2018年10月 October, 2018
矿 床 地 质 MINERAL DEPOSITS
第37卷 第5期 37 (5): 1065~1078

文章编号: 0258-7106 (2018) 05-1065-14 Doi: 10. 16111/j. 0258-7106. 2018. 05. 010

秘鲁 Don Javier 斑岩铜钼矿床流体包裹体特征*

赵宏军[1],王可勇[2],邱瑞照[1],陈秀法[1],卢民杰[3],王 军[3],杨日红[4]

(1 中国地质调查局发展研究中心,北京 100037; 2 吉林大学地球科学学院,吉林 长春 130061;
3 中国地质科学院地质研究所,北京 100037; 4 中国国土资源航空物探遥感中心,北京 100083)

摘 要 Don Javier 斑岩铜钼矿床位于南美安第斯成矿带中段,秘鲁中南部-智利北部巨型斑岩铜钼金多金属成矿带上,矿区主要出露 Yarabamba 超群花岗闪长岩岩基和英安斑岩岩体,矿体呈筒状,主要赋存在英安斑岩体及其围岩中,受 NW 向断裂构造控制。在野外地质调查的基础上,文章对矿床流体包裹体特征进行研究,并结合矿体产出形态特征,对成矿流体来源及演化进行探讨。对黄铁矿-石英和黄铜矿(辉钼矿)-石英 2 个成矿阶段的石英流体包裹体研究结果表明,成矿阶段矿石中发育富气相-液相、气液两相及含 NaCl 子矿物三相 3 种类型的原生流体包裹体,流体包裹体均一温度为 287~499℃,含 NaCl 子矿物包裹体的盐度 $w(NaCl_{eq})$为 30%~42%,密度为 1.08~1.21 g/cm^3,成矿流体属于中高温、高盐度的 NaCl-H_2O 体系,为岩浆热液来源的成矿流体。流体包裹体特征还表明,流体的沸腾作用是引起成矿流体中矿质发生沉淀富集的重要成矿机制。

关键词 地球化学;流体包裹体;成矿流体;Don Javier 斑岩铜钼矿床;安第斯成矿带;秘鲁

中图分类号:P618.42 **文献标志码**:A

Characteristics of fluid inclusions in Don Javier porphyry copper-molybdenum deposit, Peru

ZHAO HongJun[1],WANG KeYong[2],QIU RuiZhao[1],CHEN XiuFa[1],LU MinJie[3],WANG Jun[3] and YANG RiHong[4]

(1 Development and Research Center of China Geological Survey, Beijing 100037, China; 2 School of Earth Sciences, Jilin University, Changchun 130026, Jilin, China; 3 Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 4 China Aero Geophysical Survey and Remote Sensing Center for Land and Resources, Beijing 100083, China)

Abstract

The Don Javier porphyry Cu-Mo deposit is located in a large porphyry copper molybdenum gold polymetallic metallogenic belt in the south central part of Peru and northern Chile, the middle part of the Andean metallogenic belt. The mining area mainly has exposures of Yarabamba supergroup granodiorite batholith and dacite porphyry. The orebody mainly exists in dacite porphyry and its surrounding rocks in the shape of tube, and it is controlled by the NW-trending fault structure. Based on field geological survey, the authors studied the characteristics of the fluid inclusions in the deposit, and investigated the source and evolution of the ore-forming fluids in combination with the morphological characteristics of the orebodies. The pyrite and chalcopyrite (molybdenite) fluid inclusions of two stages formed four types of primary fluids containing three phases of inclusions, i.e., rich gas phase, rich liquid phase, halite-bearing three phuse fluld in clusions developed at the main ore-forming stage. The homogenization temperature of fluid inclusions is 287~499℃, the salinity $w(NaCl_{eq})$ is 30%~ 42% and the

* 本文得到中国地质调查局地质调查项目《"一带一路"矿产资源信息采集与综合研究》(编号:121201004000150009)、《全球重要成矿带成果集成与综合研究》(编号:1212011220912)、《海上丝绸之路重点地区有色金属资源潜力评价》(编号:DD20160118)和国家国际科技合作专项(编号 2011DFA22460)联合资助

第一作者简介 赵宏军,男,1969 年生,教授级高工,从事地质矿产普查找矿及成矿规律研究。Email: zhaohongjun2008@126.com

收稿日期 2017-11-01;改回日期 2018-03-05。张绮玲编辑。

http://www.kcdz.ac.cn

density is 1.08~1.21 g/cm^3. the ore-forming fluid belongs to the NaCl-H_2O system of medium and high temperature and high salinity, with mineralization fluid belonging to magma hydrothermal source. The characteristics of fluid inclusions also indicate that the boiling of fluids seems to have been an important mineralization mechanism for the precipitation and enrichment of minerals in ore-forming fluids.

Key words: geochemistry, fluid inclusion, ore-forming fluid, Don Javier porphyry Cu-Mo deposit, Andean metallogenic belt, Peru

秘鲁中南部—智利北部属于南美安第斯成矿带中段，是世界著名的斑岩铜钼金多金属成矿带，产出许多世界级的巨型斑岩铜钼矿床，如Cerro Verde、Cuajone、Toquepala等（图1）。Don Javier斑岩铜钼矿床位于Cerro Verde矿床的东南，属于秘鲁Arequipa市东南约30 km处的Yarabamba辖区，该矿床是20世纪50年代初意大利的Cerro De Paso矿业公司在该区开展地质填图、地表化探等工作时发现，后经钻孔验证（孔深在78.5~144.91 m之间），铜矿化主要赋存在英安斑岩和角砾岩中，但铜品位相对较低（最高仅有0.25%）；后来该矿权几易其主（加拿大AMEC工程咨询公司，2012），但都未进行过较详细的地质工作。

2009年9月，中国庄胜矿业集团有限公司购买了Don Javier矿权，开展了较系统的勘查工作，完成1∶2000地质填图、1∶10 000物探电法扫面、1∶2000物探电法加密、1∶5000地面高精度磁测、化探取样和钻探等工作，认为该矿极有可能成为该区继Cerro Verde、Cuajane、Toquepala之后又一个世界级斑岩铜钼矿床（陈念等，2017; 金文强, 2010; 吴斌等，2013; 吴斌，2013）。

前人对Don Javier矿床主要开展了一些地质填图、化探、物探、钻探等勘查工作，对矿床成因等研究很少，本文通过野外调查和室内流体包裹体岩相学、显微测温、激光拉曼探针测试分析，对该矿床的成矿流体特征、性质及成矿机制等进行了初步探讨，以便为矿床成因和成矿规律总结提供新的证据。

1 区域成矿地质背景

Don Javier斑岩铜钼矿床位于秘鲁南部西科迪勒拉山脉的南西坡（陈念等, 2017; 金文强, 2010; 吴斌等, 2013），大地构造位置处于环太平洋成矿域东南部，安第斯成矿带的中段，秘鲁中南部—智利北部巨型斑岩铜钼金多金属成矿带内。

研究区最老地层是北西端少量出露的前寒武系变质杂岩体，岩性为混合岩相、片麻岩相及片岩相，常具片理、劈理小褶皱等构造特征。广泛分布的是中生界侏罗系陆缘相、滨海相碎屑岩、碳酸盐岩和白垩系岩浆-火山岩系、火山沉积岩系及第四系冲积物、残积物与火山灰等（陈念等, 2017; 金文强, 2010）。

可能受纳斯卡板块俯冲，南美板块边缘隆起的影响，主干断裂及褶皱轴向均为NW-SE向，断裂构造早期表现为逆冲推覆特征，断层面倾向NE，晚期具有反映伸展作用的缓倾斜拆离断层特点。

区内岩浆岩活动强烈，多呈NW-SE向分布于海岸带和西科迪勒拉，时代主要为侏罗纪—早白垩世，岩性从基性岩、中性岩到酸性岩。中生代强烈的构造-岩浆活动形成了大量的Cu、Mo、Au、Ag、Pb、Zn、Sn、As、Sb矿床（赵宏军等，2014）。

2 矿床地质特征

2.1 矿区地质

Don Javier矿区地层主要为上侏罗统—下白垩统Yura群的石英砂岩、硅质岩、浅灰色页岩。

区内火山岩、侵入岩分布广泛，具有多期次特征。侵入岩呈NW向雁列式展布，其岩性主要为英安斑岩、石英英安斑岩、斜长石黑云母斑岩、安山玢岩等。喷出岩主要是中酸性火山岩，岩石类型较复杂，主要是英安岩、流纹岩、火山角砾岩等（Chan et al., 2003; Beckinsale et al., 1985）。分布最广的Yarabamba大岩基，岩性多为花岗闪长岩、石英闪长岩，被认为是典型的大陆边缘钙碱性花岗闪长岩，经Rb-Sr法、锆石U-Pb法测年，得到该岩体的年龄为（68±3）Ma（Chan et al.,2003; Beckinsale et al.,1985; Phelps, 2000; Carpio,2000）。

区内断裂可分为NW向、NE向和近EW向3组断裂（金文强, 2010），其中NW向断裂被认为是主要的控岩控矿构造，沿断裂分布有英安斑岩脉、矿体及矿化蚀变带。该组断裂的走向一般为NW

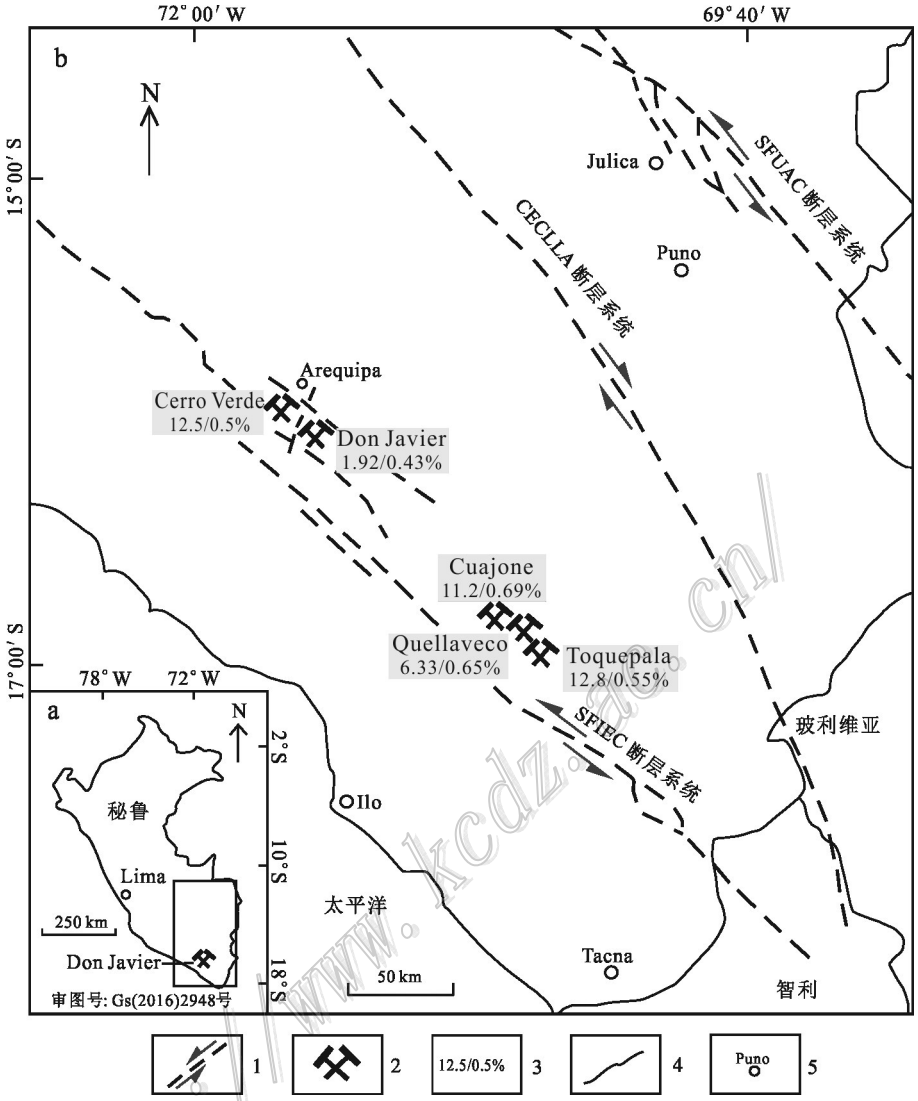

图1　秘鲁南部Don Javier地区位置图(a)和三大断层系统及主要矿床位置图(b)(据陈念等, 2017修改)

1—断层系统;2—铜矿床;3—矿床资源量(Mt)/平均品位;4—国界或海岸线;5—城市

Fig. 1　Location of the Don Javier (a) three fault systems and major deposits locations in southern Peru (b) (modified after Chen et al., 2017)

1—Fault system; 2—Copper deposit; 3—Reserves (Mt)/average grade; 4—National boundaries of coast line; 5—City

http://www.kcdz.ac.cn/

300°~315°,倾角 80°~90°,被认为是为含矿英安斑岩岩浆的侵入和成矿热液的上升提供了通道。NE向断裂是早期形成的,也与成矿有关,秘鲁中南部的一些古新世斑岩铜矿多产于NW向断裂与NE向断裂的交汇处。近EW向断裂为成矿后断裂,对矿体起破坏作用(陈念等, 2017; 金文强, 2010; 吴斌, 2013)(图2)。

在图2圈出的矿体中部,目前揭露出一北东走向100 m×350 m近纺锤形角砾岩带,经钻孔勘探确认,该角砾岩筒位于英安斑岩体内靠近西南侧花岗闪长岩。在NE-J勘探线,08号钻孔在地表下200 m穿透角砾岩,58号钻孔在地表下1400 m处仍未穿透角砾岩,而50号、48号钻孔分别在550 m和450 m处穿透角砾岩,这表明该角砾岩筒近直立。据基质成分不同,将矿区内的角砾岩分为石英-电气石角砾岩、电气石角砾岩、硅质角砾岩等(金文强,2010),角砾多为花岗闪长岩、英安斑岩、石英岩等,成分较杂,呈次棱角状到次圆形,砾径几mm~20 cm不等;胶结角砾的基质多为电气石、石英微晶或英安质成分。

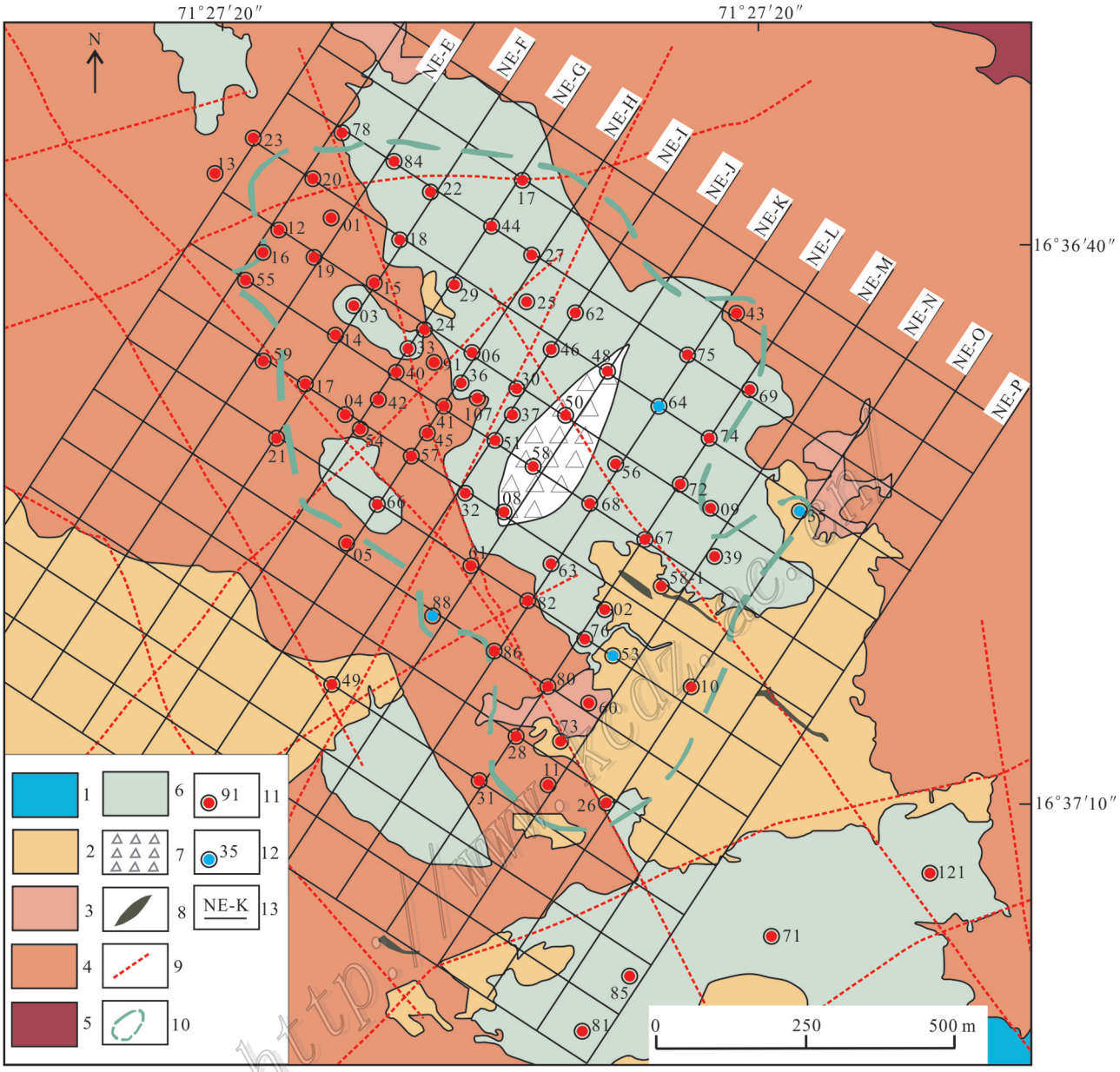

图2 Don Javier斑岩铜钼矿床矿区地质图(据加拿大AMEC工程咨询公司, 2012; 陈念等, 2017修改)

1—侏罗系砂岩;2—闪长岩;3—石英闪长岩;4—花岗闪长岩;5—花岗岩;6—英安斑岩;7—角砾岩筒;8—安山岩脉;9—推断断层;10—矿体范围;11—钻孔及编号;12—采集包裹体试验样品的钻孔及编号;13—勘探线及编号

Fig.2 Geological map of the Don Javier Cu-Mo deposit(modified afrer AMEC Mining Consultants(Canada) Company Limited, 2012; Chen et al., 2017)

1—Jurassic sandstone; 2—Diorite; 3—Quartz diorite; 4—Granodorite; 5—Granite; 6—Dacite porphyry; 7—Breccia pipe; 8—Andesite vein; 9—Inferred fault; 10—Orebody range; 11—Drill hole and its serial number; 12—Drill hole and its serial number of fluid inclusion sample; 13—Exploration line and its serial number

角砾岩带大量电气石的出现,说明热液活动强烈,含硼的挥发分多,且在热液后期,多在岩体顶部形成倒锥形隐爆角砾岩筒,这在南美安第斯造山带的斑岩铜(金)矿床中较为常见,如Cripple Creek、Montana Tunnels、Cerro de Pasco、El Teniente、Los Bronces、Río Blanco、Cabeza deVaca等矿床。

2.2 矿化特征

截止2014年底,Don Javier铜矿区按照70 m×70

m勘探网度，已完成金刚石钻孔140个，总进尺达138 152 m，圈定的矿体分布在1040 m×560 m范围内，以0.3%为经济铜边界品位获得推断+控制铜资源量为129万t，平均铜品位0.43%，钼品位0.018%，银品位2.274 g/t(陈念等，2017; 吴斌，2013)。

Don Javier 斑岩铜钼矿为隐伏矿床，以原生矿石为主。氧化带深10~50 m，局部深达70 m。主矿体主要赋存在英安斑岩体及角砾岩体内，由上至下矿体连续稳定，矿体大致呈筒状，NW方向长约1230 m，NE方向宽约750 m，由NW向SE方向倾斜，并略微向NE方向侧伏(吴斌等，2013)。在矿体周围，还分布有小的斑岩矿体及脉状矿体。

原生矿石以细脉状和浸染状金属硫化物为主(图3)，矿石矿物主要为黄铜矿、辉钼矿、黄铁矿、磁铁矿等，次为砷黝铜矿、斑铜矿、辉铜矿、方铅矿、闪锌矿等。由于矿床表生氧化及次生富集作用，矿体上部可见少量的孔雀石、铜蓝、蓝辉铜矿等次生矿物；脉石矿物主要为石英和长石(钾长石、钠长石和斜长石)，其次为绿泥石、白云母及少量的方解石、高岭石等。矿石构造以脉状、浸染状和网脉状为主(图3b、c、d)。

根据钻孔岩芯编录及矿山地质技术人员观察，矿床的矿化可分为以黄铁矿-石英为主和以黄铜矿(辉钼矿)-石英为主2个阶段。

(1) 黄铁矿-石英阶段，黄铁矿粒度较集中于0.02~0.3 mm，主要呈不规则状、粒状嵌布，也有少量呈自形、半自形晶、压碎结构分布于石英、长石等脉石矿物中。此外，部分黄铁矿与磁铁矿、黄铜矿关系紧密，有少量黄铁矿以包体形式分布于粗粒磁铁矿、黄铜矿颗粒中，在粗粒黄铁矿颗粒中亦可见微细粒的黄铜矿、方铅矿、闪锌矿包体。

(2) 黄铜矿(辉钼矿)-石英阶段，黄铜矿在矿石中主要呈中、粗粒不规则状嵌布于石英、长石等脉石矿物中，或以浸染状散布于脉石矿物中，或与辉钼矿紧密毗邻连生，还可见粗粒黄铜矿中呈片状集合体嵌布的辉钼矿等(图3d)。

Don Javier 斑岩铜钼矿矿化蚀变较强且分带明显，由中心的钾化带(石英-钾长石-黑云母)(在图2中位于勘探线NE-G到NE-L之间矿体深部)向外变为绢英岩化带(石英-绢云母-黄铁矿)，最外是青磐岩化带(绿帘石-方解石-绿泥石)，在绢英岩化带与青磐岩化带之间有时存在黏土化带(石英-高岭石-蒙脱石)。绢英岩化带是该矿床主要的含矿蚀变带，其次是黏土化带(图4)。蚀变带分带与矿体形态相符，具有典型的斑岩Cu-Mo矿床的蚀变特征。

3　流体包裹体研究

3.1　样品采集及研究方法

本次研究样品取自图2中DJ-35、DJ-53、DJ-64、DJ-88等4个钻孔的岩芯，按矿物组合及所代表的成矿阶段不同，采集新鲜的矿石样品共15件。首先将这些样品磨制成双面抛光厚0.2~0.3 mm的包裹体片。通过光学显微镜观察，确定主矿物特征和原生或假次生包裹体的大小、形态、分布、类型、共生组合及充填度，照相、定位后再进行热力学研究，挑选有代表性的包裹体进行显微测温。

流体包裹体测试工作在吉林大学地球科学学院地质流体实验室完成，流体包裹体岩相学观察使用仪器为德国Zeiss Axiolab(10x50)型显微镜，测温使用仪器为英国Linkam THMSG-600型冷热两用台，低温部分测温精度为±0.1℃，＞300℃时精度为±2℃，测试室温24~25℃。包裹体测温过程中，低温下(＜10℃)升温速率为0.1~1℃/min，10~31℃时升温速率为5~10℃/min，在高温(＞100℃)时升温速率为5~10℃/min，在相变化温度附近，将升温速率控制到1℃/min。冷冻测温时，利用液氮对包裹体降温，并观察包裹体变化，包裹体冷冻后缓慢升温，当接近相变点时，控制升温速率。一般气液两相包裹体，可测定其冰点温度和包裹体完全均一温度，含子晶包裹体可测得子晶消失温度、气泡消失温度(气泡优于子晶消失)和包裹体完全均一温度。

包裹体测温数据处理利用MacFlincor计算程序完成。单个包裹体成分分析使用仪器为Renishaw system 1000型激光拉曼光谱仪，测试条件：室温25℃；激光器：514.5 nm Ar^+离子型；狭缝宽度：10 μm；扫描范围：1200~4000 cm^{-1}；积分时间：60 s。

3.2　流体包裹体岩相学特征

Don Javier 斑岩铜钼矿床矿石及含矿岩体斑晶中流体包裹体较为发育，据室温下(22℃±)的相态特征，主要划分出气相-富气相(LV)、气液两相(VL)及含NaCl子矿物三相(SL)等3种类型的原生流体包裹体(图5、表1)。各类型包裹体岩相学特征如下：

(1) 含NaCl子矿物三相流体包裹体(SL)：该类包裹体在含矿斑岩体和2个成矿阶段发育较为普

http://www.kcdz.ac.cn

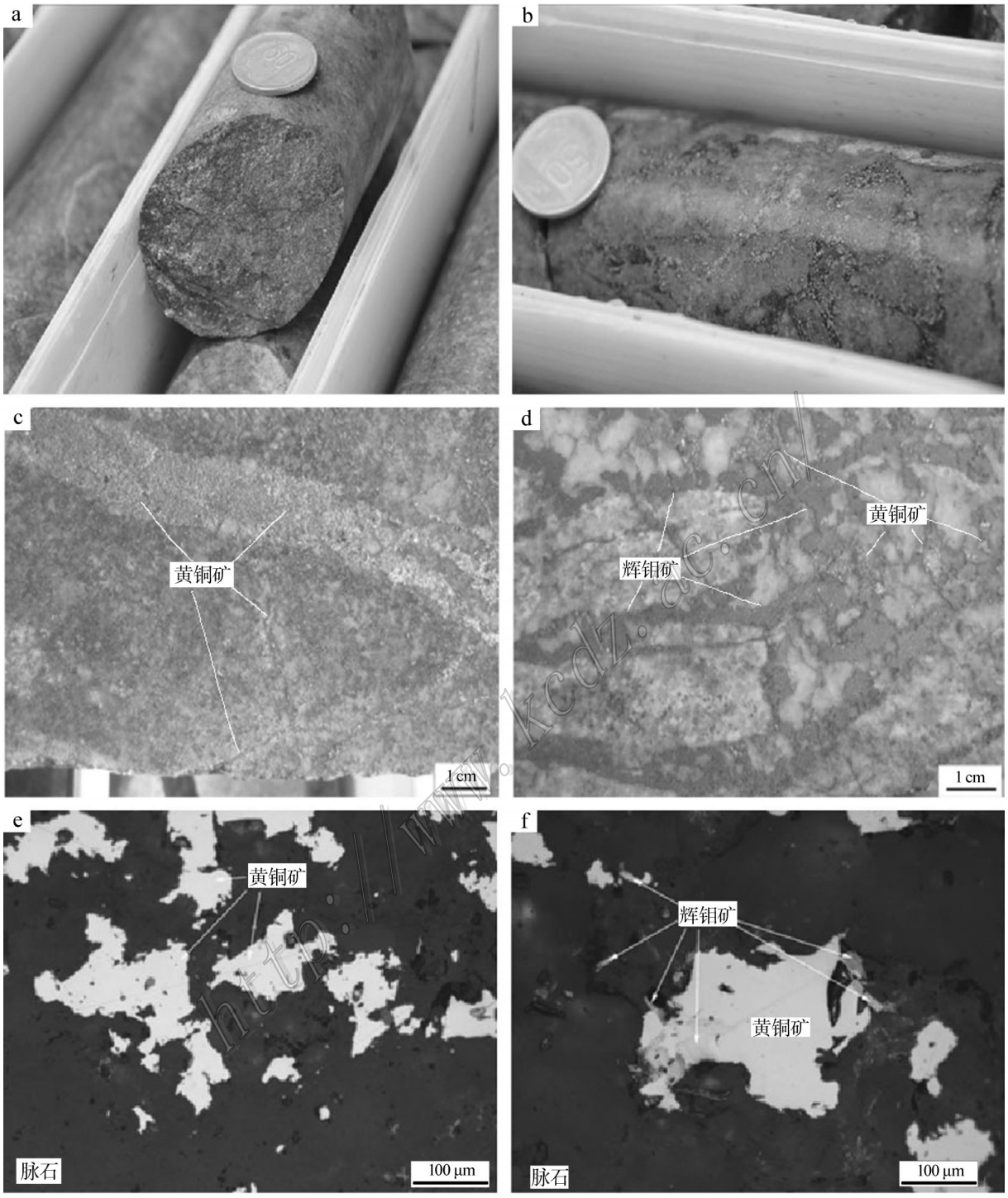

图3 Don Javier 斑岩铜钼矿床矿石构造及结构特征

a. 呈斑杂状构造铜矿石(岩芯); b. 细脉浸染状构造铜矿石(岩芯); c. 黄铁矿(含少量黄铜矿)呈粗细脉状产出; d. 黄铜矿与呈脉状产出的辉钼矿(灰色); e. 矿石中黄铜矿以不规则状嵌布于脉石矿物中(+); f. 矿石中黄铜矿与辉钼矿紧密毗邻连生(+)

Fig. 3 Ore structure and structural characteristics of the Don Javier porphyry Cu-Mo deposit

a. Copper ore of spotted structure (drilling core); b. Copper ore of veins disseminated structure (drilling core); c. Pyrite (with a small amount of chalcopyrite) of thick veins; d. Chalcopyrite and veined molybdenite (gray); e. Ore chalcopyrite irregularly embedded in gangue minerals(+); f. Closely associated chalcopyrite and molybdenite(+)

http://www.kcdz.ac.cn/

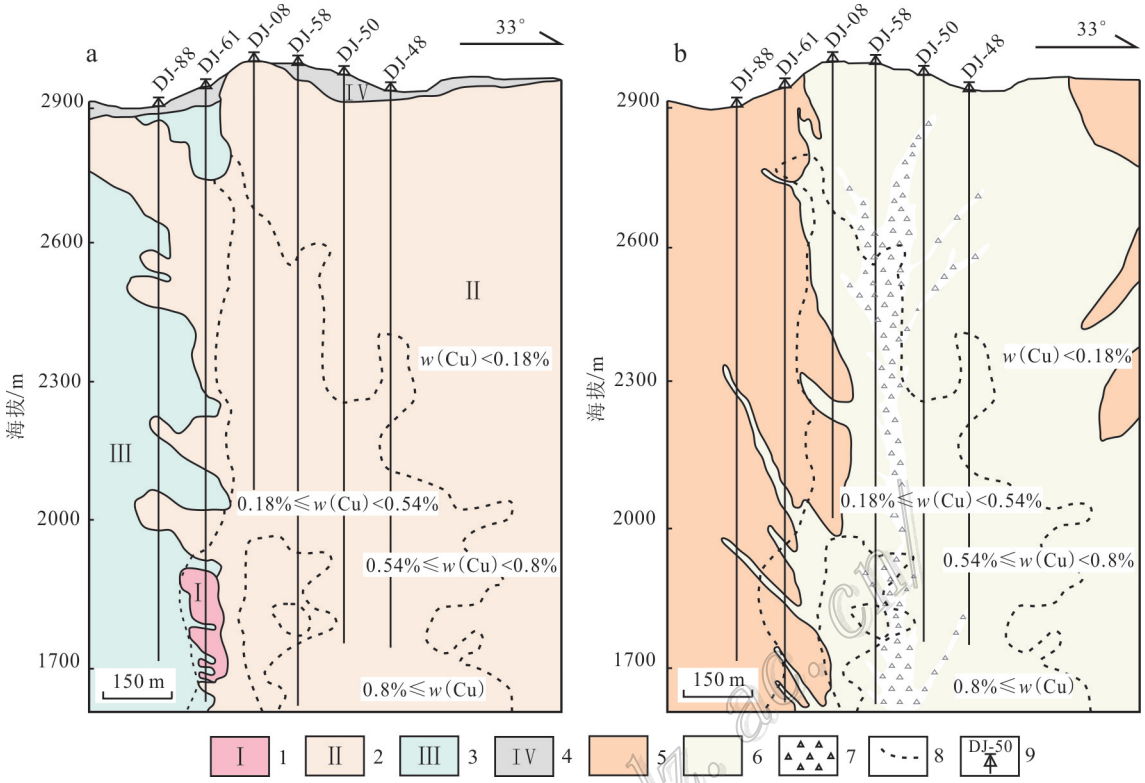

图4　Don Javier 斑岩铜钼矿 NE-J勘探线蚀变剖面图(a)和岩性剖面图(b)(据陈念等,2017修改)

1—钾硅酸盐化带;2—绢英岩化带;3—青磐岩化带;4—泥化带;5—花岗闪长岩;6—英安斑岩;7—角砾岩带;8—铜品位等值线;9—钻孔及编号

Fig. 4　Geological cross section (a) along NE-J exploration line (b) of Don Javier porphyry Cu-Mo deposit (modified afrer Chen et al., 2017)

1—Potasic-silicification zone; 2—Phyllic zone; 3—Prophylitic zone; 4—Argillic zone; 5—Granodiorite; 6—Porphyry dacite; 7—Breccias zone; 8—Contour line of copper grade; 9—Drill hole and its serial number

遍。室温下,该类包裹体主要由气相、液相及1~2个固体子矿物构成,子矿物主要呈较完好的立方体晶形,颜色一般无色或淡绿色,据其晶形特点推测为NaCl子矿物;该类包裹体气相分数一般15%~40%,多数包裹体气相分数为20%左右,子矿物体积分数一般为10%~30%;该类包裹体大小一般为6~20 μm,以6~10 μm居多,形态多为长条形及椭圆形;在石英颗粒中,该类包裹体多随机或成群发育,因此多数属原生流体包裹体(图5b、g)。

(2) 气相-富气相包裹体(LV):该类包裹体在含矿斑岩体、黄铜矿-(辉钼矿)-石英阶段和黄铁矿-石英阶段的石英中发育,数量相对少。室温下,该类包裹体主要呈单一气相或为两相,但气相分数较大,一般为50%~90%,镜下该类包裹体颜色普遍偏暗;该类包裹体大小一般为6~15 μm,形态多为椭圆形及长条状。在石英颗粒中,大部分此类包裹体随机或与另两类包裹体成群分布,因此,多数此类包裹体具原生成因特点(图5a、c、d)。

(3) 气液两相包裹体(VL):该类包裹体在含矿斑岩体、两个成矿阶段石英中发育较为普遍。室温下,此类包裹体主要由气相及液相两相构成,多数包裹体气相分数较为接近,为15%~40%,以20%~40%居多;在石英颗粒中,该类包裹体多随机或与另两类包裹体成群分布,其大小一般为6~20 μm,形态一般呈椭圆形、长条状(图5e、f、h)。

3.3　Don Javier 斑岩铜钼矿床成矿流体特征

根据Don Javier斑岩铜钼矿床划分的2个成矿阶段,对不同成矿阶段石英中发育的各类流体包裹体进行了研究。同时,为便于比较,对含矿岩体石英斑晶中的流体包裹体也进行了相应的测试分析。

(1) 黄铁矿-石英成矿阶段　该矿化阶段石英中富气相包裹体在冷冻-升温过程中,测得包裹体冰点

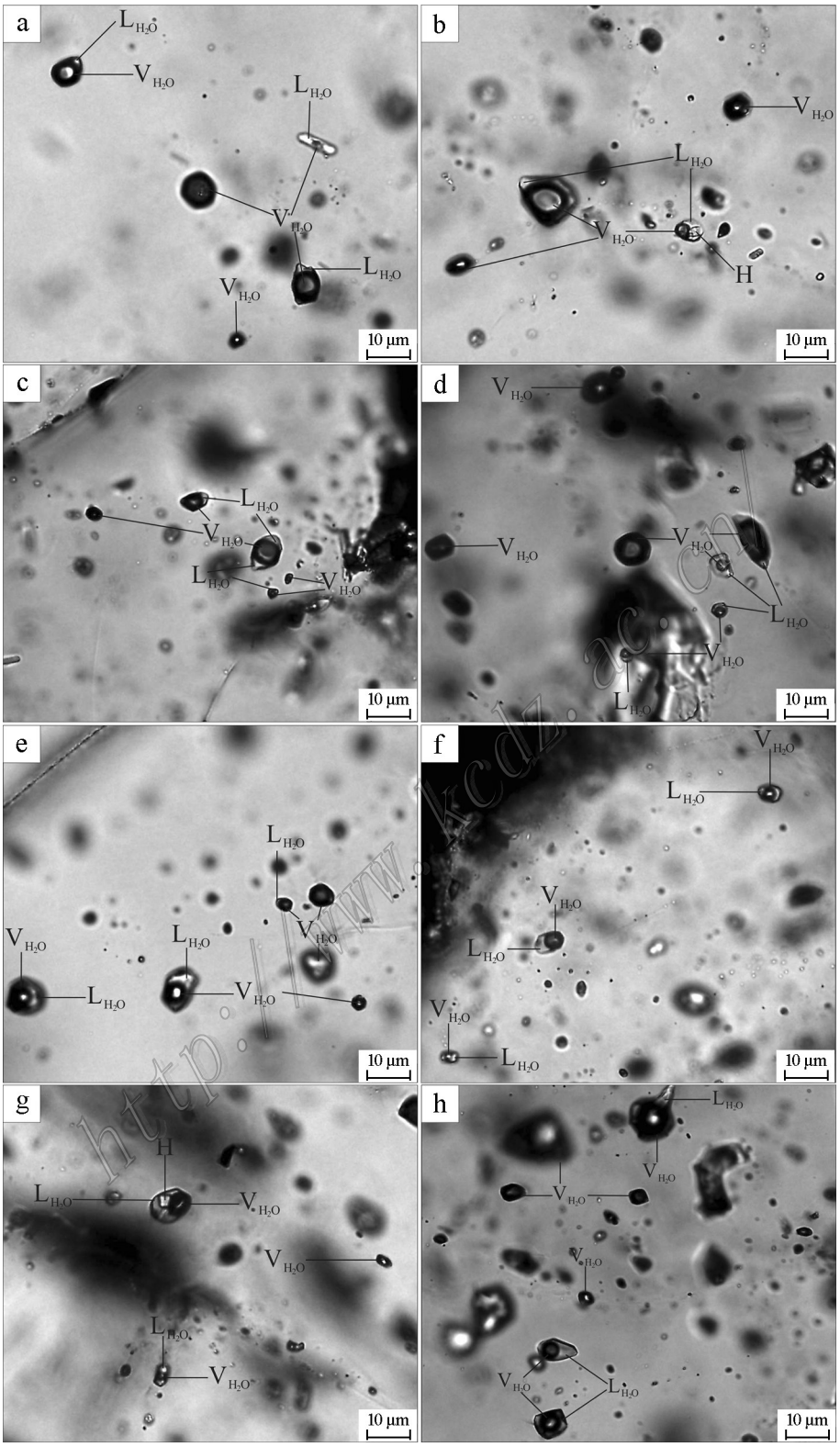

图5 Don Javier 斑岩铜钼矿床流体包裹体照片

a. 气相-富气相包裹体(LV型);b. 含子矿物三相包裹体(SL型);c. 富气相包裹体(LV型);d. 气相-富气相包裹体(LV型);e. 气相、气液两相包裹体(VL型);f. 气液两相流体包裹体(VL型);g. 含子矿物三相包裹体(SL型);h. 富气相及气液两相包裹体(VL型)

L—液相;V—气相;H—NaCl子晶

Fig. 5　Photomicrographs of various types of fluid inclusions in the Don Javier porphyry Cu-Mo deposit

a. Aqueous two-phase and vapor-rich fluid inclusion (VL); b. Halite-bearing three-phase fluid inclusion (SL); c. Vapor rich fluid inclusion (LV); d. Aqueous two-phase and vapor-rich fluid inclusion (VL); e. Aqueous two-phase and vapor fluid inclusion (LV); f. Aqueous two-phase fluid inclusion (VL); g. Halite-bearing three-phase fluid inclusion (SL); h. Vapor-rich and aqueous two-phase fluid inclusion (LV)

L—Liquid; V—Vapour; H—Halite (NaCl)

温度为−1.8~−4.2℃，对应盐度 $w(NaCl_{eq})$ 为 2.9%~6.7%，包裹体均一温度为 357~479℃，据均一温度及盐度，估算出流体密度为 0.48~0.63 g/cm³（图 6）；气液两相包裹体在冷冻-升温过程中，测得包裹体冰点温度为−4.2~−6.1℃，对应盐度 $w(NaCl_{eq})$ 为 6.6%~9.4%，包裹体均一温度为 312~454℃，据均一温度及盐度，估算出流体密度为 0.47~0.77 g/cm³（图 6）；含 NaCl 子矿物三相包裹体在升温过程中，固体子矿物先于气泡消失，子矿物溶化温度为 175~299℃，包裹体完全均一温度为 298~424℃，据此估算出流体包裹体盐度 $w(NaCl_{eq})$ 及密度分别为 30%~39% 及 1.09~1.13 g/cm³（图 6）。

（2）*黄铜矿（辉钼矿）-石英成矿阶段*　该阶段石英中富气相包裹体在冷冻-升温过程中，测得包裹体冰点温度为−1.8~−3.3℃，对应盐度 $w(NaCl_{eq})$ 为 2.9%~5.4%，包裹体均一温度为 321~399℃，估算出流体密度为 0.52~0.70 g/cm³（图 7）；气液两相包裹体在冷冻-升温过程中，测得包裹体冰点温度为−3.5~−5.4℃，对应盐度 $w(NaCl_{eq})$ 为 5.6%~8.4%，包裹体均一温度为 287~373℃，据均一温度及盐度，估算出流体密度为 0.64~0.80 g/cm³（图 7）；含 NaCl 子矿物三相包裹体在升温过程中，固体子矿物先于气泡消失，子矿物溶化温度为 218~326℃，包裹体完全均一温度为 289~373℃，据此估算出流体包裹体盐度 $w(NaCl_{eq})$ 及密度分别为 32%~41% 及 1.08~1.12 g/cm³（图 7）。

（3）*含矿岩体石英斑晶*　含矿岩体石英斑晶中富气相包裹体在冷冻-升温过程中，测得包裹体冰点温度为−1.7~−4.8℃，对应盐度 $w(NaCl_{eq})$ 为 2.7%~7.6%，包裹体均一温度为 375~490℃，据均一温度及盐度，估算流体密度为 0.47~0.56 g/cm³（图 8）；气液两相包裹体在冷冻-升温过程中，测得包裹体冰点温度为−4.2~−6.8℃，对应盐度 $w(NaCl_{eq})$ 为 6.6%~10.3%，包裹体均一温度为 354~463℃，据均一温度及盐度，估算出流体密度为 0.47~0.69 g/cm³（图 8）；含 NaCl 子矿物三相包裹体在升温过程中，固体子矿物先于气泡消失，子矿物溶化温度为 218~358℃，包裹体完全均一温度为 376~499℃，据此估算出流体包裹体盐度 $w(NaCl_{eq})$ 为 32%~46%，个别高达 55%~60%，流体密度为 1.08~1.21 g/cm³（图 8）。

总体来看，在含矿斑岩体、黄铜矿-（辉钼矿）-石英和黄铁矿-石英成矿阶段中同类包裹体均一温度、盐度等参数变化范围基本一致，反映其成矿流体地球化学性质相近，总体属中-高温较高盐度不均匀热液体系，与岩浆热液、特别是斑岩型矿床成矿流体特征有相似之处（芮宗瑶等，2003；2006）。大部分石英颗粒中可见到固-气-液相、气-液相和气相包裹体成

http://www.kcdz.ac.cn

表 1　Don Javier 斑岩铜钼矿床流体包裹体测温数据一览表

Table 1　The results of microthermometry of fluid inclusion in the Don Javier porphyry Cu-Mo deposit

岩/矿石/成矿阶段	包裹体类型	大小/μm	气相分数/%	子矿物比例/%	冰点温度/℃	均一温度/℃	子矿物熔化温度/℃	$w(NaCl_{eq})$/%	密度/(g/cm³)
黄铁矿-石英	LV	6~15			−1.8~−4.2	357~479		2.9~6.7	0.48~0.63
	VL	6~20	20~40		−4.2~−6.1	312~454		6.6~9.4	0.47~0.77
	SL	6~20	15~30	18~30		298~424	175~299	30.0~39.0	1.09~1.13
黄铜矿-(辉钼矿)-石英	LV	6~15			−1.8~-3.3	321~399		2.9~5.4	0.52~0.70
	VL	6~20	20~40		−3.5~−5.4	287~373		5.6~8.4	0.64~0.80
	SL	8~18	15~35	15~30		289~373	218~326	32.0~41.0	1.08~1.12
含矿斑岩体	LV	6~15			−1.7~−4.8	375~490		2.7~7.6	0.47~0.56
	VL	6~20	20~40		−4.2~−6.8	354~463		6.6~10.3	0.47~0.69
	SL	8~12	15~30	10~30		376~499	218~358	32.0~46.0	1.08~1.21

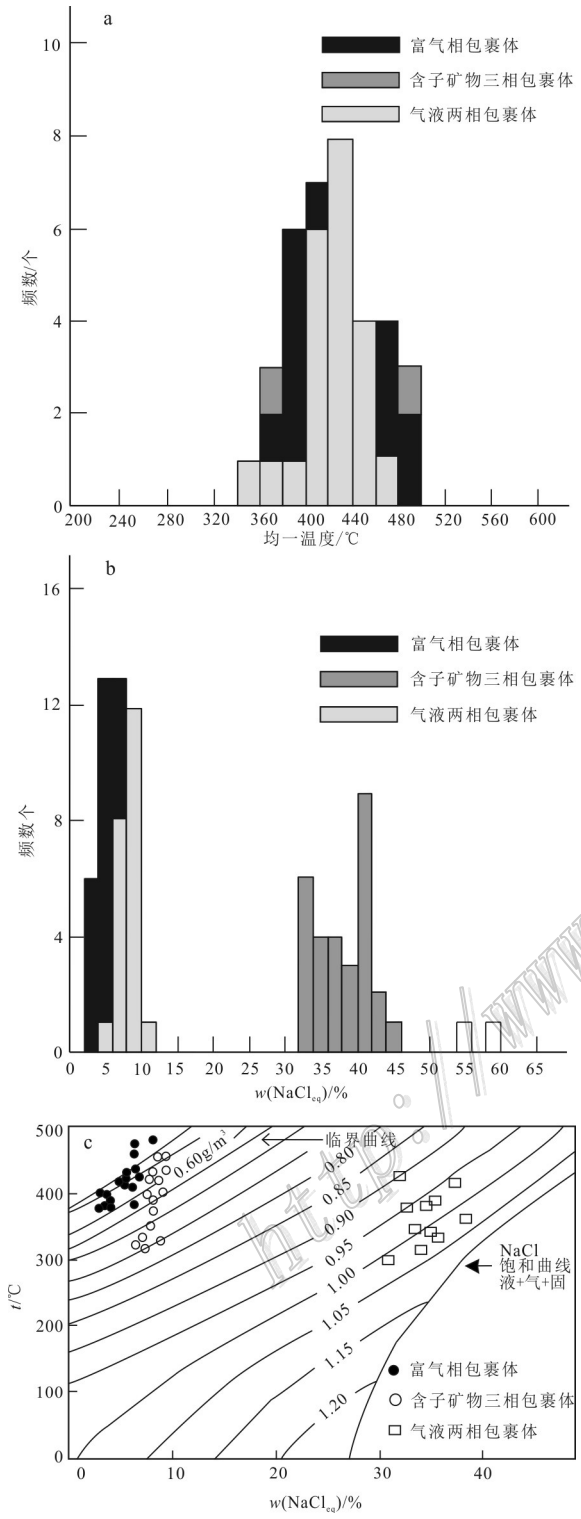

图6 黄铁矿-石英成矿阶段流体包裹体的均一温度(a)、盐度直方图(b)及均一温度-盐度-密度关系图解(c)

Fig. 6 Histograms of homogenization temperature (a), salinity (b) and relationship diagram of homogenization temperature-salinity- density (c) of fluid inclusions at metallogenic stages of pyrite-quartz

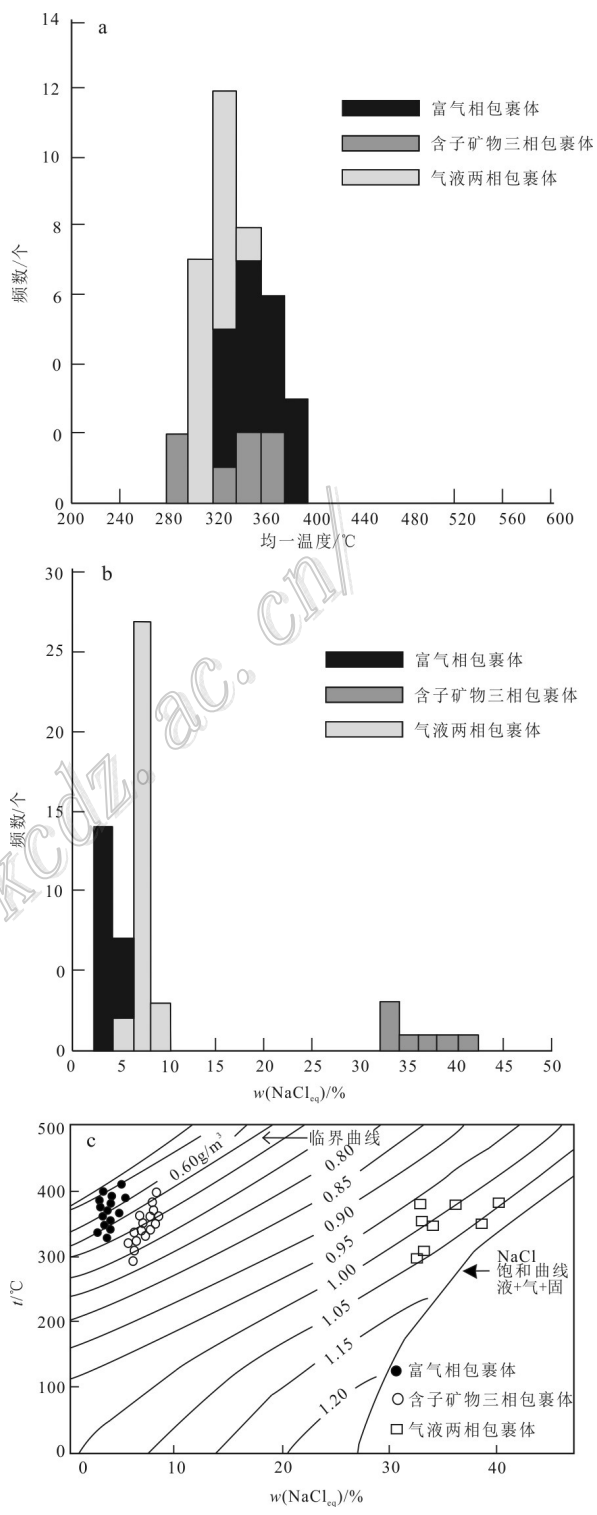

图7 黄铜矿(辉钼矿)-石英成矿阶段流体包裹体均一温度(a)、盐度直方图(b)及均一温度-盐度-密度关系图解(c)

Fig.7 Histograms of homogenization temperature (a), salinity (b) and relationship diagram of homogenization temperature-salinity-density (c) of fluid inclusions at metallogenic stages of chalcopyrite (molybdenite)-quartz

http://www.kcdz.ac.cn/

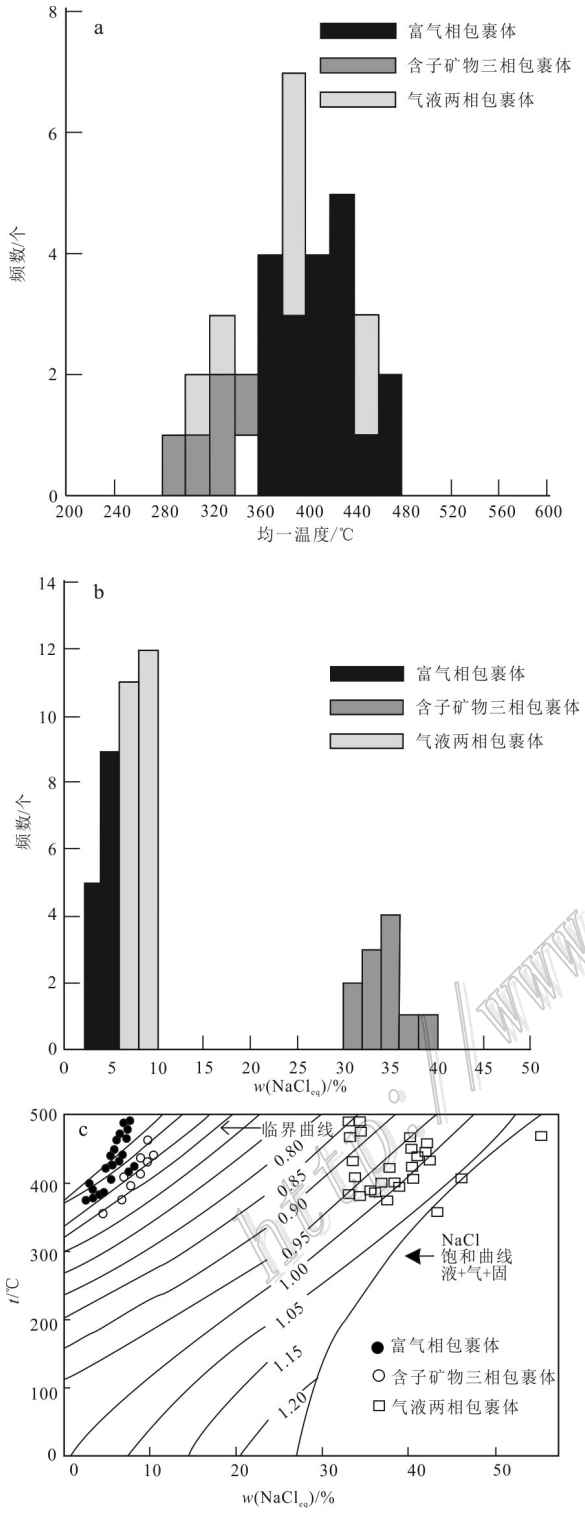

图8　含矿岩体石英斑晶中包裹体均一温度(a)、盐度直方图(b)及均一温度-盐度-密度关系图解(c)

Fig. 8　Histograms of homogenization temperature (a), salinity (b) and relationship diagram of homogenization temperature-salinity-density (c) of fluid inclusions in quartz phenocrysts from dacite porphyry

群共生发育的现象，且部分气相包裹体与气液两相包裹体均一温度相近(气相包裹体均一温度多在350~470℃，气液两相包裹体均一温度在320~450℃)，但盐度(气相包裹体盐度 $w(NaCl_{eq})$ 多在2.9%~6.7%，而气液两相包裹体盐度 $w(NaCl_{eq})$ 在6.1%~9.3%)又明显低于气液两相包裹体的事实说明，在铜、钼成矿过程中流体曾发生过沸腾作用，这也是导致铜、钼等元素得以富集的重要机制(芮宗瑶等，2003)。

4　结果与讨论

4.1　流体来源

秘鲁 Don Javier 斑岩铜钼矿床主要铜钼矿矿化阶段石英中普遍发育富气相、气液两相及含 NaCl 子矿物三相3种类型的原生流体包裹体，成矿流体为高盐度的 $NaCl-H_2O$ 体系热液，这与国内外许多斑岩型矿床成矿流体地球化学特征相近(李向文等，2013；李文昌等，2013；葛文春等，2007；陈衍景等，2009；刘斌等，1999；王可勇等，2010；卢焕章等，2004；Sillitoe, 2010)，一般认为，此类成矿流体可直接来源于岩浆演化晚期分异热液(陈衍景等，2009)。本区铜钼成矿作用与英安斑岩岩体关系密切，矿体主要产于英安斑岩体及其附近岩体内，本次工作虽未进行赋矿围岩英安斑岩、Yarabamba 花岗闪长岩岩体年龄的测试，但与 Don Javier 铜钼矿成矿条件、赋矿层位相似，相距仅 18 km 的 Cerro Verde 铜矿的研究表明，围岩 Yarabamba 花岗闪长岩岩体的 U-Pb 锆石年龄为 62 Ma~(67±1) Ma，Rb-Sr 年龄为(68±3) Ma(Chan et al.,2003; Beckinsale, et al.,1985)。含矿英安斑岩的 U-Pb 锆石年龄则为(61±1) Ma，黑云母 K-Ar 年龄为 56~(59±2) Ma(Chan.et al., 2003; Beckinsale et al.,1985)。用绢云母 $^{40}Ar-^{39}Ar$ 法测定得到热液活动年龄为(62.0±1.1)Ma(Chan et al., 2003)。从年龄看，成矿斑岩的侵入时间略晚于 Yarabamba 花岗闪长岩岩基，但在岩浆期后热液作用时限范围之内，表明 Yarabamba 花岗闪长岩浆分异的热液可能为成矿作用提供了重要的热液来源(吴斌等, 2013; Chan et al., 2003; Beckinsale et al.,1985)。

近年来，国外大量的岩浆岩熔体包裹体研究成果为了解岩浆分异流体地球化学性状提供了直接证据。已有研究表明，在贫 CO_2 及 SO_2、富 H_2O 和 Cl 的中-酸性熔浆体系里，岩浆结晶作用主要分异出富 Cl 流体，分异流体性质取决于原始熔浆的成分、初始

的 Cl/H_2O 比值、流体分异时间、流体分异时熔浆结晶程度及所处深度等因素(李文昌等,2013;葛文春等,2007;王可勇等,2008;2010;代军治等,2006;刘斌等,1999)。岩浆结晶作用可直接分异出高盐度流体(Webster,2004),也可分异出中等盐度的超临界流体,或在NaCl-H_2O 体系两相区内分异出高盐度卤水及共存的低盐度、低密度蒸气相(李文昌等,2013;葛文春等,2007;王可勇等,2008;2010;代军治等,2006;刘斌等,1999;Webster,2004;Kamenetsky et al.,1999;2002a;2002b;Roedder,1992;Cline et al.,1995)。

本区主要铜钼矿化阶段石英中发育气相、富气相、气液两相及含子矿物三相4种类型的原生流体包裹体,高盐度含子矿物包裹体与富气相包裹体共生发育,显示为不均匀的沸腾体系流体特征。因此,本区成矿流体应是英安斑岩(或花岗闪长斑岩)岩体侵位于地壳较浅部位,岩浆处于半固结状态,岩体顶部聚集了大量的挥发分,当压力超过临界点时,会沿着薄弱部位迅速释放(减压沸腾)而发生隐爆作用,导致岩体上部的岩石破碎成角砾状(图2中存在爆破角砾岩),裂隙发育,而岩浆流体发生液态不混溶,使NaCl-H_2O 体系两相区内分异出高盐度卤水及共存的低盐度、低密度蒸气相。

4.2 成矿流体演化

秘鲁Don Javier斑岩铜钼矿床不同成矿阶段流体包裹体岩相学及物理、化学参数特征的差异,反映了由早到晚成矿流体组成与地球化学性质发生了明显变化,并揭示了其演化趋势。在黄铁矿-石英成矿阶段与黄铜矿(辉钼矿)-石英成矿阶段,石英中均发育气相-富气相、气液两相及含子矿物三相3种类型的原生流体包裹体,但由黄铁矿-石英成矿阶段→黄铜矿(辉钼矿)-石英成矿阶段,液相、气相及含NaCl子矿物三相及液相及气液两相包裹体发育数量显著减少,同类包裹体均一温度、盐度参数略有降低,密度略增大,反映了以岩浆热液来源为主的成矿流体运移到地壳较浅部位,在自然冷却降温和(或)在构造薄弱部位,压力迅速降低引起岩浆流体沸腾(减压沸腾),从而使其发生液态不混溶作用,而流体的不混溶作用可以使单一的流体发生相分离,成为两相或多相不均匀流体,从而破坏了体系原有的平衡状态,导致某些有用组分沉淀并富集成矿,流体的沸腾作用是矿质从成矿流体中分离的重要机制(Roedder,1984;Drummond et al.,1985;陈衍景等,2007;Klemm et al.,2008)。

本次研究发现,各阶段流体包裹体的均一温度、盐度变化范围并不太大,与国内外一些斑岩铜钼矿床矿化阶段所具有的包裹体从较高温、较高盐度向低温、低盐度方向演化,体现出外来大气降水混合的演变趋势不同。因此,秘鲁Don Javier斑岩铜钼矿床主要矿化阶段成矿流体为岩浆热液来源,属于中高温、高盐度NaCl-H_2O 体系。

5 结 论

(1)根据Don Javier斑岩铜钼矿床临近的Cerro Verde铜矿成矿年代学研究,成矿作用发生于(61±1)Ma(Chan et al.,2003;Beckinsale et al.,1985),为古新世。流体包裹体研究表明,Don Javier斑岩铜钼矿床主成矿阶段,石英中均发育气相-富气相、气液两相及含NaCl子矿物三相3种类型的原生流体包裹体,流体包裹体均一温度为287~499℃,含NaCl子矿物多相包裹体盐度 $w(NaCl_{eq})$ 为30%~42%,密度为1.08~1.21 g/cm^3,表明成矿流体属于中高温、高盐度的NaCl-H_2O体系,为岩浆热液来源的成矿流体。

(2)由于富液相流体包裹体、富气相流体包裹体和含子晶固相的多相包裹体3种类型包裹体共生,并且加热后富液相流体包裹体均一到液相,富气相流体包裹体均一到气相,包裹体气相分数为15%~40%,以20%~30%居多,均一温度大致相当,表明流体曾发生过沸腾作用,这可能为Don Javier斑岩铜钼矿床成矿的重要机制之一。

(3)结合南美安第斯褶皱山系构造演化历程可知,在古近纪,受太平洋纳斯卡板块向南美板块俯冲挤压作用影响,在大陆边缘形成强烈褶皱和逆冲断层,并使陆缘遭受强烈构造变形,伴随着俯冲作用,产生强烈而广泛的中酸性岩浆-火山活动,为铜、钼、金等多金属矿化创造良好的成矿构造环境(赵宏军等,2014;Sillitoe,2010;Instituto Geologico Mineroy Metalurgico,2003)。

(4)区域的Yarabamba花岗闪长岩岩基侵位,其分异的热液为成矿作用提供了重要的热液来源,也可能提供部分成矿物质,而其后的英安斑岩的侵入是本区包括Don Javier、Cerro Verde等众多大型矿床的形成提供了重要的物质来源。

志 谢 在秘鲁考察期间,庄胜集团公司总裁周建和、中国庄胜矿业有限公司秘鲁分公司董事长

http://www.kcdz.ac.cn

吴斌、工程总经理王学峰等中秘人员给予了热情接待和无私帮助,匿名审稿专家对论文提出了建设性意见和建议,文中的图件由中国地质大学的硕士研究生于永善、郑瑜林清绘,在此对他们表示最诚挚的感谢。

References

AMEC Mining Consultants (Canada) Company Limited. 2012. Don Javier copper molybdenum deposit N. L. 43-101 technical report [R]. Internal report. 23.

Beckinsale R D, Sanchez A W, Brook M, et al. 1985. Rb-Sr whole-rock isochron and K-Ar age determinations for the Coastal batholith of Peru[A]. In: Pitcher W S, Atherton M P, Cobbing E J, Beckinsale R D, eds. Magmatism at a plate edge: The Peruvian Andes: Glasgow, Blackie[C]. 250-260.

Carpio M. 2000. Inventarioy evaluacion de los recursos minerales de los Departamentos de Tacna, Moqueguay areas de Arequipay Puno [M]. Proyecto Multinacional Andino. Ingemmet, Lima, 35-68.

Chan X Q, Alan H. C and James K W L. 2003. ^{40}Ar-^{39}Ar ages of hypogene and supergene mineralization in the Cerro Verde-Santa Rosa porphyry Cu-Mo cluster, Arequipa, Peru[J]. Econ. Geol., 98: 1683-1696.

Chen N, Mao J W, Fan C L and Chen Y M. 2017. Alteration-mineralization characteristics and three-dimensional exploration model of Don Javier porphyry copper-molybdenum deposit, Peru[J]. Mineral Deposits, 36(3): 705-718(in Chinese with English abstract) .

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

Chen Y J, Ni P, Fan H R, Pirajno F, Lai Y, Su W C and Zhang H. 2007. Diagnostic fluid inclusions of different types hydrothermal gold deposits[J]. Acta Petrologica Sinica, 23(9): 2085-2108(in Chinese with English abstract).

Cline J S and Vanko D A. 1995. Magmatically generated saline brines related to molybdenum at Questa, New Mexico, USA[A]. In: Thompson J F H, ed. Mineralogical Association of Canada Short Course Volume 23, Magmas, fluids and ore deposits[M]. 153-174.

Dai J Z, Wang K Y, Mao J W and Yang Y C. 2006. Fluid Inclusions in the Gaojiapuzi silver deposit, Liaoning Province[J]. Acta Geologica Sinica, 80(7): 1055-1064 (in Chinese with English abstract).

Drummond S E and Ohmoto H. 1985. Chemical evolution and mineral deposition in boiling hydrothermal systems[J]. Econ. Geol., 80(1): 126-147.

Ge W C, Wu F Y, Zhou C Y and Zhang J H. 2007. Metallogenic epochs of the porphyry Cu, Mo deposits in the eastern Xingmeng orogenic belt and their geodynamic implications[J]. Chinese Science Bulletin, 52(20): 2407-2417(in Chinese with English abstract).

Instituto Geologico Mineroy Metalurgico. 2003. Estudio de los Recursos Minerales del Peru[M]. Peru, Lima. 12-25.

Jin W Q. 2010. On geological features and genesis study of the Cereana- Don Javier porphyry copper deposit in southern Peru [D]. Tutor: Gao G M. Changsha: Central South University. 30-43(in Chinese with English abstract).

Kamenetsky V S, Wolfe R C and Eggins S M.1999. Volatile exsolution at the Dinkidi Cu-Au porphyry deposit, Philippines: A melt-inclusion record of the initial ore-forming process[J]. Geology, 27(8): 691-694.

Kamenetsky V S, Davidson P and Mernaght P. 2002a. Fluid bubbles in meltinclusions and pillow-rim glasses: High-temperature precursors to hydrothermal fluids[J]? Chemical Geology, 183: 349-364.

Kamenetsky V S, Van Achterbergh E and Ryan C G. 2002b. Extreme chemical heterogeneity of granite-derived hydrothermal fluids: An example from inclusions in a single crystal of miarolitic quartz[J]. Geology, 30(5): 459-462.

Klemm L M, Pettke T and Heinrich C A. 2008. Fluid and source magma evolution of the Questa porphyry Mo deposit, New Mexico, USA[J]. Mineralium Deposita, 43(5): 533-552.

Li W C, Wang K Y, Yin G H, Qin D H, Yu H J, Xue S R and Wan D. 2013. Geochemical characteristics of ore-forming fluids and genesis of Hongshan copper deposit in northwestern Yunnan Province[J]. Acta Petrologica Sinica, 29(1): 270-282(in Chinese with English abstract).

Li X W, Wang K Y, Qian Y, Wang X Z, Chang L, Wei L M and Sun F Y. 2013. The geochemical characteristics of ore-forming fluids of Daheishan molybdenum deposit and its geological significance, Jilin Province[J]. Acta Petrologica Sinica, 29(9): 3173-3182(in Chinese with English abstract).

Liu B and Shen K. 1999. Fluid inclusion thermodynamics[M]. Beijing: Geological Publishing House. 1-290.

Lu H Z, Fan H R, Ni P, Ou G X, Shen K and Zhang W H. 2004. Fluid inclusions[M]. Beijing: Science Press. 1-234.

Phelps D. 2000. Geologia de los porfidos de cobre Cerro Verdey Santa Rosa, Arequipa, Peru: Arequipa, Departmento de Geologia [R] .

http://www.kcdz.ac.cn/

Sociedad Minera Cerro Verde S. A. 21.

Roedder E. 1984 . Fluid inclusions. reviews in mineralogy[M]. Michigan: Mineralogical Society of American.

Roedder E. 1992. Fluid inclusion evidence for immiscibility in magma-tic differentiation[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 56(1): 5-20.

Rui Z Y, ZhaoY M, Wang L S and Wang Y T. 2003. Role of volatile components in formation of skarn and porphyry deposits[J]. Mineral Deposits, 22(2): 141-148(in Chinese with English abstract) .

Rui Z Y, Hou Z Q, Li G M, Liu B, Zhang L S and Wang L S. 2006. A genetic model for the Gandise porphyry copper deposits[J]. Geological Review, 52(4): 459-466(in Chinese with English abstract).

Sillitoe R H. 2010. Porphyry copper systems[J]. Econ. Geol., 105(1): 3-41.

Wang K Y, Qing M, Sun F Y, Wan D, Wang L and Li X W. 2010. Study on the geochemical characteristics of ore-forming fluids and genesis of Xiaoxinancha gold-copper deposit, Jilin Province[J]. Acta Petrologica Sinica, 26(12): 3727-3734(in Chinese with English abstract).

Wang K Y, Wang L, Liu Z H and Wang J Y. 2008. Characteristics of fluid inclusions and origin of Gaojiapuzi silver deposit Liaoning Province[J]. Acta Petrologica Sinica, 24(9): 2085-2093(in Chinese with English abstract).

Webster J D. 2004. The exsolution of magmatic hydrosaline chloride liquids[J]. Chemical Geology, 210(1-4): 33-48.

Wu B. 2013. Peruvian Don Javier copper deposit metallogenic geological characteristics, economical development model and its promotion[D]. Tutor: Zhao P D. Beijing: China University of Geosciences. 31p(in Chinese with English abstract).

Wu B, Fang Z and Ye Z C. 2013 . Geological characteristics of Don Javier porphyry copper molybdenum deposit[J]. Mineral Deposits, 32(6):1159-1170 (in Chinese with English abstract).

Zhao H J, Lu M J, Qiu R Z and Ye J H. 2014. Discussion on the temporal and spatial distribution of copper deposits in the Andes Metallogenic Belt[C]. China Earth Science Joint Academic Annual Meeting, 2604-2607(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

陈念, 毛景文, 范成龙, 陈玉明 . 2017. 秘鲁 Don Javier 斑岩型铜钼矿床矿化蚀变特征及矿床三维勘查模型[J]. 矿床地质, 36(3): 705-718.

陈衍景, 倪培, 范洪瑞, PIRAJNO F, 赖勇, 苏文超, 张辉 . 2007. 不同类型热液金矿系统的流体包裹体特征[J]. 岩石学报, 23(9): 2085-2108.

陈衍景, 李诺 . 2009. 大陆内部浆控高温热液矿床成矿流体性质及其与岛弧区同类矿床的差异[J]. 岩石学报, 25(10): 2477-2508.

代军治, 王可勇, 毛景文, 杨言辰 . 2006. 辽宁高家堡子银矿床流体包裹体研究[J]. 地质学报, 80(7): 1055-1064.

葛文春, 吴福元, 周长勇, 张吉衡 . 2007. 兴蒙造山带东段斑岩型Cu, Mo 矿床成矿时代及其地球动力学意义[J]. 科学通报, 52(20): 2407-2417.

加拿大 AMEC 工程咨询公司 . 2012. Don Javier 铜钼矿床 N . I. 43-101 技术报告[R]. 内部资料 . 12-15.

金文强 . 2010. 秘鲁南部Cercana -Don Javier 斑岩铜矿地质特征及成因探讨(硕士学位论文)[D]. 导师:高光明 . 长沙:中南大学, 7-16.

李文昌, 王可勇, 尹光侯, 秦丹鹤, 余海军, 薛顺荣, 万多 . 2013. 滇西北红山铜矿床成矿流体地球化学特征及矿床成因[J]. 岩石学报, 29(1): 270-282.

李向文, 王可勇, 钱烨, 王献忠, 常亮, 韦烈民, 孙丰月 . 2013. 吉林大黑山钼矿床成矿流体地球化学特征及其地质意义[J]. 岩石学报, 29(9): 3173-3182.

刘斌, 沈昆 . 1999. 流体包裹体热力学[M]. 北京: 地质出版社 . l-290.

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 . 234 页 .

芮宗瑶, 赵一鸣, 王龙生, 王义天 . 2003. 挥发份在矽卡岩型及斑岩型矿床形成中的作用[J]. 矿床地质, 22(1):141-148.

芮宗瑶, 侯增谦, 李光明, 刘波, 张立生, 王龙生 . 2006. 冈底斯斑岩铜矿成矿模式[J]. 地质论评, 52(4):459-466.

王可勇, 王力, 刘正宏, 汪建宇 . 2008. 辽宁高家堡子大型银矿床流体包裹体特征及矿床成因[J]. 岩石学报, 24(9): 2085-2093.

王可勇, 卿敏, 孙丰月,万多, 王力, 李向文 . 2010. 吉林小西南岔金-铜矿床成矿流体地球化学特征及矿床成因研究[J]. 岩石学报, 26 (12): 3727-3734.

吴斌 . 2013. 秘鲁 Don Javier 铜矿开发模式与经济研究(硕士学位论文)[D]. 导师:赵鹏大 . 中国地质大学(北京), 35-51.

吴斌, 方针, 叶震超 . 2013. Don Javier 斑岩型铜钼矿床地质特征[J]. 矿床地质, 32(6): 1159-1170.

赵宏军, 卢民杰, 邱瑞照, 叶锦华 . 2014. 浅谈安第斯成矿带铜矿时空分布规律[C]. 中国地球科学联合学术年会 . 2604-2607.

http://www.kcdz.ac.cn/