研究的热点^[3-16]。但是, 以往有关北衙 Au、Cu 多金属矿区成矿流体的研究工作相对比较薄弱, 尤其缺乏有关富碱斑岩中流体包裹体的研究成果。笔者在前人研究工作的基础上, 重点对与成矿密切相关的富碱斑岩中石英斑晶, 以及矿体中的石英脉和方解石脉中的流体包裹体进行了详细研究, 并对北衙金多金属矿集区成矿物质和成矿流体的来源进行了讨论。

1 区域地质背景

北衙金多金属矿集区位于金沙江—哀牢山—红河富碱斑岩带中段的丽江—大理斑岩型金多金属矿化集中区(图 1)。从全球范围来看, 金沙江—哀牢山富碱斑岩成矿带是西南三江成矿省的重要组成部分, 该成矿省位于滨西太平洋成矿域与特提斯—喜马拉雅成矿域的结合部位, 成矿条件优越, 矿产资源丰富, 是勘查找矿的有利地段。穿越滇西地区金沙江—哀牢山带是滇西三条古特提斯缝合带(甘孜—理塘, 昌宁—孟连, 金沙江—哀牢山)之一, 该带曾经历古特提斯洋的构造演化^[17-25]。金沙江—哀牢山洋在晚泥盆世—早石炭世期间由弧后盆地扩张形成洋盆, 转而进入洋盆扩张阶段, 在早—晚二叠世的过渡期因扬子板块向西挤压, 洋盆停止扩张并开始向西俯冲, 最终于早—中三叠世闭合。到第三纪后,

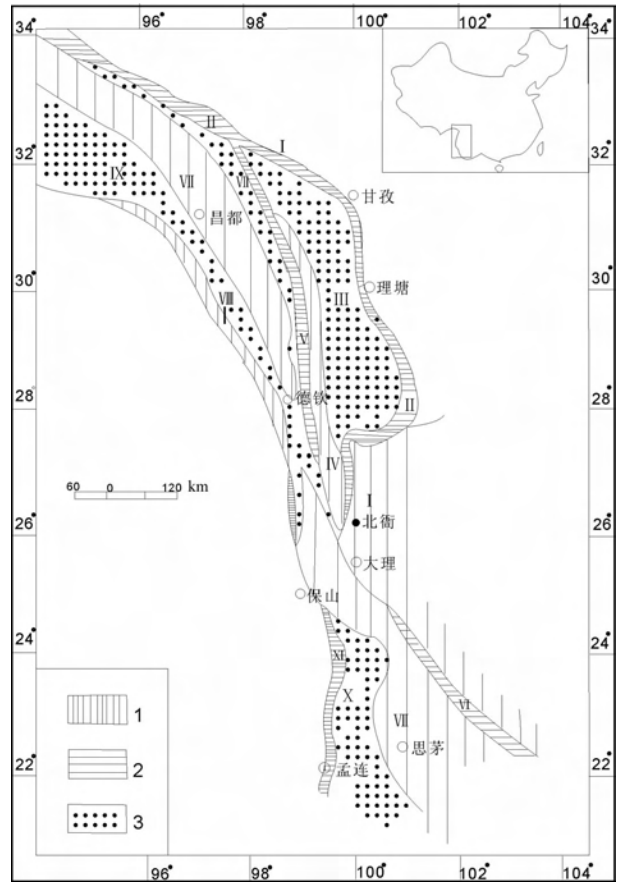


图 1 三江地区火山岩构造分区图
(据莫宣学等, 2001)

Fig. 1 Subdivision of Sanjiang tectono-volcanic belt
1—陆块或微陆块; 2—洋脊准洋脊; 3—火山弧。I—扬子板块; II—甘孜—理塘洋脊/准洋脊型火山岩-蛇绿岩带; III—义敦弧火山岩带; IV—中咱微陆块火山岩区; V—金沙江洋脊/准洋脊火山-蛇绿岩带; VI—哀牢山洋脊/准洋脊火山-蛇绿岩带; VII—江达维西弧火山岩带; VIII—昌都—思茅微陆块火山岩区; IX—丁青—八宿洋脊/准洋脊火山蛇绿岩带; X—波密—腾冲弧火山岩带

由于印度板块向欧亚板块的俯冲碰撞, 印度板块与扬子板块相向俯冲, 沿金沙江—哀牢山缝合带的大规模走滑拉分作用, 形成了滇西新生代富碱斑岩以及与之相伴的斑岩型铜金多金属矿床的形成^[26-28]。

2 矿床地质特征

在大地构造上,北衙金多金属矿集区位于三江褶皱系与扬子准地台的弧形结合部位,扬子陆块西缘丽江—盐源台缘西缘中生代拗陷的南西端西缘的NW向金沙江—红河断裂、SN向宾川—程海断裂和NE向丽江—木里断裂之间。北衙矿集区总体上

受南无山复式背斜东翼的一个NNE向次级向斜构造控制,地形上表现为一个被第四系冲积层所覆盖的小型SN向山间盆地。已知的东矿带(五里盘矿床、桅杆坡矿床、笔架山矿床)和西矿带(金沟坝矿床、红泥塘矿床、万硐山矿床)就分布在该盆地的东西两侧(即向斜两翼,图2)。矿区出露有二叠纪玄武岩、三叠系中统北衙组灰岩、古近系丽江组碎屑角砾岩、第四系全新统冲积层等。其中北衙组灰岩广

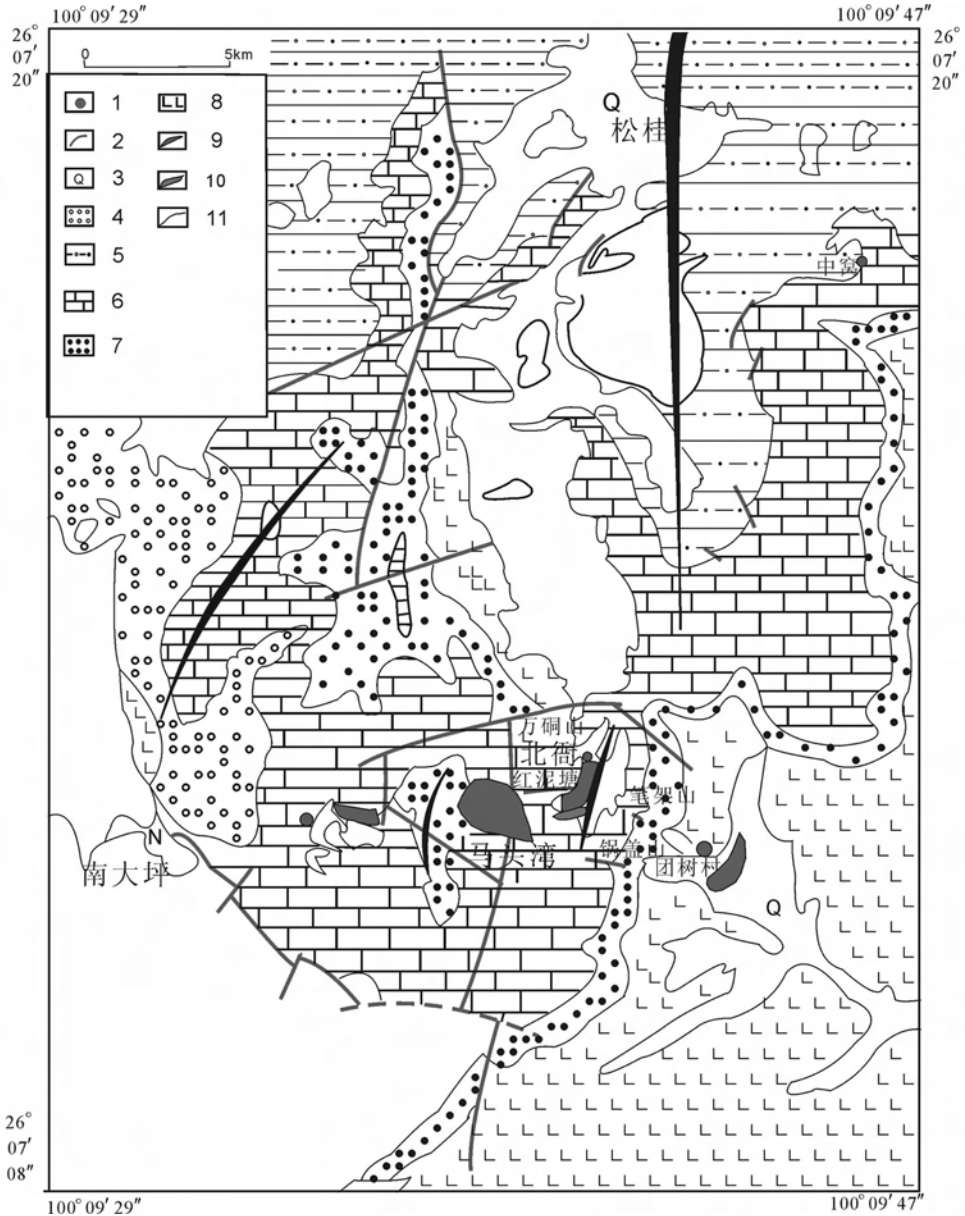


图2 北衙金多金属矿地质简图
(据云南地质三队)

Fig. 2 Simplified geological map of Beiya gold-polymetallic deposit

1—矿点; 2—断层; 3—第四系现代坡积、冲积层; 4—第三系砾岩、砂岩、粘土; 5—三叠系上统长石、石英砂岩; 6—三叠系中统灰岩、白云质灰岩; 7—三叠系下统砂岩夹页岩; 8—二叠纪玄武岩; 9—新生代富碱斑岩; 10—褶皱; 11—地层界线

泛出露于向斜两翼, 是主要的容矿围岩。

区内广泛分布有喜山期富碱斑岩, 这些富碱斑岩主要呈岩脉、岩株成群成带产出, 岩性主要有石英正长斑岩、正长斑岩、黑云正长斑岩、煌斑岩等^[9]。区内还存在 NNE 向和 EW 向两条隐伏断裂构造^[3], 其中 EW 向断裂为洱海—北衙—永仁区域隐伏断裂构造的一部分, 控制着区内富碱斑岩的岩浆活动^[8,11]。矿体主要产于上述两组断裂的次级构造中, 以及北衙向斜两翼或次级短轴背斜和向斜轴部解理裂隙发育的地带与蚀变破碎带的裂隙带中。

据前人^[3-8]的研究表明, 北衙金、铜多金属矿集区是由斑岩型、浅成热液型、隐爆角砾岩型、夕卡岩型等多种矿化类型组成的。其浅部的热液型矿床的矿石类型主要为硫化物型, 硫化物型主要有黄铁矿、方铅矿、闪锌矿、黄铜矿, 脉石矿物主要有长石、石英、方解石、白云石、重晶石等, 矿石结构主要为自形、半自形、填隙和包含结构等, 块状、细脉状、浸染状构造; 氧化物型矿石矿物有磁铁矿、赤铁矿、褐铁矿等, 矿石结构主要为交代、交代残留和假象结构等, 土状、蜂巢状、致密块状、胶状等构造。金主要以自然金的形式分布于褐铁矿、磁铁矿、赤铁矿、黄铁矿(假象)等矿物的颗粒间和裂隙中, 少量以微粒金的形式嵌布或包裹于褐铁矿及磁铁矿集合体中。矿区内广泛发育不同类型的围岩蚀变, 主要有钾化、绢云母化、硅化、夕卡岩化、碳酸盐化、绿泥石化、绿帘石化、黄铁矿化、褐铁矿化、赤铁矿化等。围岩蚀变与 Au 的矿化呈正相关关系, 蚀变越强, Au 含量越高。

3 流体包裹体特征及分类

本研究对采自炭窑、万铜山、红泥塘、马头湾、南大坪等不同矿段的钻孔中获得的含石英脉、方解石脉以及矿区内的富碱斑岩(石英正长斑岩)19 件流体包裹体样品进行了分析测试。

总体来看, 富碱斑岩中的斑晶石英以及矿体中的石英脉和方解石脉中的包裹体均比较发育, 其中以红泥塘、南大坪矿段的富碱斑岩中斑晶石英内的包裹体尤为发育。包裹体不仅数量多, 而且普遍发育含固相子矿物的多相包裹体(占包裹体总量的 50% 以上)。子矿物类型多, 有时一个包裹体中就含有 3~4 个子矿物, 这在我国同类型矿床中是不多见的。在室温和冷冻条件下未见 CO₂ 包裹体。通常

流体包裹体呈面状或线状沿晶体的生长面理方向分布, 主要为原生或假次生包裹体, 极少数为次生包裹体。包裹体大小一般在 4~20 μm 左右, 少数达 30 μm, 形状有椭圆状、负晶形、长条状、不规则状等。根据流体包裹体的充填度、主要相组成、均一方式等, 可以将本区包裹体分为 3 种类型, 不同类型包裹体的显微镜下照片见图 3。

(1) 富液相包裹体(I 型): 该类型包裹体在本区最为发育, 普遍见于不同矿段的石英脉和方解石脉以及富碱斑岩石英斑晶中, 约占包裹体总数的 70% 以上。充填度在 70%~95%, 由气液两相组成, 大小在 2~20 μm, 以 4~10 μm 居多。呈椭圆状、不规则状、负晶形等。该类型包裹体在加热升温的过程中, 首先出现气泡微动并向包裹体的某个角落移动, 当温度继续升高至近均一温度时, 气泡开始剧烈跳动, 并逐渐变为一个小黑点, 最后慢慢消失。

(2) 富气相包裹体(II 型): 该类型包裹体主要见于红泥塘、南大坪矿段富碱斑岩的石英斑晶中, 富气相包裹体多与含子矿物多相包裹体(III 型)共生。充填度多在 30%~50%, 少数为 10%。包裹体多呈椭圆状、负晶形, 大小在 8~20 μm, 在热台上加热时气泡慢慢膨胀, 最后充满整个包裹体而均一至气相。

(3) 含子矿物多相包裹体(III 型): 该类包裹体由气相、液相和固相组成, 往往在一个包裹体中含有 1~2 个子晶, 甚至多达 3~4 个子矿物, 如立方体的石盐以及形态各异的不透明金属子矿物。这种包裹体在红泥塘、南大坪两矿段富碱斑岩的石英斑晶中尤其发育。这种包裹体大小一般为 4~20 μm, 充填度在 50%~80%。其中的石盐子矿物以无色透明, 立方体晶形清晰, 加热时溶解速度相对较慢为特征。此外, 绝大多数 III 型包裹体中石盐的熔化温度高于气液均一温度, 即含石盐的多相包裹体绝大多数是以石盐的熔化消失而达到最终均一, 子矿物的熔化温度都高于 290℃, 排除了子矿物为钾盐的可能^[29]。不透明的金属子矿物在加热的过程中无变化。

4 流体包裹体的显微测温

在流体包裹体岩相学观察的基础上, 选择具有代表性的流体包裹体片在中国地质大学(北京)地球化学实验室的 Linkam-THMSG600 型冷-热台上进行测试。仪器测定的温度范围为 -196~+600℃, 均一法测温精度在 ±1℃, 冷冻法的精度在 ±0.1

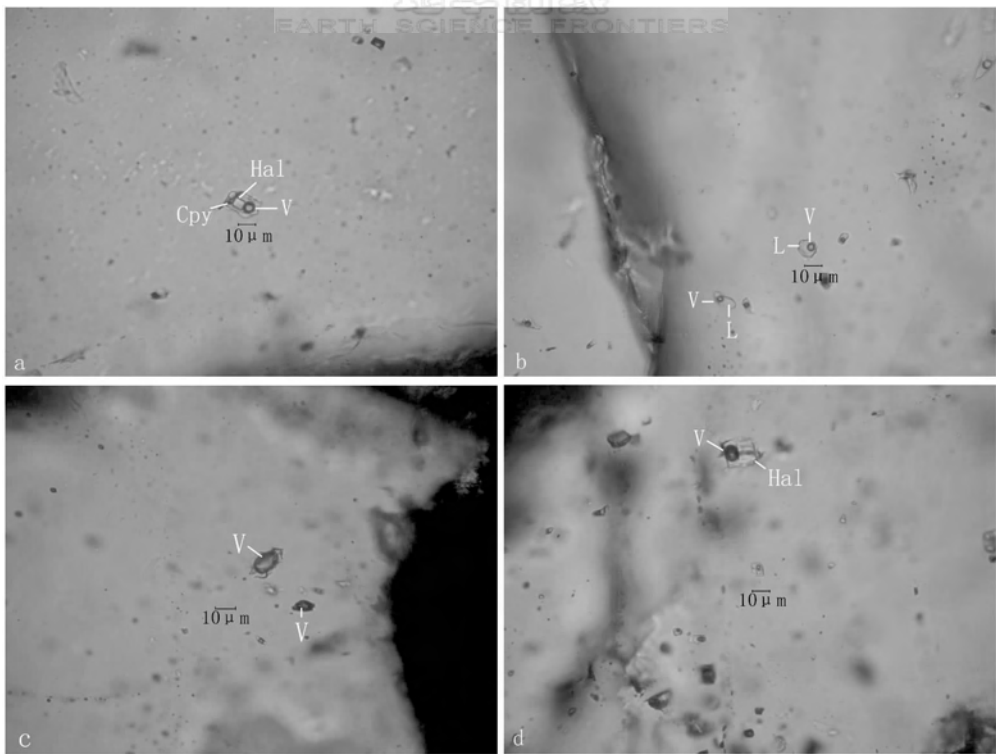


图3 不同类型包裹体的显微镜下照片

Fig. 3 Photos of fluid inclusions under microscope
Hal—石盐; Cpy—黄铜矿; V—气相; L—液相

℃。笔者根据卢焕章等^[30]的方法,采用冰点和测子矿物溶化温度查表获得盐度数据(表1)。由表1可以清晰地看出,矿区内流体包裹体均一温度变化范围较宽,从132~550℃(个别大于550℃),主要集中在250~400℃范围内(图4),盐度变化范围也较大, $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 变化在1.9%~61.1%。I类和II类气液两相包裹体的密度根据Bodnar^[31-32]相关图解求得。含子矿物的III型多相包裹体的密度在0.62~1.16 g/cm³(据刘斌等^[33]查表求得),变化范围也比较大。

显微测温结果表明,矿区不同类型包裹体的温度范围和峰值温度差异很大(图4)。各类包裹体显微测温结果如下:

I型富液包裹体均一温度范围在150~550℃(个别大于550℃),但主要集中在200~400℃。盐度为2.2%~21.4%(NaCl_{eq}),以4.5%~10%(NaCl_{eq})居多,流体密度范围在0.62~1.01 g·cm⁻³。II型富气包裹体均一温度为274~550℃(个别大于550℃),主要集中在350~550℃,盐度范围为9.7%~19.8%(NaCl_{eq}),流体密度在0.68~0.88 g·cm⁻³。III型含子矿物多相包裹体均一温度范围

为298~550℃(个别大于550℃),盐度范围为38.2%~61.1%(NaCl_{eq}),流体密度在1.05~1.16 g·cm⁻³。值得指出的是,少数包裹体中子晶个数可达3~4个,且出现个别包裹体中的石盐子晶在550℃以上仍未均一的情况,推测部分包裹体盐度可达70%以上。

为此,我们根据均一温度和盐度的变化范围以及两者之间的关系(图5),进一步将本区流体包裹体分为3组:①高温高盐度流体包裹体,盐度>38%(NaCl_{eq}),均一温度500~550℃(个别大于550℃);②中高温高盐度流体包裹体,盐度>38%(NaCl_{eq}),均一温度在300~450℃;③中低温低盐度流体包裹体,盐度在2.2%~21.4%(NaCl_{eq}),均一温度在150~450℃。值得一提的是,矿体中的方解石脉,均一温度150~324℃,盐度范围为4.65%~11.81%(NaCl_{eq}),流体密度在0.75~1.00 g·cm⁻³。可能代表成矿后期的热液。

在红泥塘和南大坪两个矿段富碱斑岩的石英斑晶中发现富气相包裹体和含子矿物的包裹体共存的现象。流体包裹体测温结果表明,富气相包裹体的均一温度多在350℃以上,且有相当一部分包裹体

表1 流体包裹体具代表性的显微测温结果及盐度和密度

Table 1 Representative microthermometric determination of fluid inclusions

样号	矿物	测定个数	包裹体类型	$t_m/^\circ\text{C}$	$t_h/^\circ\text{C}$	子矿物溶化温度/ $^\circ\text{C}$	$w(\text{NaCl}_{\text{eq}})/\%$	$\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$
WDS-2	方解石	14	I	-2.8~-8.1	150~324		4.65~11.81	0.75~0.95
WDS-2b	方解石	11	I	-2.7~-6.8	154~279		4.49~10.24	0.75~1.00
TY-1b	石英	13	I	-2.2~-5.7	211~550(个别大于550)		3.71~8.81	
		19	I	-3.0~-13.2	232~428		5.0~17.1	0.62~0.90
HNT-3	石英	6	II	-6.9~-7.8	369~550(个别大于550)		10.4~11.5	0.68~0.74
		12	III		305~460	298~514(个别大于514)	38.2~61.1	1.05~1.16
		30	I	-3.0~-12.9	216~388		5.0~16.9	0.62~0.92
HNT-3b	石英	2	II	-6.4~-6.8	347~393		9.7~10.2	0.73~0.75
		6	III		197~333	307~449	38.6~53.3	1.06~1.10
HNT-4b	石英	16	I	-5.1~-13.2	132~464		8.0~17.1	0.75~1.01
WDS-1	石英	30	I	-3.0~-16.8	220~451		5.0~20.1	0.68~0.84
WDS-1b	石英	7	I	-9.3~-11.2	228~371		13.2~15.2	0.84~0.90
ZK3-1	石英	16	I	-1.3~-6.1	179~500		2.2~9.3	0.79~0.89
ZK3-248	石英	6	I	-4.7~-6.2	252~370		7.5~9.5	0.66~0.85
MTW-6	石英	3	I	-1.1~-4.6	433~522		1.9~7.3	
MTW-7	石英	26	I	-1.2~-7.9	237~550(个别大于550)		2.1~11.6	0.65~0.73
		7	I	-6.2~-18.6	287~350		9.5~21.4	0.73~0.86
NDP-2b	石英	5	II	-9.8~-16.5	274~352		13.7~19.8	0.79~0.88
		11	III		281~459	297~550(个别大于550)	38.2~48.6	1.05~1.08

注:上述样品由第一作者在中国地质大学(北京)地球化学实验室完成。 t_h —完全均一温度; t_m —冰点温度; $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ —盐度; ρ —密度。

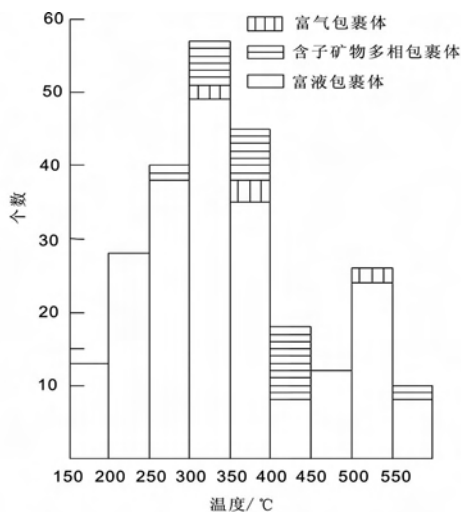


图4 流体包裹体均一温度直方图

Fig. 4 Histogram showing homogenization temperature of fluid inclusions

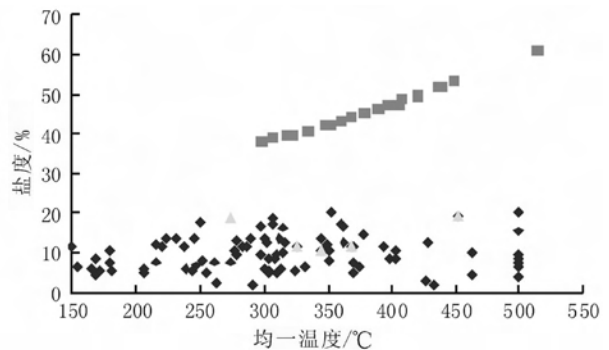


图5 流体包裹体的均一温度-盐度关系图
Fig. 5 Diagram showing the relationship between homogenization temperature and salinity

的均一温度达到550 $^\circ\text{C}$ 。含子矿物的多相包裹体均一温度多集中在300 $^\circ\text{C}$ 以上,也有部分均一温度高达550 $^\circ\text{C}$ 。两类包裹体均一温度相似而盐度范围差异很大,可能与成矿流体的演化过程中有强烈的流体沸腾作用或不混溶作用发生有关^[34]。为了进一步了解这两个矿段的成矿条件,笔者采用刘斌等^[33]

估算包裹体形成压力的公式,获得成矿压力平均在 141×10^5 Pa左右。因为红泥塘矿段发育了隐爆角砾岩,它标志着该矿段可能发生过流体的沸腾作用^[8,13-14]。而流体的沸腾作用最易发生在从封闭系统(静岩压力)向开放系统(静水压力)转化时的压力突降阶段^[29],因此推测红泥塘和南大坪两个矿段的成矿作用是在开放的环境下发生的,成矿压力应为静水压力。为此我们进一步利用张文淮等^[34]提供的相关公式,将成矿压力平均值(141×10^5 Pa左右)换算成矿深度,大约在1.4 km。

5 流体包裹体的气液相成分分析

流体包裹体气、液相成分分析工作在中国科学院地质与地球物理研究所完成。气体成分分析采用日本真空技术株式会社生产的 RG202 四极质谱仪 SME, 液相成分分析采用日本岛津公司 (SHIMADZU) 生产的 HIC-6A 型离子色谱仪。工作电压为 -1.22 kV。用于进行气液相成分分析的样品是方解石, 选自万铜山接触带灰岩中的脉状方解石。工作流程参见朱和平等^[35]。包裹体中气相成分和液相成分的分析测试结果列于表 2。

分析结果表明, 本区流体包裹体的气相成分主要是 H₂O, 其次为 CO₂、N₂、CH₄ (图 6), 液相成分中主要富含 Na⁺、K⁺、Cl⁻ 等阴、阳离子。流体包裹体主要属于 NaCl-H₂O 体系。因为 CO₂ 可以调节流体的 pH 值, 使含 Au 流体得以稳定迁移, 当温度降低时, Au 可以在较小的温度范围内和较小的迁移距离内得到彻底释放, 有利于形成有经济价值的 Au 矿床。世界上大多数金矿床的成矿流体均富含 CO₂, 本区流体包裹体中均含有一定数量的 CO₂, 与

国外很多金矿成矿流体的特征一致^[38]。此外, 红泥塘富碱斑岩中石英斑晶的流体包裹体中还含有 H₂S、SO₄²⁻。综合考虑北衙金多金属矿金矿化与黄铁矿的密切关系, 推测 Au 可能主要呈 Au(HS)₂⁻ 络合物形式迁移。

6 流体包裹体的激光拉曼探针分析

为了更深入的了解成矿流体的成分, 我们进一步开展了单个包裹体的激光拉曼探针成分分析。分析工作是在中国科学院矿床地球化学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 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, 100~4 000 cm⁻¹ 全波段一次取谱。

分析结果表明 (图 7), I 型富液相包裹体和 II 型富气相包裹体的气相成分主要是水蒸气, 部分含有少量的 CO₂, 个别包裹体的气相中发现少量 SO₂ 的存在。III 型含子矿物多相包裹体的气相成分主要是 H₂O, 极少数包裹体中的气相含有 CO₂。子矿物

表 2 流体包裹体气液相成分分析结果

Table 2 Gas and liquid composition of fluid inclusions

样号	矿段	测试矿物	气相摩尔分数/%							液相成分含量/(μg·g ⁻¹)					
			H ₂ O	N ₂	CO ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	H ₂ S	F ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺
WD567-8	万铜山	白云石	93.56	1.175	4.082	0.582	0.101	0.145	0.105	1.31	2.88	0.4	0.11	0.019	0.255
WD687-7	万铜山	脉石英	67.67	0.059	31.04	0.595	0.143	0.049	2.32	5.76	12.1	5.61	1.8	0.06	0.456
HNT-4	红泥塘	热液石英	80.97	1.24	10.95	0.04	0.02	6.78	7.10	2.47	102.5	8.3	15.1	2.11	3.65
HNT-6	红泥塘	石英斑晶	91.26	0.91	3.74	0.05	0.01	4.03	5.25	5.05	17.8	10.3	10.5	0.26	1.62
HNT-8	红泥塘	石英斑晶	86.54	1.22	6.63	0.13	0.03	5.43	5.74	5.79	20.79	11.99	11.29	1.02	2.64
WDS1-1	万铜山	方解石	88.00	0.495	11.03	0.361	0.054	2E-04	<	1.047	<	0.798	0.072	2.08	>
WDS1-2	万铜山	方解石	85.71	0.858	12.66	0.65	0.084	3E-04	<	2.70	<	0.702	0.144	0.807	>

注: 由中国地质科学院地质与地球物理研究所朱和平测试。“<”表示低于检出限, “>”表示高于检出限。HNT 引自吴开兴^[36]; WDS567-8、WDS687-7 引自徐爱民^[37]。

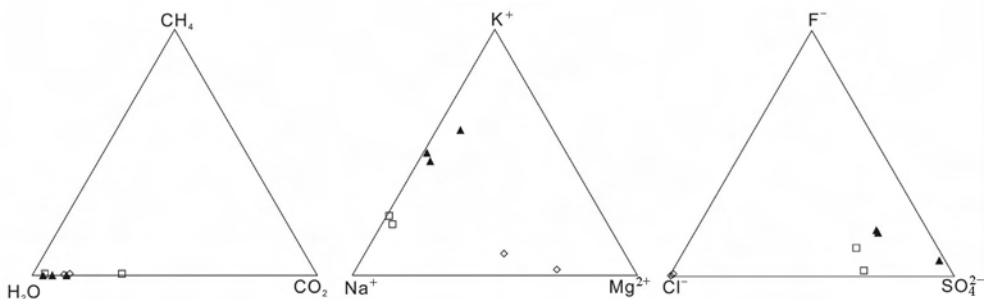


图 6 流体包裹体气液相成分三角图

Fig. 6 Ternary diagram of liquid and gas composition of fluid inclusions

▲红泥塘石英; □万铜山石英; ◇万铜山方解石

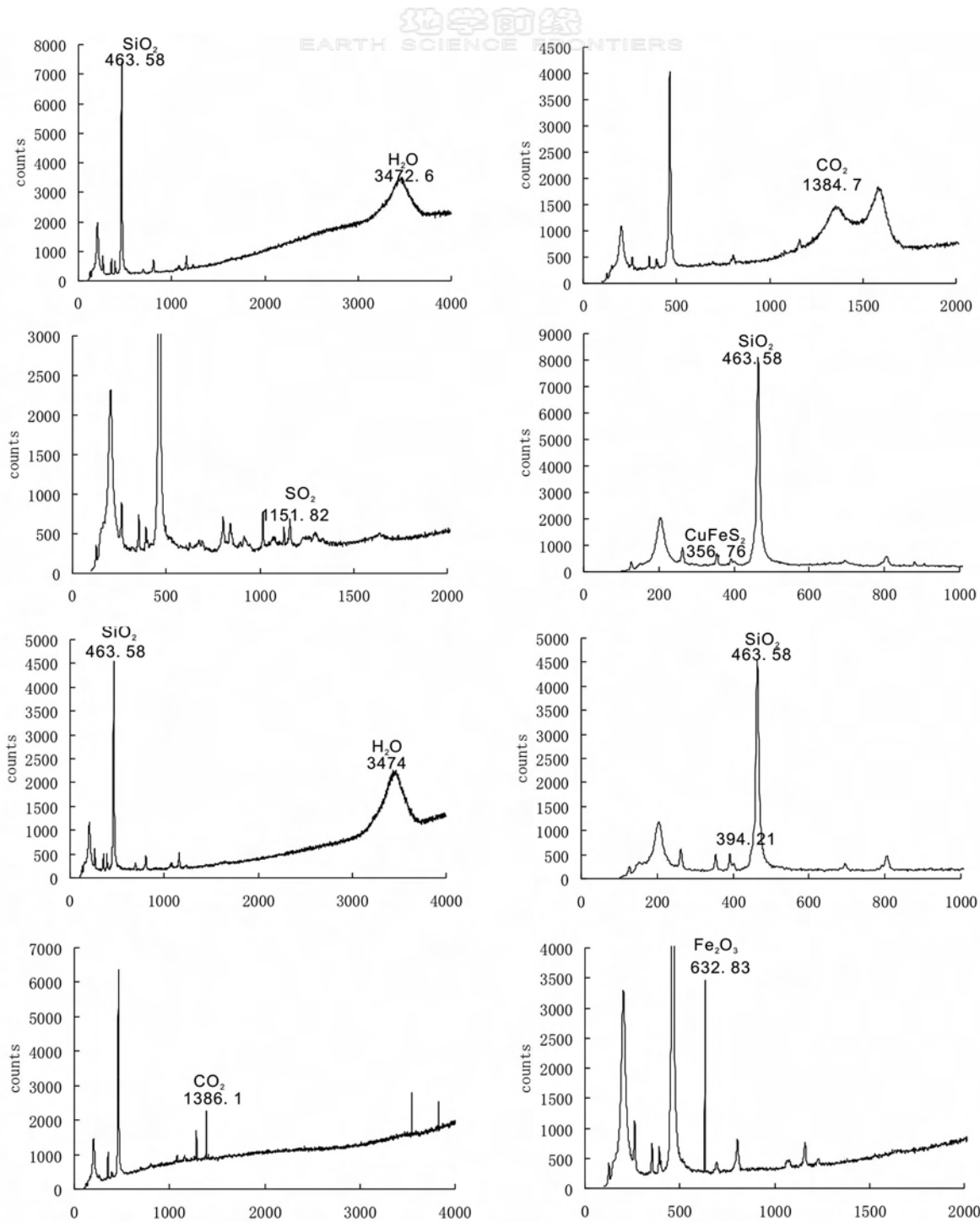


图7 激光拉曼光谱分析
Fig. 7 Laser Raman spectroscopic analyses

主要是石盐子晶(图7)。此外,包裹体中普遍出现不透明金属子矿物,其子晶多呈浑圆状和三角形状,个别子晶因颗粒很小而呈黑点,且在升温的过程中,这些金属子晶极容易发生迁移。经激光拉曼探针鉴定,这些金属子矿物均具有黄铜矿特征的 356 cm^{-1}

拉曼谱峰(图7)。因此,这些金属子矿物均为黄铜矿。单个包裹体激光拉曼光谱分析结果,不仅有力地支持了北衙金多金属矿集区的成矿流体富含 Cu、Fe 等成矿元素的认识,而且也证明成矿流体主要与富碱斑岩的分异作用有关。

7 讨论

上述有关北衙金矿流体包裹体的研究资料表明, 本区存在高温高盐度流体、中高温高盐度流体、中低温低盐度流体 3 种流体。有关研究指出, 高盐度流体的成因可能有 3 种: (1) 通过中酸性岩浆在岩浆房中的结晶分离作用, 使岩浆中的挥发份到达饱和或过饱和状态, 进而分异出独立的高盐度流体; (2) 由中低盐度的热液通过液相不混溶作用或减压沸腾作用形成; (3) 在岩浆结晶分异作用的晚期, 从残余岩浆中直接出溶形成^[2, 39-40]。从本区高盐度流体包裹体的特征来看, 尽管富气相包裹体与含石盐的高盐度包裹体共生, 但是绝大多数含石盐的包裹体都是通过石盐溶解而均一的, 这表明流体包裹体是在液相状态中被圈闭的, 因此不可能由岩浆出溶的低盐度流体演化(不混溶或沸腾作用)而形成^[41]。Cline 等^[39]的研究认为, 从岩浆中出溶的流体的盐度随压力和岩浆结晶程度的不同而改变。当岩浆结晶时的压力为 2×10^8 Pa, 结晶程度为 59% 时, 最初出溶的流体盐度 $\omega(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 最高可达 53.4%。随着结晶程度的增加, 出溶流体的盐度逐渐降低。当岩浆结晶时的压力为 0.5×10^8 Pa, 结晶程度为 8% 时, 最初出溶的流体的盐度最低 ($\omega(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 仅为 1.1%)。随着结晶程度的增大, 出溶流体的盐度急剧加大, $\omega(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 可达 80% 以上。采用包裹体测温结果估算的北衙金矿高盐度流体的盐度 $\omega(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 38.2%~61.1%, 尽管北衙金矿的成矿压力平均在 141×10^5 Pa 左右, 远小于岩浆结晶压力 0.5×10^8 Pa, 但是富碱斑岩的结晶程度很高(全晶质似斑状—斑状结构), 这意味着本区高盐度流体可能存在两种成因, 即由中酸性岩浆在深部岩浆房中通过结晶分异作用形成; 和/或在岩浆结晶分异作用的晚期, 从残余岩浆中出溶形成。而且前一种成因与地幔派生的深部流体从本质上看是相同的。因此, 流体包裹体的研究进一步证明, 地幔流体作用贯穿于富碱岩浆成岩成矿的全过程, 成矿流体作用实质上是地幔流体作用在地壳中的延续^[42]。

从北衙金矿高盐度流体包裹体具有富含石盐子矿物, 富气包裹体与黄铜矿子矿物包裹体共存的特征, 以及盐度范围 ($\omega(\text{NaCl}_{\text{eq}}) > 38\%$) 等特征, 与 Hedenquist 等^[43]确定的斑岩铜矿中的成矿流体特征完全一致。值得注意的是, 北衙金铜多金属矿集

区的浅部还存在着高硫化作用(HS)的浅成热液矿床, 它与其他类型的矿床一起构成了本区一个完整的内生矿床系列。本区中温中等盐度和低温低盐度的流体, 具有早期岩浆出溶流体与晚期大气降水混合的特征, 正好与 HS 型矿床的成矿流体相对应^[44]。因此, 3 类流体包裹体的确定进一步印证了本区存在多种矿床成因类型和具有一个完整成矿系列的认识^[45]。而且, 流体包裹体激光拉曼探针分析, 显示成矿流体富含 Cu、Fe 等成矿元素, 与 Vanko 等^[46]提出的斑岩型矿床中高盐度成矿流体具有很强的携带成矿元素能力的情况一致。

大量研究表明, 北衙金铜多金属矿集区是一个与富碱斑岩有着密切关系的成矿系列, 具有广阔的找矿前景。目前, 该区浅部的夕卡岩型矿床和浅成热液型矿床的研究和找矿勘探工作已经完成, 下一步的勘探和研究工作主要应集中在深部最具有潜力的斑岩型矿床方面^[4, 13]。因为在红泥塘、南大坪两地富碱斑岩的石英斑晶中普遍发育多相包裹体, 其中的金属子矿物经激光拉曼光谱分析定为黄铜矿, 与 Bodnar^[47]所展示的斑岩铜矿流体包裹体中黄铜矿子晶的形态相似。因此, 我们认为北衙矿区本部外围的炭窑—羊俊—南大坪等地, 可能是寻找斑岩型金矿的最有利地段。

8 结论

(1) 北衙金多金属矿集区存在着 3 种成矿流体: ①高温高盐度流体包裹体, 盐度 $> 38\%$ (NaCl_{eq}), 均一温度 $500 \sim 550$ °C (个别大于 550 °C); ②中高温高盐度流体包裹体, 盐度 $> 38\%$ (NaCl_{eq}), 均一温度为 $300 \sim 450$ °C; ③中低温低盐度流体包裹体, 盐度为 $2.2\% \sim 21.4\%$ (NaCl_{eq}), 均一温度为 $150 \sim 450$ °C。

(2) 本区流体包裹体的气相成分主要是 H_2O , 其次为 CO_2 、 N_2 、 CH_4 , 液相成分中主要富含 Na^+ 、 K^+ 、 Cl^- 等阴阳离子。成矿流体总体上主要属于 $\text{NaCl}-\text{H}_2\text{O}$ 体系。流体包裹体的激光拉曼探针分析表明, 成矿流体中富含 Cu、Fe 等成矿元素。

(3) 根据对本区流体包裹体均一温度、盐度和流体成分的测试数据, 参照和对比前人的研究成果, 初步确定本区成矿流体的成因主要与富碱斑岩岩浆作用有关, 总体属于岩浆流体。成矿流体的来源可能与富碱斑岩岩浆深部的分异作用有关, 也与富碱斑岩浅部分异和流体出溶作用有关。

(4) 流体包裹体的研究进一步证明, 北衙地区是一个以斑岩型矿床为主, 兼有多种类型矿床的成矿系列。成矿流体中富含 Cu、Fe 等成矿元素的事实证明, 本区具有寻找斑岩型矿床的巨大潜力。特别是北衙外围的炭窑—羊倭—南大坪等地, 可能是寻找斑岩型金矿的最有利地段。

References:

- [1] Xie Y L, Hou Z Q, Xu J H, et al. Evolution of multi-stage ore-forming fluid and mineralization: Evidence from fluid inclusions in Yulong porphyry copper deposit, East Tibet[J]. Acta Petrologica Sinica, 2005, 21(5): 1409-1415 (in Chinese).
- [2] Wang S X, Zhang X C, Qin C J, et al. Fluid inclusions in quartz veins of Pulang porphyry copper deposit, Zhongdian, Northwestern Yunnan, China[J]. Geochimica, 2007, 36(5): 467-478(in Chinese).
- [3] Cai X P, Liu B G, Ji C Y. Preliminary study on characteristics and genesis of Au deposit in Beiya Area, Western Yunnan Province[J]. Au Science and Technology, 1991, 7: 7-19(in Chinese).
- [4] Cai X P. Characteristics, genesis and prospecting of Beiya gold deposit, Western Yunnan[M]//Geology and Geochemistry of Gold Deposits in China. Beijing: Science Press, 1993: 134-151(in Chinese).
- [5] Li Y, Qin D X, Li C. The characteristics of oxidation and prospecting significance of Beiya gold deposit[J]. Journal of Kunming University of Sciences and Technology, 1999, 24(1): 120-124(in Chinese).
- [6] Ren Z J, Luo R S, Li L J, et al. Geology and ore control of the Beiya lateritic gold in Yunnan[J]. Geology in China, 2001, 28(8): 17-22(in Chinese).
- [7] Cui Y L, Chen X S, Yan J G. Geological characteristics and metallogenic condition of lateritic clay type gold deposits in Beiya[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2001, 21(4): 654-658 (in Chinese).
- [8] Ge L S, Guo X D, Zou Y L, et al. Geological characteristics and genesis of Beiya gold deposit, Yunnan Province[J]. Contributions to Geology and Mineral Research, 2002, 17(1): 32-46(in Chinese).
- [9] Zeng P S, Mo X X, Yu X H. Nd, Sr and Pb isotopic characteristics of the alkali-rich porphyries in Western Yunnan and its compression strike-slip setting[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2002, 21(3): 231-241(in Chinese).
- [10] Xiao Q B, Cai X P, Xu X W. Formation and conservation of Beiya epigenetic deposit, Yunnan Province[J]. Mineral Deposits, 2003, 22(4): 401-407(in Chinese).
- [11] Liu J Y. Geological characteristics of lamprophyre and its prospecting significance of the Beiya gold deposit, Yunnan[J]. Gold Geology, 2004, 10(1): 20-23(in Chinese).
- [12] Ying H L, Cai X P. ^{40}Ar - ^{39}Ar dating of orthoclase and muscovite from alkali-rich porphyries in the Beiya mine, Yunnan[J]. Chinese Journal of Geology, 2004, 39(1): 107-110(in Chinese).
- [13] Guo Y S, Zeng P S, Yang W G, et al. Geological characteristics and metallogenic types of Beiya gold-polymetallic deposit, in Yunnan[J]. Engineering Science, 2005, 7: 218-223(in Chinese).
- [14] Wu K X, Hu R Z, Bi X W, et al. Study of the fluid inclusions in altered porphyries in the Beiya gold deposit, Western Yunnan[J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 2005, 25(2): 20-26(in Chinese).
- [15] Xu S M, Mo X X, Zeng P S, et al. Characteristics and origin of alkali-rich porphyries from Beiya in Western Yunnan[J]. Geoscience, 2006, 20(4): 527-535(in Chinese).
- [16] Xu X W, Cai X P, Song B C, et al. Petrologic, chronological and geochemistry characteristics and formation mechanism of alkaline porphyries in the Beiya gold district, Western Yunnan[J]. Acta Petrologica Sinica, 2006, 22(3): 631-642 (in Chinese).
- [17] Mo X X, Lu F X, Shen S Y, et al. Sanjiang Tethyan Volcanism and Related Mineralization[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1993: 1-267(in Chinese).
- [18] Mo X X, Shen S Y, Zhu Q W, et al. Volcanics-ophiolites and Related Mineralization in the Middle Southern Segment of Sanjiang Region[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1998: 1-128(in Chinese).
- [19] Mo X X, Deng J F, Dong F L, et al. Volcanic petrotectonic assemblages in Sanjiang orogenic belt, SW China and implication for tectonic[J]. Geological Journal of China Universities, 2001, 7(2): 121-138(in Chinese).
- [20] Mo X X, Pan G T. From the Tethys to the formation of Qinghai-Tibet plateau: Constrained by tectono-magmatic events[J]. Earth Science Frontiers, 2006, 13(6): 43-51 (in Chinese).
- [21] Liu Z Q, Li X Z, Ye Q T, et al. The Division of the Tectono-magmatic Belts and the Distribution of Mineral Resources in the Sanjiang[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1993: 1-89(in Chinese).
- [22] Zhang Q, Zhou D J, Zhao D S, et al. Wilson cycle of the Paleo-Tethyan orogenic belt in Western Yunnan: Record of magmatism and discussion on mantle processes[J]. Acta Petrologica Sinica, 1996, 12(1): 17-28(in Chinese).
- [23] Wang L Q, Pan G T, Li D M, et al. The spatio-temporal framework and geological evolution of the Jinshajiang arc-ba-

- sin systems[J]. *Acta Geologica Sinica*, 1999, 73(3): 206-218(in Chinese).
- [24] Zhong D L. Paleo-Tethys Tectonic Belt of the Northwest of Yunnan and Sichuan Province[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1998: 1-69(in Chinese).
- [25] Wang X F, Metcalfe I, Jian P, et al. The Jinshajiang-Ailaoshan suture zone, China: Tectono-stratigraphy, age and evolution[J]. *Asian Earth Sci*, 2000, 18: 675-690.
- [26] Zhang L S, Zhong D L. The red river strike-slip shear zone and Cenozoic tectonics of East Asia continent[J]. *Chinese Journal of Geology*, 1996, 31(4): 327-341(in Chinese).
- [27] Hou Z Q, Ma H W, Zaw K, et al. The Himalayan Yulong porphyry copper belt: Product of large-scale strike-slip faulting in Eastern Tibet[J]. *Economic Geology*, 2003, 98: 125-145.
- [28] Wang D H, Ying H L, Liang H Y, et al. Cenozoic Continental Geodynamics and Large-scale Mineralization in the Sanjiang Region, China [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2006: 1-39(in Chinese).
- [29] She H Q, Li J W, Feng C Y, et al. The high-temperature and hypersaline fluid inclusions and its implications to the metallogenesis in Duobuza porphyry copper deposit, Tibet [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2006, 80(9): 1434-1447(in Chinese).
- [30] Lu H Z, Fan H R, Ni P, et al. Fluid Inclusions[M]. Beijing: Science Press, 2004: 132-208(in Chinese).
- [31] Bodnar R J. Revised equation and table for determining the freezing point depression of H₂O-NaCl solutions[J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 1989, 57: 683-684.
- [32] Bodnar R J, Vityk M O. Interpretation of microthermometric data for H₂O-NaCl fluid inclusions[M]//Fluid Inclusions in Minerals; Methods and Applications[M]. Blacksburg: Virginia Polytechnic Institute, 1994: 117-130.
- [33] Liu B, Shen K. Fluid Inclusion Thermodynamics[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1999: 1-290(in Chinese).
- [34] Zhang W H, Chen Z Y. The Geology of Fluid Inclusion[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1993: 1-87(in Chinese).
- [35] Zhu H P, Wang L J, Liu J M. Determination of quadrupole mass spectrometer for gaseous composition of fluid inclusion from different mineralization stages[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2003, 19(2): 314-318(in Chinese).
- [36] Wu K X. The Cenozoic Alkali-rich Igneous Rocks, Western Yunnan and their Relation with Metallogenesis of Gold[D]. Guiyang: Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Science, 2005: 1-99(in Chinese).
- [37] Xu S M. Metallogenic Modeling of the Beiya Gold Deposit in Western Yunnan and Its Relation to the Cenozoic Alkali-rich Porphyries [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2007: 1-96(in Chinese).
- [38] Phillips G N, Evans K A. Role of CO₂ in the formation of gold deposits[J]. *Nature*, 2004, 429: 860-863.
- [39] Cline J S, Bodnar R J. Can economic porphyry copper mineralization be generated by a typical cal-alkaline melt[J]? *Journal of Geophysical Research*, 1991, 96, B5: 8113-8126.
- [40] Bodnar R J. Synthetic fluid in nature quartz Ⅲ. The system H₂O-NaCl. Experimental determination of the halite liquidus and isochores for a 40wt% NaCl solution [J]. *Geochemica Cosmochimica Acta*, 1994, 58: 1053-1063.
- [41] Zhang D H, Zhang W H, Liu W. The high salinity fluid inclusions and its significance in ore origin in the Yinshan polymetallic deposit[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2003, 19(1): 173-180(in Chinese).
- [42] Liu X F, Song X F, Lu Q X, et al. Mantle fluid's action in the process of petrogenesis of alkalic porphyry and associated mineralizations, Western Yunnan, China[J]. *Journal of Jilin University: Earth Science Edition*, 2006, 36(4): 503-510(in Chinese).
- [43] Hedenquist J W, Lowenstern J B. The role of magma in the formation of hydrothermal ore deposits[J]. *Nature*, 1994, 370: 519-527.
- [44] Sillitoe R H. The tops and bottoms of porphyry copper deposits[J]. *Econ Geol*, 1973, 68: 799-815.
- [45] Xue C D, Hou Z Q, Liu X, et al. Petrogenesis and metallogenesis of the Beiya gold-polymetallic ore district, Northwestern Yunnan Province, China: Responses to the Indo-Asian collisional processes[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2008, 24(3): 457-472(in Chinese).
- [46] Vanko D A, Bonnin-Mosbah M, Philippot P, et al. 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.
- [47] Bodnar R J. Fluid-inclusion evidence for a magmatic source for metals in porphyry copper deposits[M]//Thompson J F H. Magma, Fluid, and Ore Deposits. Mineralogical Association of Canada Short Course Series, British Columbia; Mineralogical Association of Canada, 1995, 23: 139-152.

参考文献:

- [1] 谢玉玲, 侯增谦, 徐九华, 等. 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[J]. *岩石学报*, 2005, 21(5): 1409-1415.
- [2] 王守旭, 张兴春, 秦朝建, 等. 滇西北中甸普朗斑岩铜矿流体包裹体初步研究[J]. *地球化学*, 2007, 36(5): 467-478.
- [3] 蔡新平, 刘秉光, 季成云. 滇西北衙金矿矿床特征及成因初探[J]. *黄金科技动态*, 1991, 7: 7-19.
- [4] 蔡新平. 滇西北衙金矿矿床特征、成因及找矿远景预测[M]

- //中国金矿地质地球化学研究. 北京: 科学出版社, 1993: 134-151.
- [5] 李元, 秦德先, 黎诚. 云南金矿的氧化特征及找矿意义[J]. 昆明理工大学学报, 1999, 24(1): 120-124.
- [6] 任治矾, 罗荣生, 李连举, 等. 云南北衙红土型金矿地质特征及成矿规律[J]. 中国地质, 2001, 28(8): 17-22.
- [7] 崔银量, 陈贤胜, 宴建国. 北衙红色粘土型金矿地质特征和成矿条件[J]. 矿物学报, 2001, 21(4): 654-658.
- [8] 葛良胜, 郭晓东, 邹依林, 等. 云南北衙金矿床地质特征及成因研究[J]. 地质找矿论丛, 2002, 17(1): 32-46.
- [9] 曾普胜, 莫宣学, 喻学惠. 滇西富碱斑岩带的 Nd, Sr, Pb 同位素特征及其挤压走滑背景[J]. 岩石矿物学杂志, 2002, 21(3): 231-241.
- [10] 肖骑彬, 蔡新平, 徐兴旺. 云南北衙表生金矿形成与保存探讨[J]. 矿床地质, 2003, 22(4): 401-407.
- [11] 刘建云. 云南北衙金矿煌斑岩地质特征及找矿意义[J]. 黄金地质, 2004, 10(1): 20-23.
- [12] 应汉龙, 蔡新平. 云南北衙矿区富碱斑岩正长石和白云母的⁴⁰Ar-³⁹Ar 年龄[J]. 地质科学, 2004, 39(1): 107-110.
- [13] 郭远生, 曾普胜, 杨伟光, 等. 北衙金多金属矿床地质特征与成因[J]. 中国工程科学, 2005, 7: 218-223.
- [14] 吴开兴, 胡瑞忠, 毕献武, 等. 滇西北衙金矿蚀变斑岩中的流体包裹体研究[J]. 矿物岩石, 2005, 25(2): 20-26.
- [15] 徐受民, 莫宣学, 曾普胜, 等. 滇西北衙富碱斑岩的特征及成因[J]. 现代地质, 2006, 20(4): 527-535.
- [16] 徐兴旺, 蔡新平, 宋宝昌, 等. 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[J]. 岩石学报, 2006, 22(3): 631-642.
- [17] 莫宣学, 路凤香, 沈上越, 等. 三江特提斯火山作用与成矿[M]. 北京: 地质出版社, 1993: 1-267.
- [18] 莫宣学, 沈上越, 朱勤文, 等. 三江中南段火山岩-蛇绿岩与成矿[M]. 北京: 地质出版社, 1998: 1-128.
- [19] 莫宣学, 邓晋福, 董方浏, 等. 西南三江造山带火山岩-构造组合及意义[J]. 高校地质学报, 2001, 7(2): 121-138.
- [20] 莫宣学, 潘桂堂. 从特提斯到青藏高原形成: 构造-岩浆事件的约束[J]. 地学前缘, 2006, 13(6): 43-51.
- [21] 刘增乾, 李兴振, 叶庆同, 等. 三江地区构造岩浆带的划分与矿产分布规律[M]. 北京: 地质出版社, 1993: 1-89.
- [22] 张旗, 周德进, 赵大升, 等. 滇西古特提斯造山带的威尔逊旋回: 岩浆活动记录和深部过程讨论[J]. 岩石学报, 1996, 12(1): 17-28.
- [23] 王立全, 潘桂堂, 李定谋, 等. 金沙江弧盆地时空结构及地史演化[J]. 地质学报, 1999, 73(3): 206-218.
- [24] 钟大赉. 滇川西部古特提斯造山带[M]. 北京: 地质出版社, 1998: 1-69.
- [26] 张连生, 钟大赉. 从红河剪切带走滑运动看东亚大陆新生代构造[J]. 地质科学, 1996, 31(4): 327-341.
- [28] 王登红, 应汉龙, 梁华英, 等. 西南三江地区新生代大陆动力学过程与大规模成矿[M]. 北京: 地质出版社, 2006: 1-39.
- [29] 余宏全, 李进文, 丰成友, 等. 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.
- [30] 卢焕章, 范宏瑞, 倪培, 等. 流体包裹体[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 132-208.
- [33] 刘斌, 沈昆. 流体包裹体热力学[M]. 北京: 地质出版社, 1999: 1-290.
- [34] 张文淮, 陈紫英. 流体包裹体地质学[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1993: 1-87.
- [35] 朱和平, 王莉娟, 刘建明. 不同成矿阶段流体包裹体气相成分的四极质谱测定[J]. 岩石学报, 2003, 19(2): 314-318.
- [36] 吴开兴. 滇西新生代富碱火成岩及其与金成矿关系研究[D]. 贵阳: 中国科学院地球化学研究所, 2005: 1-99.
- [37] 徐受民. 滇西北衙金矿床的成矿模式及与新生代富碱斑岩的关系[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2007: 1-96.
- [41] 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.
- [42] 刘显凡, 宋祥峰, 卢秋霞, 等. 地幔流体在滇西富碱斑岩成岩成矿过程中的作用[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2006, 36(4): 503-510.
- [45] 薛传东, 侯增谦, 刘星, 等. 滇西北衙金多金属矿田的成岩成矿作用: 对印-亚碰撞造山过程的响应[J]. 岩石学报, 2008, 24(3): 457-472.