

杨毅, 张志, 唐菊兴, 等. 西藏多龙矿集区波龙斑岩铜矿床蚀变与脉体系统[J]. 中国地质, 2015, 42(3): 759-776.

Yang Yi, Zhang Zhi, Tang Juxing, et al. Mineralization, alteration and vein systems of the Bolong porphyry copper deposit in the Duolong ore concentration area, Tibet[J]. Geology in China, 2015, 42(3): 759-776(in Chinese with English abstract).

## 西藏多龙矿集区波龙斑岩铜矿床蚀变与脉体系统

杨毅<sup>1</sup> 张志<sup>1</sup> 唐菊兴<sup>2</sup> 陈毓川<sup>2</sup> 李玉彬<sup>3</sup>

王立强<sup>2</sup> 李建力<sup>3</sup> 高轲<sup>1</sup> 王勤<sup>1</sup> 杨欢欢<sup>1</sup>

(1. 成都理工大学地球科学学院, 四川 成都 610059; 2. 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037;

3. 西藏自治区地质矿产勘查开发局第五地质大队, 青海 格尔木 816000)

**摘要:** 波龙铜矿床是多龙矿集区继多不杂斑岩铜矿床后发现的又一大型斑岩铜矿床。文章在详细的野外地质编录及室内镜下鉴定基础上, 对波龙斑岩矿床蚀变与脉体系统进行系统梳理。结果表明, 波龙矿床发育明显的蚀变分带, 从深部(或核部)往浅部(或外侧)具有钾化带→黄铁绢英岩化带→泥化叠加黄铁绢英岩化带→角岩化带(或外侧的青磐岩化带)的蚀变分带特征。共识别出 M、A、B、D 4 种脉体类型, 以 A、B 脉最为发育。与成矿关系密切的主要为钾化带、黄铁绢英岩化带及 A、B 脉。与国内外典型斑岩矿床蚀变特征相比, 波龙矿床蚀变特征总体与“二长岩”模式相似, 特征矿物组合与阿根廷 Bajo de la Alumbrera 矿床, 国内驱龙铜矿、多不杂铜矿等都具有相似之处。但波龙矿床从钾化带至黄铁绢英岩化带都大量发育的稀疏-稠密浸染状及脉状磁铁矿是该矿床的独有特色。

**关键词:** 蚀变; 脉体; 斑岩铜矿; 波龙; 多龙矿集区

中图分类号: P618.41 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2015)03-0759-18

## Mineralization, alteration and vein systems of the Bolong porphyry copper deposit in the Duolong ore concentration area, Tibet

YANG Yi<sup>1</sup>, ZHANG Zhi<sup>1</sup>, TANG Ju-xing<sup>2</sup>, CHEN Yu-chuan<sup>2</sup>, LI Yu-bin<sup>3</sup>, WANG Li-qiang<sup>2</sup>,  
LI Jian-li<sup>3</sup>, GAO Ke<sup>1</sup>, WANG Qin<sup>1</sup>, YANG Huan-huan<sup>1</sup>

(1. Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China; 2. MLR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, CAGS, Beijing 100037, China; 3. No. 5 Geological Party, Tibet Bureau of Geology and Mineral Resources Exploration, Golmud 816000, Qinghai, China)

**Abstract:** The Bolong copper deposit is another large-size porphyry deposit discovered after the Duobuza porphyry copper deposit

收稿日期: 2014-06-30; 改回日期: 2014-09-19

基金项目: 青藏专项优选项目(12120113037400)、国家自然科学基金项目(41172077)及国家重点基础研究发展规划“973”项目(2011CB403103)联合资助。

作者简介: 杨毅, 男, 1983 年生, 博士生, 主要从事矿床学、矿产普查与勘探工作; E-mail: 290744982@qq.com。

通讯作者: 张志, 男, 1985 年生, 博士生, 主要从事青藏高原地质矿产研究; E-mail: tancer@qq.com。

in the Duolong ore district. In this paper, the authors systematically investigated the alterations and vein systems in the Bolong copper deposit based on field geological records and indoor microscopic identifications. The results show that the Bolong copper deposit is characterized by obvious alteration zonation of potassic zone→pyrite phyllic zone→argillation superimposed pyrite phyllic zone→hornfels zone (or propylitization zone on the outer side) from the deep part (core) to the shallow part (or the outer side). Four types of veins (M, A, B, D) can be recognized in the deposit, with A B veins being most developed. the potassic zone, pyrite phyllic zone and A, B veins are related to the mineralization. A comparison with the typical alteration features of porphyry deposits both in China and abroad shows that the alteration features of the Bolong copper deposit are similar to features of the “monzonite” model, and the characteristics of the mineral assemblages are similar to those of the Bajo de la Alumbrera porphyry Cu deposit in Argentina and the Qulong copper deposit and Duobuza copper deposit in Tibet. However, the Bolong deposit has its unique feature that it possesses a large number of sparsely – densely disseminated and veined magnetites from the potassic zone to the pyrite phyllic zone.

**Key words:** alteration; vein body; porphyry copper deposit; Bolong; Duolong ore concentration area

**About the first author:** YANG Yi, male, born in 1983, Ph.D candidate, engages in the study of ore deposit, mineral prospecting and exploration; E-mail: 290744982@qq.com.

**About the corresponding author:** ZHANG Zhi, male, born in 1985, Ph.D candidate, engages in the study of geology and mineral resources in the Tibetan Plateau; E-mail: tancer@qq.com.

作为世界上铜产量中最重要的矿床类型, 斑岩铜矿在世界范围内广泛分布<sup>[1]</sup>, 具有重要的经济与科研价值。对于斑岩型矿床而言, 矿床地质、蚀变与脉体系统的研究是该类型矿床研究中最为基础且重要的成员。从Lowell和Guibert<sup>[2]</sup>提出的“二长岩”蚀变分带模式开始, 到后来Hollister<sup>[3]</sup>对“二长岩”模式进行修正并提出了“闪长岩”蚀变分带模式, 人们开始了对斑岩型矿床蚀变分带的探索研究并取得了丰硕的研究成果<sup>[4-7]</sup>。在斑岩矿床蚀变分带研究过程中, 许多学者注意到庞大而复杂的脉体系统是斑岩型矿床中成矿物质沉淀的另一重要场所(另一为浸染状矿化), 因此对于脉体系统的研究有助于对于流体演化、矿化分带及找矿指示的系统研究<sup>[8-11]</sup>。Gustafson和Hunt<sup>[8]</sup>最早对斑岩成矿系统中的脉体进行了分类研究, 并首次提出A、B、D 3种脉体类型, 后来Arancibia和Clark<sup>[4]</sup>、Gustafson和Quiroga<sup>[12]</sup>又对此进行了补充, 在前述基础上新增M及EB 2种脉体类型, 此后关于斑岩矿床脉体系统的研究可以用硕果累累来形容<sup>[6-7, 9-11, 13-16]</sup>。

波龙铜矿床是多龙矿集区内继多不杂斑岩铜矿床之后发现的又一斑岩铜矿床, 与多不杂铜矿床紧邻, 累计探明资源量已超越多不杂, 具超大型远景规模。西藏地质五队于2004年发现波龙矿化点, 并于2005年确定其为富金斑岩型铜矿床, 自此之后, 波龙斑岩铜矿床在逐年的勘查中逐渐露出其

“大个头”的面貌风采, 成为班—怒成矿带国家级矿产资源接续基地中重要的一员。虽然找矿勘查取得巨大突破, 但矿床研究却较为薄弱, 近年来仅对矿床成岩成矿时代<sup>[7, 17-18]</sup>方面做了较为详细的研究, 但对于矿床蚀变、脉体系统及成矿等基础研究工作却尚未进行, 因此, 本文在详细野外地质编录及室内镜下鉴定的基础上, 对矿床蚀变特征、脉体系统及其与成矿关系进行了详细研究, 以期对波龙斑岩矿床成矿模式研究奠定基础。

## 1 地质背景

横贯青藏高原中部的班公湖—怒江缝合带是冈底斯陆块与羌塘陆块的分界线, 是冈瓦纳大陆和欧亚大陆的板块边界<sup>[19]</sup>。伴随中生代班公湖—怒江特提斯洋向北、往南双向俯冲至南羌塘陆块与北冈底斯陆块碰撞闭合的构造演化过程<sup>[16, 20-24]</sup>, 岩浆活动频繁, 构造活动强烈<sup>[25-26]</sup>, 从而引发了一系列从俯冲期至碰撞期的成矿事件, 形成诸多以Cu、Au、Mo、Fe等为主成矿元素特色的斑岩型、浅成低温热液型、斑岩—矽卡岩型矿床<sup>[7, 16-17, 27-34]</sup>。在班公湖—怒江北向俯冲的过程中, 在羌塘地块南缘形成一系列构造—岩浆弧, 波龙斑岩铜矿床便位于这些构造—岩浆弧中的多不杂岩浆弧中(图1)。

波龙斑岩铜矿床处于多龙矿集区东南部(图2), 区内除多不杂外, 还发育有铁格隆南、拿若、尔尔

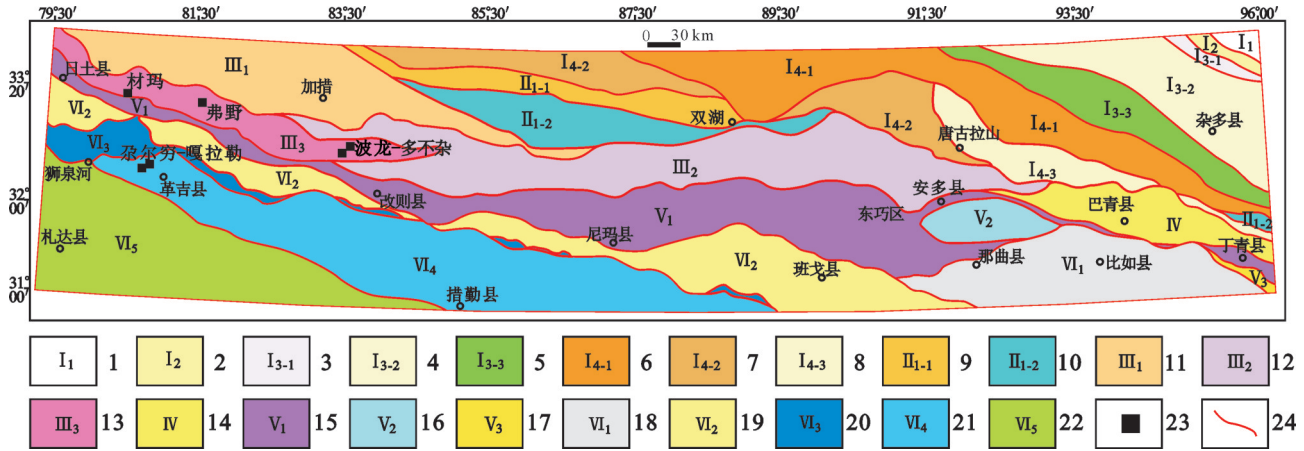


图1 班公湖—怒江成矿带及邻区构造单元分布图(据参考文献[22]修改)

1—玉龙塔格—巴颜喀拉前陆盆地; 2—西金乌兰湖—金沙江—哀牢山结合带; 3~5—昌都—兰坪地块; 6~8—北羌塘—甜水海陆块; 9~10—龙木错—双湖—澜沧江蛇绿混杂岩带; 11—多玛地块; 12—南羌塘盆地; 13—扎普—多不杂岩浆弧带; 14—左贡地块; 15—班公湖—怒江蛇绿混杂带; 16—聂荣地块; 17—嘉玉桥地块; 18—那曲—洛隆弧前盆地; 19—昂龙岗日—班戈岩浆弧; 20—狮泉河—申扎—嘉黎蛇绿混杂岩带; 21—措勤—申扎岩浆弧; 22—龙格尔—工布江达复合岩浆弧; 23—矿点; 24—地质界线

Fig.1 Distribution of tectonic units in the Bangong Co–Nujiang metallogenic belt and its neighboring areas (modified after reference [22])

1—Yulongtage–Bayan Har foreland basin; 2—Xijin Ulan Hu–Jinshajiang–Ailao Shan boundary belt; 3–5—Qamdo–Lanping block; 6–8—Northern Qiangtang–Tianshuihai block; 9–10—Lungmu Co–Shuanghu–Lancangjiang ophiolite mélangé belt; 11—Doima block; 12—Southern Qiangtang basin; 13—Zapug–Duobuza magma arc belt; 14—Zuogong block; 15—Bangong Co–Nujiang ophiolite mélangé zone; 16—Nyainrong block; 17—Jiayuqiao block; 18—Nagqu–Lhorong fore–arc basin; 19—Nganglong Kangri–Baingoin magma arc belt; 20—Shiquanhe–Xainza–Lhari ophiolite mélangé belt; 21—Coqen–Xainza magma arc belt; 22—Longger–Gongbo gyamda composite magma arc belt; 23—Deposit; 24—Geological boundary

勤、色那、地堡那木岗等极具找矿潜力的矿床点<sup>[28]</sup>。其中地堡那木岗、波龙、多不杂、铁格隆南及拿若等矿床均沿北东向断层分布,而尕尔勤、色那、赛角及拿若则沿北西向断层分布,因此NE向及NW向断裂构造很可能为矿集区内主要的控矿断裂构造<sup>[17–18]</sup>。矿集区内除大量覆盖的第四系外,从三叠系至新近系均有地层出露,包括上三叠统日干配错组、下侏罗统曲色组(J<sub>1q</sub>)、中一下侏罗统色哇组(J<sub>1–2s</sub>)、下白垩统美日切错组(K<sub>1m</sub>),其中下侏罗统曲色组及中一下侏罗统色哇组是矿集区内重要的围岩地层,而下白垩统美日切错组陆相中基性火山岩建造则为重要的矿床盖层<sup>[28]</sup>。

## 2 矿床地质特征

波龙矿床内出露地层主要为下侏罗统曲色组(J<sub>1q</sub>)、下白垩统美日切错组(K<sub>1m</sub>)及第四系(Q)(图3)。曲色组岩性组合主要为变长石石英砂岩,是波龙矿床的直接围岩。美日切错组主要由一套紫红色安山岩组成。第四系仅在矿区北东部及南部沟

谷有所分布。

矿区内岩浆活动较为简单,主要可见花岗闪长斑岩及花岗斑岩的侵位。前人研究成果表明,矿区至少存在3期岩体侵位<sup>[7]</sup>,包括早期的2期含矿花岗闪长斑岩及后期的不含矿花岗斑岩。陈华安等<sup>[18]</sup>对三期岩体进行了精确的锆石U–Pb年代学地球化学特征研究,获得三期岩体成岩年龄在119~120 Ma,具备岛弧岩浆岩的地球化学特征。

波龙矿床总体为一隐伏矿床,含矿斑岩体未出露地表,矿体总体具有“筒状”形态。区内发育典型的斑岩蚀变系统,可见有钾化、黄铁绢英岩化、泥化、青磐岩化及角岩化等多种蚀变类型。矿石矿物主要可见黄铜矿、辉钼矿、磁铁矿、黄铁矿等(图4–A~F),其次为自然金及少量斑铜矿,脉石矿物主要可见石英、黑云母、钾长石、钠长石、石膏等(图4–B、E)。

## 3 矿床热液蚀变系统

波龙矿床发育典型的斑岩蚀变系统,经过笔者对已施工钻孔的详细编录,共识别出矿区具有钾



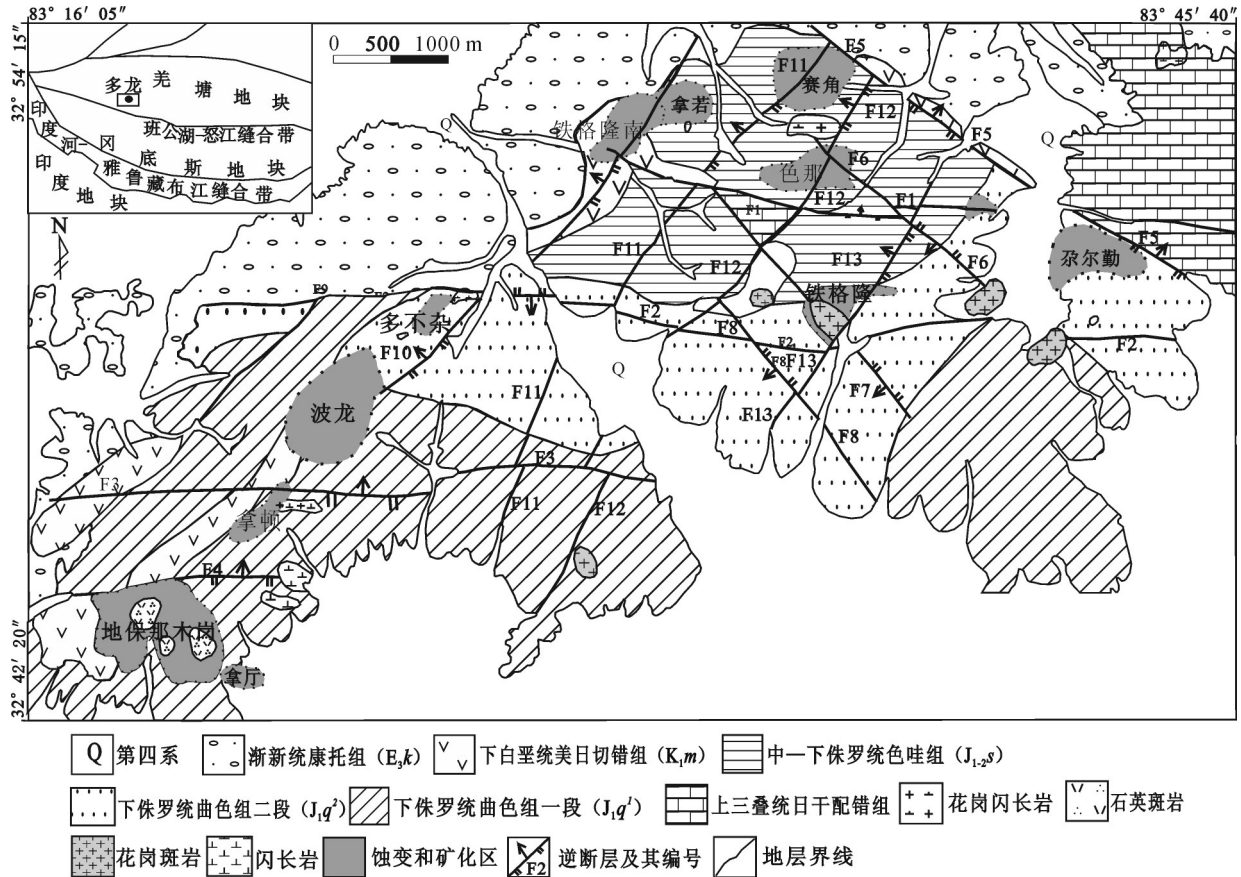


图2 多龙矿集区地质简图(据资料①改绘)

Fig. 2 Geological map of the Duolong ore concentration area (modified after reference ①)

化、黄铁绢英岩化、泥化、青磐岩化及角闪岩化5种蚀变类型,以黄铁绢英岩化及泥化蚀变最为发育,其次为钾化及青磐岩化蚀变,角闪岩化仅在局部可见,各蚀变类型之间普遍具有叠加现象。

### 3.1 钾化

钾化蚀变是波龙矿区较为发育的蚀变类型之一,是波龙矿床中最早形成的蚀变类型。钾化蚀变仅在含矿花岗闪长斑岩中发育(图5-A~C),以目前施工钻孔探测到的隐伏含矿斑岩体范围而言,钾化蚀变主要集中在179~163线。钾化蚀变主要可见钾长石化及黑云母化2种脉石矿物热液蚀变形式,总体上以黑云母化为主(图5-B),钾长石化次之(图5-A),与其紧邻的多不杂矿床及冈底斯成矿带典型斑岩矿床——驱龙铜矿钾化带典型蚀变特征均有所区别<sup>[6,30]</sup>。另可见钾化蚀变期大量热液磁铁矿产出

(图5-C),是波龙矿床钾化蚀变带较为显著的特色。

黑云母化是波龙矿床钾化蚀变中的主要识别标志,主要可见有2种形式,一种为角闪石的黑云母化,另一种为热液脉状黑云母。角闪石的黑云母化较为普遍,在已揭露的含矿斑岩中基本均可见或多或少的角闪石斑晶黑云母化现象(图5-B、D~G),交代形式多可见面状交代形式,另可见沿角闪石颗粒边部及裂隙交代,多可见交代残余结构(图5-D、F),个别交代完全者仅可见角闪石晶型,并在黑云母化过程中析出大量呈斑状形式的磁铁矿。热液脉状黑云母在矿床中发育较少,仅少数钻孔可见,往往与钾化蚀变带顶部与黄铁绢英岩化或泥化蚀变叠加区域可见,且往往以粗脉形式出现,如钻孔ZK17101钾化蚀变带顶部可见脉宽约3 cm的热液黑云母粗脉。通过对部分交代成因黑云母进行电

① 西藏自治区地质调查院,西藏班公湖-怒江成矿带西段多金属资源调查阶段性地质报告[R].拉萨:西藏自治区地质调查院,2009.



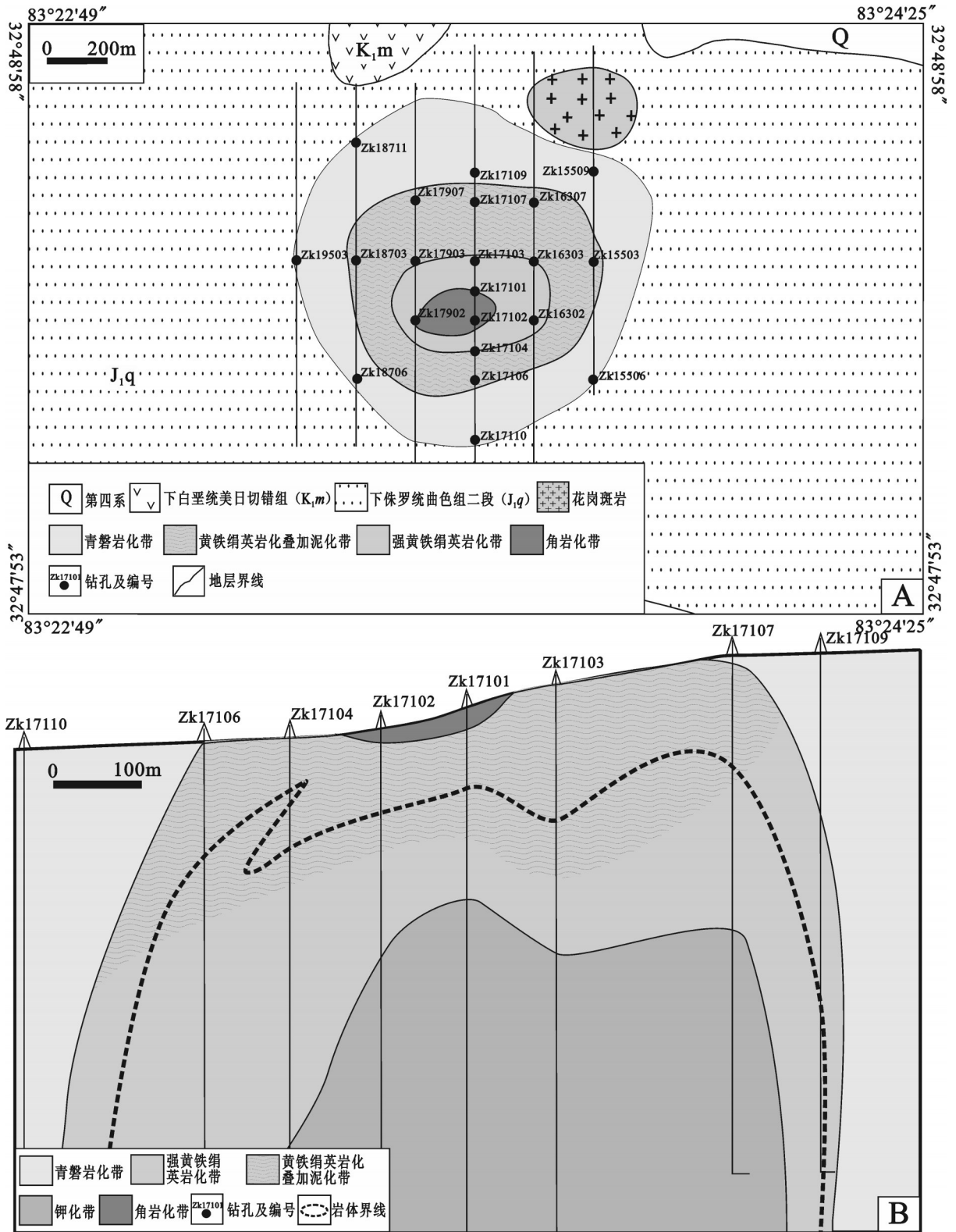


图3 波龙矿床地质与平面蚀变分带叠合图(A)及171号勘探线剖面蚀变分带图(B)

Fig. 3 Superimposition map of geology and plane alteration zoning (A) and section alteration zoning along No. 171 exploration line (B) of the Bolong copper deposit

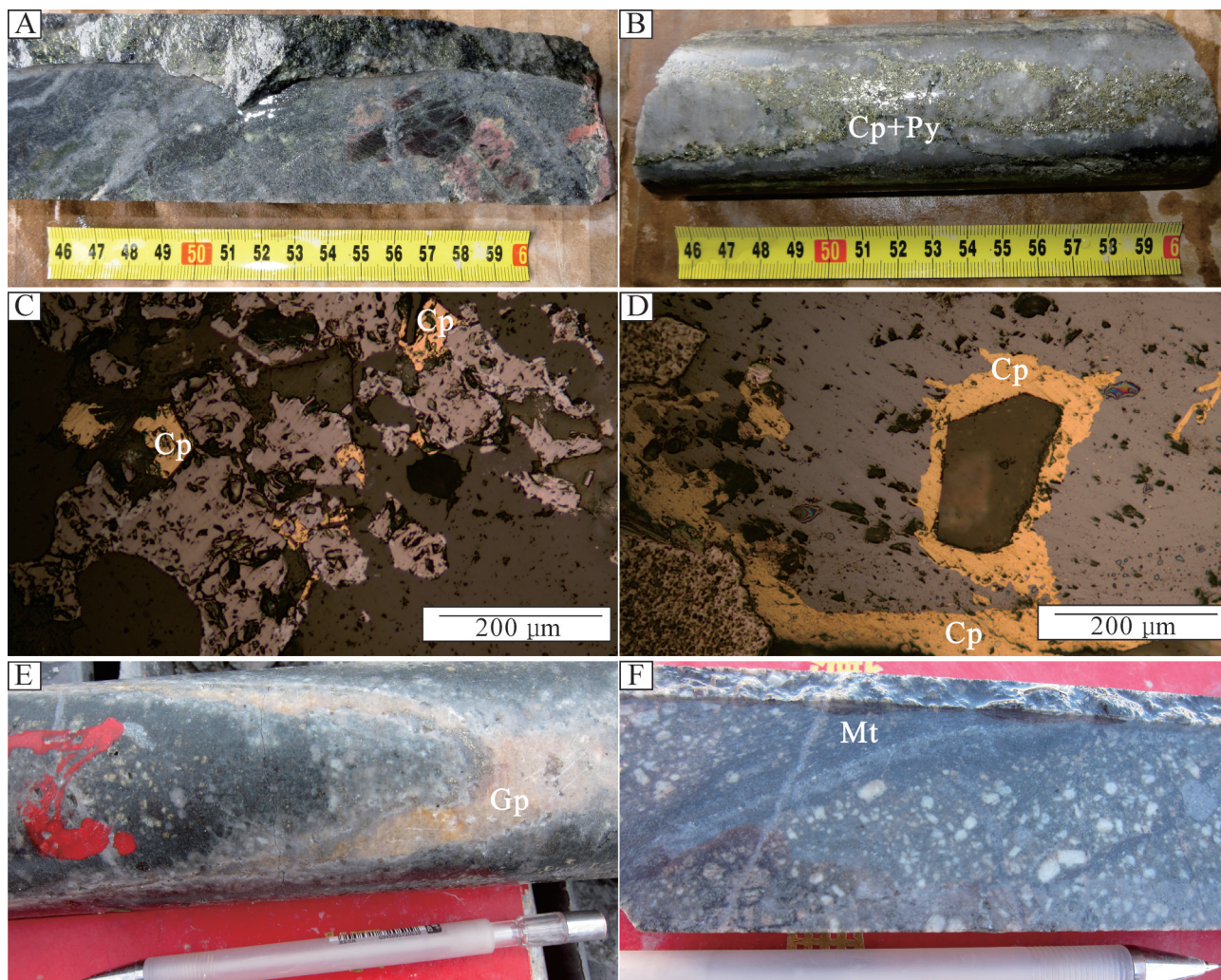


图4 波龙矿床矿石矿物及脉石矿物照片

A, C—长石英砂岩中浸染状黄铜矿+黄铁矿+磁铁矿及其显微照片(BL17103-B27); B, D—石英+黄铜矿+黄铁矿脉及其显微照片(BL17103-B31); E—花岗闪长斑岩中石膏脉(BL17101-B12); F—花岗闪长斑岩中大量发育浸染状磁铁矿(BL17101-B18); Cp—黄铜矿; Py—黄铁矿; Mt—磁铁矿; Gp—石膏

Fig. 4 Ore minerals and gangue minerals photos of the Bolong deposit

A, C—Disseminated chalcopyrite+pyrite+magnetite in feldspar quartz sandstone and its photomicrographs (BL17103-B27);

B, D—Quartz+ chalcopyrite+pyrite vein (BL17103-B31); E—Gypsum vein in granodiorite porphyry (BL17101-B12);

F—Disseminated magnetite in granodiorite porphyry (BL17101-B18); Cp—Chalcopyrite; Py—Pyrite; Mt—Magnetite; Gp—Gypsum

子探针分析(表1), 结果表明其 $\text{SiO}_2$ 含量在34.987%~38.648%,  $\text{MgO}$ 含量在14.32%~15.813%,  $\text{FeO}$ 含量在13.458%~14.528%,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 含量在14.615%~15.738%, 属于镁-铁质黑云母类。

钾长石化是波龙矿床钾化蚀变的另一种主要产物, 主要可见脉状或细脉状钾长石(图5-H)、弥漫状钾长石化(图5-A)、钾长石晕3种形式, 以脉状及细脉状钾长石为主, 弥漫状钾长石化较少发育, 而

钾长石晕仅在局部可见。脉状钾长石既可见细脉又可见粗脉, 以细脉形式居多, 脉宽在1~4 mm, 可见有纯钾长石脉及石英+钾长石脉2种形式, 以后者居多, 另可见少量钾长石+磁铁矿脉(图5-C)。弥漫状钾长石化发育极少, 仅在钾化带核部部分区域可见, 主要可见斑晶或基质中斜长石的钾长石化(图5-I), 使得岩石呈现面状肉红色。值得注意的是, 在弥漫状钾长石化上部发育有绢英岩化及泥化强烈



表1 波龙矿床成矿岩体中黑云母电子探针数据(%)

Table 1 Electron microprobe analyses (%) of biotites from metallogenic rocks in the Bolong deposit

序号	bl17101-645.8-1	bl17101-645.8-2	bl17101-578.4-1	bl17101-423.1-1	bl17101-369.2-1	bl17101-369.2-2	bl17101-297.5-1
SiO <sub>2</sub>	36.413	36.789	36.967	34.987	36.719	36.643	38.648
TiO <sub>2</sub>	4.468	4.581	4.584	4.283	3.77	4.366	3.127
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14.615	14.461	14.648	15.498	15.738	15.165	14.94
FeO	14.089	14.528	14.46	14.412	14.602	13.458	14.224
MnO	0.28	0.284	0.315	0.106	0.106	0.179	0.106
MgO	15.529	15.277	14.848	14.824	14.32	15.732	15.813
CaO	0.009	0.018	0.042	-	0.057	0.081	0.075
Na <sub>2</sub> O	0.277	0.218	0.252	0.272	0.246	0.233	0.257
K <sub>2</sub> O	8.373	8.568	8.78	8.264	8.689	8.451	8.266
F	0.269	0.242	0.249	0.691	0.261	0.2	0.481
基于 11 个氧原子计算							
Si	2.7322	2.7477	2.7568	2.6599	2.7507	2.7319	2.8279
Al <sup>IV</sup>	1.2678	1.2523	1.2432	1.3401	1.2493	1.2681	1.1721
Al <sup>VI</sup>	0.0247	0.0206	0.0442	0.0486	0.1402	0.0644	0.1163
Ti	0.2522	0.2574	0.2572	0.2450	0.2125	0.2449	0.1721
Fe <sup>3+</sup>	0.2417	0.2462	0.2512	0.2615	0.2558	0.2479	0.2958
Fe <sup>2+</sup>	0.6424	0.6613	0.6507	0.6548	0.6590	0.5912	0.5746
Mn	0.0178	0.0180	0.0199	0.0068	0.0067	0.0113	0.0066
Mg	1.7370	1.7010	1.6507	1.6801	1.5992	1.7485	1.7249
Ca	0.0007	0.0014	0.0034	0.0000	0.0046	0.0065	0.0059
Na	0.0403	0.0316	0.0364	0.0401	0.0357	0.0337	0.0365
K	0.8015	0.8164	0.8353	0.8015	0.8304	0.8038	0.7716
Total	7.7583	7.7538	7.7488	7.7385	7.7442	7.7521	7.7042
MF	0.6582	0.6476	0.6417	0.6454	0.6344	0.6728	0.6629
Al <sup>VI</sup> +Fe <sup>3+</sup> +Ti	0.5185	0.5242	0.5525	0.5551	0.6085	0.5572	0.5842
Fe <sup>2+</sup> +Mn	0.6602	0.6792	0.6706	0.6617	0.6657	0.6025	0.5812
Ti/(Mg+Fe+Ti+Mn)	0.0872	0.0893	0.0909	0.0860	0.0777	0.0861	0.0621
Al/(Al+Mg+Fe+Ti+Mn+Si)	0.1869	0.1843	0.1872	0.2013	0.2020	0.1927	0.1868

注:“-”为低于检测线。测试单位:长安大学成矿作用及其动力学实验室。

表2 波龙矿床成矿岩体中长石电子探针数据(%)

Table 2 Electron microprobe analyses (%) of feldspars from metallogenic rocks in the Bolong deposit

分析项目	bl17101-969.8-1	bl17101-969.8-2	bl17101-969.8-4	bl17101-369.2-1	bl17101-369.2-2	bl17101-479.93-1
	Kfs	Kfs	Kfs	Pl	Pl	Pl
SiO <sub>2</sub>	48.59	65.406	46.714	55.039	56.027	56.061
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	35.359	19.53	35.422	27.375	24.256	27.229
CaO	0.007	0.021	0.055	9.906	7.93	9.717
Na <sub>2</sub> O	0.396	0.404	0.443	5.869	3.942	6.191
K <sub>2</sub> O	6.541	12.249	6.323	0.448	2.846	0.433
BaO	0.071	0.271	0.081	0.017	0.06	0.009
F	0.108	0.015	0.086	0.074	0.052	0.111
基于 8 个氧原子						
Si	2.3662	3.0129	2.3269	2.5151	2.6507	2.5345
Al	2.0294	1.0603	2.0795	1.4743	1.3525	1.4508
Ca	0.0004	0.0010	0.0029	0.4850	0.4020	0.4707
Na	0.0374	0.0361	0.0428	0.5200	0.3616	0.5427
K	0.4064	0.7198	0.4018	0.0261	0.1718	0.0250
Ba	0.0027	0.0098	0.0032	0.0006	0.0022	0.0003
An	0.08	0.14	0.66	47.04	42.98	45.33
Ab	8.42	4.77	9.56	50.43	38.66	52.26
Or	91.50	95.10	89.78	2.53	18.36	2.41

注:Pl—斜长石, Kfs—钾长石。测试单位:长安大学成矿作用及其动力学实验室。

蚀变,长石斑晶以及基质中长石矿物基本已绢云母化及泥化蚀变而使得岩石颜色偏白,但角闪石斑晶的黑云母化却较为明显,表明绢云母化及泥化为后期叠加蚀变,而叠加的绢云母化及泥化蚀变可能是致使弥漫状钾长石化现象消失的重要原因。此外,在波龙矿床钾化蚀变中还可见钾长石晕现象,但仅局部可见,主要在少数黑云母脉两侧可见较为明显

的钾长石晕。对部分长石斑晶进行了电子探针分析(表2),结果显示斜长石(Pl)SiO<sub>2</sub>含量总体高于钾长石(Kfs),钾长石相对贫钠(Na<sub>2</sub>O含量在0.396%~0.443%),反映斜长石斑晶的钾长石化比较彻底。斜长石 An 牌号在 40~50,属于中长石类型,样品 bl17101-369.2-2 Na<sub>2</sub>O 含量与 K<sub>2</sub>O 含量较为相近,反映存在明显的钾化蚀变中交代残余现象。



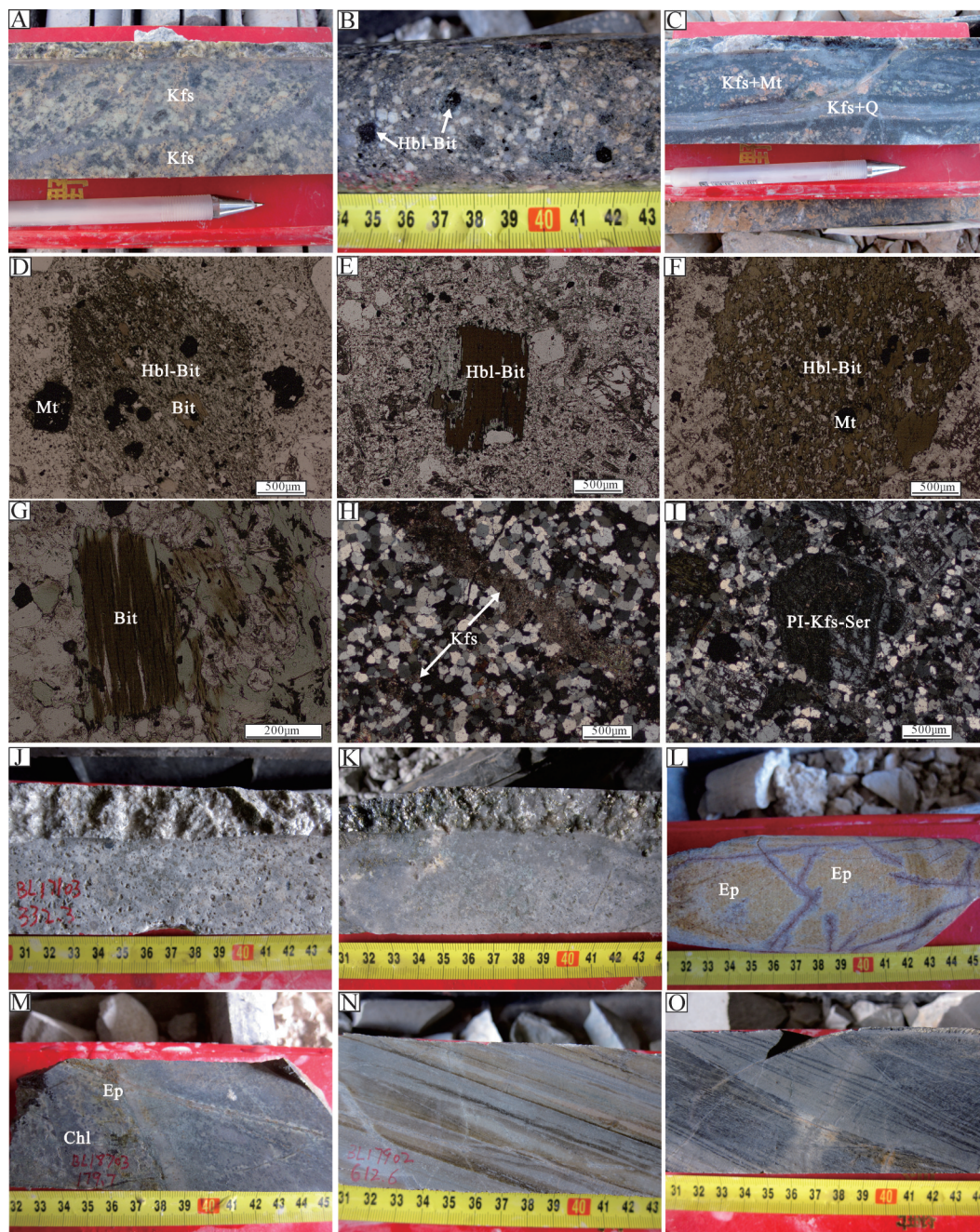


图5 波龙矿区蚀变特征照片

A—弥漫状钾长石化(17101-483.5 m); B—角闪石的黑云母化(17103-462.5 m); C—花岗闪长斑岩中浸染状及脉状磁铁矿(17101-724.7 m); D-G—角闪石黑云母化(17101-510.7 m、17101-369.2 m、17103-479.63 m、17103-448.7 m)(-); H—石英+钾长石脉(17101-298.5 m)(+); I—斜长石的钾长石化及绢云母化(17101-510.7 m)(+); J—泥化叠加黄铁绢英岩化蚀变(17103-332.3 m); K—典型黄铁绢英岩化(17903-285.6 m); L—弥漫状绿帘石化(17907-100.6 m); M—弥漫状绿泥石化及绿帘石化(18703-92.7 m); N-O—条带状角岩(17902-68.5 m、17902-78.2 m); Kfs—钾长石; Bit—黑云母; Hbl—角闪石; Mt—磁铁矿; Ep—绿帘石; Chl—绿泥石; Ser—绢云母; Pl—斜长石; Q—石英

Fig.5 Photos of alteration features in the Bolong copper deposit

A—Diffuse K-feldspathization (17101-483.5 m); B—Hornblende replaced by biotite (17103-462.5 m); C—Disseminated and veinlike magnetite in the granodiorite porphyry (17101-724.7 m); D-G—Hornblende replaced by biotite (17101-510.7 m, 17101-369.2 m, 17103-479.63 m, 17103-448.7 m) (-); H—Quartz+ K-feldspar vein (17101-298.5 m) (+); I—Plagioclase replaced by K-feldspar and sericite (17101-510.7 m) (+); J—Argillation superimposed upon pyritization-sericitization-silification alteration; K—Typical pyritization-sericitization-silification alteration (17903-285.6 m); L—Diffuse epidote (17907-100.6 m); M—Diffuse epidote and chlorite (18703-92.7 m); N-O—Banded hornfels (17902-68.5 m, 17902-78.2 m); Kfs—K-feldspar; Bit—biotite; Hbl—Hornblende; Mt—Magnetite; Ep—Epidote; Chl—Chlorite; Ser—Sericite; Pl—Plagioclase; Q—Quartz



### 3.2 黄铁绢英岩化

黄铁绢英岩化是波龙矿床中最为发育,分布范围最广的蚀变类型,从含矿斑岩体至围岩均有大量发育,与其紧邻的多不杂矿床明显不同<sup>[35]</sup>。黄铁绢英岩化发育于钾化蚀变外围,前缘叠加在钾化蚀变之上,主要蚀变标志为大量浸染状的黄铁矿、绢云母化及硅化共同产出(图5-J~K),为斑岩型矿床中典型的黄铁绢英岩化蚀变。

在波龙矿床的黄铁绢英岩化蚀变带中,浸染状黄铁矿的发育是一大特色,以围岩中最为发育,含矿斑岩体中次之。绢云母化是该类蚀变中最重要的蚀变,可见有长石类矿物的绢云母化及次生黑云母的绢云母化2类,以前者为主。长石类矿物的绢云母化大量发育,长石斑晶及基质中长石的绢云母化均较为发育,从而使得岩石整体偏白色(图5-I)。长石斑晶既可见斜长石斑晶大量绢云母化,也可见斜长石斑晶蚀变后形成的钾长石斑晶的绢云母化,多可见交代残余结构,蚀变完全者仅可见长石颗粒晶型,而颗粒内部全被星点状绢云母及粘土矿物代替。黑云母的绢云母化发育较少,主要是在角闪石斑晶经受钾化蚀变形成的次生黑云母中可见部分绢云母化。硅化蚀变是黄铁绢英岩化中另一重要蚀变,主要表现为长石类矿物的硅化,可见有石英+硫化物脉、长石斑晶被石英交代以及基质矿物发生团块状硅化形式,其中石英+硫化物脉大量发育,长石斑晶被石英交代以及基质矿物发生团块状硅化蚀变总体发育不多。然而,虽然该蚀变带中大量发育石英+硫化物脉,但却基本未能见到绢云母晕,这是与很多斑岩型矿床不同的。

### 3.3 泥化

泥化是波龙矿床另一种广泛发育的蚀变类型,但泥化蚀变基本不能分出独立的蚀变带,该种蚀变基本叠加在含矿斑岩体与围岩接触带附近的黄铁绢英岩化蚀变之上。泥化蚀变多为长石类矿物分解蚀变所致,形成高岭石、地开石等代表性粘土矿物,包括长石斑晶及基质中长石类矿物均可见较强泥化蚀变,部分长石斑晶泥化蚀变较强已全部蚀变成粘土矿物,在经历天水或地下水参与下的冲刷淋滤后,形成许多孔隙(图5-J),仅剩下长石斑晶晶型外壳。在整体泥化蚀变较强区域岩石均较为松散。

### 3.4 青磐岩化

青磐岩化在波龙矿床中不是很发育,仅在黄铁绢英岩化带外围有较小面积可见,可能是受到现今施工工程控制有限所致。矿床青磐岩化主要在围岩中可见,另在含矿斑岩体边部与围岩接触带区域局部可见,主要可见弥漫状及脉状2种形式,以弥漫状青磐岩化最为发育,脉状较少。弥漫状青磐岩化主要可见绿泥石化及绿帘石化2种(图5-L~M),主要是长石类矿物蚀变及热液黑云母退蚀变所形成,绿泥石化常常形成绿泥石团斑,而绿帘石则多以弥漫状形式分布与长石石英砂岩中(图5-L)。脉状青磐岩化中主要可见石英+绿泥石细脉,但总体发育较少,不见脉状绿帘石产出,但在靠围岩上部位置可见到少量的碳酸盐脉产出,另局部可见石英+方解石脉。值得注意的是,除了弥漫状及脉状青磐岩化蚀变外,在斑岩体边部局部还可见绿泥石晕形式的青磐岩化蚀变。

### 3.5 角岩化

角岩化蚀变在波龙矿床中分布十分有限,仅在ZK17101附近几个钻孔上部的曲色组围岩中可见有较强角岩化。矿床角岩化蚀变主要可见有块状角岩与条带状角岩2种,其中条带状角岩比较发育(图5-N~O),成分上表现为长英质角岩与黑云母角岩交替出现。块状角岩发育较少,多属于长英质角岩类。

## 4 矿床脉体系统

斑岩矿床脉体系统的研究最早实例来自于智利EI Salvador斑岩铜矿,Gustafson和Hunt<sup>[8]</sup>对该矿床进行详细的脉体特征研究后提出了A、B、D3种脉体类型,之后又有学者在他们的研究基础上新增了M及EB2种脉体类型<sup>[4,12]</sup>,上述几种脉体类型从形成阶段来讲主要可分为3类:第1类是斑岩尚未完全固结、形成于成矿早期的M脉及A脉,一般来讲M型脉早于A脉,且脉中矿物组成相对单一;第2类是斑岩体已经固结、大规模裂隙发育阶段形成的EB脉及B脉,一般来讲EB脉早于B脉形成,属于A脉与B脉的过渡类型;第3类是成矿晚期、处于开放系统中并有雨水参与形成的D脉。

波龙矿床发育有庞大而复杂的脉体系统,笔者在详细的野外钻孔岩心地地质编录及室内整理与镜

表3 波龙铜矿床主要脉体类型及其特征

Table 3 Main vein types and their characteristics in the Bolong deposit

脉体类型	脉体矿物组合	所处蚀变带	形状及大小	产出特征与切穿关系	脉体厘定参考依据
M	Mt	钾化带	不规则,部分呈网状,脉宽多数小于1 mm	分布较局限,仅钾化带内部可见,被多数后期脉切穿	[4]
A	Kfs	钾化带	不规则,部分呈网状,可见具微褶皱或石香肠状,脉宽多数集中在1~5 mm,最宽者可达3 cm	主要分布在斑岩体中,与钾化蚀变密切相关,被多数后期B脉所切穿。各类A脉并不是同时形成,相互亦有切穿关系。至少可分3期	[8]
	Bit	钾化带			
	Kfs+Q	钾化带			
	Q+Mt	钾化带、黄铁绢英岩化带			
	Q+Mt+Bit	钾化带			
	Q+Bit+Cp+Py	钾化带			
	Kfs+Mt	钾化带、黄铁绢英岩化带			
	Q+Mt+Cp+Py	钾化带、黄铁绢英岩化带			
	Q+Kfs+Mt	钾化带、黄铁绢英岩化带			
B	Q+Cp	黄铁绢英岩化带、泥化带	较平直,脉体总体较宽,2~3 cm不等,多数集中在4~10 mm	大量发育且分布较为广泛,从钾化带至黄铁绢英岩化带至外围的青磐岩化带中均有分布,以黄铁绢英岩化带最为发育。切穿前期形成的A脉,但被后期的D脉切穿。各类B脉亦不是同时形成,部分有较明显的相互切穿关系。至少可分为3期	[8]
	Q+Py	钾化带、黄铁绢英岩化带、泥化带			
	Q+Py+Cp	钾化带、黄铁绢英岩化带、泥化带			
	Q+Mo+Cp	黄铁绢英岩化带、泥化带			
	Q+Gp+Py+Cp	黄铁绢英岩化带、青磐岩化带			
D	Q+Py+Cp	黄铁绢英岩化带、泥化带、青磐岩化带	不规则,多数为细脉,脉宽多数集中在1~4 mm	总体发育不多,黄铁绢英岩化带中较为发育,切穿前期形成的A、B脉	[8]
	Gp	黄铁绢英岩化带、泥化带			
	Py	黄铁绢英岩化带、青磐岩化带			
	Q+Cal	青磐岩化带			
	Chl	青磐岩化带			

注: Mt—磁铁矿; Kfs—钾长石; Q—石英; Py—黄铁矿; Cp—黄铜矿; Mo—辉钼矿; Gp—石膏; Cal—方解石; Bit—黑云母; Chl—绿泥石。

下鉴定的基础上,依据不同矿物组合共识别出20种脉体,并依据总体穿切关系将19种脉体归入了M、A、B、D 4大类脉体类型中(表3)。总体上讲以A、B脉最为发育,D脉次之,M脉发育较少。

#### 4.1 M型脉

M型脉仅在钾化带核部可见,是矿床脉体系统中最早形成的脉体类型,矿物组合上为较为单一的磁铁矿。该类脉体多以细脉形式出现,脉宽基本小于1 mm,多以缓角度近似平行的条带状形式出现,也可见呈网脉状形式出现。该类脉体多可见被以钾长石细脉或粗脉为代表的A脉所切穿,表明M型脉要早于A型脉形成。

#### 4.2 A型脉

A型脉在波龙矿床中大量发育,是钾化蚀变带

中的主要脉体类型,均分布在含矿斑岩体中(图6-A~E),围岩中不见有A型脉。波龙矿床中A型脉总体特征表现为不规则状,脉壁多可见港湾状,经过笔者详细的钻孔岩心编录,依据不同矿物组合共识别出9种脉体可归为A型脉,分别是:钾长石脉、石英+钾长石脉、石英+磁铁矿脉、石英+磁铁矿+黑云母脉、钾长石+磁铁矿脉、石英+钾长石+磁铁矿脉、石英+磁铁矿+黄铜矿+黄铁矿脉、黑云母脉、石英+黑云母+黄铜矿+黄铁矿脉。纯钾长石脉较细,脉宽多在1 mm左右,发育不多,可见明显切穿早期磁铁矿细脉(M型脉),局部可见脉宽约1 cm的粗钾长石脉。石英+钾长石脉相对纯钾长石脉较为发育,粗脉至细脉均有产出,但以粗脉居多,脉宽者可达1.5 cm。石英+磁铁矿脉、钾长石+磁铁矿脉、石英+钾长



石+磁铁矿脉以及石英+磁铁矿+黄铜矿+黄铁矿最为发育,基本遍布整个钾化蚀变带,且脉宽均较粗,从0.5~2 cm不等,其中石英+磁铁矿+黄铜矿+黄铁矿脉是钾化蚀变带中最重要的脉状矿化类型。黑云母脉及石英+黑云母+黄铜矿+黄铁矿脉总体发育较少,黑云母多以细脉形式出现,脉宽在0.2~0.5 mm不等,且该脉两侧多出现钾长石晕。石英+黑云母+黄铜矿+黄铁矿脉仅在钾化蚀变带顶部可见,脉粗且脉中叶片状黑云母颗粒粗大,最粗者脉宽者可达3 cm(图6-C)。在众多的A型脉体中,局部可见明显的钾长石脉被磁铁矿+钾长石脉切穿,后者又被石英+磁铁矿脉切穿,因此,尽管不能完全厘定前述9种脉体形成次序,但A型脉至少可以分为3个不同期次。

#### 4.2 B型脉

B型脉是波龙矿床中最为发育的脉体,其广泛分布于含矿斑岩体及蚀变围岩中,从蚀变带上讲,B型脉主要分布于黄铁绢英岩化带,次为钾化带,另青磐岩化带中有少量分布。B型脉总体上晚于A型脉形成,脉宽总体较A型脉宽,脉壁相对较为平直(图6-A、6-F~G)。笔者经过系统钻孔岩心编录,共识别出5种不同矿物组合的B型脉,分别是:石英+黄铁矿脉、石英+黄铜矿脉、石英+黄铁矿+黄铜矿脉、石英+辉钼矿+黄铜矿脉、石英+石膏+黄铁矿+黄铜矿脉。石英+黄铁矿脉较为发育,从细脉至粗脉均有发育,细脉脉宽在0.2~0.5 cm,粗脉脉宽在0.6~1 cm,该脉应是B型脉中最早形成的脉体类型,在编录中可见其切穿了大多数A型脉,又被后期石英+黄铜矿脉或石英+黄铁矿+黄铜矿脉切穿等多数B型脉切穿。石英+黄铜矿脉总体不发育,主要在黄铁绢英岩化与钾化蚀变叠加带可见,另在钾化蚀变带中有少量发育。石英+黄铁矿+黄铜矿脉是B型脉中最为发育的脉体类型,该类脉体总体脉宽较粗,多数在0.6~3 cm(图6-F),该脉同时是B型脉中最重要的脉状矿化赋矿脉体类型。石英+辉钼矿+黄铜矿脉总体不发育,且脉宽相对其余B型脉而言较窄,仅在部分钻孔中可见,该类脉体明显晚于石英+黄铜矿+黄铁矿脉以及缓角度石英+黄铁矿细脉,具备明显的切穿关系,该类脉体是波龙矿床中辉钼矿唯一的产出形式。石英+石膏+黄铜矿脉发育较少,仅在局部可见。

#### 4.3 D型脉

D型脉在波龙矿床中不如A型及B型脉发育,主要集中在曲色组长石石英砂岩砂岩中,部分分布在含矿斑岩体边部。与前述脉体类型相比,D型脉多以细脉形式产出,脉宽多在1~4 mm,且产状多近直立产出(图6-E、G~H),其多数切穿了前期形成的B型脉,因此其形成比B型脉晚(图6-G),属于波龙矿床脉体系统中最晚形成的脉体类型。经过笔者详细的钻孔岩心编录,共识别出5种D脉,分别是:石英+黄铁矿+黄铜矿细脉、黄铁矿细脉、无矿石膏脉、方解石脉、绿泥石脉。石英+黄铁矿+黄铜矿细脉以及黄铁矿细脉是D型脉中最为发育的类型,产状多数近直立。无矿石膏脉较为发育,但总体发育程度明显比与其紧邻的多不杂矿床要差,且不见有多不杂矿床中网脉状石膏脉发育,而仅可见脉宽在1~4 mm的石膏细脉。方解石脉发育很少,仅局部可见。

## 5 讨论与结论

### 5.1 蚀变及其分带与成矿

波龙斑岩铜矿床矿床具有复杂的蚀变类型,但在平面及垂向上蚀变分带均较为明显(图3),因为矿床为隐伏矿床,因此波龙矿床平面与剖面蚀变分带有所区别。

从平面上看,主要可以分出角岩化、黄铁绢英岩化、泥化及青磐岩化蚀变,以171线为中心,具备较为明显的蚀变分带,其中泥化以叠加黄铁绢英岩化蚀变而存在,不能单独划分出蚀变分带(图3-A)。角岩化在蚀变分带中心位置,但分布范围十分有限,主要集中在ZK17101、ZK17102、ZK17902展布区域。黄铁绢英岩化分布范围非常广,具有强黄铁绢英岩化与弱黄铁绢英岩化之分,在角岩化外围分布有强黄铁绢英岩化带,主要分布03~04排孔。在强黄铁绢英岩化带外围又分布有弱黄铁绢英岩化带,弱黄铁绢英岩化实际为叠加有泥化蚀变的黄铁绢英岩化带。因为本次编录及露头踏勘范围仅在限于现有钻孔施工范围,因此青磐岩化带分布范围较为狭窄,仅在09排孔及06排孔外围可见。因此,波龙矿床平面蚀变分带从内至外依次可分为:角岩化带→强黄铁绢英岩化带→泥化叠加弱黄铁绢英岩化带→青磐岩化带。

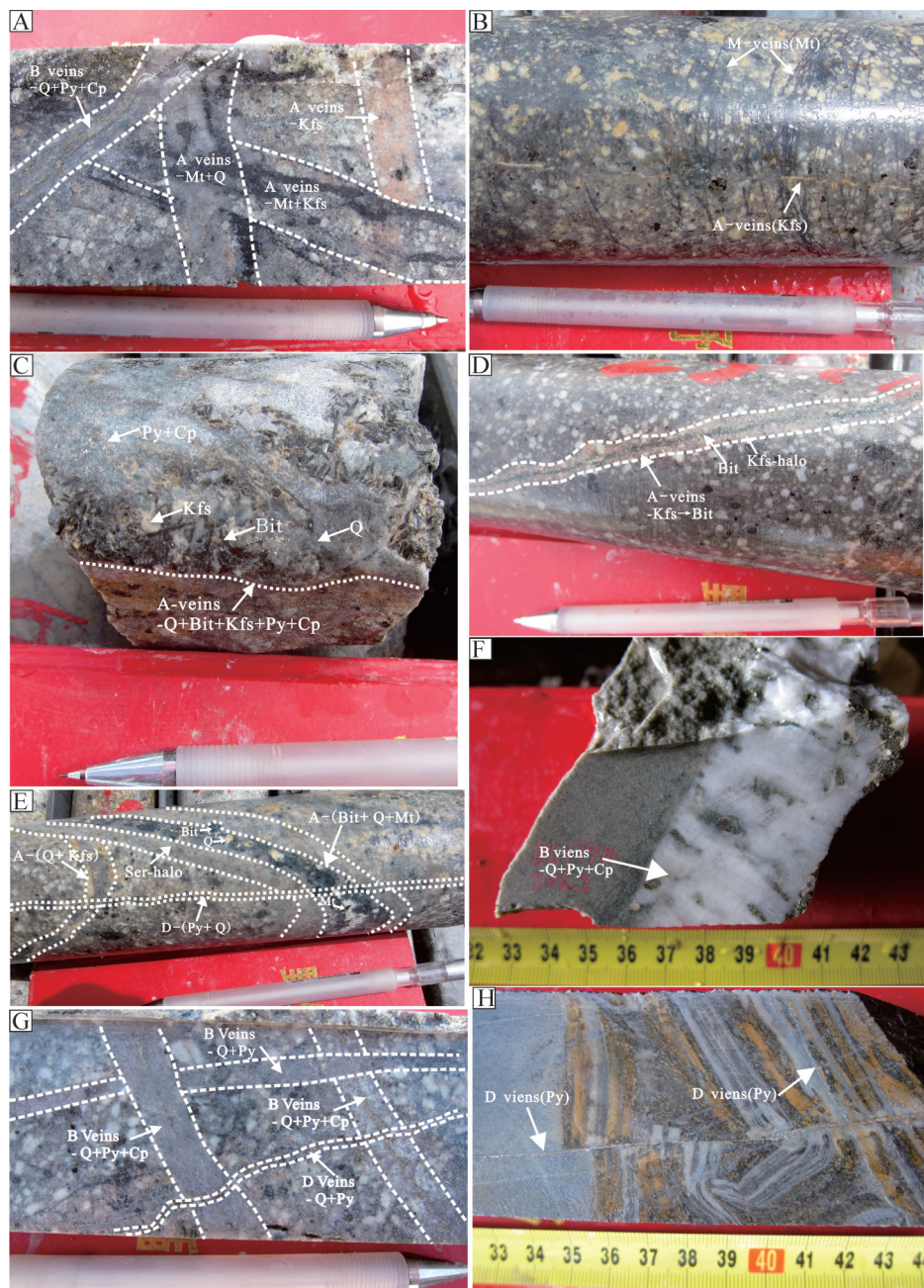


图6 波龙矿区脉体特征

A—花岗闪长斑岩体中3期具明显切穿关系的A脉被后期B脉切穿(17101-479.6 m); B—花岗闪长斑岩体中条带状M脉被后期钾长石A脉所切穿(17101-327.6 m); C—花岗闪长斑岩体中宽Q+Bit+Kfs+Py+Cp脉(17101-298.5 m); D—花岗闪长斑岩体中黑云母脉两侧可见钾长石晕(17101-369.2 m); E—花岗闪长斑岩体中2期A脉被后期D脉所切穿,早期Q+Mt+Bit脉还具有绢云母晕(17101-345.6 m); F—长石石英砂岩中宽而平直的B脉(17101-347.5 m); G—花岗闪长斑岩体中3期相互切穿的B脉被后期D脉切穿(17103-621.5 m); H—蚀变长石石英砂岩中相互穿插的两期D脉(17902-321.6 m); Mt—磁铁矿; Kfs—钾长石; Q—石英; Py—黄铁矿; Cp—黄铜矿; Bit—黑云母; Ser—绢云母

Fig. 6 Photos of vein features in the Bolong copper deposit

A— Three stages of A veins penetrated by B vein in granodiorite porphyry (17101-479.6 m); B— Banded M veins penetrated by A vein in granodiorite porphyry (17101-327.6 m); C— Wide Q+Bit+Kfs+Py+Cp vein in granodiorite porphyry (17101-298.5 m); D— K-feldspar halo along the biotite vein in granodiorite porphyry (17101-369.2 m); E— Two stages of A veins penetrated by D vein and sericite halo along the early Q+Mt+Bit vein in granodiorite porphyry (17101-345.6 m); F— Wide and straight B vein in feldspar quartz sandstone (17101-347.5 m); G— Three stages of B veins penetrated by D vein in granodiorite porphyry (17103-621.5 m); H— Two stages of D veins in the altered feldspar quartz sandstone (17902-321.6 m); Mt—Magnetite; Kfs—K-feldspar; Q—Quartz; Py—Pyrite; Cp—Chalcopyrite; Bit—Biotite; Ser—Sericite



从垂向上看,波龙矿床垂向蚀变分带特征同平面向分带特征不同,在垂向上展现出了典型斑岩铜矿蚀变分带特征(图3-B),从深部或较深部往浅部依次可见钾化带→黄铁绢英岩化带→角岩化带(部分可见),从核部往两侧依次可见钾化带→黄铁绢英岩化带→青磐岩化带,泥化带不能划分出单独的蚀变带,主要叠加在黄铁绢英岩化带之上。从剖面蚀变分带图可以看出,含矿斑岩体控制了整个钾化带的分布,同时控制了大部分黄铁绢英岩化带,曲色组围岩则包含了黄铁绢英岩化带、青磐岩化带及角岩化带。

在波龙矿床众多蚀变类型中,与成矿关系最为密切的是钾化带、黄铁绢英岩化带,其次为黄铁绢英岩化与泥化叠加蚀变带,青磐岩化带及角岩化带对铜矿化基本没有贡献。经过笔者野外地质编录以及对矿区部分分析数据的查阅,粗略估算了各蚀变带与矿化强度的关系,其中钾化带赋存了矿床约30%的铜,黄铁绢英岩化带赋存了矿床约45%的铜,黄铁绢英岩化带与泥化叠加蚀变带赋存了矿床约20%的铜,青磐岩化带及角岩化带对矿床铜的贡献很小,仅贡献了约5%的铜,且多数集中在青磐岩化带,角岩化带基本没有铜贡献。从上述各蚀变带对矿床铜的贡献程度来说,尽管泥化蚀变不能单独划分出来,但它与黄铁绢英岩化叠加带贡献了矿床20%的铜,因此泥化蚀变带同样是矿床重要的赋矿

蚀变带之一。波龙矿床从核部至外侧,从浅部至深部,矿石类型具有一定的分带性,表现为在处于最内部的钾化带区域,以浸染状铜矿石最为发育,其次发育有脉状铜矿石;在往外的黄铁绢英岩化及泥化带中,则脉状铜矿石占主体地位,浸染状铜矿石相对于钾化带来说发育较弱;在最外部的青磐岩化带中及角岩化带中,矿化程度已比较弱,基本全是脉状铜矿石。

## 5.2 高氧化含氟流体及脉体系统对成矿的贡献

波龙矿床斑岩体中从深部至浅部均发育大量脉状磁铁矿,沿磁铁矿两边还发育有稀疏-稠密浸染状磁铁矿,此外还发育石膏脉,表明波龙矿床成矿流体具有高氧化的特征,且矿床中磁铁矿发育程度(尤其是ZK17101中)远大于与其相邻的多不杂及冈底斯成矿带驱龙等著名的具有高温高氧化成矿流体性质的斑岩铜矿床<sup>[6-7,36-38]</sup>,表明波龙矿床成矿流体具有高氧化性的特点,且可能比前述矿床具有更高的氧化性。

值得注意的是,矿床中大量发育的交代黑云母及热液黑云母,进行部分黑云母电子探针分析表明黑云母中均含有氟,其含量均>0.2%(表1),远大于与其邻近的多不杂斑岩铜矿床<sup>[36]</sup>。此外,在长石斑晶中可见具有明显的溶蚀现象(图7-A~B),对部分长石电子探针分析表明其也含有氟(表2),含量在

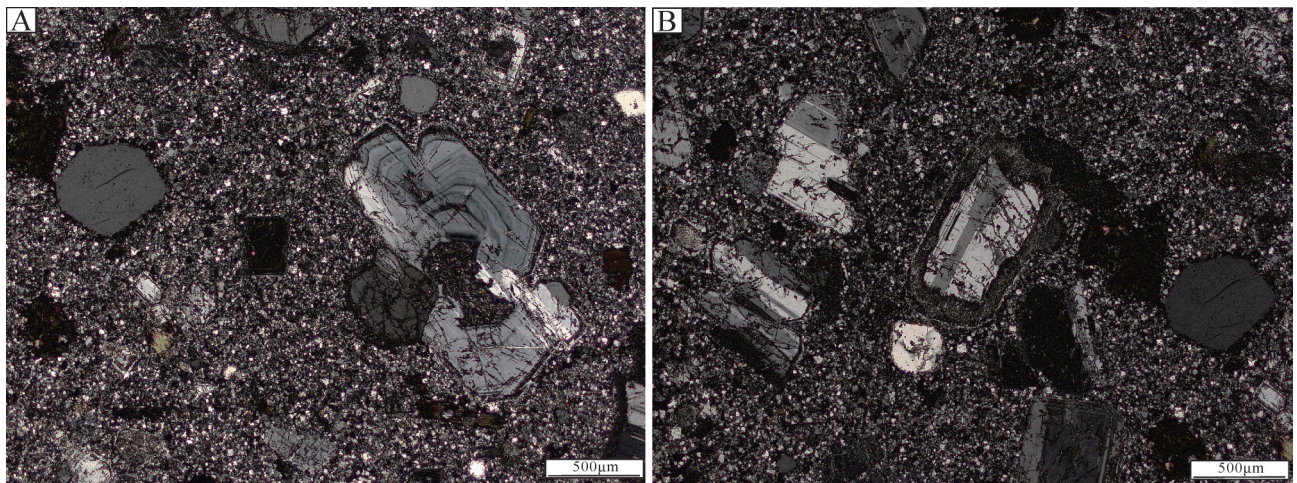


图7 波龙矿床花岗闪长斑岩体中长石斑晶的溶蚀及交代现象

A—具环带结构的长石斑晶具有明显的溶蚀结构; B—长石斑晶具有明显的溶蚀与被交代现象

Fig. 7 Dissolution and metasomatic alteration of feldspar phenocrysts in in the Bolong deposit

A—Dissolution structure of feldspar phenocrysts; B—Dissolution and metasomatic alteration of feldspar phenocrysts



0.015%~0.111%,表明波龙矿床成矿流体中具有一定的氟。尽管氟含量远不如一些具有高氟高氧化流体的斑岩矿床(如大兴安岭北段岔路口巨星斑岩铜矿床)<sup>[39-40]</sup>,但已明显不同于青藏高原典型斑岩铜矿——驱龙及多不杂等<sup>[6-7, 36-38]</sup>,结合其大量发育的热液磁铁矿及石膏脉的地质事实表明波龙矿床成矿流体为高氧化含氟流体。

波龙矿床错综复杂的脉体系统是成矿物质沉淀的主要场所之一,至少有40%的铜赋存于各种脉体中。在前述研究波龙矿床已识别出的M、A、B、D 4大类脉体类型中,以A、B脉与成矿关系最为密切,D型脉有轻微贡献,M型脉基本对矿床铜没有贡献。在A脉中与成矿关系密切的主要为相对较晚期形成的A型脉,主要以石英+黑云母+黄铜矿+黄铁矿脉及石英+磁铁矿+黄铜矿+黄铁矿脉贡献最大,它们贡献了矿床脉状矿石的30%左右;在矿床发育众多的B型脉中,除开石英+黄铁矿脉外,其余所有识别出的B型脉均与铜矿化有关,矿床脉状铜矿石中有65%的铜都是由B脉提供的,其中以石英+黄铜矿脉以及石英+黄铜矿+黄铁矿脉贡献最大,并且矿床发育不多的辉钨矿便赋存于B脉中;D脉与M脉对矿床铜的贡献十分有限,仅D脉中的石英+黄铁矿+黄铜矿脉贡献了矿床中脉状矿石的约5%的铜,M型脉则没有贡献。

### 5.3 与国内外典型矿床对比

斑岩矿床的蚀变分带研究一直是斑岩型矿床研究中的重要成员,自Lowell和Guilber<sup>[2]</sup>提出“二长岩”模式及Hollister<sup>[3]</sup>提出“闪长岩”模式两个经典模式后,斑岩矿床蚀变分带及其与成矿的关系研究经久不衰。与“二长岩”模式相关的斑岩体主要为以花岗闪长斑岩—二长花岗斑岩为代表的钙碱性中性斑岩系统,以斑岩体为中心向外蚀变分带可描述为:钾化带、似千枚岩化带、泥化带、青磐岩化带,相关的;与“闪长岩”模式相关的斑岩体主要为钙碱性中性岩系统(如闪长岩),以斑岩体为中心形成钾化带,外部形成青磐岩化带,相对缺失绢英岩化带。

将“二长岩”模式、“闪长岩”模式、智利Escondida斑岩铜矿、阿根廷Bajo de la Alumbreira斑岩铜矿及国内驱龙、多不杂斑岩铜矿床蚀变分带特征与波龙矿床蚀变分带及特征矿物组合进行对比研究(表4)。从特征统计表中可以看出,从分带上讲,波龙斑

岩铜矿床蚀变分带模式总体与“二长岩”模式较为相似,但却缺失较为单独的泥化带,波龙矿床中泥化带均叠加在黄铁绢英岩化带之上而存在。波龙矿床蚀变分带明显不同于“闪长岩”模式,矿床具有广泛发育的黄铁绢英岩化带,外部还发育有较为狭窄的角岩化带,而“闪长岩”模式仅发育内部的钾化带及外部的绿泥石化带。与国内典型矿床相比,波龙铜矿床与冈底斯成矿带驱龙铜矿床蚀变特征比较相似,蚀变分带大体相同。与智利著名斑岩铜矿——Escondida斑岩铜矿相比,波龙矿床缺少高级泥化带,却可见角岩化带。与阿根廷著名斑岩铜矿Bajo de la Alumbreira矿床相比,二者蚀变特征较为相似,均不能划分出单独的泥化带,泥化蚀变以叠加绢云母化蚀变而存在,且均缺乏高级泥化带,但波龙矿床则多了小范围的角岩化带。值得注意的是,波龙斑岩铜矿床在蚀变上具有其独特的地方,即矿床发育有大范围黄铁绢英岩化带,然而与其紧邻的多不杂斑岩铜矿床是不发育绢英岩化带的,紧邻的两矿床在该蚀变上是截然不同的,且波龙矿床黄铁绢英岩化带还可以分出强黄铁绢英岩化带与弱黄铁绢英岩化带两部分,是其独有蚀变特色。

从矿物组合上讲,波龙铜矿床各蚀变分带上的典型矿物组合有别于其他典型斑岩铜矿床,既不同于典型“二长岩”模式也不同于典型“闪长岩”模式,矿床在钾化带发育大量脉状、稀疏—稠密浸染状磁铁矿化,这与其紧邻的多不杂斑岩铜矿<sup>[35]</sup>、安第斯成矿带Escondida铜矿<sup>[41]</sup>及Bajo de la Alumbreira<sup>[42]</sup>矿床较为相似,但波龙矿床黄铁绢英岩化带仍然有大量磁铁矿产出,无论从分布范围还是含量上讲,波龙矿床都是显著区别于前述矿床的。此外,从标志性蚀变矿物上讲,波龙矿床钾化带典型蚀变矿物主要为钾长石及黑云母,黑云母相对更广泛,该特点与驱龙铜矿、多不杂铜矿均有所差别;大面积分布的黄铁绢英岩化带发育有大量浸染状黄铁矿,属于以黄铁矿、绢云母化、硅化为代表的典型黄铁绢英岩化蚀变,该特点与“二长岩”及“闪长岩”模式矿床以及国内驱龙、玉龙、多不杂等矿床都是有所区别的,是波龙矿床的特色之一。

综上所述,波龙铜矿床同大多数斑岩矿床一样具有典型的斑岩型矿床蚀变特征,蚀变强烈且分带性明显。但波龙矿床又具有其独有的特征,表现为



艳老师对本文提出了宝贵的修改意见,在此一并表示最诚挚的感谢!

### 参考文献(References):

- [1] Sillitoe R H. Porphyry copper systems[J]. *Economic Geology*, 2010, 105: 3–41.
- [2] Lowell J D, Guilbert J M. Lateral and vertical alteration–mineralization zoning in porphyry copper deposits[J]. *Econ. Geol.*, 1970, 65: 373–408.
- [3] Hollister V F. *Geology of the Porphyry copper deposits of the Western Hemisphere*[M]. New York: Soc Mining Engineers AIME, 1978: 0–219.
- [4] Arancibia O N, Clark A H. Early magnetite– amphibole– plagioclase alteration– mineralization in the Island Copper porphyry copper– gold– molybdenum deposit, British Columbia[J]. *Econ. Geol.*, 1996, 91: 402–438.
- [5] Bouzari F, Clark A H. Prograde evolution and geothermal affinities of a major porphyry copper deposit: The Cerro Colorado hypogene protore, I Region, northern Chile[J]. *Econ. Geol.*, 2006, 101: 95–134.
- [6] 杨志明, 侯增谦, 宋玉财, 等. 西藏驱龙超大型斑岩铜矿床: 地质、蚀变与成矿[J]. *矿床地质*, 2008, 27(3): 279–318.  
Yang Zhiming, Hou Zengqian, Song Yucui, et al. Qulong superlarge porphy Cu deposit in Tibet: Geology, alteration and mineralization[J]. *Mineral Deposits*, 2008, 27(3): 279– 318(in Chinese with English abstract).
- [7] Li Guangming, Li Jinxiang, Qin Kezhang, et al. Geology and hydrothermal alteration of the Duobuza gold–rich porphyry copper district in the Bangongco metallogenetic belt, Northwestern Tibet[J]. *Resource Geology*, 2012, 62(1): 99–118.
- [8] Gustafson L B, Hunt J P. The porphyry copper deposit at El Salvador, Chile[J]. *Econ. Geo.*, 1975, 70: 857–912.
- [9] Hunt J P, Bratt J A, Marquardt J C. Quebrada Blanca, Chile: An enriched porphyry copper deposit[J]. *Mining Engineering*, 1983, 35: 636–644.
- [10] Dilles J H, Einaudi M T. Wall– rock alteration and hydrothermal flow paths about the Ann– Mason porphyry copper deposit, Nevada—a 6–km vertical reconstruction[J]. *Econ. Geo.*, 1992, 87: 1963–2001.
- [11] Redmond P B, Landtwing M R, Einaudi M T. Cycles of porphyry dike emplacement, veining, alteration and mineralization in the Bingham porphyry Cu– Au– Mo deposit[J]. *Joint Biennial SGA– SEG Meeting*, 6th, Kraków, Poland, 2001, Proceedings, 473–476.
- [12] Gustafson L B, Quiroga G J. Patterns of mineralization and alteration below the porphyry copper orebody at El Salvador, Chile[J]. *Econ. Geo.*, 1995, 90: 2–16.
- [13] Cannell J, Cooke D R, Walshe J L, et al. Geology, mineralization, alteration, and structural evolution of the El Teniente porphyry Cu– Mo deposit[J]. *Econ. Geo.*, 2005, 100: 979–1003.
- [14] Pollard P J, Taylor R G. Paragenesis of the Grasberg Cu– Au– Ag deposit, Irian Jaya, Indonesia: Results from logging section 13[J]. *Mineralium Deposita*, 2002, 37: 117–136.
- [15] Masterman G J, Cooke D R, Berry R F, et al. Fluid chemistry, structural setting, and emplacement history of the Rosario Cu– Mo porphyry and Cu– Ag– Au epithermal veins, Collahuasi district, northern Chile[J]. *Econ. Geo.*, 2005, 100: 835–862.
- [16] 李光明, 李金祥, 秦克章, 等. 西藏班公湖带多不杂超大型富金斑岩铜矿的高温高盐高氧化成矿流体: 流体包裹体证据[J]. *岩石学报*, 2007, 23(5): 935–952.  
Li Guangming, Li Jinxiang, Qin Kezhang, et al. High temperature, salinity and strong oxidation ore–forming fluid at Duobuza gold–rich porphyry copper deposit in the Bangonghu tectonic belt, Tibet: Evidence from fluid inclusions[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007, 23(5): 935–952(in Chinese with English abstract).
- [17] 祝向平, 陈华安, 马东方, 等. 西藏波龙斑岩铜金矿床的 Re– Os 同位素年龄及其地质意义[J]. *岩石学报*, 2011, 27(7): 2159–2164.  
Zhu Xiangping, Chen Huaan, Ma Dongfang, et al. Re– Os dating for the molybdenite from Bolong porphyry copper– gold deposit in Tibet, China and its geological significance[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2011, 27(7): 2159– 2164(in Chinese with English abstract).
- [18] 陈华安, 祝向平, 马东方, 等. 西藏波龙斑岩铜金矿床成矿斑岩年代学、岩石化学特征及其地质意义[J]. *地质学报*, 2013, 87(10): 1–19.  
Chen Huaan, Zhu Xiangping, Ma Dongfang, et al. Geochronology and geochemistry of the Bolong porphyry Cu– Au deposit, Tibet and its mineralizing significance[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2013, 87(10): 1–19 (in Chinese with English abstract).
- [19] 潘桂堂, 王立全, 朱弟成. 青藏高原区域地质调查中几个重大科学问题的思考[J]. *地质通报*, 2004, 23(1): 12–19.  
Pan Guitang, Wang Liquan, Zhu Dicheng. Thoughts on some important scientific problems in regional geological survey of the Qinghai– Tibet plateau[J]. *Geological Bulletin of China*, 2004, 23(1): 12–19 (in Chinese with English abstract).
- [20] 秦克章, 李光明, 张旗, 等. 西藏浅成低温金–银矿的成矿条件与可能产出区分析——从斑岩–浅成低温铜金成矿系统的角度[C]//陈毓川, 毛景文, 薛春纪(主编). 第八届全国矿床会议论文集. 北京: 地质出版社, 2006: 666–670.  
Qin Kezhang, Li Guangming, Zhang Qi, et al. Metallogenic conditions and possible occurrences for epithermal gold mineralizations in Gangdese and Bangonghu Belts, Tibet—in view of porphyry– epithermal Cu– Au metallogenetic systematic[C]//Chen Yuchuan, Mao Jingwen, Xue Chunji(eds.).



- Proceedings of 8th National Conference of Mineral Deposits, China. Beijing: Geological Publishing House, 2006: 666–670 (in Chinese).
- [21] 康志强, 许继峰, 王保第, 等. 拉萨地块北部去申拉组火山岩: 班公湖–怒江特提斯洋南向俯冲的产物[J]. 岩石学报, 2010, 26(10): 3106–3116.
- Kang Zhiqiang, Xu Jifeng, Wang Baodi, et al. Qushenla Formation volcanic rocks in north Lhasa block: Products of Bangong Co–Nujiang Tethy's southward subduction[J]. Acta Petrologica Sinica, 2010, 26(10): 3106–3116 (in Chinese with English abstract).
- [22] 耿全如, 潘桂棠, 王立全, 等. 班公湖–怒江带、羌塘地块特提斯演化与成矿地质背景[J]. 地质通报, 2011, 30(8): 1261–1274.
- Geng Quanru, Pan Guitang, Wang Liquan, et al. Tethyan evolution and metallogenic geological background of the Bangong Co–Nujiang belt and the Qiangtang massif in Tibet[J]. Geological Bulletin of China, 2011, 30(8): 1261–1274 (in Chinese with English abstract).
- [23] 高顺宝, 郑有业, 王进寿, 等. 西藏班戈地区侵入岩年代学和地球化学对班公湖–怒江洋盆演化时限的制约[J]. 岩石学报, 2011, 27(7): 1973–1982.
- Gao Sunbao, Zheng Youye, Wang Jinshou, et al. The geochronology and geochemistry of intrusive rocks in Bange area: Constraints on the evolution time of the Bangong Lake–Nujiang ocean basin[J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27(7): 1973–1982(in Chinese with English abstract).
- [24] 曲晓明, 辛洪波, 杜德道, 等. 西藏班公湖–怒江缝合带中段碰撞后A型花岗岩的时代及其对洋盆闭合时间的约束[J]. 地球化学, 2012, 41(1): 1–14.
- Qu Xiaomin, Xin Hongbo, Du Dedao, et al. Ages of post-collisional A-type granite and constraints on the closure of the oceanic basin in the middle segment of the Bangonghu–Nujiang suture, the Tibetan plateau[J]. Geochimica, 2012, 41(1): 1–14 (in Chinese with English abstract).
- [25] 吴珍汉, 叶培盛, 杨艳. 西藏阿里推覆构造与蛇绿岩构造侵位[J]. 中国地质, 2013, 40(1): 182–190.
- Wu Zhenhan, Yepesheng, Yang Yan. The Ngari thrust system and tectonic emplacement of ophiolites in western Tibet[J]. Geology in China, 2013, 40(1): 182–190(in Chinese with English abstract).
- [26] 张予杰, 刘伟, 朱同兴, 等. 西藏申扎县买巴地区早白垩世侵入岩锆石U–Pb年龄及地球化学[J]. 中国地质, 2014, 41(1): 50–60.
- Zhang Yujie, Liu Wei, Zhu Tongxing, et al. Zircon U–Pb age and geochemistry of Early Cretaceous intrusive rocks in Maiba area of Xainza County, Tibet[J]. Geology in China, 2014, 41(1): 50–60 (in Chinese with English abstract).
- [27] 冯国胜, 陈振华, 廖六根, 等. 西藏日土地区弗野玢岩铁矿的地质特征及找矿意义[J]. 地质通报, 2007, 26(8): 1041–1047.
- Feng Guosheng, Chen Zhenhua, Liao Liugen, Xet al. Geological characteristics of the Fuye porphyrite iron deposit, Rutog County, Tibet, China and its significance for iron prospecting[J]. Geological Bulletin of China, 2007, 26(8): 1041–1047(in Chinese with English abstract).
- [28] 李金祥, 李光明, 秦克章, 等. 班公湖带多不杂富金斑岩铜矿床斑岩–火山岩的地球化学特征与时代: 对成矿构造背景的制约[J]. 岩石学报, 2008, 24(3): 531–543.
- Li Jinxiang, Li Guangming, Qin Kezhang, et al. Geochemistry of porphyries and volcanic rocks and ore-forming geochronology of Duobuza gold-rich porphyry copper deposit in Bangonghu belt, Tibet: Constraints on metallogenic tectonic settings[J]. Acta Petrologica Sinica, 2008, 24(3): 531–543(in Chinese with English abstract).
- [29] 唐菊兴, 张志, 李志军, 等. 西藏尕尔穷–嘎拉勒铜金矿集区成矿规律、矿床模型与找矿方向[J]. 地球学报, 2013, 34(4): 385–394.
- Tang Juxing, Zhang Zhi, Li Zhijun, et al. The metallogenic regularity, deposit model and prospecting direction of Gaerqiong–Galale copper–gold ore field, Tibet[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2013, 34(4): 385–394 (in Chinese with English abstract).
- [30] 唐菊兴, 孙兴国, 丁帅, 等. 西藏多龙矿集区发现浅成低温热液型铜(金银)矿床[J]. 地球学报, 2014, 35(1): 6–10.
- Tang Juxing, Sun Xingguo, Ding Shuai, et al. Discovery of the epithermal deposit of Cu(Au–Ag) in the Duolong ore concentrating area, Tibet[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2014, 35(1): 6–10(in Chinese with English abstract).
- [31] 张志, 唐菊兴, 李志军, 等. 西藏尕尔穷–嘎拉勒铜金矿集区侵入岩岩石地球化学特征及其地质意义[J]. 地质与勘探, 2013, 49(4): 676–688.
- Zhang Zhi, Tang Juxing, Li Zhijun, et al. Petrology and geochemistry characteristics and their geological significance of intrusive rocks in Gaerqiong–Galale ore concentration area, Tibet[J]. Geology and Exploration, 2013, 49(4): 676–688(in Chinese with English abstract).
- [32] 江少卿, 孙兴国, 杨铁铮, 等. 藏北多龙斑岩铜金矿集区综合信息找矿模型研究[J]. 中国地质, 2014, 41(2): 497–509.
- Jiang Shaoqing, Sun Xingguo, Yang Tiezheng, et al. Integrated anomaly model and metallogenic prediction of the Duolong porphyry copper-gold ore concentration area in northern Tibet[J]. Geology in China, 2014, 41(2): 497–509(in Chinese with English abstract).
- [33] 方向, 唐菊兴, 李彦波, 等. 西藏多龙矿集区拿若铜(金)矿床成矿元素空间分布规律及地球化学勘查模型[J]. 中国地质, 2014, 41(3): 936–950.
- Fang Xiang, Tang Juxing, Li Yanbo, et al. Metallogenic element

- spatial distribution of the Naruo copper (gold) deposit in the Duolong ore concentration area of Tibet and its geochemical exploration model[J]. *Geology in China*, 2014, 41(3): 936–950(in Chinese with English abstract).
- [34] 孙兴国, 冯道永, 粟登逵, 等. 西藏班公湖带铁格隆南超大型斑岩铜(金)矿床的勘查突破及区域找矿意义[J]. *中国地质*, 2014, 41(4): 1314–1327.
- Sun Xingguo, Feng Daoyong, Su Dengkui, et al. The exploration breakthrough of the Tiegelongnan superlarge porphyry Cu(Au) deposit, Bangong Lake arc, Tibet, and its significance[J]. *Geology in China*, 2014, 41(4): 1314–1327(in Chinese with English abstract).
- [35] 张志, 唐菊兴, 李玉彬, 等. 西藏多不杂富金斑岩铜矿床蚀变与脉体系统[J]. *矿床地质*, 2014, 33(6).
- Zhang Zhi, Tang Juxing, Li Yubin, et al. Mineralization, alteration and vein systems of Duobuza gold-rich porphyry copper deposit, Tibet[J]. *Mineral Deposits*, 2014, 33(6)(in Chinese with English abstract).
- [36] Li Jinxiang, Li Guangming, Qin Kezhang, et al. High-temperature magmatic fluid exsolved from magma at the Duolong porphyry copper-gold deposit, Northern Tibet[J]. *Geofluids*, 2011, 11(1): 134–143.
- [37] Li Jinxiang, Li Guangming, Qin Kezhang, et al. Mineralogy and mineral chemistry of the Cretaceous Duolong gold-rich porphyry copper deposit in the Bangongco arc, northern Tibet[J]. *Resource Geology*, 2012, 62(1): 19–41.
- [38] Xiao Bo, Qin Kezhang, Li Guangming, et al. Highly oxidized magma and fluid evolution of Miocene Qulong giant porphyry Cu–Mo deposit, Southern Tibet, China[J]. *Resource Geology*, 2012, 62(1): 4–18.
- [39] 金露英, 秦克章, 孟昭君, 等. 大兴安岭北段岔路口巨型铜铅锌矿床脉体特征、产状及其对成矿的指示[J]. *矿床地质*, 2014, 31(4): 742–760.
- Jin Luying, Qin Kezhang, Meng Zhaojun, et al. Features and occurrences of veins in Chalukou giant molybdenum-zinc-lead deposit, northern Da Hinggan Mountains, and their indications for mineralization[J]. *Mineral Deposits*, 2014, 31(4): 742–760(in Chinese with English abstract).
- [40] Li Zhenzhen, Qin Kezhang, Li Guangming, et al. Formation of the giant Chalukou porphy Mo deposit in northern Great Xing'an Range, NE China: Partial melting of juvenile lower crust in intraplate extension environment[J]. *Lithos*, 2014, 202–203: 138–156.
- [41] Garza R A P, Titley S R, Francisco P B. Geology of the Escondida porphyry copper deposit, Antofagasta region, Chile[J]. *Econ. Geo.*, 2001, 96: 307–324.
- [42] Ulrich T, Heinrich C A. Geology and alteration geochemistry of the porphyry Cu–Au deposit at Bajo de la Alumbrera Argentina[J]. *Econ. Geo.*, 2001, 96: 1719–1742.