

doi: 10.12029/gc20180504

金文强, 高光明, 高祥, 肖娟, 牛英杰, 王自力, 孙佳. 2018. 秘鲁南部 Don Javier 斑岩铜钼矿床岩石地球化学与岛弧成因[J]. 中国地质, 45(5): 931–942.

Jin Wenqiang, Gao Guangming, Gao Xiang, Xiao Juan, Niu Yingjie, Wang Zili, Sun Jia. 2018. Lithogeochemistry and island arc origins of Don Javier porphyry copper–molybdenum deposit in southern Peru[J]. *Geology in China*, 45(5): 931–942(in Chinese with English abstract).

# 秘鲁南部 Don Javier 斑岩铜钼矿床岩石地球化学与岛弧成因

金文强<sup>1</sup> 高光明<sup>2</sup> 高祥<sup>3</sup> 肖娟<sup>4</sup> 牛英杰<sup>1</sup> 王自力<sup>1</sup> 孙佳<sup>1</sup> 薛志波<sup>1</sup>

(1. 天津华北地质勘查局, 天津 300170; 2. 中南大学地球科学与信息物理学院, 湖南长沙 410083;

3. 神雾科技集团股份有限公司, 北京 102200; 4. 庄胜矿产资源集团有限公司, 北京 100052)

**摘要:**秘鲁南部古新世—始新世斑岩铜钼成矿带是安第斯成矿带的重要组成部分, 产出有大量世界级斑岩铜钼矿床, 最近勘探的 Don Javier 斑岩铜钼矿床是该成矿带中的又一重大发现。本文对 Don Javier 矿床的含矿斑岩、围岩的岩石学和地球化学进行了研究, 以探讨岩石成因和矿床形成的构造环境。主量元素和微量元素地球化学特征表明: ①含矿斑岩体属过铝质钙碱性系列英安斑岩, 围岩为过铝质钙碱性系列的花岗闪长岩, 且二者具有相同的物质来源; ②两类岩石均具有轻稀土富集, 富大离子亲石元素特征, 在球粒陨石标准化稀土配分曲线图上呈明显的右倾型, 左陡而右缓, 且二者均显示 Eu 负异常, 表明岩浆岩的成岩过程中有结晶分异作用或其他地质作用参与; ③含矿斑岩体和围岩形成于岛弧环境, 为经典岛弧岩石; ④Don Javier 铜钼矿床可能是在纳斯卡板块向南美板块俯冲, 熔融形成的钙碱性岩浆、岩浆弧走滑挤压环境的有利条件下形成。

**关键词:**地球化学; 微量元素; 构造环境; 斑岩铜钼矿床; Don Javier; 秘鲁

中图分类号: P618.41; P618.65; P585.3 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2018)05-0931-12

## Lithogeochemistry and island arc origins of Don Javier porphyry copper–molybdenum deposit in southern Peru

JIN Wenqiang<sup>1</sup>, GAO Guangming<sup>2</sup>, GAO Xiang<sup>3</sup>, XIAO Juan<sup>4</sup>,  
NIU Yingjie<sup>1</sup>, WANG Zili<sup>1</sup>, SUN Jia<sup>1</sup>, XUE Zhibo<sup>1</sup>

(1. Tianjin North China Geological Exploration Bureau, Tianjin 300170, China; 2. Central South University, Changsha 410083, Hunan, China; 3. Shenwu Technology Group Corporation, Beijing 102200, China; 4. Junefield Mineral Resource Holdings Co., Ltd., Beijing 100052, China)

**Abstract:** The belt of Palaeocene–Eocene copper–molybdenum porphyry deposits in southern Peru is an important part of the Andes metallogenic belt with a large number of world–class porphyry copper–molybdenum deposits. The recently explored Don Javier porphyry copper–molybdenum deposit is another major discovery in this belt. In this paper, studies of the petrology and

收稿日期: 2018–05–02; 改回日期: 2018–09–14

基金项目: 中国地质调查局项目(12120114010301)资助。

作者简介: 金文强, 1983年生, 男, 硕士, 工程师, 长期从事矿产资源勘查工作; E-mail: 232178920@qq.com。

geochemistry of ore-bearing porphyry and surrounding rocks were conducted to validate their petrogenesis and tectonic setting. According to major and trace element characteristics, the authors have reached some conclusions: ① The ore-bearing porphyry belongs to peraluminous calc alkaline series dacite porphyry, the surrounding rocks belong to peraluminous calc alkaline series of granodiorite, and both have the same material source. ② The two types of rocks are enriched in light rare earth element and large ion lithophile elements; in chondrite normalized rare-earth element pattern, they show obvious right deviation type characterized by left steep and right slow, and both show Eu negative anomaly, which indicates that the petrogenesis of magmatic rocks involved crystallization differentiation or other geological processes. ③ The ore-bearing porphyry and surrounding rocks were formed in an island arc environment, belonging to a classic rock island. ④ The Don Javier copper molybdenum deposit may have been formed in favourable conditions of the subduction of Nazca Plate to the South American plate, the melting of calc alkaline magma and the strike slip extrusion.

**Key words:** geochemistry; trace elements; tectonic environment; porphyry copper-molybdenum deposit; Don Javier; Peru

**About the first author:** JIN Wenqiang, male, born in 1983, master, engineer, engages in exploring and mining of mineral resources; E-mail: 232178920@qq.com.

**Fund support:** Supported by China Geological Survey Program (No. 12120114010301).

## 1 引 言

安第斯中部是全球第一大斑岩铜矿富集区,包括秘鲁南部、智利北部和阿根廷西北部(毛景文,2014),空间上从西部滨海向东陆内呈4个南北走向带的分布,分别为白垩纪氧化铁铜金矿(IOCg)、古新世—早始新世(66~52 Ma)斑岩铜矿、晚始新世—早渐新世(42~31 Ma)斑岩铜矿和中新世中期—早上新世(16~5 Ma)斑岩铜矿(Deckart et al.,2014)。Don Javier斑岩铜钼矿床位于秘鲁南部城市阿雷基帕(Arequipa)东南约28 km处。按照秘鲁能源矿产部成矿带划分,该矿床属于秘鲁南部古新世—始新世斑岩铜钼成矿带,该带历史上铜的产量为1600万t,占秘鲁铜产量的57%,铜资源量6300万t,占秘鲁铜资源量的29%(Bustamante et al., 2014),是秘鲁最重要的斑岩铜矿带,世界上知名的Cerro Verde、Cuajone、Quellaveco、Toquepala、Chapi、Cerro negro、Los Calatos等大型、超大型斑岩铜钼矿床均产于该带。据2013年9月AMC矿业咨询公司完成的Don Javier NI43-101报告显示,控制+推断资源量:铜矿石量30300万t;铜平均品位0.43%,金属量129.09万t;钼平均品位0.017%,金属量5.23万t;银平均品位2.64 g/t,金属量800.1 t(AMC,2013),达到了大型铜矿床规模,是秘鲁南部古新世—始新世斑岩铜钼成矿带中的又一重大发现。

本文以该矿床赋矿斑岩(英安斑岩)及围岩(花岗闪长岩)为研究对象,详细地研究了主量和微量元素特征,以期探讨矿区内与成矿有关的岩浆岩的

成因、形成环境和矿床形成的条件。

## 2 区域成矿背景

Don Javier斑岩铜钼矿床位于秘鲁南部古新世—始新世斑岩铜钼成矿带,该成矿带处于北西向的西科迪勒拉山构造岩浆带南段,为纳斯卡洋壳板块向南美大陆板块俯冲,形成的安第斯山陆缘造山带岩浆弧的组成部分(金文强,2010)。

中—新生代以来,纳斯卡板块持续向南美大陆俯冲造山,使得安第斯造山带岩浆活动异常活跃,在遭受洋壳向陆壳俯冲的汇聚作用影响,在纳斯卡板块俯冲作用下,形成了一系列近乎连续的钙碱性侵入超单元,由于大规模的构造—岩浆活动,使其中安第斯地壳明显增厚,伴随巨量的铜富集,形成了大量斑岩型铜钼矿床(William,2005;Acosta et al, 2008)。该矿床主要控矿岩体为耶拉旺巴—阿雷基帕(Yarabamba—Arequipa)超单元花岗闪长岩—英安斑岩(61 Ma)(Acosta et al,2008);主要控矿断裂为北西—南东向的印加—普丘(Incapuquio)断裂,该断裂控制了中酸性斑岩的侵入位置,控制着斑岩铜钼矿床的产出。

## 3 矿床地质及岩浆岩岩石特征

### 3.1 矿区地质

矿区出露的地层比较简单,主要为上侏罗统一—下白垩统Yura群Hualhuanl组石英砂岩、硅质岩和浅灰色页岩。

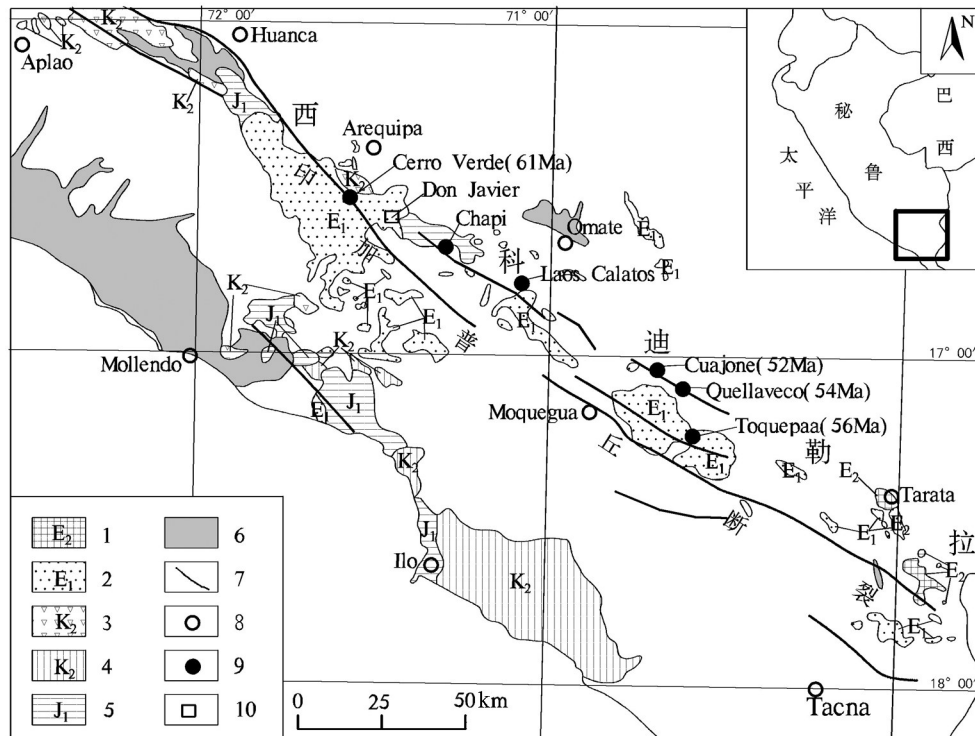


图1 古新世—始新世斑岩铜—钼成矿带中的主要矿床及地质构造环境和侵入岩(据 Acosta et al., 2008 修改)  
 1—始新世 Challaviento 侵入岩(40 Ma); 2—晚白垩—古新世 Yarabamba—Arequipa 超单元(61 Ma); 3—晚白垩世 Tiabaya 超单元(78 Ma);  
 4—晚白垩世 ILO 超单元(103 Ma); 5—早侏罗世 Punta Cales 超单元(190 Ma); 6—变质岩基底; 7—断层; 8—城市; 9—古新世—始新世斑岩  
 铜钼矿床; 10—Don Javier 矿床

Fig.1 Main deposits, geological setting and intrusions in the Paleocene–Eocene porphyry Cu–Mo belt  
 (modified after Acosta et al., 2008)

1–Eocene Challaviento intrusion (40 Ma); 2–Late Cretaceous–Paleocene Yarabamba–Arequipa super unit (61Ma); 3–Late Cretaceous Tiabaya super unit (78 Ma); 4–Late Cretaceous ILO super unit (103 Ma); 5–Early Jurassic Punta Cales super unit (190 Ma); 6–Metamorphic basement; 7–Fault; 8–City; 9–Paleocene Eocene porphyry Cu–Mo deposits; 10–Don Javier deposit

区内构造主要为北西向断裂,走向北西 290°~315°, 倾角 80°左右。从区域上看,北西向断层是印加—普丘断层系统的一部分,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,为区内主要的控岩和导矿构造;北东向断裂展布方向为北东 20°~30°(图 2),与北西向断裂交汇处控制了斑岩铜钼矿床的产出,为矿床的赋矿构造。

区内岩浆活动强烈,主要为耶拉旺巴(Yarabamba)侵入超单元,岩性为花岗闪长岩、石英闪长岩、闪长岩等,后期又有英安斑岩和隐爆角砾岩侵入。

### 3.2 矿床地质

Don Javier 矿床为一斑岩型铜钼矿床,矿体主要赋存英安斑岩中及外接触带的花岗闪长岩中,矿体主要由一个扁平椭球状盲矿体构成,北西—南东方向长逾 1230 m,北东—南西方向宽逾 750 m,其长

轴方向大致为北西 310°,往北东陡倾,向南东侧伏,其侧伏角在 30~45°(图 3)。

矿石类型主要为含黄铜矿、辉钼矿细脉、网状细脉矿石和浸染状矿石。

矿石结构为自形—半自形晶结构、他形细粒结构。主要构造为块状构造、浸染状构造、细脉状构造和团斑状构造。

矿床的主要蚀变类型有泥化、青磐岩化、绢云母化、绢英岩化、绿泥石化、硅化、钾长石化等蚀变,并有符合斑岩铜矿特征的蚀变分带现象。

矿石矿物主要为黄铜矿、辉钼矿、蓝辉铜矿、铜蓝、斑铜矿、辉铜矿、黝铜矿、孔雀石、方铅矿、闪锌矿等。

脉石矿物主要为长石(钾长石、钠长石和斜长石)和石英,其次为绿泥石、白云母,另外有少量的方解石、高岭石以及微量的石膏、金红石、楣石、磷

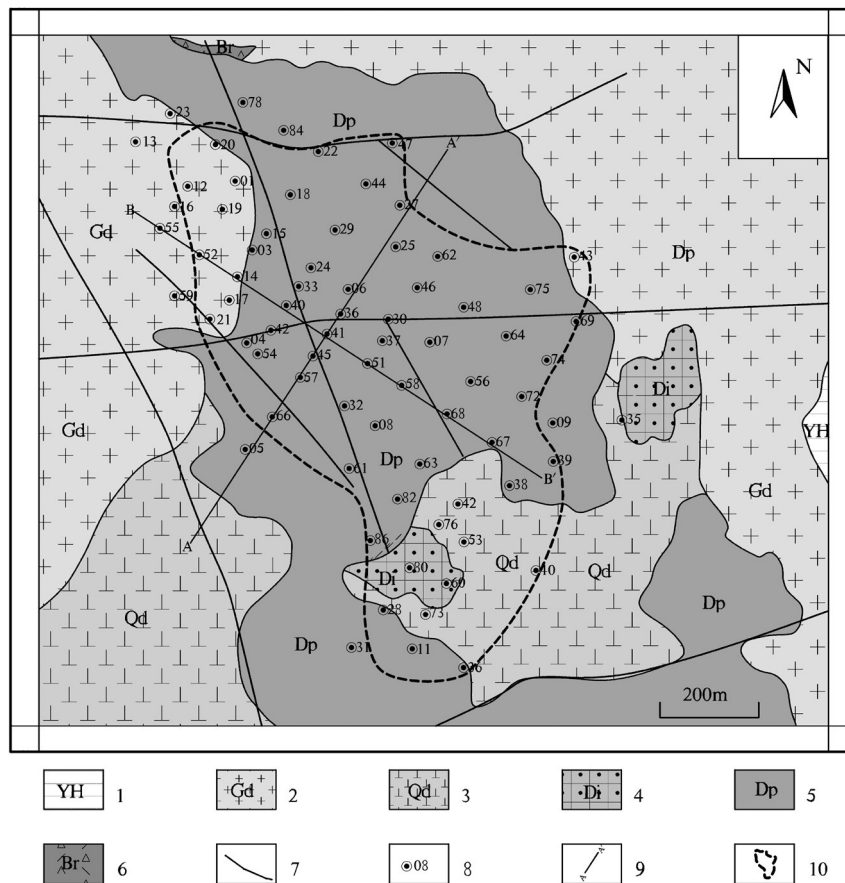


图2 Don Javier矿区地质地图

1—Yura群Hualhuanl组石英砂岩;2—花岗闪长岩;3—石英闪长岩;4—闪长岩;5—英安斑岩;6—隐爆角砾岩;7—断裂;8—钻孔位置;  
9—剖面线位置;10—矿体边界

Fig. 2 Geological map of the Don Javier Deposit

1—Yura Group Hualhuanl Formation sandstone; 2—Granodiorite; 3—Diorite; 4—Quartz diorite; 5—Dacite porphyry;  
6—Cryptoexplosion breccias; 7—Fault; 8—Drill hole; 9—Section; 10—Boundary of orebody

灰石、绿帘石、锆石等。

从赋矿岩体类型、矿化蚀变类型及分带、矿体结构构造等特征看,该矿床属于典型的斑岩型铜钼多金属矿床,从赋矿岩体的含矿特征和蚀变特征来看,英安斑岩与成矿关系密切,对成矿作用的影响最大,为本区矿床的形成提供主要热动力和热液。

### 3.3 岩浆岩岩石特征

区内岩浆耶拉旺巴(Yarambamba)侵入超单元,岩性为花岗闪长岩、石英闪长岩、闪长岩等,形成时代为晚白垩世(INGEMET, 2003)。在早期花岗质岩体侵入之后,安第斯山向上运动,形成了许多断裂破碎带和构造带,后期古新世—始新世英安斑岩侵入到早期花岗闪长岩中。

花岗闪长岩主要矿物为斜长石、正长石、石英;次

要矿物为绢云母、绿泥石、电气石等。斜长石分斑晶和基质,斑晶为自形—半自形矿物,交代残留结构,部分或完全被绢云母交代,粒径2~5 mm,绢云母化强烈,含量为10%。石英分为斑晶和基质,斑晶为半自形粒状矿物,呈港湾状、浑圆状,有被熔蚀的现象,粒径在0.6~2 mm,含量为30%。绢云母、斜长石的蚀变矿物,多呈鳞片状集合体附着在残留的斜长石矿物上,甚至完全交代斜长石。图4a:斜长石(Plg)被绢云母(Ser)交代,被石英(Qz)和正长石(Ort)等填隙物充填。标尺长0.154 mm(+);图4b:斜长石(Plg)斑晶被细粒石英(Qz)、正长石(Ort)斜长石(Plg)充填。

英安斑岩斑晶为颗粒较大的斜长石和石英;基质主要为细粒的斜长石、石英和绢云母,以及少量的不透明矿物。斑晶:斜长石斑晶为呈自形板状结

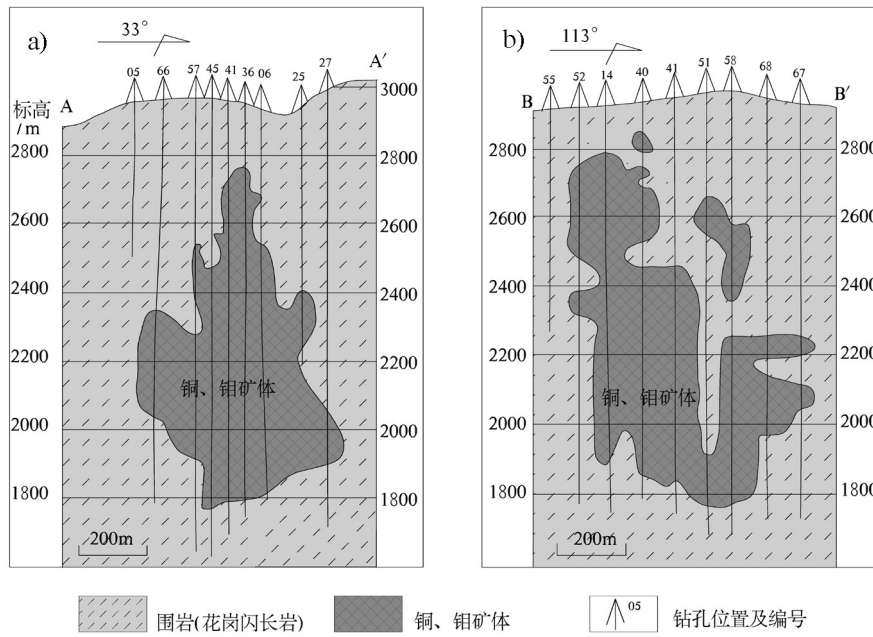


图3 Don Javier 矿区 A-A' 和 B-B'剖面图  
Fig.3 Geological Sections along A-A' and B-B' lines in Fig. 3

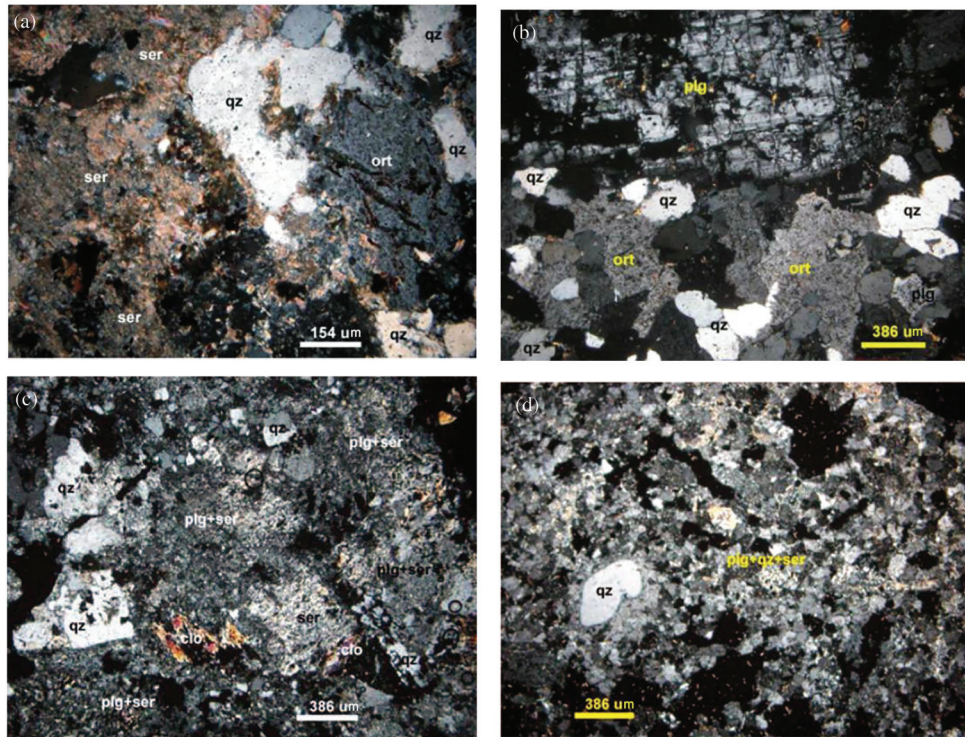


图4 花岗闪长岩和英安斑岩显微照片  
ort—正长石; plg—斜长石; qz—石英; ser—绢云母; clo—绿泥石  
Fig.4 Photomicrograph of granodiorite and dacite porphyry  
ort— Orthoclase; plg— Plagioclase; qz— Quartz; ser— Sericite; clo— Cchlorite

构,粒径多在2~5 mm,最大可达7.63 mm;具复合双晶和聚片双晶,常被绢云母部分或完全交代;石英斑晶,常被熔蚀呈港湾状、浑圆状,为交代残余矿物,粒径多在1~3 mm。图4c:斜长石(Plg)斑晶被绢云母交代,石英斑晶见溶蚀现象,绿泥石为铁镁矿物的蚀变矿物,标尺长0.386 mm(+);图4d:石英(Qz)斑晶被溶蚀,被基质矿物石英(Qz)、斜长石(Plg)和绢云母交代。

## 4 岩石地球化学特征

### 4.1 样品采集与分析方法

本次8件样品全部来源于Don Javier矿区钻孔中,其中3件样品为含矿斑岩体的围岩——花岗闪长岩,编号为33-364、F001和36-653,3件样品岩石新鲜,但因受英安斑岩侵入影响具绿泥石化、绢云母化蚀变;5件样品为含矿斑岩体英安斑岩,编号为17A-500、15-396、30A、14-483和21-405,5件样

品岩石新鲜,但普遍具钾长石化、绢云母化蚀变。

样品分析在澳实分析检测(广州)公司完成,主量元素分析:样品经过破碎、过筛直至200目以下,用偏硼酸锂熔融,然后用X荧光光谱仪分析,方法代码,ME-XRF06 X;微量元素分析:样品加工至200目以下,采用四酸(氢氟酸、硝酸、高氯酸、盐酸)消解法溶样,最后用等离子发射质谱进行定量分析,方法代码ME-ICP61,分析结果见表1。

### 4.2 主量元素

从表1、图5中可以看出花岗闪长岩和英安斑岩主量元素特征:

花岗闪长岩的SiO<sub>2</sub>含量在58.88%~61.56%,属于中酸性岩石,全碱含量(Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O)在6.86%~7.72%,里特曼指数 $\sigma$ 为2.44~3.64,两个样品属钙碱性系列,碱度指数AR为1.88~2.21,在Wright的AR-SiO<sub>2</sub>岩石化学分类图(图5a)上,样品点落入钙碱性范围,与里特曼指数基本一致;Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>含量普遍较高,在

表1 花岗闪长岩、英安斑岩主量元素分析数据(10<sup>-2</sup>)及相关参数  
Table 1 Major element compositions (10<sup>-2</sup>) and related parameters of granodiorite and dacite porphyry

样号	花岗闪长岩			英安斑岩				
	33-364	F001	36-653	17A-500	15-396	30A	14-483	21-405
SiO <sub>2</sub>	61.56	59.18	58.88	68.22	57.67	63.16	65.69	61.68
TiO <sub>2</sub>	0.68	0.66	0.68	0.46	0.63	0.47	0.49	0.66
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15.61	15.7	15.83	14.88	13.7	14.81	14.51	15.39
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.10	2.27	2.84	0.89	3.28	1.91	2.85	2.18
FeO	4.46	3.26	4.08	1.28	4.73	2.75	4.10	3.14
MnO	0.12	0.7	0.26	0.21	0.54	0.02	0.08	0.13
MgO	1.97	2	2.8	1.82	1.03	1.07	0.79	2.35
CaO	2.24	3.16	4.91	2.8	2.68	2.08	0.18	2.67
Na <sub>2</sub> O	2.92	0.5	3.16	4.28	0.23	1.33	0.09	2.94
K <sub>2</sub> O	3.94	6.6	4.56	1.53	4.3	3.44	4.43	2.27
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.17	0.18	0.15	0.06	0.75	0.14	0.13	0.15
总量	96.76	94.21	98.15	96.43	89.54	91.18	93.33	93.55
(DI)	70.11	66.68	63.18	76.14	65.42	72.96	76.43	67.94
A/NK	1.72	1.97	1.56	1.71	2.72	2.51	2.94	2.11
A/CNK	1.19	1.15	0.83	1.08	1.38	1.53	2.75	1.27
SI	12.02	13.67	16.06	18.58	7.63	10.22	6.47	18.28
AR	1.97	2.21	1.88	1.98	1.76	1.79	1.89	1.81
$\sigma$	2.44	2.87	3.64	1.31	1.19	1.04	0.86	1.35
R1	1987	2183	1560	2691	2821	3064	3333	2538
R2	665	791	993	707	678	621	368	753

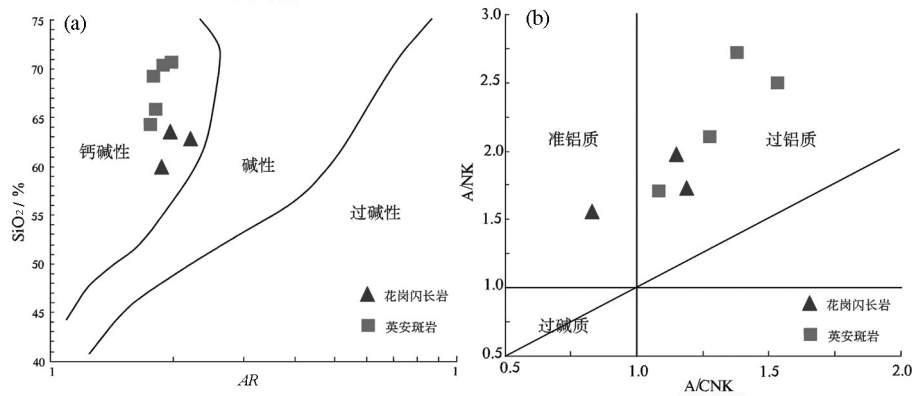


图5 Don Javier 矿床花岗闪长岩和英安斑岩主量元素相关图解  
a—AR—SiO<sub>2</sub>图解(据 Wright, 1969); b—A/CNK—A/NK 图解(据 Maniar, 1989)  
Fig.5 Major elements diagram of granodiorite and dacite porphyry from the Don Javier deposit  
a—SiO<sub>2</sub>—AR diagram (after Wright, 1969); b—A/CNK—A/NK diagram (after Maniar, 1989)

15.61%~15.83%; 铝饱和度 A/CNK 范围为 0.83~1.19, 两个样品大于 1, 属铝过饱和系列, 在 Maniar 的 A/CNK—A/NK 图解(图 5b)上, 两个样品点落入过铝质岩石范围内, 与铝饱和度指数一致; 分异指数 *DI* 为 63.18~71.11; 固结指数 12.02~16.06。

英安斑岩的 SiO<sub>2</sub> 含量在 57.67%~68.22%, 属于中酸性岩石, 全碱含量 (Na<sub>2</sub>O + K<sub>2</sub>O) 在 4.52%~5.21%, 里特曼指数  $\sigma$  为 0.86~1.35, 属钙碱性系列, 碱度指数 *AR* 为 1.76~1.98, 在 Wright 的 *AR*—SiO<sub>2</sub> 岩石化学分类图(图 5a)上, 样品点全部落入钙碱性范围, 与里特曼指数一致; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量普遍较高, 在 13.7%~15.39%; 铝饱和度 A/CNK 范围为 1.08~2.75, 全部大于 1, 属铝过饱和系列, 在 Maniar 的 A/CNK—A/NK 图解(图 5b)上, 4 个样品点基本都落入过铝质岩石范围内, 与铝饱和度指数一致; 分异指数 *DI* 为 65.42~76.43; 固结指数 6.47~18.58。

#### 4.3 微量元素

Don Javier 矿床花岗闪长岩和英安斑岩的稀土元素数据(表 2, 图 6a、6b), 两种岩石总体都具有以下特点: 轻稀土元素相对富集且分异明显; 重稀土元素相对亏损, 分异不显著;  $\delta$ Eu 值都小于 1。两类岩石稀土元素特征分别如下:

花岗闪长岩稀土元素总量较高, 且富集轻稀土,  $\sum \text{REE} = 125.33 \times 10^{-6}$  ( $104.77 \times 10^{-6} \sim 157.16 \times 10^{-6}$ ),  $\sum \text{LREE} = 92.23 \times 10^{-6}$  ( $80.55 \times 10^{-6} \sim 115.32 \times 10^{-6}$ ),  $\sum \text{HREE} = 32.29 \times 10^{-6}$  ( $24.22 \times 10^{-6} \sim 41.84 \times 10^{-6}$ ), LREE/HREE 范围为 2.56~3.33, La<sub>N</sub>/Yb<sub>N</sub> 的变化范围

在 5.9~8.94,  $\delta$ Eu 值为 0.70 (0.58~0.78), Eu 异常明显。

英安斑岩稀土元素总量较高, 同样富集轻稀土,  $\sum \text{REE} = 182.06 \times 10^{-6}$  ( $70.13 \times 10^{-6} \sim 446.15 \times 10^{-6}$ ),  $\sum \text{LREE} = 133.78 \times 10^{-6}$  ( $55.47 \times 10^{-6} \sim 318.14 \times 10^{-6}$ ),  $\sum \text{HREE} = 147.92 \times 10^{-6}$  ( $14.66 \times 10^{-6} \sim 128.01 \times 10^{-6}$ ), LREE/HREE 范围分别为 2.26~3.78, La<sub>N</sub>/Yb<sub>N</sub> 的变化范围在 3.78~10.21,  $\delta$ Eu 值为 0.58 (0.21~1.03), Eu 异常明显。

花岗闪长岩表现为相对富集 K、Rb、U、Th、Hf 等元素, 相对亏损 Nb、Ta、P、Ti 元素, 同时具有高 Sr、低 Yb 的特点(表 2, 图 6c), Sr =  $381 \times 10^{-6}$  ( $279 \times 10^{-6} \sim 508 \times 10^{-6}$ ), Yb =  $1.90 \times 10^{-6}$  ( $1.33 \times 10^{-6} \sim 2.57 \times 10^{-6}$ )。英安斑岩同样表现为相对富集 K、Rb、U、Th、Hf 等元素, 相对亏损 Nb、Ta、P、Ti 元素特点(表 2, 图 6d)。

## 5 岩石成因及形成环境探讨

### 5.1 岩石成因

花岗闪长岩和英安斑岩主量元素地球化学特征表明, 两者都为过铝质钙碱性系列岩石。

花岗闪长岩和英安斑岩球粒陨石标准化稀土配分曲线(图 6a、6b)显示两者都呈明显的右倾型, 左陡而右缓特征, La<sub>N</sub>/Yb<sub>N</sub> 的变化范围分别在 5.9~8.94、3.78~10.21, Ce<sub>N</sub>/Yb<sub>N</sub> 的变化范围分别在 5.1~7.23、3.9~8.84, 轻稀土元素富集且分异明显, 重稀土元素亏损且分异不明显, Eu 呈负异常均说明, 其存在明显的分异作用或其他地质过程(张东阳, 张招崇, 2010)。

由微量元素原始地幔标准化蛛网图(图 6c、6d)

表2 花岗闪长岩、英安斑岩微量元素分析数据( $10^{-6}$ )及相关参数  
 Table 2 Trace element compositions ( $10^{-6}$ ) and related parameters of granodiorite and dacite porphyry

样号	花岗闪长岩			英安斑岩				
	33-364	F001	36-653	17A-500	15-396	30A	14-483	21-405
La	23.8	17.6	15.8	12.4	55.3	19.5	21.4	15
Ce	51.8	37.1	35.6	26.6	142	44	46.9	40.3
Pr	6.57	4.45	4.86	3.05	19.7	5.71	5.72	6.2
Nd	26.3	17	20.2	10.9	81.9	23.5	22.2	27.2
Sm	5.81	3.55	4.51	1.91	18.05	4.64	4.21	6.26
Eu	1.04	0.85	1.06	0.61	1.19	0.85	0.63	1.06
Gd	4.91	2.94	3.97	1.63	15.65	3.85	3.16	4.98
Tb	0.76	0.44	0.59	0.24	2.35	0.53	0.5	0.76
Dy	4.41	2.5	3.4	1.4	13.65	2.92	2.85	4.45
Ho	0.91	0.49	0.67	0.29	2.61	0.55	0.57	0.88
Er	2.6	1.41	1.92	0.9	7.48	1.54	1.68	2.58
Tm	0.4	0.21	0.29	0.15	1.06	0.21	0.27	0.4
Yb	2.57	1.33	1.81	1.07	6.4	1.29	1.76	2.68
Lu	0.38	0.2	0.27	0.18	0.91	0.18	0.26	0.39
Y	24.9	14.7	19.1	8.8	77.9	17.6	16.5	25.4
$\Sigma$ REE	157.16	104.77	114.05	70.13	446.15	126.87	128.61	138.54
$\Sigma$ LREE	115.32	80.55	82.03	55.47	318.14	98.2	101.06	96.02
$\Sigma$ HREE	41.84	24.22	32.02	14.66	128.01	26.87	27.55	42.52
LREE/HREE	2.76	3.33	2.56	3.78	2.49	3.43	3.67	2.26
$La_N/Yb_N$	6.26	8.94	5.9	7.83	5.84	10.21	8.22	3.78
$Ce_N/Yb_N$	5.22	7.23	5.1	6.44	5.75	8.84	6.91	3.9
$\delta Eu$	0.58	0.78	0.75	1.03	0.21	0.6	0.51	0.56
Rb	142	258	32.1	64.9	169	132.5	222	111
Ba	763	1185	99.8	208	1005	603	698	264
Th	31.4	24.8	9.83	24.6	35.9	9.55	25.8	27.1
U	4.46	6.01	2.48	4.57	6.41	1.75	4.44	5.88
K	31200	52900	4500	12400	34900	26700	34700	17800
Ta	0.6	0.6	0.3	0.4	0.4	0.3	0.4	0.5
Nb	7.6	8.5	4.2	4.5	6.3	4.6	5.1	7.5
Pb	28	67	35	45	38	21	112	45
Sr	357	279	508	401	152	185	12	260
P	640	780	700	260	3380	580	590	690
Zr	279	250	127	201	211	121	194	256
Hf	8.2	7.1	3.7	6.2	6.1	3.5	5.9	7.1
Ti	3200	3700	3700	2600	3500	1300	2400	3000
Zr/Hf	34.02	35.21	34.32	32.42	34.59	34.57	32.88	36.06
Y/To	27.36	30	28.51	30.34	29.85	32	28.95	28.86
Nb/Ta	12.67	14.17	14	11.25	15.75	15.33	12.75	15



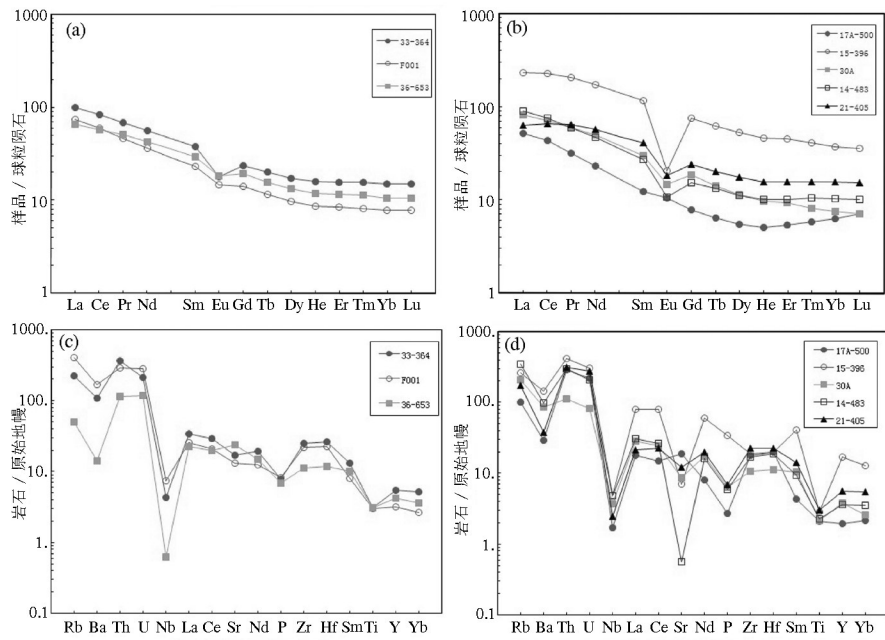


图6 Don Javier 矿床花岗闪长岩和英安斑岩稀土元素球粒陨石标准化配分图解(a,b)和微量元素原始地幔标准化蛛网图(c,d) (球粒陨石和原始地幔据 Sun et al, 1989)

Fig.6 Chondrite-normalized REE patterns(a,b), primitive mantle normalized trace element spider diagrams(c,d) of granodiorite and dacite porphyry from the Don Javier deposit (normalization values after Sun et al, 1989)

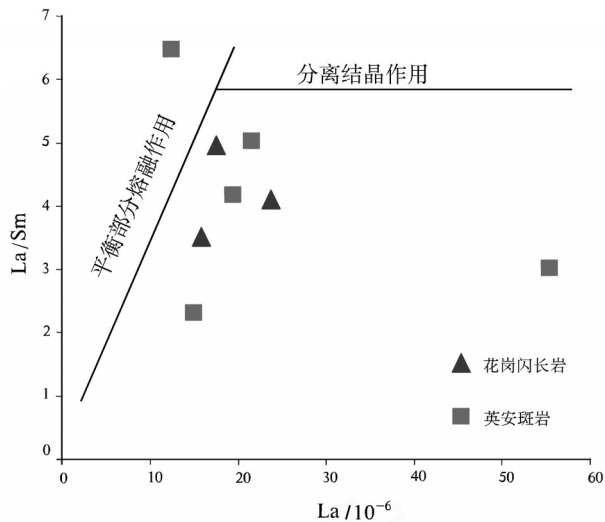


图7 平衡部分熔融作用与结晶分离作用(据赵振华等, 1982)  
Fig.7 Equilibrium partial melting and crystallization separation (after Zhao, 1982)

可知, 无论是花岗闪长岩还是英安斑岩, 总体富集大离子亲石元素(K、Rb、Ba), 而相对亏损高场强元

素(Nb、Ta、P、Ti), 这种大离子亲石元素(LILE)和高场强元素(HFSE)之间的解耦是火山弧花岗岩的典型特征(Winter, 2001), 特别是Ta、Nb的负异常, 进一步反映了本区具有火山弧岩石典型的特征(Jahn et al., 1999), 并暗示着源区有金红石、榍石等矿物的残留, 因为这些矿物是强烈富集Ta、Nb(Green and Pearson, 1986), 这可能是俯冲作用致使含水流体相携带LREE等元素进入地幔楔形区的结果(李昌年, 1992), 图7也说明了花岗闪长岩还是英安斑岩形成于平衡部分熔融作用。区域上遭受纳斯卡洋壳向陆壳俯冲的汇聚作用影响下形成一系列钙碱性岩浆, 综上认为花岗闪长岩和英安斑岩为纳斯卡洋壳向南美大陆俯冲部分熔融的产物。

### 5.2 形成环境探讨

如前文所述, 研究区的含矿斑岩(英安斑岩)和围岩(花岗闪长岩)有着相同的源区物质组成, 且两种岩石都具有典型的火山弧特征。在(La/Yb)<sub>N</sub>-Yb<sub>N</sub>、Sr/Y-Yb 判别图上(图8a、8b)花岗闪长岩和英安斑岩基本都落入经典岛弧岩石范围内。同样在Pearce 花岗岩类微量元素图解中(图9), 花岗闪长岩和英安斑岩

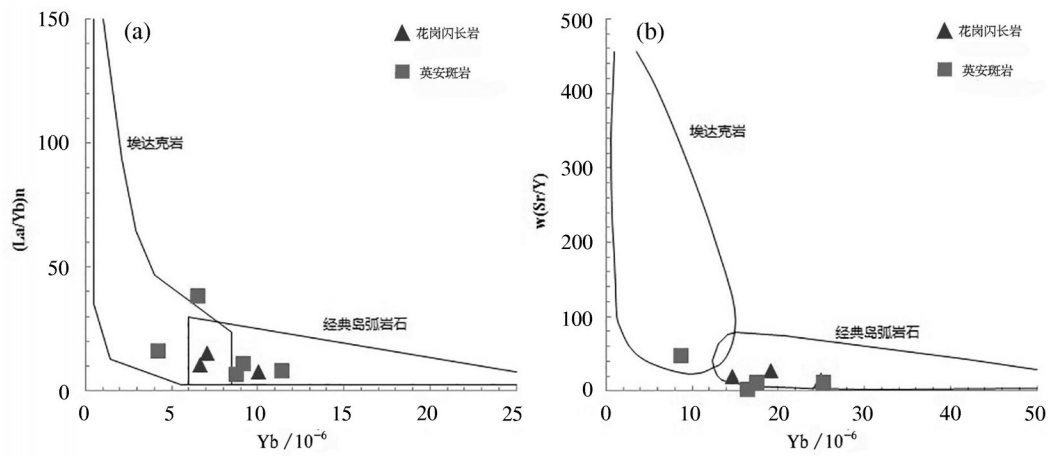


图8 Don Javier 矿床花岗闪长岩和英安斑岩(La/Yb)<sub>N</sub>-Yb<sub>N</sub>、Sr/Y-Y 判别图解(据 Defant et al,1990)  
Fig.8 (La/Yb)<sub>N</sub>-Yb<sub>N</sub> and Sr/Y-Y diagrams of granodiorite and dacite from the Don Javier deposit (after Defant et al,1990)

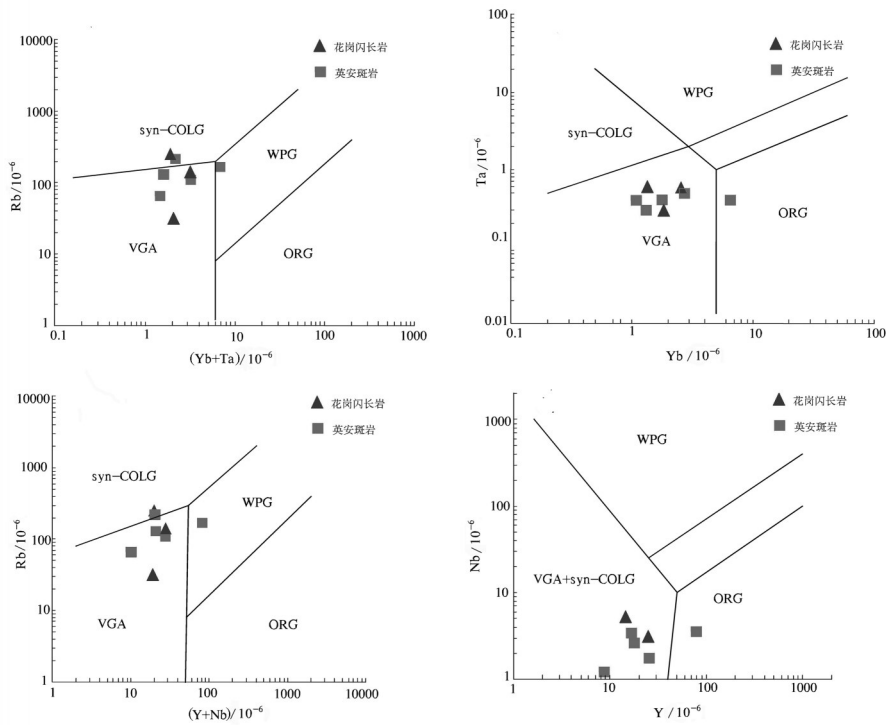


图9 Don Javier 矿床花岗闪长岩和英安斑岩 Rb-(Yb+Ta)、Ta-Yb、Rb-(Y+Nb)、Nb-Y 判别图解(底图据 Pearce et al.,1984)  
WPG—板内花岗岩; VAG—火山弧花岗岩; Sys-COLG—同碰撞花岗岩; ORG—大洋中脊斜长花岗岩  
Fig.9 Rb-(Yb+Ta), Ta-Yb, Rb-(Y+Nb) and Nb-Y for tectonic siting of granodiorite and dacite from the Don Javier deposit (after Pearce et al., 1984)  
WPG—Intraplate granite; VAG—Volcanic arc granite; Sys-COLG—syn-collisional granite; ORG—Ocean ridge granite

基本都落入火山弧花岗岩范围内,说明了本区花岗闪长岩和英安斑岩都形成于岛弧环境。

在 SiO<sub>2</sub>-lgCa/(Na<sub>2</sub>O +K<sub>2</sub>O)图解上(图 10), 花岗

闪长岩和英安斑岩都投影在挤压型范围,说明二者形成于挤压环境。前人研究认为与斑岩铜矿成矿有关的岩体是洋壳在俯冲过程中部分熔融的产物

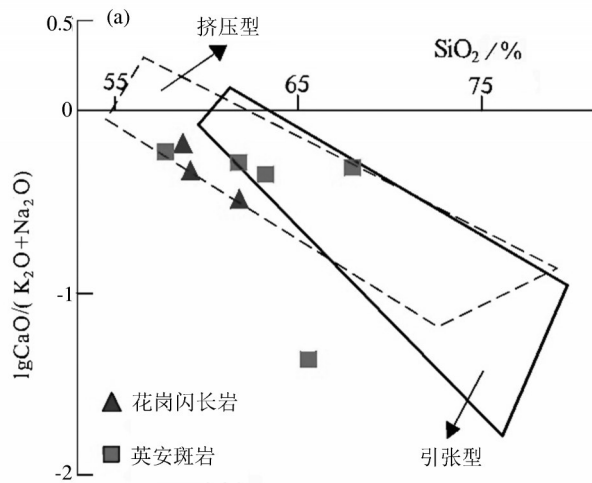


图 10 Don Javier 矿床花岗岩类的  $\text{SiO}_2 - \lg\text{Ca}/(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$  (据 Brown, 1982)

Fig. 10  $\text{SiO}_2 - \lg\text{Ca}/(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$  diagram of granitoids from Aolunhua porphyry copper-molybdenum deposit (after Brown, 1982)

并认为斑岩铜矿形成于挤压环境,南美古新世—始新世岩浆弧在挤压走滑环境下形成了一系列大型、超大型斑岩铜矿(Sillitoe, 1972, 1998)。Don Javier 斑岩铜钼矿床可能就是在南美古新世—始新世火山弧走滑挤压的有利环境下形成的。

## 6 结 论

(1) 含矿斑岩体属过铝质钙碱性系列英安斑岩;围岩为过铝质钙碱性系列的花岗闪长岩和二长岩,且二者具有相同的物质来源。

(2) 英安斑岩和花岗闪长岩都具轻稀土元素相对富集,稀土球粒陨石标准配分曲线为右倾,“V”字形,负钕异常特征明显,表明岩浆岩的成岩过程中有结晶分异作用或其他地质作用参与。

(3) 花岗闪长岩和英安斑岩为纳斯卡洋壳向南美大陆俯冲部分熔融的产物。

(4) 含矿斑岩体和围岩形成于岛弧环境,为经典岛弧岩石,而非埃达克岩。

(5) 本文认为 Don Javier 铜钼矿床可能是在古新世—始新世纳斯卡板块向南美板块俯冲,熔融形成的钙碱性岩浆、岩浆弧走滑挤压环境的有利条件下形成。

**致谢:**野外地质工作得到了庄胜矿产资源集团有限公司总经理徐跃东、地勘院院长肖娟和秘鲁地质专家和同行的热心帮助;审稿专家和编辑老师在本文修改过程中提出了建设性意见,在此一并表示衷心的感谢!

## Reference

- Acosta H, Quispe J, Santiesteban A. and Acosta J. 2008. Épocas metalogénicas y tipos de yacimientos metálicos en la margen occidental del Sur del Perú: latitudes 14's - 18's. Resúmenes extendidos XIV Congreso Peruano de Geología [C]. 273.
- AMC Mining Consultants(Canada) Ltd. 2013. Don Javier Cu-Mo project Arequipa, Peru Technical Report[R]. 75-76
- Beijing General Research Institute of Mining & Metallurgy. 2013. Research Report on Mineral Processing Technology of Don Javier Copper Molybdenum Ore[R]. 3-25(in Chinese).
- Bustamante A, Cardozo M, Acosta J. 2014. Overview of the main Peruvian Copper Porphyry Belts and Deposits[R]. 2-27
- Brown G C. 1982. Calc-alkaline intrusive rocks their diversity, evolution, and relation to volcanic arcs[C]//Thorpe R S(ed.). Andesites-orogenic Andesites and Related Rocks. New York: John Wiley & Sons, 437-464.
- Deckart K, Silva W, Spröhnle C, Vela I. 2014. Timing and duration of hydrothermal activity at the Los Bronces porphyry cluster: An update[J]. Mineralium Deposita, 49:535-546.
- Defant M J, Drummond M S. 1990. Derivation of some modern arc magmas by of young subducted lithosphere[J]. Nature, 347:662-665.
- Dela Roche H, Leterrier J, Grandclaude P. 1980. A classification of volcanic and plutonic rocks using R1-R2 diagram and major-element analyses -- Its relationships with current nomenclature[J]. Chemical Geology, 29: 183-210.
- Green T H, Pearson N J. 1986. Rare-earth element partitioning between sphene and coexisting silicate liquid at high pressure and temperature[J]. Chemical Geology, 55(1/2):105-119.
- Instituto Geológico Minero y Metalúrgico(INGEMET). Estudio de los Recursos Minerales del Perú[R]. 2003:12-25.
- Jahn B M, Wu F Y, Lo C H. 1999. Crust-mantle interaction induced by deep subduction of the continental crust: Geochemical and Sr-Nd isotopic evidence from post-collisional mafic-ultramafic intrusions of the northern Dabie complex central China[J]. Chemical Geology, 157(1/2):119-146.
- Jin Wenqiang. 2010. On Geological Features and Genesis Study of the Cercana-Don Javier Porphyry Copper Deposit in Southern Peru (dissertation for master degree) [D]. Changsha: Central South University, 7-16(in Chinese with English abstract).
- Le Bel L M. 1985. Mineralization in the Arequipa segment: The porphyry Cu deposit of Cerro Verde/Santa Rosa[C]//Pitcher W S, Atherton M P, Cobbing E J, Beckinsale R D (eds.). Magma-tism at

- a plate edge. The Peruvian Andes. New York: JohnWiley and Sons Inc. 250–260.
- Li Changnian. 1992. Trace elements Petrology of Igneous Rocks[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 74–117.
- Li Zhidan, Chen Junqiang, Wang Jiaying, Wen Sibao, Xiao Zhibin, Tang Chao, Liu Xing, Yu Reng'an. 2016. Geology and geochemistry of the Gonghudong skarn copper deposit in Darhan Muminggan Joint Banner, Inner Mongolia and its significance[J]. *Geology in China*, 43(4): 1367–1384(in Chinese with English abstract).
- Maniar P D, Piccoli P M. 1989. Tectonic discrimination of granitoids[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 101(5): 635–643.
- Mao Jingwen, Luo Maocheng, Xie Guiqing, Liu Jun, Wu Senghua. 2014. Basic characteristics and new advances in research and exploration on porphyry copper deposits [J]. *Acta Geologica Sinica*, 88(12): 2156–2169 (in Chinese with English abstract).
- Middlemost E A K. 1994. Naming materials in the magma/igneous rock system[J]. *Earth Science Reviews*, 37(3/4): 215–224.
- Pearce J A, Harris N B W, Tindle A G. 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks[J]. *Journal of Petrology*, 25: 956–983.
- Sun S S, McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes[C]// Saunders A D, Norry M J(eds.). *Magmatism in the Ocean Basins*. Geological Society, London, Special Publications, 42: 313–345.
- Sun Zhuanrong, Dong Guochen, Zhao Zuoxin, Wang Weiqing, Liu Shengqiang. 2017. Petrological, geochemical and geochronological features of Lailishan granitoids in western Yunnan and their genesis of partial melting of crustal source[J]. *Geology in China*, 44(6): 1140–1158(in Chinese with English abstract).
- Thompson R N. 1982. Magmatism in the British Tertiary volcanic province, Scotland[J]. *Geology*, 18: 49–107.
- Wei Shaogang, Song Yang, Tang Juxing, Gao Ke, Feng Jun, Li Yanbo, Hou Lin. Geochronology, geochemistry and petrogenesis of quartz diorite porphyrite from the Sena copper (gold) deposit, Tibet[J]. *Geology in China*, 2016, 43(6): 1894–1912(in Chinese with English abstract).
- William M V. 2005. The Late Paleozoic–Early Mesozoic Chocolate Formation of southern Peru: New data and interpretations[C]//The International Symposium On Andean Geodynamics, Extended Abstracts, 490–492.
- Winter J D. 2001. An Introduction to Igneous and Metamorphic Petrology[M]. New Jersey: Prince Hall, 1–697.
- Wright J B. 1969. A simple alkalinity ratio and its application to questions of non-orogenic granite genesis[J]. *Geological Magazine*, 106: 370–384.
- Zhang Dongyang, Zhang Zhaocong, Xue Chunji, Ai Yu. 2010. Petrology and geochemistry of the ore-forming porphyries in the Lamasu copper deposit, western Tianshan: Implications for petrogenesis[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(3): 680–694(in Chinese with English abstract).
- Zhao Zhenhua. 1982. Research method of rare earth element geochemistry[J]. *Geology and Geochemistry*, (1): 26–33(in Chinese).

### 附中文参考文献

- 金文强. 2010. 秘鲁南部 Cercana–Don Jovier 斑岩铜矿地质特征及成因探讨(硕士学位论文)[D]. 长沙: 中南大学, 7–16.
- 李昌年. 1992. 火成岩微量元素岩石学[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 74–117.
- 李志丹, 陈军强, 王佳莹, 文思博, 肖志斌, 汤超, 赵行, 俞初安. 2016. 内蒙古达拉旗官忽洞矽卡岩型铜矿床地质、地球化学特征及其意义[J]. *中国地质*, 43(4): 1367–1384.
- 毛景文, 罗茂澄, 谢桂青, 刘军, 吴胜华. 2014. 斑岩铜矿床的基本特征和研究勘查新进展[J]. *地质学报*, 88(12): 2156–2169.
- 孙转荣, 董国臣, 赵作新, 王伟清, 刘圣强. 2017. 滇西来利山花岗岩年代学、地球化学特征及其壳源部分熔融成因[J]. *中国地质*, 44(6): 1140–1158.
- 韦少港, 宋扬, 唐菊兴, 高柯, 冯军, 李彦波, 候淋. 2016. 西藏色那铜(金)矿床石英闪长玢岩年代学、地球化学与岩石成因[J]. *中国地质*, 43(6): 1894–1912.
- 张东阳, 张招崇, 薛春纪, 艾羽. 2010. 西天山喇嘛苏铜矿成矿斑岩的岩石学、地球化学特征及成因探讨[J]. *岩石学报*, 26(3): 680–694.
- 赵振华. 1982. 稀土元素地球化学研究方法[J]. *地质地球化学*, (1): 26–33.