

西藏革吉县尕尔穷铜金矿床地质特征及其成因意义

胡正华^{1,2)}, 丁 枫^{1)*}, 唐菊兴^{1,3)}, 李志军¹⁾, 姚晓峰⁴⁾, 邓世林⁵⁾, 张 志¹⁾,
王艺云¹⁾, 王红星¹⁾, 宋俊龙¹⁾, 陈 伟¹⁾

1)成都理工大学, 四川成都 610059;

2)江西省地质调查研究院, 江西南昌 330000;

3)中国地质科学院矿产资源研究所, 国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 北京 100037;

4)中国地质大学, 北京 100083;

5)四川省地矿局物探队, 四川成都 610000

摘 要: 位于西藏阿里地区革吉县的尕尔穷铜金矿床是班公湖-怒江成矿带西段首个达到详查程度的大型铜金矿床。矿区发育三条断裂, 其中 F_1 和 F_2 断层呈北东-南西向展布, F_3 断层为南北向展布。 F_1 断裂产状复杂、延伸大于 3000 m, 破碎带内发育的铜金矿体严格受其控制。目前, 矿床主要由斑岩型钼(铜、金)矿体、接触带矽卡岩型铜金矿体、 F_1 断裂破碎带内似 IOCG 型铁铜金矿体组成。不同矿体特征差别显著, 斑岩型矿体主要产于石英闪长岩、花岗斑岩中, 金属矿物以网脉状辉钼矿主, 次为黄铜矿、磁铁矿、黄铁矿; 矿物组合有磁铁矿+黄铁矿、黄铜矿+辉钼矿。矽卡岩型矿体主要产于石英闪长岩、花岗斑岩与碳酸盐岩接触带, 呈层状、似层状, 金属矿物主要为细脉-网脉状黄铜矿、斑铜矿、辉铜矿、铜蓝、自然铜、自然金、自然银, 矿物组合为黄铜矿-磁铁矿-自然金、黄铜矿-斑铜矿-磁铁矿-自然金-银、黄铜矿-赤铁矿-自然金、辉钼矿、黄铜矿-自然金。破碎带内似 IOCG 型铁铜金矿体产于 F_1 断裂破碎带, 呈似层状, 金属矿物以细脉-网脉状矿石和角砾状赤铁矿、磁铁矿、黄铜矿、斑铜矿、辉铜矿、铜蓝、自然金为主; 矿物组合为黄铜矿-自然金、黄铜矿-斑铜矿-自然金-银矿、赤铁矿-磁铁矿-自然金、黄铜矿-自然金。根据矿床地质特征, 综合前人研究资料, 本文对矿床的成因进行了进一步探讨, 认为尕尔穷铜金矿床是晚白垩世班怒洋关闭后南羌塘-三江复合板片与冈底斯-念青唐古拉板片之间弧-陆碰撞阶段形成的, 具有与钾玄岩-高钾钙碱性闪长类岩体、陆-陆同碰撞钾玄岩-高钾钙碱性重熔型花岗斑岩有成因密切联系的构造-岩浆岩“三位一体”的成矿特征, 即主矿体赋存于斑岩、矽卡岩、构造破碎带中形成的“斑岩-矽卡岩-似 IOCG”型铜金矿床。

关键词: 尕尔穷; 铜金矿床; 地质特征; 成矿模式; 成因

中图分类号: P588.13; P594.1 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2012.04.19

Geological Characteristics and Genetic Significance of the Ga'erqiong Cu-Au Deposits in Ge'gyai County, Tibet

HU Zheng-hua^{1,2)}, DING Feng¹⁾, TANG Ju-xing^{1,3)}, LI Zhi-jun¹⁾, YAO Xiao-feng⁴⁾, DENG Shi-lin⁵⁾,
ZHANG Zhi¹⁾, WANG Yi-yun¹⁾, WANG Hong-xing¹⁾, SONG Jun-long¹⁾, CHEN Wei¹⁾

1) Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059;

2) Jiangxi institute of Geological survey, Nanchang, Jiangxi 330000;

3) MLR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037;

4) China University of Geoscience, Beijing 100083;

5) Geophysical Prospecting Party of Sichuan Bureau of Geology and Mineral Resources, Chengdu, Sichuan 610000

本文由公益性行业科研专项(编号: 201011013-3)和国家 973 项目(编号: 2011CB403103)联合资助。

收稿日期: 2012-05-26; 改回日期: 2012-06-11。责任编辑: 魏乐军。

第一作者简介: 胡正华, 男, 1985 年生。博士研究生。现从事固体矿产普查与勘探工作。E-mail: hucdut@qq.com。

*通讯作者: 丁枫, 男, 1973 年生。讲师。从事矿产普查与勘探的教学和研究工作。E-mail: 22847785@qq.com。

Abstract: The Ga'erqiong Cu-Au deposit in Ge'gyai County of Ngari area in Tibet is the first large-size Cu-Au deposit based on detailed survey. The ore district has three fractures, in which fractures F₁ and F₂ are NE-SW trending whereas F₃ is NS- extending. The attitude of F₁ is very complex, and the extension is longer than 3000 m. The Cu-Au ore body in this fracture zone is strictly controlled by the fracture. The deposit consists of porphyry Mo-(Cu, Au) ore body, skarn Cu-Au ore body in contact zone and IOCG-like Fe-Cu-Au ore body in F₁ fracture zone. Different ore bodies have marked differences. Porphyry ore body is mainly developed in quartz diorite and granite-porphyry, in which metallic minerals are mainly stockwork molybdenite, and subordinately chalcopyrite, magnetite, pyrite; the mineral assemblages are composed of magnetite-pyrite and chalcopyrite-molybdenite. The skarn ore body is mainly developed in the zone where quartz diorite and granite-porphyry are in contact with carbonatite, and the shapes are lamellar and lamellar; the main metallic minerals are veinlet-stockwork chalcopyrite, bornite, chalcocite, covellite, native copper, native silver and native gold. The IOCG-like Fe-Cu-Au ore body occurs in F₁ fracture zone, its shape is lamellar and the leading metallic minerals are veinlet-stockwork ore and brecciated hematite, magnetite, chalcopyrite, bornite, chalcocite, covellite, native gold; the mineral assemblages are chalcopyrite-native gold, chalcopyrite-bornite-native gold-silver, and hematite-magnetite-native gold. Based on the geological characteristics of the ore deposit in combination with the data available, this paper discusses the geological characteristics of the ore deposit, and holds the view that the Ga'erqiong Cu-Au deposit was formed after the closure of the Bannu Ocean in late Cretaceous period, and by the collision of arc-continent between the southern Qiangtang-Sanjiang complex slab and the Gangdise-Nyanqentanglha slab, showing the tripartite metallogenic characteristics genetically closely related to potassic basalt-high potassic calc-alkaline diorite-lithosome and continent-continent co-collision potassic basalt-high potassic calc-alkaline remelted granite-porphyry. That is to say, the host ore body existed in porphyry, skarn, and structural fracture zone, thus forming the "porphyry-skarn-IOCG-like" Cu-Au deposit.

Key words: Ga'erqiong; Cu-Au deposit; geological characteristics; metallogenic model; genesis

在班公湖-怒江成矿带西段日土一改则一带相继发现多龙、尕尔穷、嘎拉勒等斑岩铜金矿以及弗野、材玛富磁铁矿等众多矿(化)点,其中多龙铜金矿床(多不杂、波龙)位于班公湖-怒江缝合带北侧,尕尔穷铜金矿床位于班公湖-怒江缝合带南侧、冈底斯最北缘的措勤-申扎火山岩浆弧内(余宏全等, 2009; 耿全如等, 2011)。对班怒成矿带的研究,目前主要包括班-怒带的构造演化(曹圣华等, 2008; 李金祥等, 2008)、成矿地质背景(曲晓明等, 2006; 耿全如等, 2011)、成矿斑岩地球化学特征(辛洪波等, 2009; 吴德新等, 2012; 赵元艺等, 2010)、成矿流体特征(余宏全等, 2006; 李光明等, 2007)等。尕尔穷铜金矿床作为班-怒带首个达到详查程度的大型铜金矿床,前人主要对矿石矿物特征及元素的赋存状态(王友, 2010; 姚晓峰等, 2011; 张志等, 2012)、成岩成矿年龄(曲晓明等, 2006; 姚晓峰等, 2012; 李志军等, 2011a)和地球化学特征(曲晓明等, 2006; 邓世林等, 2011; 邓世林, 2011; 姚晓峰, 2010; 雷传扬等, 2012; 姚晓峰等, 2012)等方面进行了较为深入的研究,而对于矿床地质特征的研究相对较弱(胡正华等, 2011),

2011年新发现了由构造破碎带控制的似 IOCG 型铁铜金矿体(李志军等, 2011b)。为此,本文通过详细的综合研究,全面系统地开展尕尔穷铜金矿床地质特征研究,并结合前人已有的研究成果,深入探讨尕尔穷铜金矿床的成因,为区域找矿指明方向。

1 矿区地质

矿区出露地层为白垩系则弄群多爱组(K₁d),由大理岩、安山质火山碎屑岩及角岩组成。由于岩体的侵入,多爱组常呈小“孤岛”状产出,仅在东部及中东部地区可见大面积产出(图 1)。矿区内构造发育,主要为北东向断裂构造,其次为南北向断裂以及次级裂隙,褶皱不发育(图 1)。矿区内发育三条主要断裂构造,其中 F₁ 和 F₂ 断层呈北东-南西向展布, F₃ 断层为南北向展布。1) F₁ 断层展布于尕尔穷南东,走向约 50°、延伸大于 3000 m,倾向多变,202 线以西倾向北西,倾角近直立,局部可见“上陡下缓”现象,具先张后扭的性质。该断层是 III 号矿体的储矿空间,对 I 号矿体具有一定的破坏作用。断层破碎带宽度多为 8~50 m,其内可见大理岩、火山岩角砾

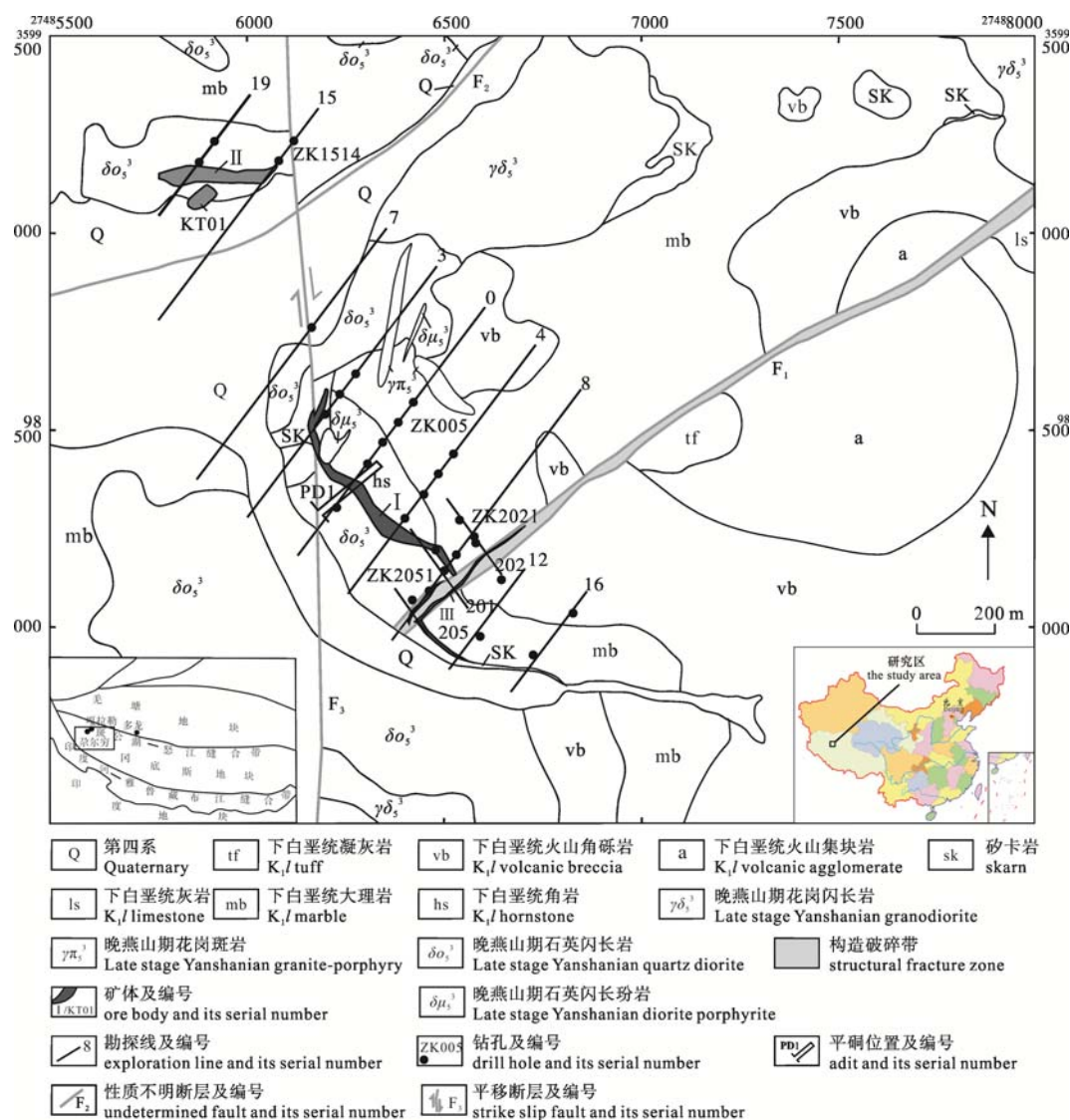


图1 尔尔穷矿区地质图(据李志军等, 2011b)

Fig. 1 Geological map of the Ga'erqiong ore district (after LI Zhi-jun et al., 2011b)

岩、凝灰岩、砂卡岩、花岗斑岩、石英闪长岩角砾被赤铁矿、硅质、钙质所胶结, 以角砾状构造和赤铁矿、方解石、石英的发育为鉴别特征。蚀变以赤铁矿化、脉状-网脉状硅化、碳酸盐化为主。断层中发育块状、脉状、团块状赤铁矿化, 细脉状、稀疏浸染状黄铜矿化和薄膜状孔雀石化等。F₁断层地表出露处可见块状赤铁矿, 也可见赤铁矿脉沿裂隙穿插于灰岩、大理岩、火山碎屑岩并胶结灰岩、大理岩和火山碎屑岩角砾等。赤铁矿呈三种形态产出: 角砾、胶结物及脉状。脉状赤铁矿至少有二期, 第一期近于直立倾角约 75°~80°, 常产于硅化与方解石脉中; 第二期倾角约 30°切割第一期脉, 偶见其与原生黄铜矿在空间上共生, 此现象的出现可能是由于多期次不同性质的成矿热液所引起的, 具体原因

有待进一步的研究。2) F₂断层为逆断层, 展布于尔尔穷矿区北部, 产状为 145°~155°∠80°~86°。沿尔尔穷主沟北东向延伸, 与 F₁断层走向一致。3) F₃断层具明显平移性质, 展布于I号矿体西部, 走向近南北, 矿区内延伸大于 3000 m, 倾向为近东(约 95°), 倾角陡立(约 78°~85°), 断裂主体被第四系覆盖, 但在地表出露处通常发育强烈褐铁矿化, 地表色调为褐红色。该断层使 I 号矿体在 3 线附近发生错移。除了断层外, 矿区内发育少量褶皱构造, 表现为灰岩中泥质条带形成形态复杂的顺层平卧褶皱、无根褶皱, 对矿体的影响不明显(唐菊兴等, 2009)。

区内岩浆岩主要为燕山晚期中酸性侵入岩, 属七一桥浆混岩系系列含角闪石钙碱性花岗岩类亚碱性系列中的钙碱性系列(郭铁鹰等, 1991; 邓世林等,

2011)。早期为闪长玢岩、石英闪长岩、花岗闪长岩、花岗闪长斑岩,晚期为花岗斑岩及细晶岩(图1)。闪长玢岩、花岗闪长斑岩及细晶岩主要是以细小的岩枝、岩脉形式产出,石英闪长岩、花岗闪长岩及花岗斑岩以岩株的形式产出。

2 矿床地质特征

矿区目前共发现三个主矿体(I、II、III号矿体)及34个小矿体。矿床由斑岩型钼(铜、金)矿体、接触交代砂卡岩型铜金矿体、断裂破碎带内似IOCG型铁铜金矿体组成。

2.1 斑岩型钼(铜、金)矿体

1) 矿体特征

目前的勘探成果显示,矿体规模较小、地表未见露头,埋藏深度变化大,最浅处81.4 m(ZK1514)、最深处540.6 m(ZK2021),见矿最低海拔为4390.3 m(ZK2021)、最高海拔为4780 m(ZK2051),含矿岩体为石英闪长玢岩和花岗斑岩。矿体空间上连续性较差,但垂向上总体具有下钼上铜-金的分带特征。Mo平均品位约为0.04%,Cu平均品位0.25%,Au平均品位0.8 g/t。矿化主要呈细脉-浸染状,主要含矿脉为石英脉(图2A, B),其次为磁铁矿-黄铁矿脉(图2C)。围岩蚀变强烈,由斑岩体中心向外发育有硅化+绿泥石化+黑云母化、高岭土化、绿泥石化+绿帘石化、绿泥石化+绿帘石化,显示出与典型斑岩型矿床相似的蚀变特征(Sillitoe, 1997)。其中在硅化+绿泥石化+黑云母化蚀变带内发育有石英脉或网脉,石英脉内具有不连续分布的黄铜矿化和辉钼矿化(图2A, B)。在含矿岩体外围的多爱组地层中发育有砂卡岩化(石榴子石+硅灰石+透辉石+绿帘石)、大理岩化、绿帘石化、绿泥石化、角闪化等蚀变(张志等, 2012)。

2) 矿石类型、特征及组构

金属矿物主要为辉钼矿,次为黄铜矿、磁铁矿、黄铁矿等;非金属矿物以石英、长石、绿泥石、绢云母等为主。主要矿石类型为磁铁矿-黄铁矿矿石、黄铜矿-辉钼矿矿石(图2A, B, C)。辉钼矿主要呈细脉状、脉状、浸染状产于含矿岩体中的晚期石英脉中,主要分布于石英脉两侧(图2A)。黄铜矿主要呈星点状、斑点状、细脉状在含矿岩体的石英脉中产出(图2B)。镜下辉钼矿呈鳞片状、叶片状集合体和单晶,有时也见以放射状、脉状、菊花状产出,有时与黄铜矿和黄铁矿等共生;黄铜矿多呈不规则状粒状和粒状集合体产出,粒径大小不等,以中细粒为主(图2D, E)。矿石构造主要有脉状、细脉状、稀

疏浸染状—稠密浸染状、角砾状构造(图2F);矿石结构以结晶结构为主(图2E)。

2.2 接触交代带砂卡岩型铜金矿体

接触带砂卡岩型铜金矿体目前发现有I、II号主矿体及多个小矿体。

1) 矿体特征

I号铜金矿体,呈似层状、透镜状产于闪长岩与多爱组碳酸盐岩接触带的砂卡岩及围岩裂隙中(图3)。矿体总体走向320°,延长大于900 m,在8~12勘探线被F₁断层所切(图1)。矿体倾向在35°~50°之间,延伸大于800 m(未控制边界)。矿体产出上陡下缓,上部倾角可达75°,下部倾角变缓。矿体连续性好,Cu平均品位约1%,Au平均品位约3 g/t,伴生Ag 8 g/t,伴生Mo为0.02%。目前发现矿体最大真厚度达46 m(ZK801)。热液蚀变强烈,主要为砂卡岩化、硅化、方解石化、绿泥石化、赤铁矿化。

II号铜金矿体,呈透镜状产出于闪长质岩体与多爱组碳酸盐岩接触带的内砂卡岩,位于19线和15线之间。该矿体Cu平均品位约为1%,Au平均品位约为2.5 g/t,伴生银钼分别约为4 g/t, 0.01%。热液蚀变强烈,主要蚀变为绿泥石化、方解石化、硅化、赤铁矿化等。

其他砂卡岩型小矿体的分布特征与I号铜金矿体相似。

2) 矿石类型、组构及特征

砂卡岩型矿体的矿石类型主要有稀疏浸染状矿石和细脉-网脉状矿石,次要类型为块状矿石、次块状矿石和角砾状矿石;依据矿区主要有用矿物及组合对矿石进行分类,主要有黄铜矿-自然金矿石、黄铜矿-斑铜矿-自然金-银矿矿石、黄铜矿-赤铁矿-自然金矿石、辉钼矿矿石、黄铜矿-自然金矿石等五大类。据矿石有用组分进行分类,主要有铜金矿石、铜(金)矿石、铜矿石、金矿石、金(铜)矿石和钼矿石六类。

矿石构造以浸染状和细脉-网脉状为主,团块状构造和角砾状构造次之。矿石结构按成因可分为结晶结构、交代结构、固溶体分离结构和表生结构四大类,其中以结晶结构、交代结构和固溶体分离结构为主(图4C, D, E)。

黄铜矿多为不规则状粒状和粒状集合体,粒径一般为0.01~0.12 mm。主要充填于砂卡岩矿物粒间或沿石榴子石环带产出。其次有半自形微粒包于石英中,以斑点或蠕虫状的出溶物包于斑铜矿;与黄铁矿、斑铜矿共生,呈团块状、不规则状、星散状产于脉石矿物中;脉多由黄铜矿、黄铁矿、斑铜矿和石英组成。黄铜矿主要与斑铜矿紧密共生,以出

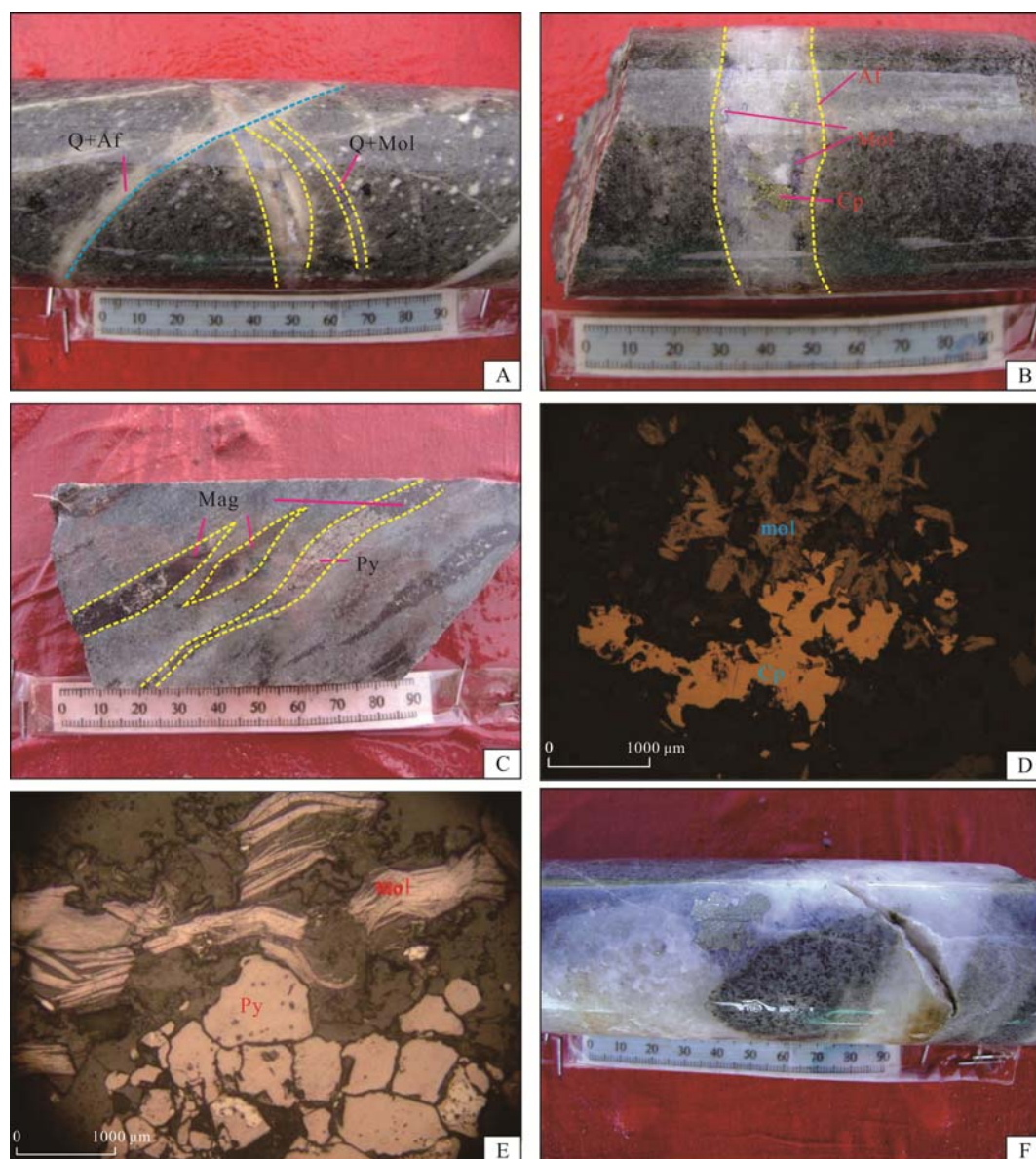


图 2 斑岩型矿体主要矿石组构及矿石矿物特征

Fig. 2 Characteristics of the main fabric and ore minerals in the porphyry ore body

A-网脉状构造, 团斑状黑云母化硅化辉钼矿化闪长岩(编号: ZK2021-421.1); B-黄铜+辉钼矿化粗大梳状构造发育的石英脉分布于闪长岩中(编号: ZK2021-455.2); C-闪长玢岩中脉状磁铁矿+黄铁矿((编号: ZK2020-328.8); D-黄铜矿+辉钼矿, 黄铜矿中含片状自形晶辉钼矿包体(编号: GR804-271.6); E-半自形晶粒状结构: 半自形黄铁矿、辉钼矿(编号: ZK801-198); F-角砾状构造闪长岩中热液角砾岩(编号: ZK2021-516.6); Q-石英; Af-钾长石; Mol-辉钼矿; Cp-黄铜矿; Py-黄铁矿; Mag-磁铁矿

A-stockwork structure—lumpy spotted biotitized, silicified molybdenite-diorite(number: ZK2021-421.1); B-quartz vein with chalcopyrite+molybdenite mineralization and coarse comb-like structure distributed in diorite(number: ZK2021-455.2);

C-veined magnetite+pyrite in diorite-porphryite(number: ZK2020-328.8); D-chalcopyrite+molybdenite and chalcopyrite with flaky euhedral molybdenite inclusion(number: GR804-271.6); E-subehedral granular texture: subehedral pyrite and molybdenite(number: ZK801-198);

F-hydrothermal breccia in brecciated diorite(number: ZK2021-516.6);

Q-quartz; Af-feldspar; Mol-molybdenite; Cp-chalcopyrite; Py-pyrite; Mag-magnetite

溶结构的形式产出(图 4C)。金属矿物主要为黄铜矿、斑铜矿、辉铜矿、铜蓝、自然铜、自然金、自然银, 次为铋矿物、碲银矿、黄铁矿、毒砂、蓝辉铜矿、辉钼矿、孔雀石、硅孔雀石、蓝铜矿、镜铁矿、赤铜矿、褐铁矿等、碲金银矿、辉钼矿、方铅矿、白钨矿、黑钨矿等。非金属矿物主要为石榴子石、

透辉石、绿帘石、绿泥石、方解石、石英和铁质、硅质粘土矿物等。

斑铜矿与黄铜矿有明显共生关系(图 4C), 矿物多为他形, 主要以细脉状斑铜矿+黄铜矿+石英矿物组合形式不均匀地分散于岩石中, 常与黄铜矿、辉铜矿连生(图 4C, E)。

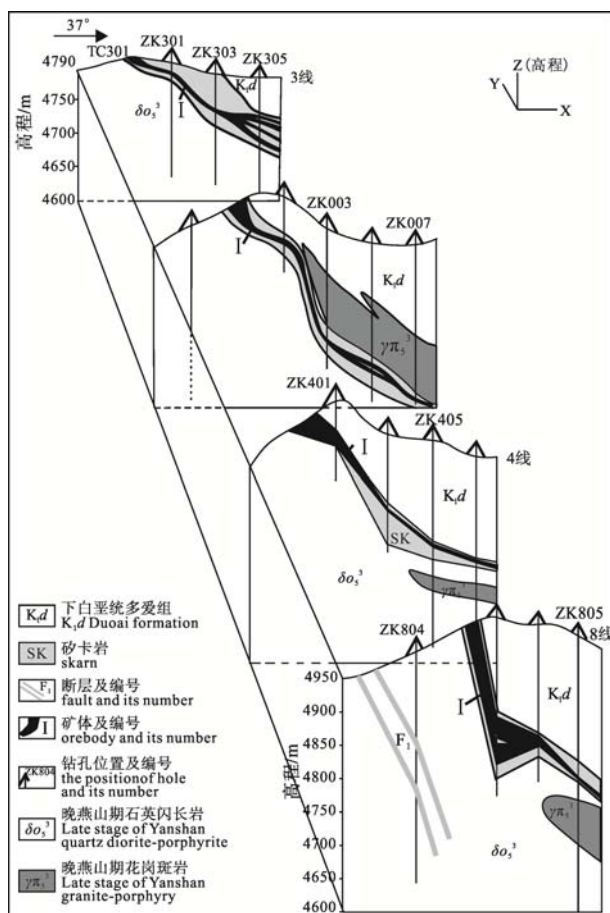


图3 矽卡岩型矿体联合勘探线剖面图

Fig. 3 Geological section along the composite exploration line of skarn ore body

辉铜矿：钻孔中少见，多呈烟灰状，分布于黄铜矿、斑铜矿边缘。

蓝辉铜矿：镜下可见其主要沿颗粒边缘及裂隙分布，或以单独的不规则群体粒状嵌布在脉石中，常伴有不规则蠕虫状铜蓝。

磁铁矿：主要分布于矽卡岩内，呈他形粒状分布于脉石矿物间，多被黄铜矿、黄铁矿、斑铜矿所交代。镜下可见穆磁铁矿，呈板片状外形。

金矿物以微细金为主，可见自然金、银金矿产出，呈细小粒状、半自形以及不规则状、圆粒状等，粒径一较小，大者可达0.1 mm左右，主要分布于石英、方解石、辉铜矿、黄铜矿的粒间、晶隙及裂隙中(图4F)。

银矿物：主要以自然银、银金矿和碲化物的形式存在。

2.3 似IOCG型铁铜金矿体

含有大量磁铁矿和(或)赤铁矿，并伴有黄铜矿±斑铜矿，矿产组合变化范围大且与一定的构造-岩浆环境有关的矿床称之为铁氧化物-铜-金型矿床，

其英文全称为 Iron oxide Copper Gold Deposits, 简称为 IOCG 型矿床(Sillitoe, 2003)。尕尔穷III号矿体产于F₁断层破碎带，矿石建造为Fe-Cu-Au建造，其铁的氧化物以赤铁矿、磁铁矿为主，铜的硫化物，以黄铜矿为主，次为斑铜矿、辉铜矿，金以自然金、铜金矿、碲金矿为主，与IOCG型矿床特征极为相似，李志军等(2011b)称之为似IOCG型矿体。

1) 矿体特征

似IOCG型铁铜金矿体(如III号矿体)，该矿体分布于F₁断裂破碎带内，是矿区主矿体之一，严格受F₁断层所控制，呈似层状、脉状产出于F₁断层破碎带中(图1)。矿体走向约为53°，延伸大于600 m，分布于205-201-214线，倾向多变，总体表现为202线北东，矿体倾向南东，202线南西，矿体倾向北西，倾角近直立或反转，矿体延伸大于200 m(未控制边界)(图5)。主矿体连续性好，Cu平均品位为0.89%，Au平均品位为3.49 g/t，目前发现矿体最大真厚度可达27 m(ZK2020)。围岩蚀变强烈，主要蚀变为硅化、赤铁矿化、褐铁矿化、方解石化、泥化等。矿体在地表出露处可见强烈赤铁矿化、褐铁矿化。

2) 矿石类型、组构及特征

该类矿石主要有细脉-网脉状矿石和角砾状矿石。

矿石构造以细脉-网脉状、角砾状为主，团块状构造次之。矿石结构按照成因分为结晶结构、交代结构、固溶体分离结构和表生结构四大类，主要为结晶结构、交代结构(图6A, C, D)。

金属矿物主要为赤铁矿、磁铁矿、黄铜矿、斑铜矿、辉铜矿、铜蓝、自然金，次为银矿物类、黄铁矿、蓝辉铜矿、孔雀石、蓝铜矿、镜铁矿、褐铁矿等、方铅矿、闪锌矿、白钨矿等。主要非金属矿物为石英、方解石、绿泥石、斜长石、绿帘石、石榴子石等。

斑铜矿多为它形粒状，粒度≤0.3 mm。边缘有次生的蓝辉铜矿及极少量铜蓝的反应边，颗粒中间沿解理缝有析出的针状黄铜矿与蓝辉铜矿形成的格状结构，次格状结构，含量3%(图6D、E)。

黄铜矿：呈细针状，少量，由斑铜矿转化而来，在斑铜矿中与蓝辉铜矿共同形成次格及格，未见单独颗粒。蓝辉铜矿形成辉铜矿的反应边结构及次格状结构；铜蓝它形粒状，常赋存于蓝辉铜矿中，与蓝辉铜矿共生或分布于斑铜矿边缘。

金矿物：常分布于石英(方解石)+赤铁矿(磁铁矿)中。

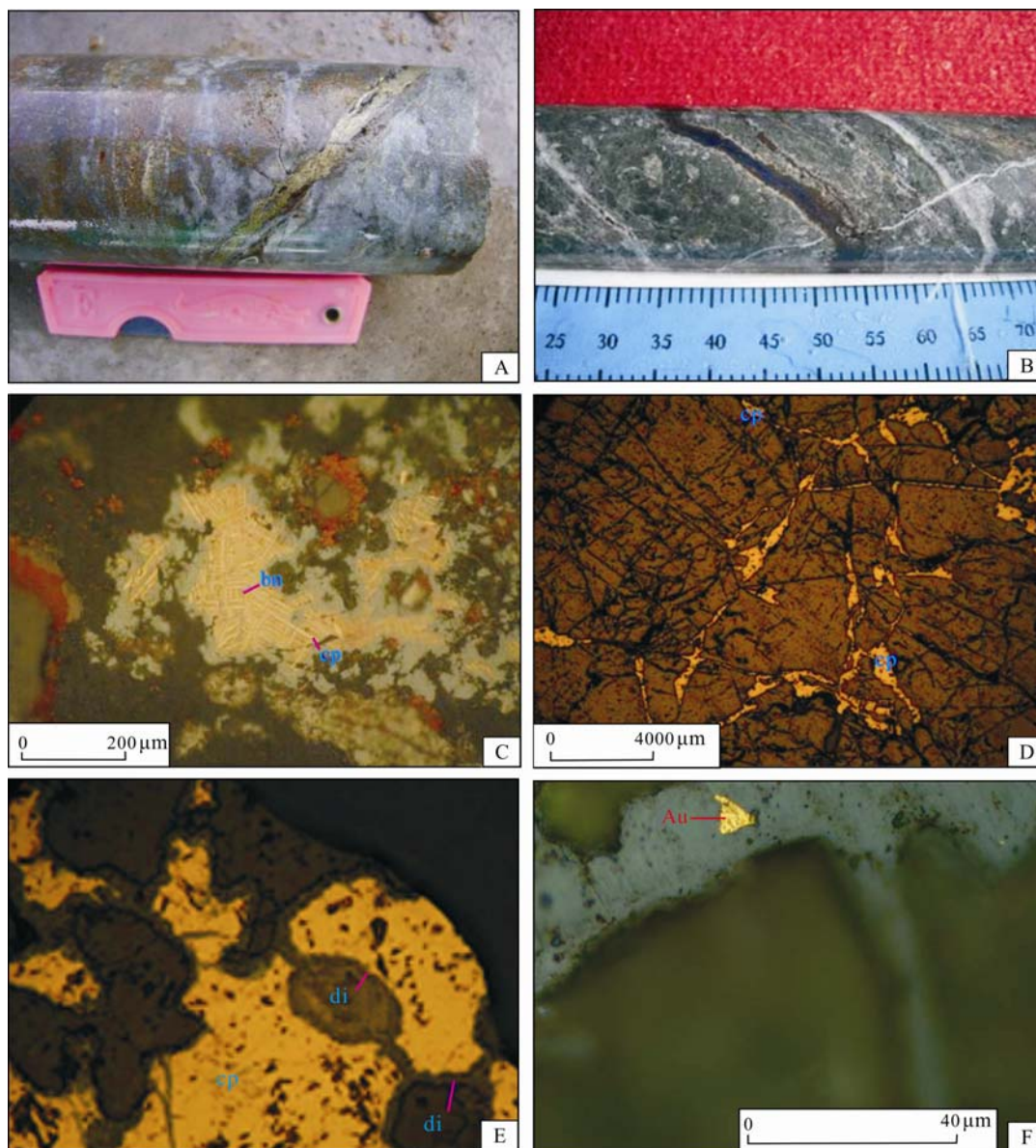


图 4 接触带砂卡岩型矿体主要矿石组构及矿石矿物特征

Fig. 4 Characteristics of the main fabric and ore minerals in the contact zone skarn ore body

A-细脉-浸染状、脉状构造黄铜矿(编号: ZK2021-144.8); B-脉状构造: 脉状斑铜矿(编号: ZK305-92.2); C-格状结构, 斑铜矿-黄铜矿呈格状双晶产出, 斑铜矿为主晶, 黄铜矿为客晶(编号: GR1910-101.9); D-网脉结构, 黄铜矿成网脉状充填交代于脉石矿物(编号: GR405-152.2); E-交代残余结构 黄铜矿被蓝辉铜矿、铜蓝等次生硫化物交代成残余(编号: GR801-155.3); F-块状磁铁矿中的自然金(编号: G-M08(8)); bn-斑铜矿; cp-黄铜矿; di-蓝辉铜矿; Au-自然金

A-veinlet-disseminated, veined chalcopyrite(number: ZK2021-144.8); B-vein structure: vein bornite(number: ZK305-92.2); C-grating texture: bornite-chalcopyrite growing in twin grating and bornite as host crystal, chalcopyrite as chadacryst(number: GR1910-101.9); D-stockwork texture: gangue minerals filled and replaced by stockwork chalcopyrite(number: GR405-152.2); E-metasomatic relict texture: chalcopyrite replaced by secondary sulfide, such as digenite, covellite, forming residual part(number: GR801-155.3); F-native gold in massive magnetite: (number: G-M08(8)); bn-bornite; cp-chalcopyrite; di-digenite; Au-native gold

赤铁矿: 自形放射状、针状及玫瑰花瓣产出, 常见单矿物以团块状、细脉状分布于构造角砾岩中, 局部可见赤铁矿部分发育揉皱构造。经常很不规则交代磁铁矿形成磁赤铁矿, 主要呈细斑状、云雾状, 与磁铁矿的界线往往模糊不清, 交代作用常自磁铁

矿的外缘向中心进行, 交代现象普遍(图 6C)。

磁铁矿, 半自形-它形结构, 粒度 ≤ 0.2 mm, 大部分被赤铁矿交代, 仅见少量残余。

金红石, 半自形-它形柱状或粒状, 粒度在 0.03 mm 左右, 常呈集合体分布。

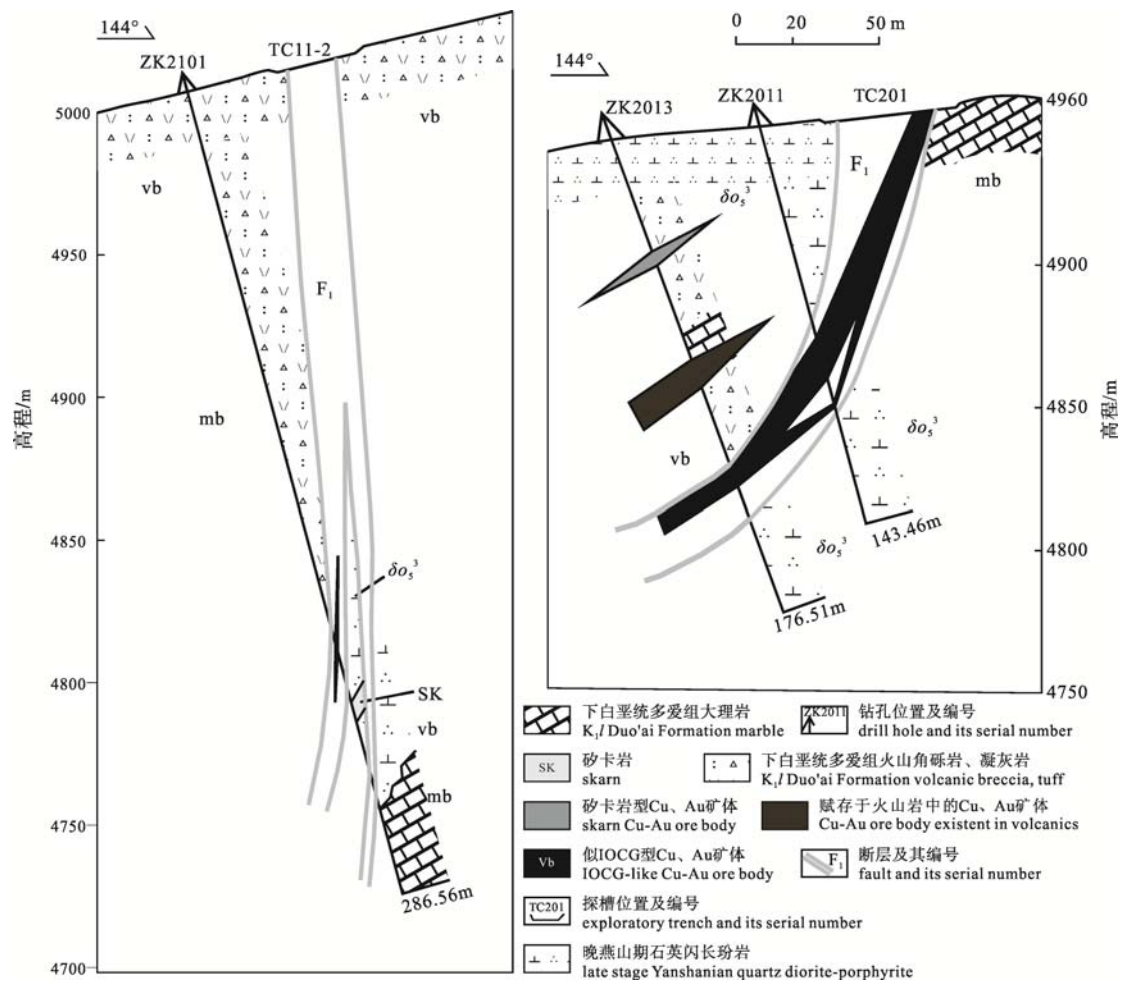


图 5 似 IOCG 型矿体 210 与 201 号勘探线剖面图
Fig. 5 Geological section along No. 210 and 201 exploration line of IOCG-like ore body

3 成因探讨

尕尔穷矿床成因的探讨主要基于如下基本的地质认识:

1) 矿区主要发育有三种矿体类型, 分别为斑岩型矿体、接触交代矽卡岩型矿体(如 I、II 号矿体)和似 IOCG 型矿体(如 III 号主矿体)。斑岩型矿体以 Cu、Mo 为主, 产于花岗斑岩和石英闪长岩中, 主要为细脉浸染状, 以石英-硫化物脉为主, 并出现大量的磁铁矿; 矽卡岩型矿体以 Cu、Au 为主, 产于花岗斑岩、石英闪长岩与多爱组碳酸盐岩接触带的矽卡岩及围岩中; 似 IOCG 型矿体成矿元素以 Fe、Cu、Au 为主, 产于 F₁ 断层破碎带中, 矿化与硅化、赤铁矿(交代磁铁矿形成)密切相关(图 4C), 这与斑岩型矿体的矿化特征类似。上述三类矿体的地质特征表明, 它们成因上存在联系, 成矿作用主要受控于花岗斑岩和石英闪长岩, 只是成矿物质沉淀的空间位置存在区别。

2) F₁ 断层破碎带控制着似 IOCG 型铁铜金矿体的分布, F₁ 断层切过矽卡岩型矿体(图 7A), 在 F₁ 断层中的构造角砾岩内发现矽卡岩、闪长玢岩、石英闪长岩角砾(图 7B), 由此可以推断似 IOCG 型铁铜金矿体形成于接触交代矽卡岩型铜金矿体之后, 表明尕尔穷矿床的成矿具有多期性。

3) 与成矿有关的石英闪长岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年显示岩体的侵位年龄为 87.1±0.4 Ma(MSWD=0.88)(姚晓峰等, 2012)。斑岩、矽卡岩矿石中辉钼矿的 Re-Os 同位素年龄为 89.7 Ma(曲晓明等, 2006)、86.79±0.47 Ma(李志军等, 2011a), 由此可以说明矿化形成于岩体演化的晚期, 这与成矿热液一般在岩浆演化后期出熔有关。从成岩(锆石 U-Pb 测年)成矿(辉钼矿的 Re-Os 测年)年龄来看, 尕尔穷矿床形成于早白垩世晚期至晚白垩世早期, 对应于燕山中晚期班公湖-怒江缝合带闭合后的碰撞阶段。

4) 根据李志军等(2011a)对尕尔穷铜金矿床 7 个

辉钼矿 Re-Os 同位素分析数据, 矿床中辉钼矿 Re 的含量变化于 12.64~164.08 $\mu\text{g/g}$, 平均值为 91.3 $\mu\text{g/g}$, 这与成矿物质来源于地幔或以地幔物质为主的矿床的辉钼矿 Re 含量相似, 通常这类矿床的辉钼矿 Re 含量多集中在 10~1000 $\mu\text{g/g}$ (应立娟等, 2010), 这反映出尔尔穷铜金矿床的成矿物源可能来自地幔或以地幔物质为主。

5)邓世林等(2011)对与成矿有关的石英闪长岩、花岗斑岩进行了岩石地球化学研究, 研究表明: 两类岩石均亏损 Nb、Ta、Zr、Hf 等高场强元素, 富集 Rb、Ba、Th、U 等大离子亲石元素; Rb/Sr 远大于 1; 具负铈和弱负钕异常, 稀土配分型式均为轻稀土富集型; 花岗斑岩明显亏损 Sr 和 Ti 元素, 石英闪长岩为岛弧环境的钾玄岩-高钾钙碱性重熔型中酸性

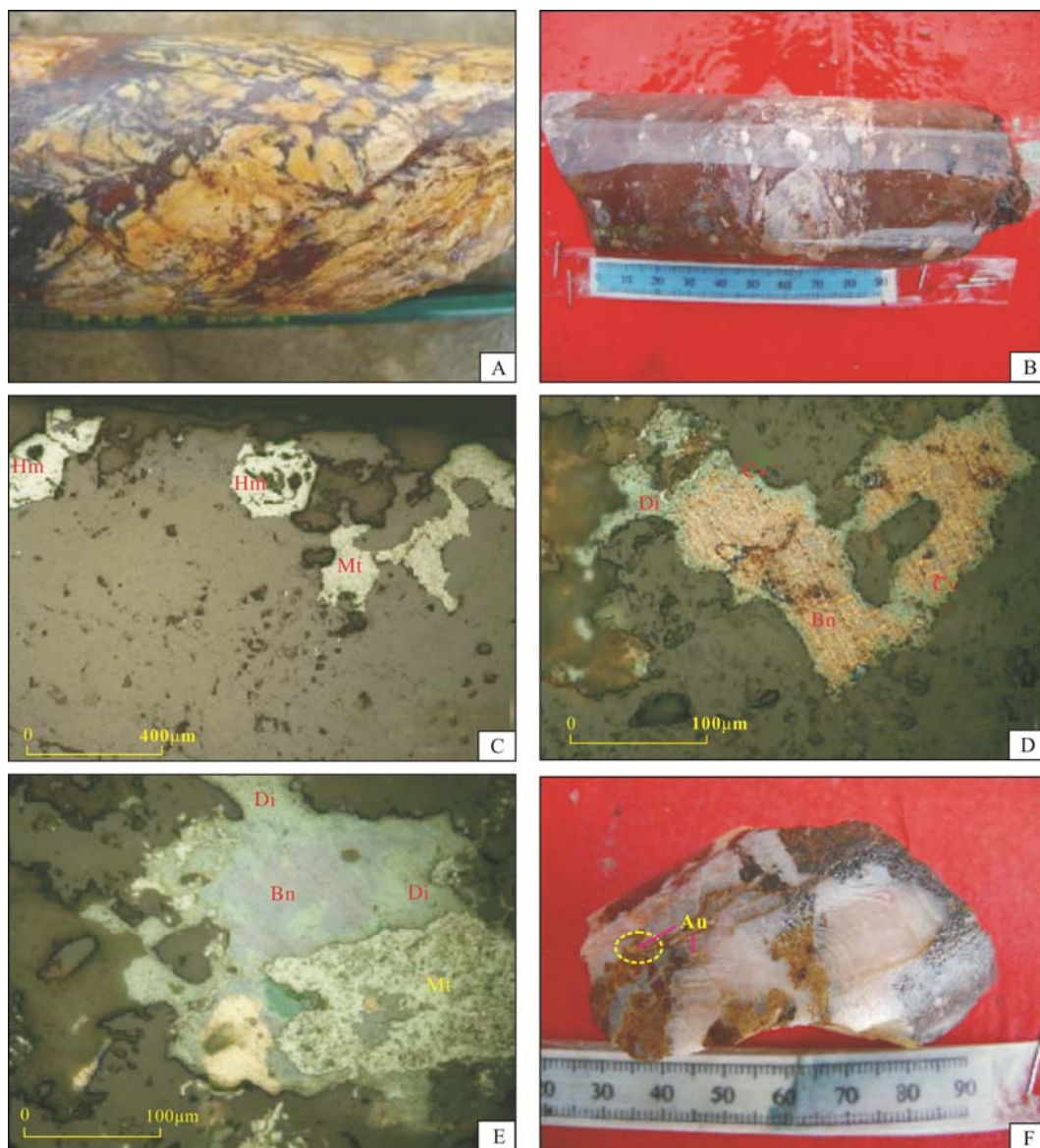


图 6 似 IOCG 型矿体主要矿石组构及矿石矿物特征

Fig. 6 Characteristics of the main fabric and ore minerals in the IOCG-like ore body

A-网脉状构造, 赤铁矿呈网脉状分布于构造角砾岩中(编号: ZK2101-253.6); B-角砾状构造, 赤铁矿以胶结物的形式胶结角砾(编号: ZK2101-253.6); C-假象赤铁矿, 磁铁矿被赤铁矿所交代(编号: ZK2020-184.7); D-固溶体分离结构(编号: G2013-45.2); E-交代结构, 斑铜矿被蓝辉铜矿所交代(编号: G2013-83.3); F-构造角砾岩中赤铁矿细脉的自然金(编号: ZK2101-202.4);

Hm-赤铁矿; Mt-磁铁矿; Di-蓝辉铜矿; Cv-铜蓝; Bn-斑铜矿; Au-自然金

A-stockwork structure: stockwork hematite distributed in structural breccia(number: ZK2101-253.6); B-brecciated structure: breccia cemented by hematite in the form of cement(number: ZK2101-253.6); C-martite: magnetite replaced by hematite(number: ZK2020-184.7); D-solid solution texture(number: G2013-45.2); E- metasomatic texture: bornite replaced by digenite(number: G2013-83.3); F-native gold in veinlet hematite growing in structural breccias(number: ZK2101-202.4);

Hm-hematite; Mt-magnetite; Di-digenite; Cv-covellite; Bn-bornite; Au-native gold

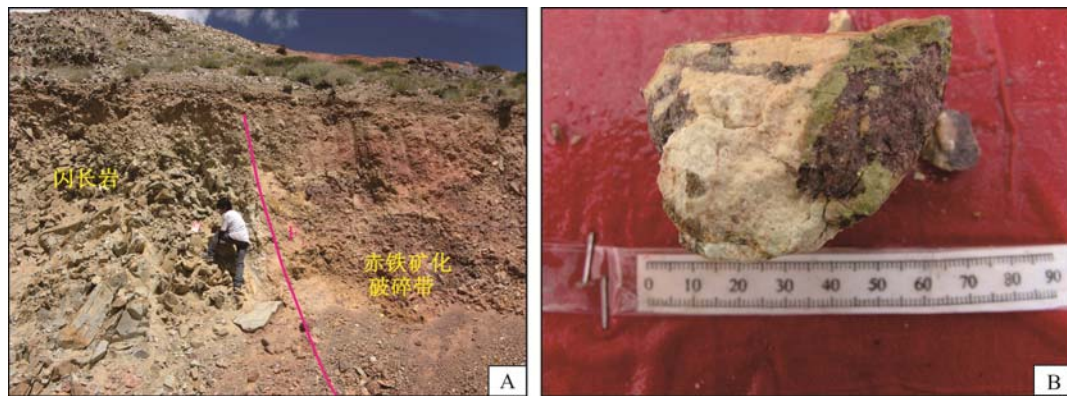


图 7 尕尔穷矿区 F_1 断层及断层内构造角砾

Fig. 7 Fracture 1 (F_1) and its breccia in the Ga'erqiong ore district

A- F_1 断层切过石英闪长玢岩; B- F_1 断层构造破碎带中的砂卡岩角砾

A- F_1 cutting quartz diorite-porphyrity; B-skarn breccia in structural fracture zone

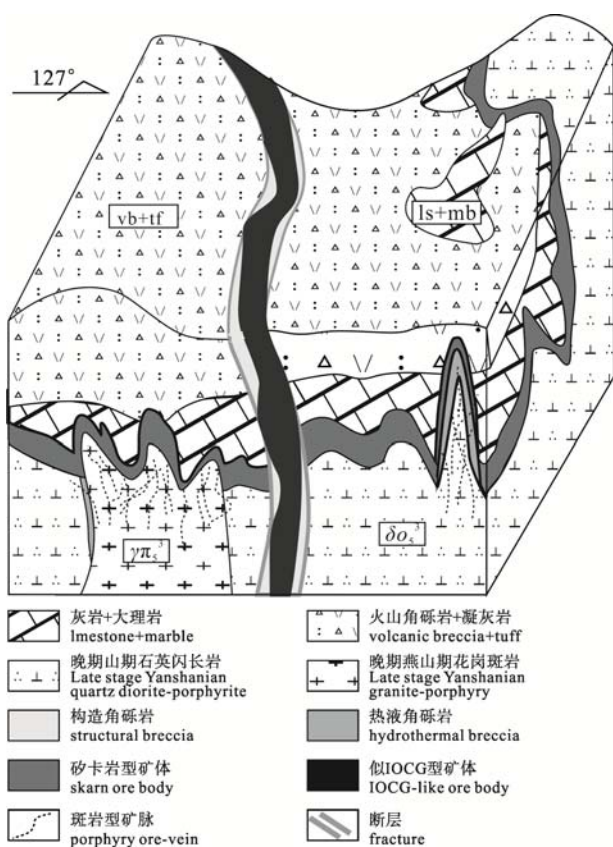


图 8 尕尔穷铜金矿床勘查模式图

Fig. 8 Exploration model of the Ga'erqiong Cu-Au deposit

岩体, 花岗斑岩为陆-陆同碰撞钾玄岩-高钾钙碱性重熔型酸性岩体。花岗斑岩形成于石英闪长岩之后(李志军等, 2011a), 而且两类岩体的副矿物均为磁铁矿-榍石-锆石系列(姚晓峰, 2010)。据以上石英闪长岩、花岗斑岩相似的产出位置、形成时期的相近性、岩石微量、稀土元素相似的特征以及相同的副矿物组合推断石英闪长岩与花岗斑岩为同源岩浆, 此推断有待后期进一步研究确定。

综上所述, 尕尔穷铜金矿床是晚白垩世班怒洋关闭后南羌塘-三江复合板片与冈底斯-念青唐古拉板片之间弧-陆碰撞阶段形成的与钾玄岩-高钾钙碱性闪长类岩体、陆-陆同碰撞钾玄岩-高钾钙碱性重熔型花岗斑岩成因密切联系的构造-岩浆岩“三位一体”的成矿形式, 即矿体赋存于斑岩、砂卡岩、 F_1 断裂破碎带中所形成的“斑岩-砂卡岩-似 IOCG”型矿床模式(图 8)。晚白垩世班怒洋关闭后冈底斯-念青唐古拉板片与南羌塘-三江复合板片之间的弧-陆碰撞作用, 导致含矿石英闪长质岩浆上侵, 火山碎屑岩发生角岩化、青盘岩化、磁铁矿化, 碳酸盐岩形成接触交代砂卡岩, 形成接触交代砂卡岩型 Cu、Au(Mo、Ag)矿体, 斑岩中形成细脉浸染状的铜钼矿化。后期陆-陆同碰撞钙碱性重熔型花岗斑岩侵位, 在花岗斑岩与多爱组碳酸盐岩接触带附近形成了砂卡岩, 以内砂卡岩为主, 成矿热液运移到接触带时则沿着接触带沉淀, 形成砂卡岩型 Cu、Au(Mo、Ag)矿床, 或直接沉淀于花岗斑岩的顶部, 形成了钼元素含量相对较高的斑岩型钼(铜、金)矿体; 成矿后期 F_1 断层活动, 当成矿热液向上运移至 F_1 断层破碎带引起成矿热液的温度、压力等条件发生变化, 直接与热液混合导致矿液中的平衡被打破, 铁、铜、金等成矿元素逐渐沉淀, 进而在破碎带中形成似 IOCG 型铁铜金矿体。

4 结论

1) 尕尔穷矿床主要由斑岩型钼(铜、金)矿体、接触带砂卡岩型铜金矿体、 F_1 断裂破碎带内似 IOCG 型铁铜金矿体组成。三类矿体在成因上存在联系, 成矿作用主要受控于花岗斑岩和石英闪长岩, 只是

成矿物质沉淀的空间位置存在区别。

2) 尕尔穷矿床形成于早白垩世晚期至晚白垩世早期, 对应于燕山中晚期班公湖-怒江缝合带闭合后的碰撞后阶段, 是晚白垩世班怒洋关闭后南羌塘-三江复合板片与冈底斯-念青唐古拉板片之间弧-陆碰撞阶段形成的与钾玄岩-高钾钙碱性闪长类岩体、陆-陆同碰撞钾玄岩-高钾钙碱性重熔型花岗岩岩成因密切联系的构造-岩浆岩“三位一体”的成矿形式, 即矿体赋存于斑岩、矽卡岩、 F_1 断裂破碎带中所形成的“斑岩-矽卡岩-似 IOCG”型成矿模式。

3) 尕尔穷矿床 F_1 断裂破碎带中的似 IOCG 铁铜金型矿体是班-怒带西段新发现的一种矿体类型, 因此, 在班-怒带西段的斑岩型矿床附近发育的构造破碎带可能具有寻找蚀变岩型铜金矿体的潜力, 尤其是高赤铁矿化、褐铁矿化、硅化的破碎带。

致谢: 本文野外得到了中国科学院地质与地球物理研究所秦克章研究员、李光明研究员、李金祥博士等地质专家的细心指导同时也获得了西藏卓朗基矿业投资有限公司的资助, 室内写作过程得到成都理工大学郎兴海博士、中国地质科学院矿产资源研究所王立强博士的指导, 在此一并表示感谢。

参考文献:

- 曹圣华, 肖晓林, 欧阳克贵. 2008. 班公湖—怒江结合带西段侏罗纪木嘎岗日群的重新厘定及意义[J]. 沉积学报, 26(4): 559-564.
- 邓世林, 唐菊兴, 李志军, 姚晓峰, 王友. 2011. 西藏尕尔穷铜金矿床岩体地球化学特征[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 38(1): 85-91.
- 邓世林. 2011. 西藏革吉县尕尔穷铜金矿床地球化学特征[D]. 成都: 成都理工大学.
- 耿全如, 潘桂棠, 王立全, 彭智敏, 张璋. 2011. 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, 30(8): 1261-1274.
- 郭铁鹰, 梁定盛, 张宜智, 赵崇贺. 1991. 西藏阿里地质[M]. 武汉: 中国地质大学出版社.
- 胡正华, 唐菊兴, 李志军, 丁枫, 姚晓峰, 张志, 胡紫豪, 李建力, 雷传扬, 王红星, 宋俊龙. 2011. 西藏革吉县尕尔穷铜金矿床Ⅲ号矿体特征[J]. 矿物学报, (增刊): 344-355.
- 雷传扬, 李志军, 张志, 胡正华, 王红星, 宋俊龙. 2012. 西藏尕尔穷铜金矿床花岗岩类的地球化学特征及其地球动力学意义[J]. 地球学报, 33(4): 601-612.
- 李光明, 李金祥, 秦克章, 张天平, 肖波. 2007. 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, 23(5): 935-952.

李金祥, 李光明, 秦克章, 肖波. 2008. 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, 24(3): 531-543.

李志军, 唐菊兴, 姚晓峰, 邓世林, 王友. 2011a. 班公湖 - 怒江成矿带西段尕尔穷铜金矿床辉钼矿 Re-Os 年龄及其地质意义[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 38(6): 678-683.

李志军, 唐菊兴, 姚晓峰, 多吉, 刘鸿飞, 邓世林, 张志, 张金树, 胡正华. 2011b. 藏北阿里地区新发现的尕尔穷铜金多金属矿床地质特征及其找矿前景[J]. 矿床地质, 30(6): 1149-1153.

曲晓明, 辛洪波. 2006. 藏西班公湖斑岩铜矿带的形成时代与成矿构造环境[J]. 地质通报, 25(7): 792-799.

余宏全, 李进文, 丰成友, 马东方, 潘桂棠, 李光明. 2006. 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, 80(9): 1434-1447.

余宏全, 李进文, 马东方, 李光明, 张德全, 丰成友, 屈文俊, 潘桂棠. 2009. 西藏多不杂斑岩铜矿床辉钼矿 Re-Os 和锆石 U-Pb SHRIMP 测年及地质意义[J]. 矿床地质, 28(6): 737-746.

唐菊兴, 李志军, 刘文周, 姚晓峰, 邓世林, 王友, 杨毅, 张志, 胡正华. 2009. 西藏自治区革吉县尕尔穷铜矿详查地质报告[R]. 西藏: 西藏地质矿产局.

王友. 2010. 西藏革吉县尕尔穷铜金矿床矿石特征研究[D]. 成都: 成都理工大学.

吴德新, 赵元艺, 刘朝强, 许虹, 李玉昌, 李玉彬, 雷晓光. 2012. 西藏多不杂矿集区斑岩铜矿地球化学指标研究[J]. 地球学报, 33(2): 185-196.

辛洪波, 曲晓明, 王瑞江, 刘鸿飞, 赵元艺, 黄玮. 2009. 藏西班公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, 28(6): 785-792.

姚晓峰, 唐菊兴, 李志军, 邓世林, 丁帅, 胡正华, 张志. 2012. 怒带西段尕尔穷矽卡岩型铜金矿含矿母岩成岩时代的重新厘定及其地质意义[J]. 地质论评, 待刊.

姚晓峰, 唐菊兴, 李志军, 邓世林, 胡正华, 张志. 2012. 西藏尕尔穷铜金矿床 S、Pb 同位素地球化学特征——成矿物质来源示踪[J]. 地球学报, 33(4): 528-536.

姚晓峰, 唐菊兴, 王友, 李志军, 邓世林. 2011. 西藏尕尔穷铜金矿金矿物特征研究[J]. 地质与勘探, 47(6): 1018-1025.

姚晓峰. 2010. 西藏革吉县尕尔穷矽卡岩型铜金矿成矿岩浆岩特

征及其含矿性研究[D]. 成都: 成都理工大学.

应立娟, 王登红, 唐菊兴, 畅哲生, 屈文俊, 郑文宝, 王焕. 2010.

西藏甲玛铜多金属矿辉钼矿 Re-Os 定年及其成矿意义[J].

地质学报, 84(8): 1165-1174.

张志, 唐菊兴, 杨毅, 李志军, 姚晓峰, 邓世林, 王红星, 宋俊龙.

2012. 西藏尕尔穷铜金矿元素空间分布规律及地球化学勘

查模型[J]. 地球学报, 33(4): 663-672.

赵元艺, 刘妍, 王瑞江, 崔玉斌, 宋亮, 吕立娜, 曲晓明. 2010.

西藏班公湖-怒江成矿带及邻区铋矿化带的发现与意义[J].

地球学报, 31(2): 183-193.

References:

CAO Sheng-hua, XIAO Xiao-lin, OUYANG Ke-gui. 2008. Re-new-Establishment of the Jurassic Mugangri Groups and Its Geological Significance on the Western Side of the Bangong Co-Nujiang Junction Zone[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 26(4): 559-564(in Chinese with English abstract).

DENG Shi-lin, TANG Ju-xing, LI Zhi-jun, YAO Xiao-feng, WANG You. 2011. Geochemical characteristics of rock mass in the Gaerqiong Cu-Au deposit, Tibet[J]. Journal of Chengdu University of Technology(Science & Technology Edition), 38(1): 85-91(in Chinese with English abstract).

DENG Shi-lin. 2011. Geochemistry Character of Gaerqiong Copper-gold Deposit, Geji Country, Tibet[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology(in Chinese with English abstract).

GENG Quan-ru, PAN Gui-tang, WANG Li-quan, PENG Zhi-min, ZHANG Zhang. 2011. Tethyan evolution and metallogenic geological background of the Bangong Co-Nujiang belt and the Qiangtang massif in Tibet[J]. Geological Bulletin of China, 30(8): 1261-1274(in Chinese with English abstract).

GUO Tie-ying, LIANG Ding-sheng, ZHANG Yi-zhi, LEI Chong-he. 1991. Geological of A Li, tibet[M]. Wuhan: University of Geosciences Press Wuhan, China(in Chinese).

HU Zheng-hua, TANG Ju-xing, LI Zhi-jun, DING Feng, YAO Xiao-feng, ZHANG Zhi, HU Zi-hao, LI Jian-li, LEI Chuan-yang, WANG Hong-xing, SONG Jun-long. 2011. The feature of III orebody mineralization of Gaerqiong Copper-gold Deposit, Geji Country, Tibet[J]. Acta Mineralogica Sinica, (suppl): 344-355(in Chinese).

LEI Chuan-yang, LI Zhi-jun, ZHANG Zhi, HU Zheng-hua, WANG

Hong-xing, SONG Jun-long. 2012. Geochemical Characteristics and Geodynamic Significance of the Granites in the Ga'erqiong Cu-Au deposit, Tibet[J]. Acta Geoscientica Sinica, 33(4): 601-612(in Chinese with English abstract).

LI Guang-ming, LI Jin-xiang, QIN Ke-zhang, ZHANG Tian-ping, XIAO Bo. 2007. 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, 23(5): 935-952(in Chinese with English abstract).

LI Jin-xiang, LI Guang-ming, QIN Ke-zhang, XIAO Bo. 2008. 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, 24(3): 531-543(in Chinese with English abstract).

LI Zhi-jun, TANG Ju-xing, YAO Xiao-feng, DENG Shi-lin, WANG You. 2011a. Re-Os isotope age and geological significance of molybdenite in the Gaerqiong Cu-Au deposit of Geji, Tibet, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology(Science & Technology Edition), 38(6): 678-683(in Chinese with English abstract).

LI Zhi-jun, TANG Ju-xing, YAO Xiao-feng, DUO Ji, LIU Hong-fei, DENG Shi-lin, ZHANG Jing-shu, HU Zheng-hua. 2011b. Geological Characteristics and Prospecting Potential of Gaerqiong copper-gold polymetallic deposit in Ali District, northern Tibet[J]. Mineral Deposits, 30(6): 1149-1153(in Chinese with English abstract).

QU Xiao-ming, XIN Hong-bo. 2006. Ages and tectonic environment of the Bangong Co porphyry copper belt in western Tibet, China[J]. Geological Bulletin of China, 25(7): 792-799(in Chinese with English abstract).

SHE Hong-quan, LI Jin-wen, FENG Cheng-you, MA Dong-fang, PAN Gui-tang, LI Guang-ming. 2006. The High-Temperature and Hypersaline Fluid Inclusions and Its Implications to the Metallogenesis in Duobuza Porphyry Copper Deposit, Tibet[J]. Acta Geologica Sinica, 80(9): 1434-1447(in Chinese with English abstract).

SHE Hong-quan, LI Jin-wen, MA Dong-fang, LI Guang-ming, ZHANG De-quan, FENG Cheng-you, QU Wen-jun, PAN Gui-tang. 2009. Molybdenite Re-Os and SHRIMP zircon U-Pb

- dating of Duobuza porphyry copper deposit in Tibet and its geological implications[J]. Mineral Deposits, 28(6): 737-746(in Chinese with English abstract).
- SILLITOE R H. 1997. Characteristics and Controls of the Largest Porphyry Copper-gold and Epithermal Gold Deposits in the Circum-Pacific Region[J]. Australian Journal of Earth Sciences, 44(3): 373-388.
- SILLITOE R H. 2003. Iron oxide-copper-gold deposits: An Andean view[J]. Mineralium Deposita, 38(7): 787-812.
- TANG Ju-xing, LI Zhi-Jun, LIU Wen-zhou, YAO Xiao-feng, DENG Shi-lin, WANG You, YANG Yi, ZHANG Zhi, HU Zheng-hua. 2009. The detailed investigation of geological reports of Gaerqiong Copper Deposit, Geji County, Tibet[R]. Tibet: Geology and Mineral Resources Bureau of Tibet(in Chinese).
- WANG You. 2010. Study on Ore Characteristic of Garjoan Copper-gold Deposit, Gejue County, Tibet[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology(in Chinese).
- WU De-xin, ZHAO Yuan-yi, LIU Chao-qiang, XU Hong, LI Yu-chang, LI Yu-bin, LEI Xiao-guang. 2012. Geochemical Indicators of Porphyry Copper Deposits in the Dobzha Ore Concentration Area, Tibet[J]. Acta Geoscientica Sinica, 33(2): 185-196(in Chinese with English abstract).
- XIN Hong-bo, QU Xiao-ming, WANG Rui-jiang, LIU Hong-fei, ZHAO Yuan-yi, HUANG Wei. 2009. Geochemistry and Pb, Sr, Nd isotopic features of ore-bearing porphyries in Bangong Lake porphyry copper belt, western Tibet[J]. Mineral Deposits, 28(6): 785-792(in Chinese with English abstract).
- YAO Xiao-feng, TANG Ju-xing, LI Zhi-jun, DENG Shi-lin, DING Shuai, HU Zheng-hua, ZHANG Zhi. 2011a. Containing ore host rock diagenetic age re-determine its geological significance of the Gaerqiong Skarn-type copper-gold Deposit in the western part of the Bangong-Nujiang suture zone[J]. Geological Review, in press(in Chinese with English abstract).
- YAO Xiao-feng, TANG Ju-xing, LI Zhi-jun, DENG Shi-lin, HU Zheng-hua, ZHANG Zhi. 2012. S, Pb Isotope Characteristics of the Ga'erqiong Gold-Copper Deposit in Tibet: Tracing the Source of Ore-forming Materials[J]. Acta Geoscientica Sinica, 33(4): 528-536(in Chinese with English abstract).
- YAO Xiao-feng, TANG Ju-xing, WANG You, LI Zhi-jun, DENG Shi-lin. 2011b. Characteristics of Gold-bearing Minerals in the Ga'erqiong Copper-Gold Deposit, Tibet[J]. Geology and Exploration, 47(6): 1018-1025(in Chinese with English abstract).
- YAO Xiao-feng. 2010. The Study of Minerogenic Magmatite Characteristic and Its Ore-bearing Potential of Gaerqiong Copper-Gold Deposit, Geji County, Tibet[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology(in Chinese with English abstract).
- YING Li-juan, WANG Deng-hong, TANG Ju-xing, CHANG Zhe-sheng, QU Wen-jun, ZHENG Wen-bao, WANG Huan. 2010. Re-Os Dating of Molybdenite from the Jiama Copper Polymetallic Deposit in Tibet and Its Metallogenic Significance[J]. Acta Geologica Sinica, 84(8): 1165-1174(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Zhi, TANG Ju-xing, YANG Yi, LI Zhi-jun, YAO Xiao-feng, DENG Shi-lin, WANG Hong-xing, SONG Jun-long. 2012. Element Spatial Distribution of the Gaerqiong Copper-gold Deposit in Tibet and Its Geochemical Exploration Model[J]. Acta Geoscientica Sinica, 33(4): 663-672(in Chinese with English abstract).
- ZHAO Yuan-yi, LIU Yan, WANG Rui-jiang, CUI Yu-bin, SONG Liang, LÜ Li-na, QU Xiao-ming. 2010. The discovery of the Bismuth Mineralization Belt in the Bangong Co-Nujiang Metallogenic Belt of Tibet and its Adjacent Areas and Its Geological Significance[J]. Acta Geoscientica Sinica, 31(2): 183-193(in Chinese with English abstract).