

doi: 10.12029/gc20160510

汪东波, 江少卿, 董方浏. 藏北多龙矿集区荣那斑岩铜矿找矿突破的实践[J]. 中国地质, 2016, 43(5): 1599–1612.

Wang Dongbo, Jiang Shaoqing, Dong Fangliu. Geological exploration of the Rongna porphyry copper deposit in the Duolong ore concentration area, northern Tibet[J]. Geology in China, 2016, 43(5): 1599–1612(in Chinese with English abstract).

藏北多龙矿集区荣那斑岩铜矿找矿突破的实践

汪东波^{1,2} 江少卿^{1,2} 董方浏^{1,2}

(1. 中铝矿产资源有限公司, 北京 100082; 2. 中国铝业公司, 北京 100082)

摘要: 荣那铜矿是中铝矿产资源有限公司近年在斑岩型铜矿找矿方面取得的一项重大突破。矿床产于班公湖—怒江缝合带北侧岛弧带中。公司在找矿初期重视基础地质研究, 加强对地调和矿调成果的二次解剖, 借鉴国内外斑岩铜矿区域分布规律, 结合 1:5 万磁法异常, 明确多龙矿集区重点找矿方向; 根据前期勘查成果, 结合 1:5 万水系沉积物测量成果, 确定荣那、拿若为重点验证区。通过总结国外斑岩铜矿蚀变模式、矿化模式和勘查模式, 选择有效的激电勘查方法圈定重点验证地段。结合隐伏斑岩体系矿化中心为中低阻、负磁异常、中等极化率, 外围发育黄铁矿化壳形成近似环状中高阻、正磁异常、中高极化率异常, 最终确定外围正磁、中高极化率异常系荣那矿床与青磐岩化带有关的黄铁矿化壳引起, 负磁、中等极化率异常为矿化中心部位, 通过选择合理网度进行钻探验证实现找矿突破。荣那矿床勘查过程中的理论思考, 区域—矿田物化探异常的综合分析、有效方法的投入和验证工程的部署充分体现了科学研究与生产的有机结合。

关键词: 斑岩铜矿; 水系沉积物测量; 磁法测量; 激发极化测量; 蚀变—矿化—勘查模式; 荣那

中图分类号: P618.41 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3657(2016)05-1599-14

Geological exploration of the Rongna porphyry copper deposit in the Duolong ore concentration area, northern Tibet

WANG Dong-bo^{1,2}, JIANG Shao-qing^{1,2}, DONG Fang-liu^{1,2}

(1. Chinalco Resources Corporation, Beijing 100082, China; 2. Aluminum Corporation of China, Beijing 100082, China)

Abstract: The Rongna copper deposit is a major exploring breakthrough of Chinalco Resources Corporation in recent years. The Rongna deposit is located in northern island arc of Bangong Co–Nujiang suture zone. Based on geological data of regional geological and mineral survey, 1:50000 magnetic anomaly, and distribution pattern of global porphyry copper deposits, the authors delineated the exploring potential zone in Duolong. According to 1:50000 stream sediment survey and other exploring achievements, Rongna and Naruo deposits were chosen as major exploring targets. Induced polarization survey was conducted as an effective method for delineating the drilling area by summarizing alteration, mineralization and exploration modes of global porphyry copper deposits. Two different geophysical anomaly patterns are generally displayed for the buried porphyry system in

收稿日期: 2016-08-04; 改回日期: 2016-08-21

基金项目: 中国铝业公司科技发展基金重点项目(2011KJZD09)资助。

作者简介: 汪东波, 男, 1962 年生, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事矿产普查与勘探研究; E-mail: db_wang@chalco.com.cn。

通讯作者: 江少卿, 男, 1983 年生, 博士, 高级工程师, 主要从事矿产普查与勘探研究; E-mail: jiangshaoqing83@163.com。

plan view: (1) the center of buried porphyry system generally develops the low resistance, moderate polarization, and negative magnetic anomaly, and (2) the pyrite shell surrounding porphyry system forms medium to high resistance, medium to high polarization, and positive magnetic anomaly. The authors infer that medium-high polarization and positive-magnetic anomaly developed surrounding the periphery of the Rongna deposit was triggered by pyrite shell correlated with propylitization belt, whereas the medium polarization and negative magnetic anomaly is located at the center of the mineralization zone. Bonanza grade copper mineralization was achieved after operating reasonable drilling. The exploring procedure of Rongna from the theoretical thinking, geophysical and geochemical anomaly analysis at different scales for effective investment and drilling operation reflects the combination art of scientific research and industrial production.

Key words: porphyry copper deposit; stream sediment survey; magnetic survey; induced polarization survey; alteration-mineralization-exploration model; Rongna

About the first author: WANG Dong-bo, male, born in 1962, doctor, economic geologist, mainly engages in the study of mineral exploration and exploitation; E-mail: db_wang@chalco.com.cn.

About the corresponding author: JIANG Shao-qing, male, born in 1983, doctor, senior geologist, mainly engages in the study of mineral exploration and exploitation; E-mail: jiangshaoqing83@163.com.

Fund support: Supported by China Ico Science and Technology Development Fund (No. 2011KJZD09).

1 引 言

西藏改则县荣那铜矿位于班公湖怒江带。荣那斑岩型矿床是中国目前发现的世界级斑岩型铜矿床之一,铜资源量规模为中国目前最大单体斑岩铜矿。自荣那铜矿床发现以来,众多学者对矿床地球化学特征、矿床蚀变特征、矿体和围岩特征、成矿机理做了一定的研究^[1-3]。但长期以来,西藏地区对斑岩铜矿的勘查工作,包括对荣那矿床的研究与勘查,缺乏对综合找矿方法优选、勘查模式厘定和有效技术方法投入的系统总结;成矿理论与勘查技术方法的有机结合程度不足长期制约西藏地区、班公湖—怒江成矿带、多龙矿田实现新的更大的找矿突破。为此,本文系统总结藏北多龙矿集区荣那斑岩矿床的找矿突破经验,强调地质背景分析与物化探资料融合、选择有效的物化探方法确定矿化中心并实施钻探工程验证,从而取得勘查突破,以期为矿业公司勘查选区和勘查突破提供经典范例,同时对指导班公湖—怒江成矿带及其世界同类地质背景的下一步找矿突破均有重要借鉴意义。

2 多龙矿集区勘查历史和概况

2.1 地理位置和大地构造背景

荣那铜矿床位于西藏阿里地区改则县物玛乡萨玛龙与扎多村境内,处于羌塘—三江复合板片南缘、班公湖—怒江缝合带北侧;地处多龙矿集区北

部,是多龙超大型斑岩铜(金)矿集区内的主要矿床。特提斯主大洋的南北双向俯冲具有与南美安第斯平坦俯冲相似构造特征,班公湖—怒江带极有可能是中国的安第斯^[4-5]。在中侏罗世至早白垩世特提斯洋班公湖—怒江段洋壳向北俯冲重熔形成岩浆弧,早白垩世岩浆弧演化过程中,在多龙矿集区形成美日切错组火山岩以及成矿斑岩体^[6-8]。

2.2 地质调查与勘查沿革

1975—1986年,西藏自治区地质局区调队开展了1:100万日土幅、改则幅区域地质调查,初步建立工作区的地层系统,对班公湖—怒江缝合带进行了初步的研究。

1998—1999年,中国国土资源航空物探遥感中心开展1:100万青藏高原中西部航磁概查,发现多龙矿集区正磁异常,峰值为500 nT,范围约20 km²。2003年,四川省地质调查院开展物玛幅1:25万区域地质调查,覆盖整个多龙矿集区,对区内地层、构造格架、岩浆岩进行系统划分。

2008年,西藏自治区地质调查院“西藏班公湖—怒江成矿带西段铜多金属资源调查”项目,在多龙矿集区完成1:5万地面高精度磁测、水系沉积物测量900 km²。通过1:5万地面高精度磁法测量工作,划分出高磁异常区、异常畸变区、低磁异常区3个异常带,识别局部磁异常35处,显示异常畸变区内的弱磁异常与矿体对应关系较好;通过1:5万水系沉积物测量,圈定地堡那木岗—波龙—多不杂、

拿若—赛角—铁格隆、尕尔勤、萨玛龙沟北等5处综合化探异常。

2.3 矿床(点)的分布

截至2016年,多龙矿集区内已发现荣那、波龙、多不杂、拿若、拿厅、地堡那木岗、拿顿、赛角、尕尔勤等9个矿床(点),区内斑岩矿床均与北东向控岩、控矿断层有关。矿集区内断裂构造发育,有近东西向成矿前断裂F2、F4(图1),北东向成矿期控矿断裂F10、F13,北西向成矿后断裂F5、F6、F8,区内主要矿点大多位于北东向或北西向构造与东西向构造交汇处。北东向断裂构造F10为本区主要控岩、控矿构造^[8-12],荣那、拿若、波龙、多不杂等矿床均沿该构造分布。

2.4 多龙矿集区和荣那勘查成果

中铝矿产资源有限公司介入本区勘查工作之前的2005—2011年,已经发现波龙(图2-A)、多不杂(图2-B)两个超大型斑岩铜矿,拿若(图2-C)大型矿床和尕尔勤、色那、拿厅等矿点,并对荣那矿区进行了钻探验证工作(图2-D)。

2010年在荣那西部以200 m×200 m工程间距施工5个钻孔,其中ZK0704穿矿厚度8 m、平均铜品位0.55%,ZK0005穿矿厚度127 m、平均铜品位0.35%,ZK0604穿矿厚度28 m、平均铜品位0.40%,ZK0805穿矿厚度182 m、平均铜品位0.39%,矿体呈脉状分布,探获铜金属量6.03万t。由于工程布设于矿体边部,验证效果不理想;2010—2012年,通过系

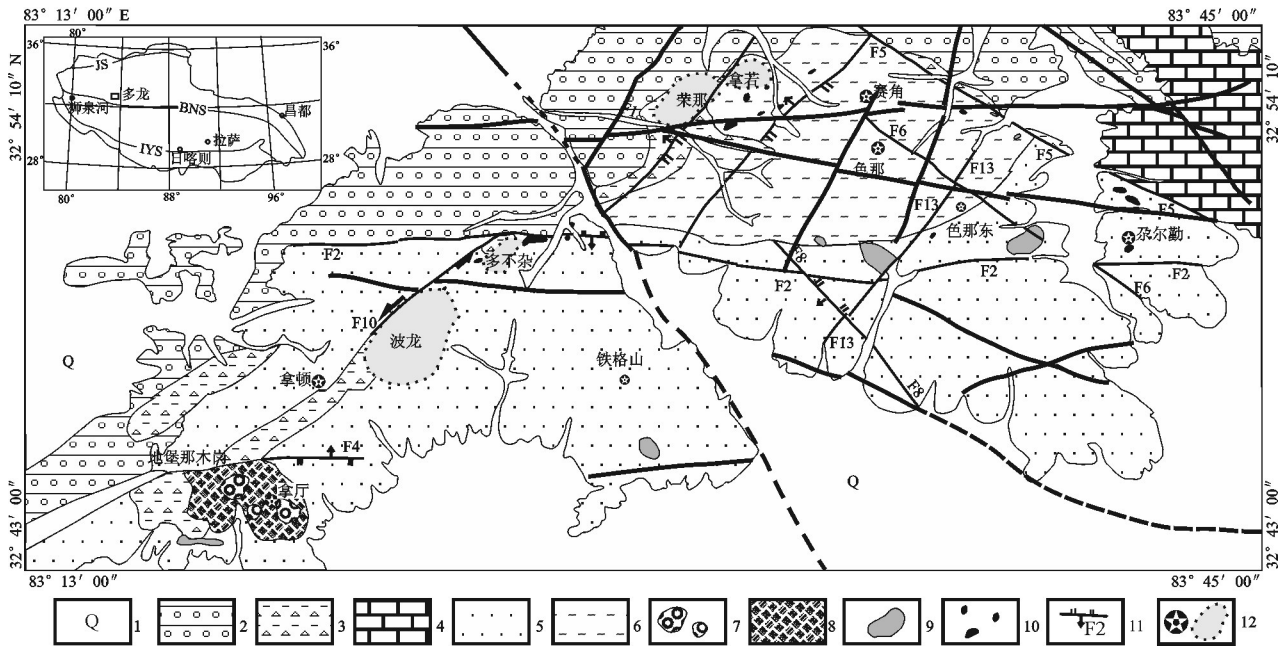


图1 多龙矿集区区域地质图(据①修改)

- 1—Q—第四系残坡积物; 2—E_{3k}—上渐新统康托组棕红色黏土及砂砾石层; 3—K_{1m}—下白垩统美日切组火山角砾岩; 4—T_{3r}—上三叠统日干配组: 厚层状灰岩; 5—J_{1q}—下侏罗统曲色组: 变质(长石)石英砂岩、粉砂岩、粉砂质板岩, 夹硅质岩、灰绿色玄武岩、基性火山熔岩;
- 6—J_{1-s}—下—中侏罗统色哇组: 变质(长石)石英砂岩、砂砾岩夹深灰色至深黑色变质石英粉砂岩; 7—K_{1λδπ}—早白垩世石英斑岩;
- 8—K_{1ηγπ}—早白垩世二长斑岩; 9—K_{1γπ}—早白垩世花岗斑岩; 10—K_{1γδπ}—早白垩世花岗闪长斑岩; 11—断层; 12—铜矿点和铜矿床

Fig. 1 Regional geological map of the Duolong ore concentration area (modified after ①)

- 1—Q—Quaternary eluvial sediments; 2—E_{3k}—Red-brown clay and gravel layers in the Upper Oligocene Kangtuo Formation; 3—K_{1m}—Volcanic breccia in the Lower Cretaceous Meiriquiecuo Formation; 4—T_{3r}—Upper Triassic Riganpeicuo Formation; 5—J_{1q}—Lower Jurassic Quse Formation: altered quartz sandstone, siltstone, silty slate, siliceous rocks, gray-green basalt, mafic volcanic lava; 6—J_{1-s}—Lower-Middle Jurassic Sewa Formation: variable length altered quartz sandstone conglomerate interbedded with deep-black to dark-gray altered quartz siltstone; 7—K_{1λδπ}—Early Cretaceous quartz porphyry; 8—K_{1ηγπ}—Early Cretaceous monzonite porphyry; 9—K_{1γπ}—Early Cretaceous granitic porphyry; 10—K_{1γδπ}—Early Cretaceous granodiorite porphyry; 11—Fault; 12—Copper ore spots and deposits

① 西藏地勘局地质五队. 西藏多龙1:5万地质报告[R]. 2012.

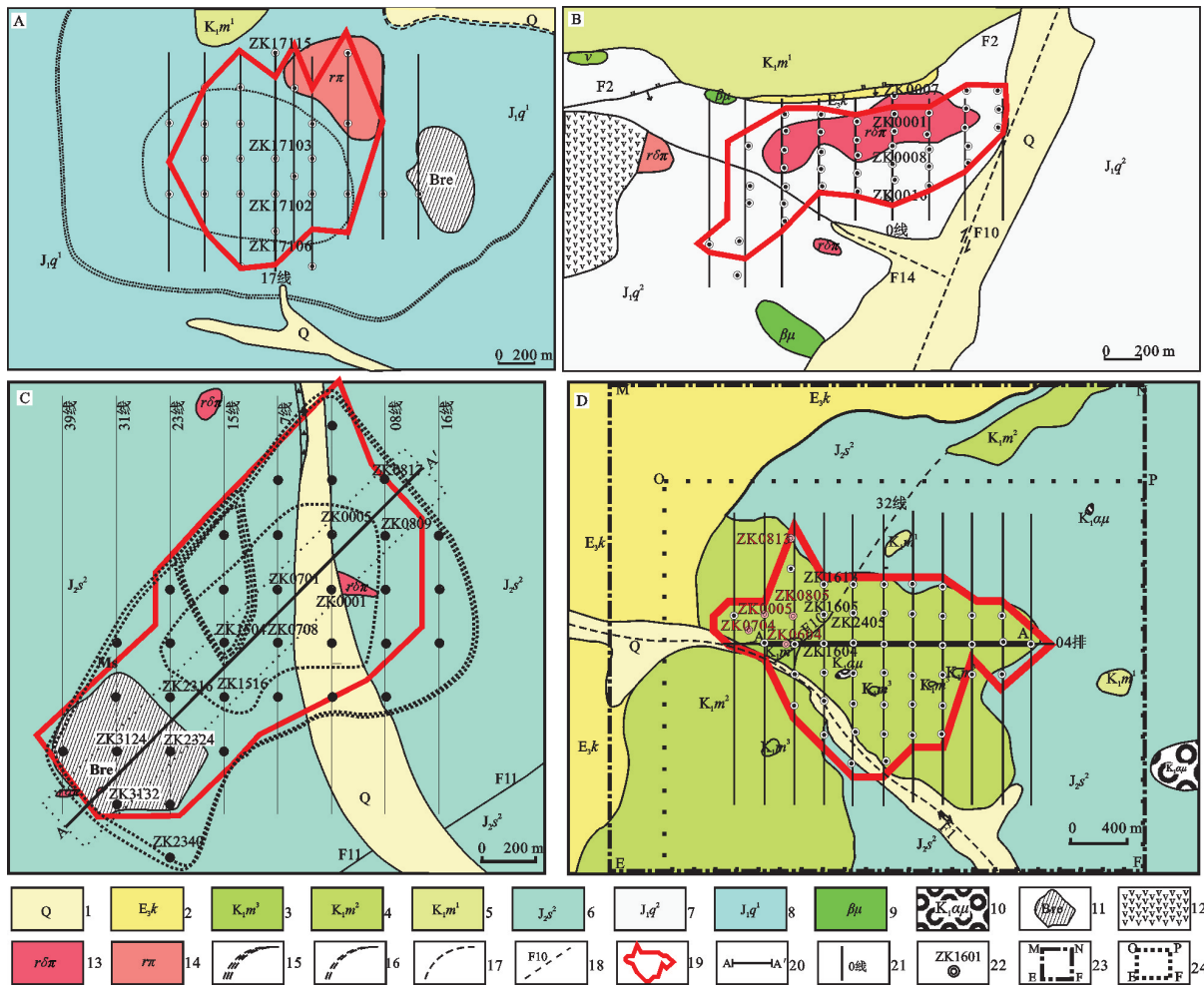


图2 多龙主要铜矿床地质与工程部署简图

A—波龙矿床(据文献[13]修改); B—多不杂矿床(据文献[14]修改); C—拿若矿床(据①修改); D—荣那矿床(据②修改)

1—Q—第四系残坡积物; 2—E₃k—上新统康托组棕红色黏土及砂砾石层; 3—K₁m³—下白垩统美日切错组下段玄武岩; 4—K₁m²—下白垩统美日切错组中段安山岩; 5—K₁m¹—下白垩统美日切错组上段火山角砾岩、集块岩; 6—J₂s²—中侏罗统色哇组二段: 变质石英砂岩、变质(长石)石英砂岩夹深灰色粉砂质板岩; 7—J₂q²—下侏罗统曲色组二段: 变质长石石英砂岩、粉砂岩、粉砂质板岩夹硅质岩; 8—J₂q¹—下侏罗统曲色组一段: 深灰色粉砂质板岩夹变质长石石英砂岩、灰岩条带; 9—βμ—墨绿色辉绿岩; 10—K₁αμ—下白垩统安山玢岩; 11—隐爆角砾岩筒; 12—玄武质安山岩; 13—rδπ—花岗闪长斑岩; 14—γπ—花岗斑岩; 15—泥化带; 16—青磐石化带; 17—黄铁绢英岩化带; 18—断层; 19—矿体范围; 20—钻孔剖面及范围; 21—勘探线; 22—钻孔; 23—1:1万磁法测量范围; 24—1:1万激电测量范围

Fig. 2 Geology and project layout of major Duolong Cu deposits

A—Bolong deposit (modified after reference [13]); B—Duobuza deposit (modified after reference [14]); C—Naruo deposit (modified after ①); D—Rongna deposit (modified after ②)

1—Q—Quaternary eluvial sediments; 2—E₃k—Red-brown clay and gravel layers in the Upper Oligocene Kangtuo Formation; 3—K₁m³—Basalt in the 3rd Member of the Lower Cretaceous Meiriquiecuo Formation; 4—K₁m²—Andesite in the 2nd Member of the Lower Cretaceous Meiriquiecuo Formation; 5—K₁m¹—Volcanic breccia in the 1st Member of the Lower Cretaceous Meiriquiecuo Formation; 6—J₂s²—The 2nd Member of the Middle Jurassic Sewa Formation: altered quartz sandstone, altered (feldspathic-) quartz sandstone interbedded with dark-gray silty slate; 7—The second member of the Quse Formation in Lower Jurassic: metamorphic feldspar quartz sandstone, siltstone; 8—J₂q¹—The first member of the Quse Formation in Lower Jurassic: Deep gray silty slate with metamorphic feldspar quartz sandstone, limestone; 9—βμ—Atrovirens diabase; 10—K₁αμ—Andesitic porphyrite of the Lower Cretaceous; 11—Aidden explosive breccias; 12—Basaltic andesite; 13—rδπ—Granodiorite-porphry; 14—γπ—Granitic porphyry; 15—Argillic zone; 16—Propylitization rock belt; 17—Pyrite phyllic zone; 18—Fault; 19—Orebody zone; 20—Drill hole profile; 21—Fencing lines; 22—Drill holes; 23—Magnetic survey area at 1:10000 scale; 24—IP survey area at 1:10000 scale

① 西藏地勘局地质五队. 西藏荣那2015年度详查报告[R]. 2015.

② 西藏地质调查院. 西藏多龙1:5万水文报告[R]. 2008.

统的地质填图、物化探工作、地表工程,2012年在荣那矿区北部对矿体继续追索,施工ZK0813仅发现43 m、0.29%铜品位矿化,探矿效果较差。截至2012年末,尚未发现主矿体,估算333+334级别铜金属量仅21.6万t。

2012年中铝矿产资源有限公司进入多龙矿集区开展找矿工作,充分借鉴国外斑岩铜矿的成矿理论、矿化蚀变和勘查模式,根据化探异常、磁异常的空间展布规律,预测2011年前验证区东部的负磁异常区对应于矿化-蚀变中心,据此布设1:1万激发极化测量和钻探验证工程。2013年在荣那矿区ZK1604验证钻孔发现矿体连续穿矿厚度达到594.14 m(未穿透矿体),铜平均品位为0.62%,由此揭开了荣那铜矿找矿突破的序幕。截止2015年,荣那矿床估算332+333+334级别铜金属量达到1097.92万t,铜平均品位0.53%。

3 多龙地区斑岩铜矿勘查战略选区

3.1 有利成矿地质背景条件

班公湖—怒江铜矿带系特提斯成矿域的重要组成部分,该带在中侏罗世至早白垩世向南、北两侧俯冲并形成岩浆弧,该岩浆弧是重要的成矿带,形成斑岩型铜(金)等矿床^[13-15]。多龙矿集区位于北侧岩浆弧内,属于活动大陆边缘^[8],具有与南美安第斯平坦俯冲相似的构造岩浆演化-矿化特征。岩浆弧内断裂交汇部位,特别是岩浆活动前及期间的断裂,与斑岩铜矿定位关系密切。横向断裂、线性构造可能与基底构造有关,有助于岩浆的上侵与定位。大型的横断层、线性构造与平行弧的构造交汇往往控制斑岩矿床的定位。多龙矿集区内发育北东向、北西向、近东西向3组断裂,其中北东向断裂与岩浆弧走向近垂直。区内3组断裂构造呈网格状发育,构造交汇部位为成矿提供有利空间。

3.2 多不杂一波龙斑岩铜矿已发现且具有较大规模

2012年中铝公司介入多龙矿集区之前该矿集区已经取得找矿突破,西藏改则县多不杂一波龙斑岩型超大型铜金矿床是继玉龙、驱龙、雄村、甲玛等超大型铜矿床之后的西藏地区又一重大找矿突破,也是班公湖—怒江成矿带发现的两个超大型斑岩铜金矿。截至2011年底,多不杂一波龙矿床333+

334铜金属量508万t,铜平均品位0.50%,伴生金的金属量217 t,金平均品位Au 0.21 g/t。多不杂一波龙斑岩铜矿的发现说明该区具有寻找世界级斑岩铜矿的成矿背景,进一步坚定了在该区持续勘查,实现找矿新突破的信心。

3.3 若干矿点评价工作进行中且展示良好前景

2008年,西藏地质五队1:5万水系沉积物测量工作成果表明,多龙地区Cu、Au元素的地球化学背景值高于西藏平均值和全国平均值^①,多龙地区Cu、Au成矿元素局部富集趋势明显,Cu、Au元素异常清晰、分布面积大、三级浓集分带完整(图3)。在多不杂一波龙矿田范围内,Cu元素高异常中心出现在多不杂、拿若—赛角—色那、荣那西侧的萨玛龙沟、尕尔勤、地堡那木岗、铁格山及以南区域。2012年前,除波龙、多不杂、拿若一批“高、大、全”异常得以评价并取得找矿进展外,其他低缓异常的查证工作尚未系统开展;如何将化探异常的评价与地质背景、物探异常的解译相结合尚未破题;荣那、尕尔勤、地堡那木岗、色那、赛角、铁格山等矿点均处于勘查工作的初期阶段,其潜力与前景有待评价。

4 勘查工作部署的思考

4.1 找矿方向的确定

(1)全球斑岩铜矿分布规律的启示

斑岩铜矿定位与岩浆弧内断裂交汇部位关系密切,大型横断层、线性构造与平行弧的构造交汇控制矿床的定位,主要呈带状和群状2种分布样式。矿带或者矿群中单一矿床间的距离为100~1000 m,深部形态变化巨大^[16]。呈矿群分布的斑岩铜矿田,如美国Globe—Miami矿田(图4-A);呈矿带分布斑岩铜矿田分为2种,一种为平行弧分布(智利Chuquicamata矿田,图4-B),另一种为穿弧分布(澳大利亚Cadia矿田,图4-C;蒙古Oyu Tolgoi矿田,图4-D)。中国西藏玉龙斑岩成矿带中的玉龙—扎那尕—多霞松多—马拉松多—莽总斑岩铜矿呈现矿带式产出(图4-E);江西德兴地区富家坞—铜厂—朱砂红斑岩铜矿也呈现矿带式分布(图4-F)。西藏多龙矿集区波龙—多不杂—荣那—拿若(图4-G)沿北东向断裂构造F10呈带状分布,因此多龙矿集区矿床应属于矿带型分布模式,据此笔者判定勘查区

①西藏地质调查院. 西藏多龙1:5万水文报告[R]. 2008.

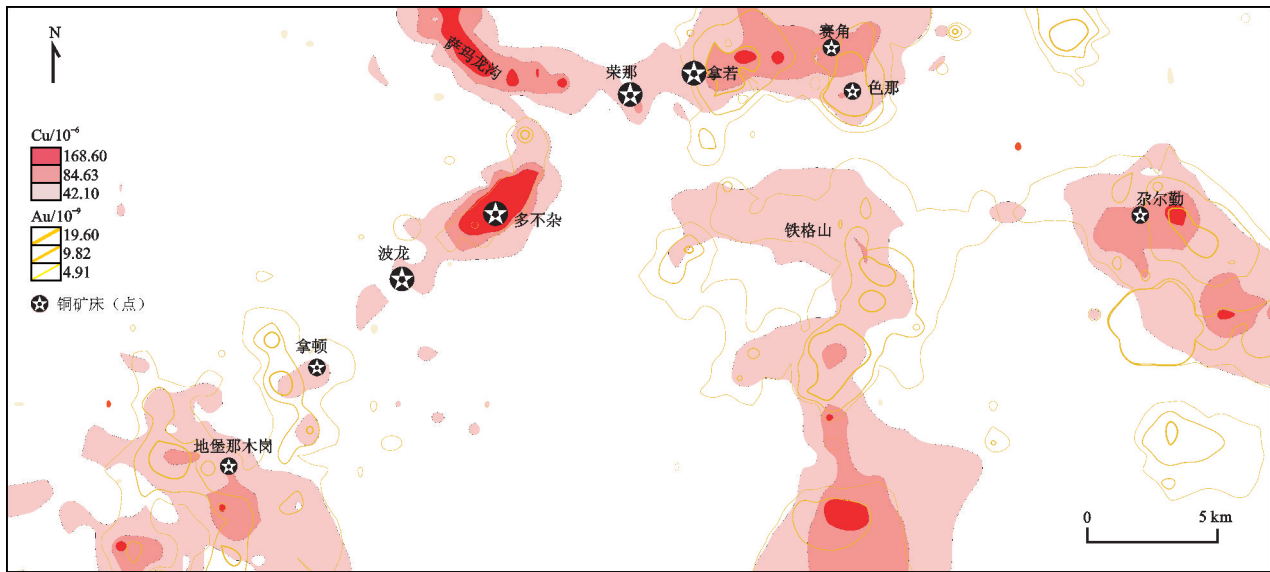


图3 多龙矿集区铜-金元素异常特征简图(据①修改)

Fig.3 Simplified map of copper anomalies in Duolong area (modified after ①)

下步的找矿重点应沿F10断层展开。

(2) 赋矿围岩的差异与矿体出露情况的启示

通过对比多龙矿集区已知斑岩铜矿赋矿围岩的地层层序以及矿体埋藏出露特征,可以进一步评价多龙矿集区处于相同层位尚未揭露的铜矿床(点)的找矿潜力。波龙、多不杂、荣那、拿若4个铜矿赋矿围岩和矿体出露特征如下:

波龙矿床: 围岩为下侏罗统曲色组,含矿斑岩体为隐伏花岗闪长斑岩(图5-A),主要呈岩株、岩脉、岩墙产出。由于蚀变较强,表现为浅灰色、灰色、波龙矿区矿体为露头矿,主矿体空间形态总体上呈筒状,长900 m,宽900 m,厚650 m,钻孔控制的矿体最大深度为1003 m,矿体Cu平均品位为0.45%,伴生Au平均品位为0.21 g/t。

多不杂矿床: 围岩为下侏罗统曲色组,含矿花岗闪长斑岩体出露地表,出露面积约0.39 km²。矿体在空间上呈蘑菇状,垂向上呈厚板状(图5-B),矿体长1500 m、宽900 m、厚600 m,钻孔控制的矿体最大深度为601.31 m,矿体Cu平均品位0.43%,伴生Au平均品位0.13 g/t。矿体顶板分布有表生期氧化矿,厚度100~150 m,氧化矿物为孔雀石、蓝铜矿、褐铁矿等。

荣那矿床: 围岩为中侏罗统色哇组(J_2s^2)变质(长

石)石英砂岩夹深灰色粉砂质板岩。含矿斑岩为花岗闪长斑岩和花岗斑岩,上覆美日切错组安山岩(图5-C),美日切错组安山岩厚度为150~230 m。矿体呈近东西向展布,东西长2200 m、南北宽1600 m、厚980 m,钻孔控制的矿体最大深度为1138 m,矿体Cu平均品位0.53%,伴生Au平均品位0.13 g/t。

拿若矿床: 围岩为中侏罗统色哇组(J_2s^2)变质(长石)石英砂岩夹深灰色粉砂质板岩(图2),美日切错组安山岩未在拿若矿区出现。含矿斑岩为花岗闪长斑岩体,斑岩体出露地表(图5-D)。拿若铜金矿体为浅剥蚀露头矿,矿体以23线为界,东侧为斑岩型较完整的铜金矿体,铜矿体产于花岗闪长斑岩体内及岩体边部的黄铁绢英岩化和青磐岩化变质(长石)石英砂岩中,西侧为引爆角砾岩型连续性较差的铜金矿(化)体。矿体走向呈北东-南西,东西长1600 m、南北宽1400 m、厚406 m,钻孔控制的矿体最大深度为700 m,矿体Cu平均品位0.38%,伴生金平均品位0.19 g/t。

矿床点空间分布与围岩的空间对应关系中(表1),波龙矿床和多不杂矿床的围岩均为下侏罗统曲色组,矿体为露头矿;荣那矿床的围岩为中侏罗统色哇组,上部覆盖下白垩统美日切错组,矿体为隐伏矿;拿若矿床的围岩为中侏罗统色哇组,矿体为

① 西藏地质调查院. 西藏多龙1:5万水文报告[R]. 2008.

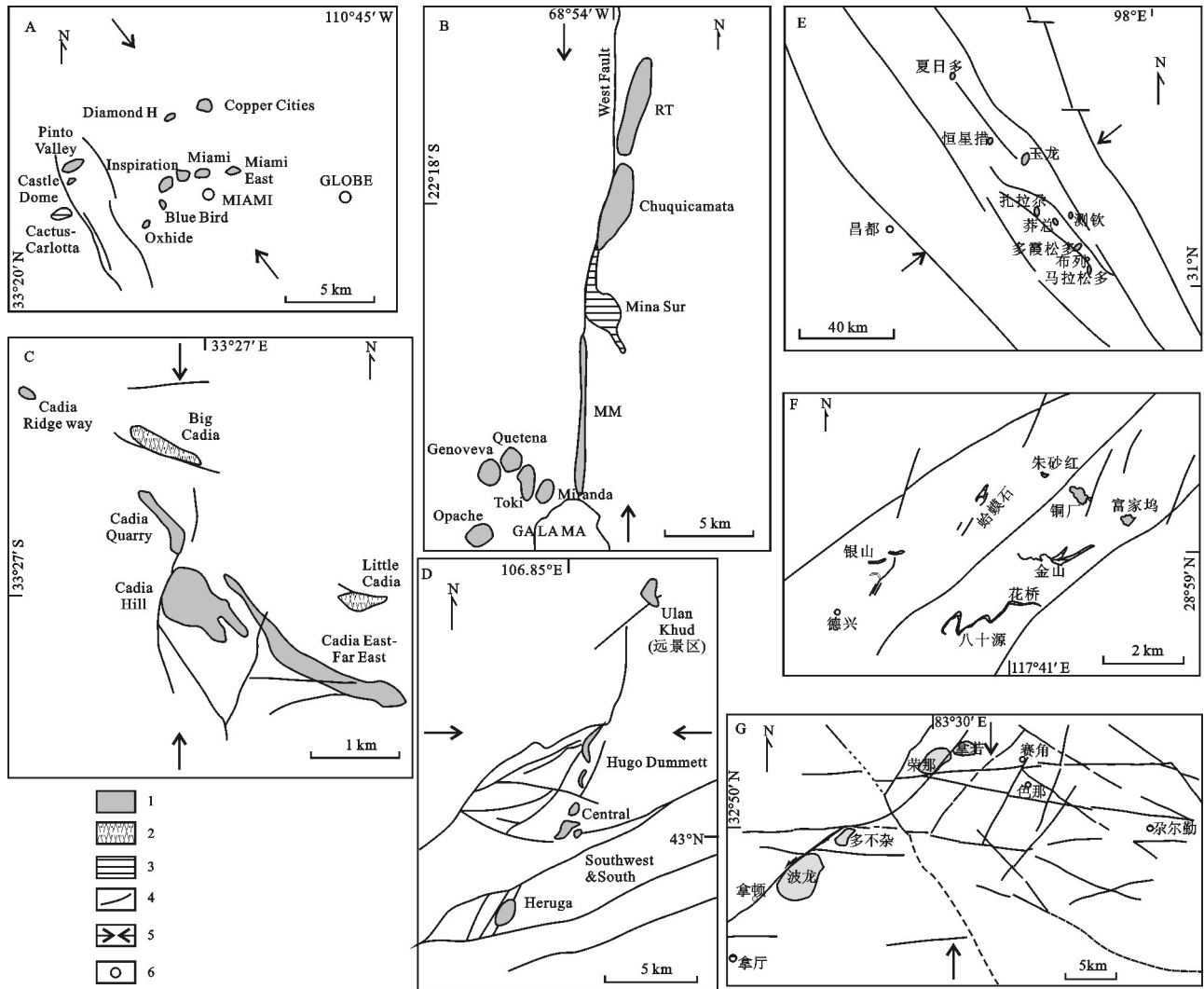


图4 同期岩浆弧形成的群状和线状分布斑岩铜矿床

A—美国亚利桑那州晚白垩—早三叠世 Laramide 岩浆弧中 Globe—Miami 群状斑岩铜矿田分布, 由古近—新近纪伸展构造引起^[16]; B—智利 Chuquicamata 地区平行于中始新世—早渐新世岩浆弧分布的斑岩铜矿田, 成矿后左行走滑引起的空间分布^[16]; C—澳大利亚 Cadia 地区与奥陶纪岩浆弧呈斜交线状分布的斑岩铜矿田^[16]; D—蒙古近似垂直于晚泥盆世岩浆弧分布的斑岩铜矿田^[16]; E—西藏昌都地区与古近—新近纪岩浆弧呈近似垂直线状分布的玉龙斑岩铜矿田^[17]; F—江西德兴地区侏罗纪岩浆弧呈近似垂直线状分布的斑岩铜矿田^[18]; G—西藏改则地区与白垩纪岩浆弧呈斜交线状分布的多龙斑岩铜矿田

1—斑岩铜矿; 2—矽卡岩型磁铁铜金矿床; 3—外生(浅成)铜矿床; 4—成矿后断层; 5—岩浆弧趋势; 6—城镇

Fig.4 Examples of porphyry Cu clusters and alignments of various sizes and at different orientations with respect to the axes of contemporaneous magmatic arcs.

A—Globe—Miami district cluster, Arizona within the Late Cretaceous—early Tertiary (Laramide) arc, with the spatial distribution partially the result of mid-Tertiary extensional tectonism^[16]; B—Chuquicamata district, northern Chile aligned parallel to the middle Eocene—early Oligocene arc axis, with the spatial distribution possibly partly the result of postmineral sinistral strike-slip faulting^[16]; C—Cadia district, New South Wales, Australia, aligned oblique to the Ordovician arc axis^[16]; D—Oyu Tolgoi district, Mongolia aligned nearly perpendicular to the Late Devonian arc axis^[16].

Porphyry Cu and other deposit outlines projected to surface where unexposed; E—Yulong district, Changdu, China, aligned nearly perpendicular to the Tertiary arc^[17]; F—Dexing district, Jiangxi, China, aligned nearly perpendicular to the Jurassic arc^[18]; G—Duolong district, Gêrzê, China, aligned oblique to the Cretaceous arc.

1—Porphyry Cu deposit; 2—Skarn magnetite—Cu—Au deposit; 3—Exotic (supergene) Cu deposit; 4—Postmineral fault; 5—Trend of magmatic arc; 6—Town

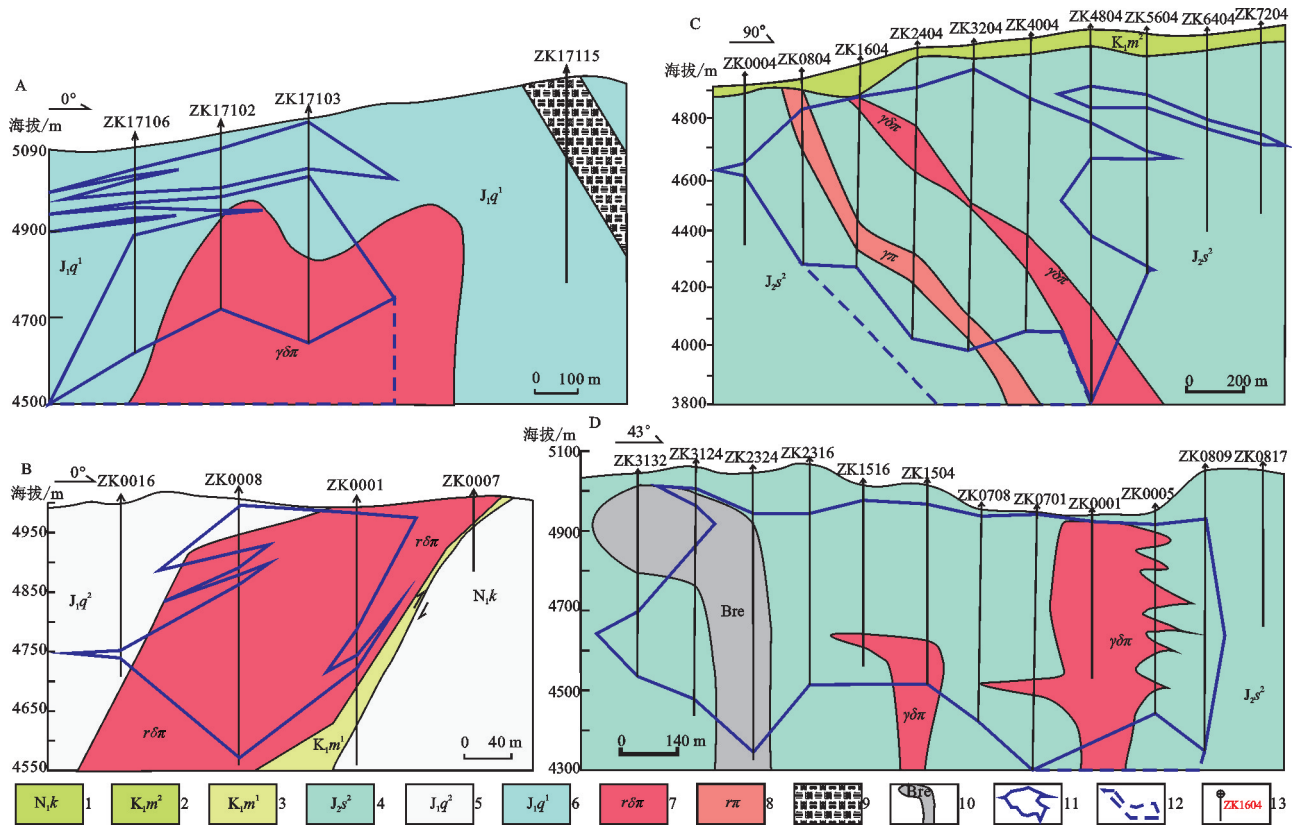


图5 多龙主要铜矿床矿体垂直纵剖面图

A—波龙矿床(据文献[13]修改); B—多不杂矿床(据文献[14]修改); C—荣那矿床; D—拿若矿床

1— N_1k —古近系康托组棕红色黏土及砂砾石层; 2— K_1m^2 —下白垩统美日切错组中段安山岩; 3— K_1m^1 —下白垩统美日切错组上段火山角砾岩、集块岩; 4— J_2s^2 —中侏罗统色哇组二段: 变质石英砂岩、变质(长石)石英砂岩夹深灰色粉砂质板岩; 5— J_2q^2 —下侏罗统曲色组二段: 变质长石石英砂岩、粉砂岩、粉砂质板岩夹硅质岩; 6— J_2q^1 —下侏罗统曲色组一段: 深灰色粉砂质板岩夹变质长石石英砂岩、灰岩条带; 7— $r\delta\pi$ —花岗闪长斑岩; 8— $\gamma\pi$ —花岗岩; 9—角砾岩; 10—隐爆角砾岩筒; 11—矿体范围; 12—推测矿体范围; 13—钻孔

Fig. 5 Vertical sections of deposits in Duolong

A—Bolong deposit (modified after reference [13]); B—Duobuza deposit (modified after reference [14]); C—Rongna deposit; D—Naruo deposit

1— N_1k —Paleogene Cantor Formation composed of brownish red clay and grit stone layer; 2— K_1m^2 —Andesite in the 2nd member of the Lower Cretaceous Meiriquiecuo Formation; 3— K_1m^1 — Volcanic breccia in the 1st member of the Lower Cretaceous Meiriquiecuo Formation; 4— J_2s^2 —The 2nd member of the Middle Jurassic Sewa Formation: altered quartz sandstone, altered (feldspathic-) quartz sandstone interbedded with dark-gray silty slate; 5—The second member of the Quse Formation in Lower Jurassic: metamorphism feldspar quartz sandstone, siltstone; 6— J_2q^1 —The first member of the Quse Formation in Lower Jurassic: Deep gray silty slate with metamorphic feldspar quartz sandstone, limestone; 7— $r\delta\pi$ — Granodiorite—porphyry; 8— $\gamma\pi$ — Granitic porphyry; 9— Breccias; 10—Hidden explosive breccias; 11—Orebody zone; 12—Potential orebody zone; 13—Drill holes

浅剥蚀露头矿。以上说明波龙、多不杂、荣那、拿若矿床主体定位空间为中下侏罗统。通过对不同矿床出露情况、赋矿围岩的分析对比可以得出如下判断: 矿集区东南部因构造抬升已出露下侏罗统, 如出现斑岩铜矿矿化, 应属于矿化体系的“根”部, 考虑到尕尔勤钻探验证效果不佳, 铜元素化探异常为大范围低缓异常(或者称之为高背景区), 其找矿潜力不容乐观。考虑到下步工作重点主要为寻找隐伏斑岩铜矿, 故勘查工作应重点为沿北东向F10断裂带, 下白垩统美日切错组分布范围内的化探中—

高铜元素异常分布区, 兼顾断裂带北东端的赛角、色那、色那东和南西端地堡那木岗地区。

(3)磁法异常特征的启示

根据地面高精度磁法测量结果, 在多龙地区存在磁异常(梯度带)畸变带(图6-A), 带内磁异常以正负交替变化的磁异常为主, 呈串珠状定向排列、带状分布, 该畸变带沿北东向F10断裂分布, 与已知斑岩铜矿的空间分布对应关系良好; 目前发现的波龙、多不杂、荣那、拿若4个超大型矿床均位于该畸变带中。对1:5万高精度磁法测量成果进行化极处

表1 藏北多龙矿集区主要斑岩铜(金)矿床基本特征

Table 1 Basic characteristics of major porphyry Cu (-Au) deposits in the Duolong ore concentration area, northern Tibet

矿床名称	围岩(地层)	成矿斑岩	围岩蚀变	矿床规模	矿石品位	最早钻探见矿时间
多不杂	下侏罗统曲色组一段(J ₁ q ¹)深灰色粉砂质板岩夹变质长石石英砂岩、灰岩条带	花岗闪长斑岩	磁铁矿化、钾长石化、黑云母化、硅化、绿泥石化、绢云母化、石膏化、伊利石-水云母化、高岭土化等	超大型	Cu 0.43%、 Au 0.13g/t	2002年
波龙	下侏罗统曲色组二段(J ₁ q ²)变质长石石英砂岩、粉砂岩、粉砂质板岩夹硅质岩	花岗闪长斑岩	磁铁矿化、电气石化、钾长石化、硅化、黑云母化、绢云母化、黏土化、石膏化、碳酸盐化、绿帘石化和绿泥石化	超大型	Cu 0.45%、 Au 0.21g/t	2004年
荣那	下侏罗统色哇组(J ₂ s)变质(长石)石英砂岩、岩屑砂岩夹深灰色至深黑色粉砂质板岩	花岗闪长斑岩、 花岗斑岩	角岩化、硅化绢英岩化、高级泥化、青磐岩化等	超大型	Cu 0.50%、 Au 0.08g/t	2010年
拿若	下侏罗统色哇组(J ₂ s)变质(长石)石英砂岩、岩屑砂岩夹深灰色至深黑色粉砂质板岩、引爆角砾岩	花岗闪长斑岩	青磐岩化、角岩化、黏土化、高级泥化等	大型	Cu 0.40%、 Au 0.21g/t	2011年

理(图6-B),波龙、多不杂、荣那、拿若4个超大型矿床磁性正偏,整体仍分布于正负磁异常带上;对1:5万高精度磁法测量成果进行化极后上延300 m处理后(图6-C),正负磁异常畸变带东西两侧呈现明显分界,结合该地区地层和岩性分布特征,畸变带西侧以低磁矿物的康托组砂砾岩为主,畸变带东侧以曲色组和色哇组变质长石石英砂岩为主。

(4)化探异常特征的启示

1:5万水系沉积物测量成果(图3)显示,拿若、多不杂、波龙3个露头铜矿床均与已知化探铜异常对应良好;铁格隆山以南地区和尕尔勤矿区铜异常均属于低缓异常,出露地层为下侏罗统,根据前述斑岩铜矿赋矿围岩与矿体出露情况的总结,上述地区若发育斑岩铜矿应为矿化体系的根部,铜异常强度应比较高,应为露头矿,所以研究认为铁格山和尕尔勤找矿潜力有限;地堡那木岗大范围低缓异常是由大面积分布的闪长岩体引起,但西部白垩系火山岩分布区尚需谨慎论证。而分布于多不杂北部的萨玛龙沟、赛角、色那地区的异常值得下步工作重视。

4.2 验证靶位的确定

4.2.1 已知矿床(点)的潜力研判

截止至2011年,多不杂、波龙已经完成普查工作,矿体深部存在一定潜力。拿若已发现矿体,外围与深部尚未封闭,初步资源量估算大于100万t,属于重点勘查对象,应继续扩大找矿成果;尕尔勤已实施钻探验证的12个钻孔均未发现重要的工业矿体,仅见小型热液脉,结合基础地质、化探资料研判,找矿潜力有限。荣那当时已开展预查工作,尚未找到主矿体,依据已有的化探成果、1:1万高精度

磁法测量成果、验证钻孔所揭示的矿化线索,判断其找矿潜力巨大。

4.2.2 前期验证钻孔帮助确定验证方向

截至2012年末,通过已知钻孔的见矿情况,能有效研判邻近地区矿化情况,通过多龙地区已知钻探情况确立已知重点矿床(点)解剖对象:(1)拿若矿床铜化探异常较好,已知钻孔已经见矿,且矿体达到大型规模,为下一步勘查工作重点;(2)荣那矿床已知钻孔见矿但矿化效果不理想,然而化探异常和磁异常均位于北东向F10成矿带中,为进一步探矿最佳对象;(3)色那角砾岩筒型金铜矿点具有低缓铜、金元素异常,磁异常明显,布置钻孔见金铜矿化,但找矿难度大,矿床规模一般;(4)尕尔勤矿点具有低缓铜元素异常,但含矿层位为下侏罗统曲色组,地层层位低,磁异常不明显,已施工14个钻孔显示铜矿化差,成矿潜力小;(5)地堡那木岗矿点,位于北西向主要成矿带西南端,拿厅矿床西部,已有钻孔显示该地区位于斑岩铜矿的青磐岩化带,找矿潜力一般。综合判断,找矿重点是荣那和拿若矿区。

4.2.3 大比例尺物化探资料和斑岩铜矿矿化蚀变模式的启示

(1)荣那矿区:2012—2013年在对荣那矿区重点验证地段的讨论是一个逐渐深化过程,2012年最初施工方案是依据由“已知到未知”和“就矿找矿”的思路,围绕已经施工的5个钻孔部署工作,缺乏理论依据和认识上的提高,钻探验证工作没有实施。2013年,在斑岩铜矿矿化、蚀变、勘查模式的指导下^[16,19],对1:1万磁法和1:1万土壤测量成果进行二次解剖,形成以下基本判断:①根据1:1万磁法测量

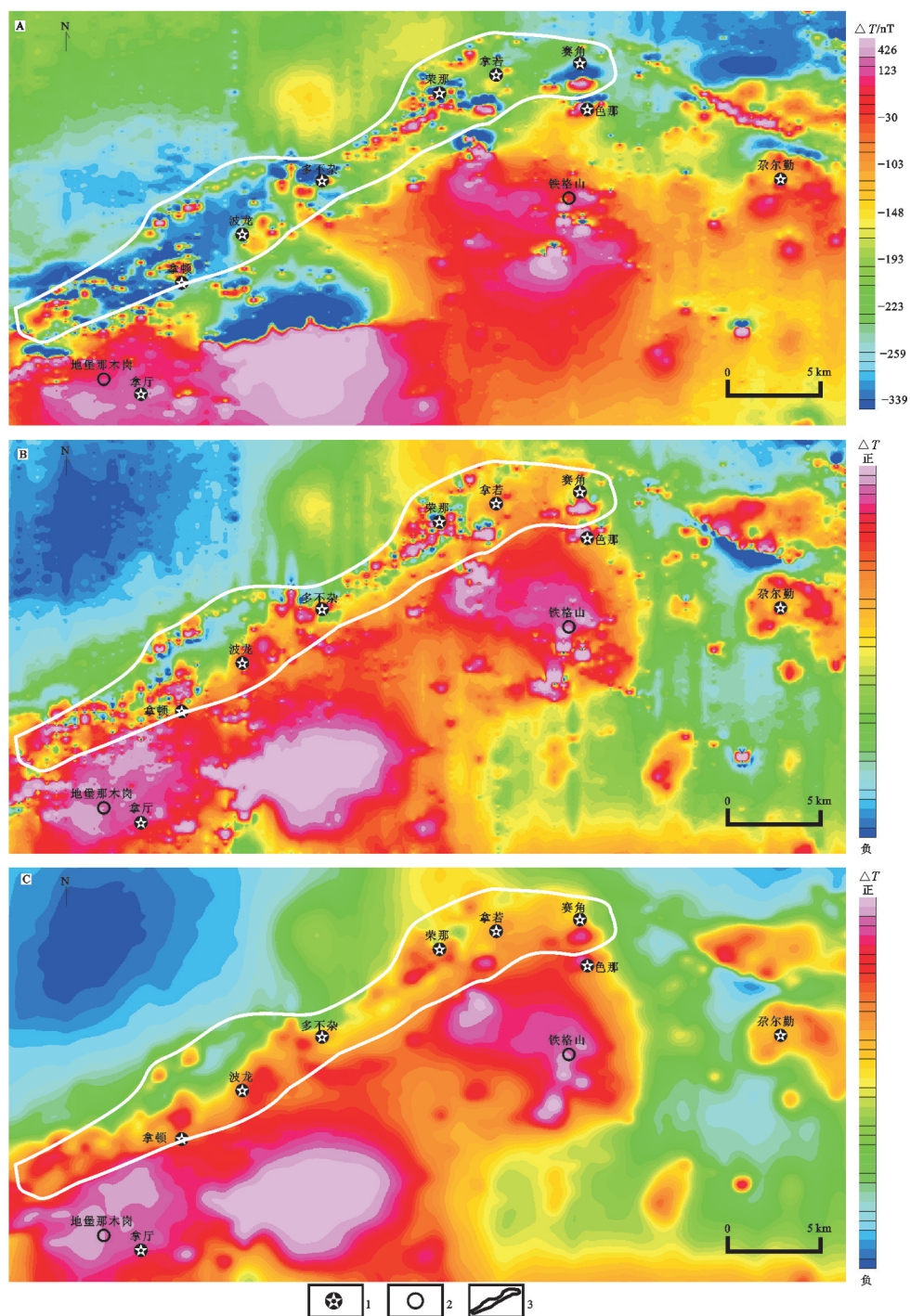


图6多龙矿区1:5万磁法异常等值线平面图(据①修改)

A—1:5万 ΔT 强磁性体异常等值线平面图; B—1:5万 ΔT 强磁性体异常化极等值线平面图; C—1:5万 ΔT 强磁性体异常化极后上延300 m等值线平面图

1—铜矿床(点); 2—地名; 3—磁异常畸变带

Fig. 6 Anomaly isolines of high magnetite rock bodies in Duolong area (modified after①)

A—Ground high-precision magnetic anomaly map at 1:50000 scale; B—Reduction-to-pole of magnetic data at 1:50000 scale; C—300 m upward-continuation field after reduction-to-pole at 1:50000 scale

1—Copper deposits (ore spots); 2—Location names; 3—Magnetite anomaly belt

①西藏地勘局地质五队. 西藏多龙1:5万物探报告[R]. 2008.

成果,结合荣那地区磁法环形异常特点,已经施工的5个钻孔处于环形异常M1西侧高磁异常区,根据斑岩铜矿蚀变和矿化特点,认定已经施工地区应该处于斑岩矿化体系的边部,负磁异常区应该处于斑岩矿化体系中心部位;②结合1:1万土壤铜元素异常,已经施工5个钻孔区域位于化探异常H1中心部位,该中心部位地表孔雀石等铜矿化出露较好,但是该区域浅部受美日切错组安山岩覆盖的影响,推测化探异常真正矿化中心应该位于现有化探异常H1东部。基于以上认识,2013年重新确定钻探验证工作的重点,将2012年原验证区的工程部署位置向东调整,2013年首批布置3个钻孔ZK1604、ZK1605、ZK0812,其中,ZK1604钻孔在施工过程中,发现矿体连续穿矿厚度达到594.14 m、铜品位0.62%,证实了上述判断,ZK1604也成为荣那铜矿床的发现孔。

为进一步验证以上对于磁法和化探异常的分析判断,为系统大规模验证提供技术支撑,借鉴国外斑岩铜矿勘查的最有效方法手段——激发极化

测量,根据1:1万高精度磁法测量和土壤测量(图7)所获得的资料,2013年部署了10 km²的1:1万激发极化测量工作(图8),取得了良好的效果,但围绕测量成果的解释存在争论和不断深化的过程。地球物理专家和大部分现场地质学家根据激发极化异常所圈定的异常,建议对所圈定的JD1~JD6均应开展钻探验证工作。笔者通过认真研究Lowell and Guilbert^[19]所提出的经典斑岩铜矿矿化、蚀变模式,该模式将斑岩铜矿矿化体系中硫化物的分布进行了简单的概括,即中心为由黄铜矿和黄铁矿构成的低品位矿化核,中间为由黄铁矿(约1%)和黄铜矿(1%~3%)组成的矿壳,外围为由黄铁矿为主体(约10%)和少量黄铜矿构成的黄铁矿壳。上述经典模式不断被发展、完善,但其硫化物分布规律始终没有改变;美国Bingham斑岩铜矿的勘查与开发过程中,对硫化物的分布进行了系统统计,矿化核心硫化物含量1.5%~6.5%(斑铜矿、黄铜矿、黄铁矿),中间矿带2.5%~7.5%(黄铜矿、黄铁矿、斑铜矿),外部黄铁矿壳3.0%~11.5%(黄铁矿、黄铜矿),进一步证

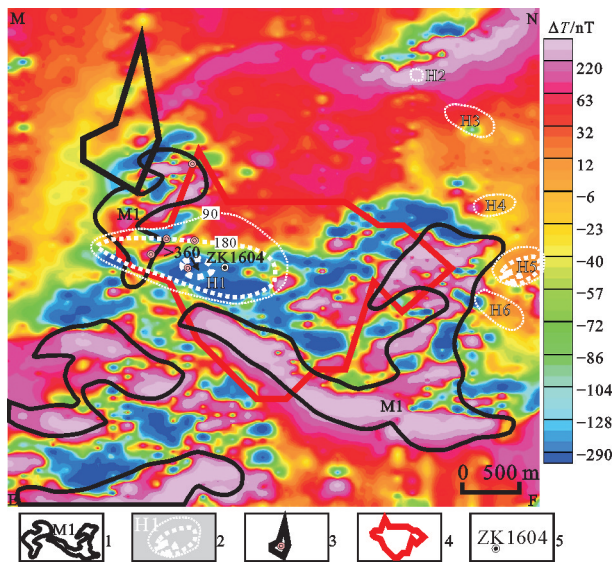


图7 荣那矿区1:1万高精度磁法异常平面图(据①修改)
1—磁异常范围;2—1:1万土壤Cu异常(单位:×10⁻⁶);3—截止2012年矿体范围;4—截止2015年矿体范围;5—钻孔及编号

Fig. 7 Ground high-precision magnetic survey map at 1:10000 scale (modified after ①)

1—Magnetic anomaly zones; 2—Cu soil anomaly at 1:10000 scale (unit: ×10⁻⁶); 3—Orebody zone in 2012; 4—Orebody zone in 2015; 5—Drill hole and its serial number

① 西藏地勘局地质队. 西藏多龙1:5万物探报告[R]. 2008.

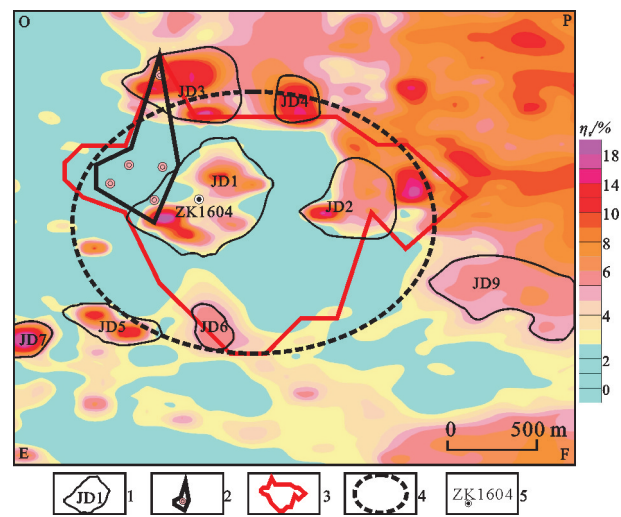


图8 荣那矿区1:1万激电中梯视极化率等值线异常平面图(据①修改)

1—视极化率异常范围;2—截止2012年矿体范围;3—截止2015年矿体范围;4—推测黄铁矿化壳范围;5—钻孔及编号

Fig. 8 Apparent chargeability isogram of Rongna (modified after ①)

1—Chargeability anomaly zones; 2—Orebody zone in 2012; 3—Orebody zone in 2015; 4—Inferred pyrite shell zone; 5—Drill hole and its serial number

实上述模式所反映的硫化物分布规律普遍存在。基于以上分析,我们对激发极化异常重新解译,指出JD1~JD6实际上是由深部斑岩铜矿床所引起的一个异常体系,JD1异常为矿化体系的核心,JD2~JD6以及西部的弱小异常构成斑岩铜矿矿化体系的外带,对应于体系外部与青磐岩化带共存的黄铁矿壳,构成了矿床的外部边界。重新解译的异常体系与1:1万磁法异常圈定的环形磁异常十分吻合(图7、图8),黄铁矿壳与外部正磁异常对应,JD1与负磁异常对应,为矿化核心。最终确定荣那矿床外围黄铁矿化壳引起正磁、中高极化环形异常,矿化中心部位具有负磁、中等极化率异常。根据上述认识,按照200 m × 200 m勘探网度,开展系统钻探验证工作,经钻探验证所圈定的矿体范围与异常所推定的范围一致(图8)。

4.3 验证方法的选择

在大比例尺物化探资料和斑岩铜矿矿化蚀变模式的启示一节中我们对理论思考与方法投入的效果、成果进行了论述,下文对采用高精度磁测和化探成果,并重点投入激发极化测量进行定位预测的主要思考与依据分析如下。

通常情况下,地球化学和地球物理勘查是主要找矿方法。地球化学勘查:无论是区域尺度、矿田尺度,还是矿床尺度,化探均是成功有效的找矿技术方法,多龙矿区重点找矿方向的确定、重点验证靶位的筛选过程中,充分利用了区域1:5万水系沉积物测量成果和1:1万土壤地球化学测量成果。地球物理勘查:在寻找斑岩铜矿过程中磁法和激发极化测量是经济有效的技术方法。地面高精度磁法测量主要用作圈定小侵入体的空间形态、确定构造格架和蚀变带。图9给出了2种产状下重力、磁法异常的样式和硫化物、脉类分布的理想模型。由于在荣那矿床上部未发现经典的脉状浅成低温热液矿化现象(图9-A),矿体上部覆盖美日切错组安山岩,当时推测其重力、磁法异常、硫化物分布应与图9-B相似。图9-B给出的硫化物分布规律,与Lowell and Guilbert^[19]所提出的经典斑岩铜矿矿化-蚀变模式中硫化物的分布,美国Bingham斑岩铜矿中硫化物分布的统计结果完全一致。考虑工作重点是确定验证靶位,而重力测量主要用于区域、矿田尺度的调查工作,所以没有安排重力测量工作。地面高精度磁测、大比例尺土壤地球化学测量方法

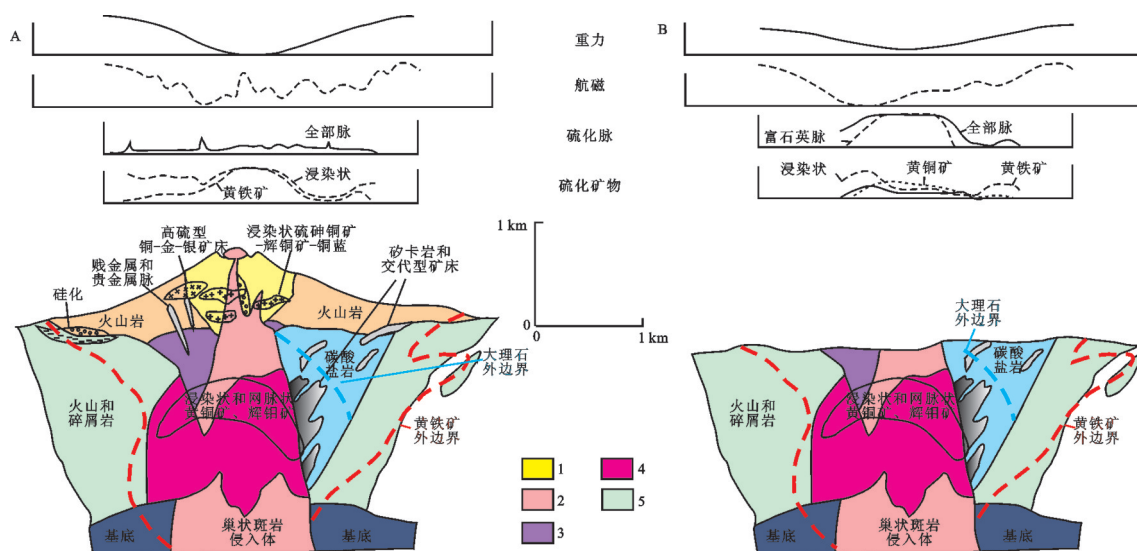


图9 斑岩铜矿系统的矿体、岩石、蚀变带分布和类型以及勘查属性模型剖面图^[20]

A—理想的发生次生富集的深成斑岩铜矿系统; B—顶部遭受部分剥蚀的斑岩铜矿系统

1—高级泥化; 2—泥化-绢英岩化; 3—绢英岩化; 4—钾化; 5—青磐岩化

Fig. 9 Cross sections of a model of a porphyry copper system that shows the distribution and types of mineral deposits, rocks, and alteration zones in porphyry copper systems, and lateral profiles of system attributes that compose exploration guides

A—Ideal secondary enriched hypogene porphyry copper system; B—Partial erosion porphyry copper system

1—Advanced argillic; 2—Argillic-sericitic; 3—Sericitic alteration; 4—Potassic alteration; 5—Propylitic alteration

有效,鉴于前期已部署相关工作,本次工作重点是对其二次分析研究。众所周知,探测细脉浸染状硫化物最有效的手段为激发极化测量,这已为国内外斑岩铜矿勘查实践所证实,故重点投入符合靶位确定阶段工作的1:1万激电测量工作。勘查实践证明找矿工作重点采用的地面高精度测量、土壤地球化学测量和激发极化测量是寻找斑岩铜矿的有效方法与组合。

5 结 论

中铝矿产资源有限公司在西藏阿里地区多不杂一波龙矿田成功的找矿实践证明,实现找矿突破不但需要现代成矿理论指导,而且需要重视基础地质研究,有效、有序的方法优选与投入,切实做到理论与勘查的紧密结合。

(1)勘查工作应立足于重点成矿区带。班公湖—怒江成矿带位于特提斯成矿域,该带在中侏罗世至早白垩世向南、北两侧俯冲并形成岩浆弧,北侧岩浆弧属于活动大陆边缘,具有与南美安第斯平坦俯冲相似的构造岩浆演化、矿化特征、前期已发现超大型的多不杂、波龙斑岩铜矿,是已被证明具有巨大找矿潜力的成矿带。

(2)重视斑岩铜矿的区域分布规律、矿田基础地质资料的研究,明确找矿主攻方向。借鉴国内外斑岩铜矿分布规律的研究成果,结合矿田地质、物化探资料,确定多龙地区斑岩铜矿具有带状分布规律,明确北东向F10断裂为区内控岩—控矿断裂,已知矿床沿该带分布,勘查工作应围绕该断裂带展开。

(3)根据经典斑岩铜矿蚀变—矿化模式分析研究,结合1:1万地面高精度磁测和1:1万土壤地球化学测量大比例尺物、化探资料,充分利用前期验证钻孔所揭示的矿化信息,确定重点验证目标。通过对多龙矿田已有的高精度磁测、土壤地球化学测量成果,结合拿若、荣那、尕尔勤、色那、赛角钻探验证资料,将拿若和荣那确定为重点验证目标,为实现找矿突破奠定了扎实的基础。

(4)根据重点验证目标内可能存在的矿化体系样式的分析,借鉴国内外斑岩铜矿勘查模式和成功勘查经验,选择大比例尺激电测量确定验证的精确范围;科学解译激电异常所给出的矿化信息,大胆验证是实现找矿突破的根本保证。

(5)实现理论与生产紧密结合的关键是

人。具有扎实现代成矿理论知识积淀,熟悉现代勘查技术的勘查学家及团队是实现这一结合的桥梁。

致谢:审稿专家对论文提出了宝贵修改意见,在此一并致以诚挚的谢意!

参考文献(References):

- [1] 江少卿,李丽,冯瑞,等.西藏多龙矿集区铁格隆矿田荣那和拿若矿床蚀变矿化特征与三维勘查模型[J].矿床地质,2015,34(2): 209-224.
Jiang Shaoqing, Li Li, Feng Rui, et al. Alteration, mineralization, and three-dimensional exploration model of Rongna and Naruo deposits in Tiegelong orefield, Duolong ore concentration area, northern Tibet[J]. Mineral Deposits, 2015, 34(2): 209-224 (in Chinese with English abstract).
- [2] 李光明,张夏楠,秦克章,等.羌塘南缘多龙矿集区荣那斑岩—高硫型浅成低温热液Cu-(Au)套合成矿:综合地质—热液蚀变及金属矿物组合证据[J].岩石学报,2015,31(8): 2307-2324.
Li Guangming, Zhang Xianan, Qin Kezhang, et al. The telescoped porphyry-high sulfidation epithermal Cu-(Au) mineralization of Rongna deposit in Duolong ore cluster at the southern margin of Qiangtang Terrane, Central Tibet: Integrated evidence from geology, hydrothermal alteration and sulfide assemblages[J]. Acta Petrologica Sinica, 2015, 31(8): 2307-2324 (in Chinese with English abstract).
- [3] 王勤,唐菊兴,方向,等.西藏多龙矿集区铁格隆南铜(金银)矿床荣那矿段安山岩成岩背景:来自锆石U-Pb年代学—岩石地球化学的证据[J].中国地质,2015,42(5): 1324-1336.
Wang Qin, Tang Juxing, Fang Xiang, et al. Petrogenetic setting of andesites in Rongna ore block, Tiegelong Cu (Au-Ag) deposit, Duolong ore concentration area, Tibet: Evidence from zircon U/Pb LA-ICP-MS dating and petrogeochemistry of andesites[J]. Geology in China, 2015, 42(5): 1324-1336 (in Chinese with English abstract).
- [4] 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(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: View of porphyry-epithermal Cu-Au metallogenic systematics[C]// Chen Yuchuan, Mao Jingwen and Xue Chunji (eds.). Proceedings of 8th State Mineral Deposit Conference. Beijing: Geological Publishing House, 2006: 660-670 (in Chinese).
- [5] 曹明坚,秦克章,李继亮.平坦俯冲及其成矿效应的研究进展——实例分析与展望[J].岩石学报,2011,27(12): 3727-3748.
Cao Mingjian, Qin Kezhang, Li Jiliang. Research progress on the

- flat subduction and its metallogenic effect, two cases analysis and some prospects[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2011, 27(12): 3727–3748(in Chinese with English abstract).
- [6] 李光明, 李金祥, 秦克章, 等. 西藏班公湖带多不杂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).
- [7] 李金祥, 李光明, 秦克章, 等. 班公湖带多不杂富金斑岩铜矿斑岩-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).
- [8] 辛洪波, 曲晓明, 王瑞江, 等. 藏西班牙湖斑岩铜矿带成矿斑岩地球化学及Pb, Sr, Nd同位素特征[J]. *矿床地质*, 2009, 28(6): 785–792.
- Xin Hongbo, Qu Xiaoming, Wang Ruijiang, et al. Geochemistry and Pb, Sr, Nd isotopic features of ore-bearing porphyries in Bangong Lake porphyry copper belt, western Tibet[J]. *Mineral Deposits*, 2009, 28(6): 785–792 (in Chinese with English abstract).
- [9] 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): 1435–1447.
- She Hongquan, Li Jinwen, Feng Chengyou, 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): 1435–1447 (in Chinese with English abstract).
- [10] 代晶晶, 曲晓明, 辛洪波. 基于ASTER遥感数据的西藏多龙矿集区示矿信息的提取[J]. *地质通报*, 2010, 29(5): 752–757.
- Dai Jingjing, Qu Xiaoming, Xin Hongbo. Extraction of alteration mineral information using ASTER remote sensing data in Duolong area, Tibet, China[J]. *Geological Bulletin of China*, 2010, 29(5): 752–757 (in Chinese with English abstract).
- [11] 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).
- [12] Li Guangming, Li Jinxiang, Qin Kezhang, et al. Geology and hydrothermal alteration of the Duobuza gold-rich porphyry copper district in the Bangongco metallogenic belt, northwestern Tibet[J]. *Resource Geology*, 2012, 62(1): 99–118.
- [13] 李玉彬, 钟婉婷, 张天平, 等. 西藏改则县波龙斑岩型铜金矿床地球化学特征及成因浅析[J]. *地球学报*, 2012, 33(4): 579–587.
- Li Yubin, Zhong Wanting, Zhang Tianping, et al. Geochemical characteristics and genesis of the Bolong porphyry copper-gold deposit in Gerze county, Tibet[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2012, 33(4): 579–587 (in Chinese with English abstract).
- [14] 李玉彬, 多吉, 钟婉婷, 等. 西藏改则县多不杂斑岩型铜金矿床勘查模型[J]. *地质与勘探*, 2012, 48(2): 274–287.
- Li Yubin, Duo Ji, Zhong Wanting, et al. An exploration model of the Duobuza porphyry Cu-Au deposit in Gaize county, Northern Tibet[J]. *Geology and Exploration*, 2012, 48(2): 274–287 (in Chinese with English abstract).
- [15] 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).
- [16] Sillitoe R H. Porphyry copper systems [J]. *Economic Geology*, 2010, 105(1): 3–41.
- [17] 唐菊兴, 张丽, 李志军, 等. 西藏玉龙铜矿床——鼻状构造圈闭控制的特大型矿床[J]. *矿床地质*, 2006, 25(6): 652–662.
- Tang Juxing, Zhang Li, Li Zhijun, et al. Porphyry copper deposit controlled by structural nose trap: Yulong porphyry copper deposit in eastern Tibet[J]. *Mineral Deposits*, 2006, 25(6): 652–662 (in Chinese with English abstract).
- [18] 毛景文, 张建东, 郭春丽. 斑岩铜矿-浅成低温热液银铅锌-远接触带热液金矿床模型: 一个新的矿床模型——以德兴地区为例[J]. *地球科学与环境学报*, 2010, 32(1): 1–14.
- Mao Jingwen, Zhang Jiandong, Guo Chunli. Porphyry Cu, epithermal Ag-Pb-Zn, distal hydrothermal Au deposits: A new model of mineral deposit——Taking the Dexing area as an example[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2010, 32(1): 1–14 (in Chinese with English abstract).
- [19] Lowell J D, Guilbert J M. Lateral and vertical alteration-mineralization zoning in porphyry ore deposits[J]. *Economic Geology*, 1970, 65(4): 373–408.
- [20] John D A, Ayuso R A, Barton M D, et al. Porphyry Copper Deposit Model[M]. Virginia: U. S. Geological Survey, 2010: 117–119.