

# 西藏冈底斯南缘碰撞后渐新世成矿作用 ——来自帕南钼矿床的 Re-Os 同位素年龄证据

段连峰<sup>1,2</sup> 李 为<sup>3</sup> 郑远川<sup>1</sup> 梁 维<sup>1,2</sup> 付 强<sup>1,2</sup> 李秋耘<sup>2</sup>

(1. 中国地质大学 地球科学与资源学院, 北京 100083; 2. 中国地质科学院 地质研究所, 北京 100037;  
3. 中国国土资源经济研究院, 北京 101149)

**摘 要:** 帕南矿床是西藏山南地区冲木达-努日矿集区东缘新发现的一个斑岩型钼矿床。野外勘查发现区内与成矿作用有关的二长花岗斑岩呈脉状侵入到古新世花岗闪长岩中, 并引起斑岩体内部和围岩发生强烈的辉钼矿矿化和热液蚀变作用。辉钼矿矿化主要产于平直石英细脉内, 部分呈浸染状分布于脉体围岩中。本文对帕南斑岩型钼矿床的4件辉钼矿样品进行了 Re-Os 同位素测试, 其模式年龄为 31.34~31.83 Ma, 平均值为  $31.66 \pm 0.22$  Ma, 并有较好的等时线年龄 ( $32.4 \pm 1.5$  Ma, MSWD=1.5)。等时线年龄与模式年龄在误差范围内一致, 表明该年龄应该代表帕南矿床的矿化年龄。这一年龄值与冲木达-努日成矿带的成矿作用时间大致相当 (30~23 Ma), 显示出帕南矿床与成矿带内其它矿床可能具有相似的成矿动力学背景。然而, 帕南矿床的成矿时代略早于区内其它矿床, 表明冲木达-努日成矿带的成矿作用应始于 32 Ma 左右, 而成矿作用则可能与碰撞后的加厚岩石圈地幔拆沉有关。

**关键词:** 辉钼矿; Re-Os 年龄; 成矿年龄; 帕南矿床; 西藏

中图分类号: P618.65; P597+.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2014)02-0307-10

## Post-collisional Oligocene metallogenic process in southern margin of Gandise belt: Evidence from Re-Os dating of molybdenite from the Pa'n an porphyry Mo deposit

DUAN Lian-feng<sup>1,2</sup>, LI Wei<sup>3</sup>, ZHENG Yuan-chuan<sup>1</sup>, LIANG Wei<sup>1,2</sup>, FU Qiang<sup>1,2</sup> and LI Qiu-yun<sup>2</sup>

(1. College of Earth Science and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. Institute of Geology, CAGS, Beijing 100037, China; 3. Chinese Academy of Land & Resource Economics, Beijing 101149, China)

**Abstract:** The Pa'n an deposit is a newly-discovered porphyry Mo deposit at the eastern edge of the Chongmuda-Nuri ore field in Shannan Prefecture of Tibet. According to field work, the vein-like monzonitic granite-porphyry related to mineralization intruded into the Paleocene granodiorite, resulting in strong molybdenite mineralization and hydrothermal alteration in the porphyry and the contact zone. The molybdenite mineralization was mainly related to the straight quartz vein where most molybdenite occurred with a minor impregnation in quartz veins near the surrounding rock. In this paper, direct Re-Os isotopic dating of molybdenites collected from the quartz-molybdenite veins in the Pa'n an porphyry Mo deposit was carried out, which yielded model ages ranging from 31.34 to 31.83 Ma, a weighted average age of  $31.66 \pm 0.22$  Ma and an isochron age of  $32.4 \pm 1.5$  Ma (MSWD=1.5). The model ages and isochron age are consistent within the error range. Therefore the data represent the ore-forming age of the Pa'n an deposit, which is basically consistent with the previous studies which

收稿日期: 2013-04-12; 修订日期: 2013-12-10

基金项目: "973"计划项目(2011CB403100); 地调项目(1212011121253); 中央高校基本科研业务费(2-9-2013-18)

作者简介: 段连峰(1987-), 男, 汉族, 硕士研究生, 主要从事矿床学研究, E-mail: duanlianfeng0701@163.com; 通讯作者: 郑远川(1982-), 男, 汉族, 博士, 从事矿床学教学和陆陆碰撞成矿方面研究, E-mail: zheng\_yc@126.com。

suggest that the mineralization of the Chongmuda-Nuri ore field occurred in Oligocene (30~23 Ma). These data indicate that the Pa'nán deposit had a similar deep dynamic progress to the other deposits in the Chongmuda-Nuri ore belt. Nevertheless, the metallogenic epoch of the Pa'nán porphyry deposit is slightly earlier than that of the other deposits in the Chongmuda-Nuri ore belt, suggesting that mineralization was probably started at ca.32 Ma and related to the delamination of post-collision thickened mantle lithosphere.

**Key words:** molybdenite; Re-Os dating; metallogenic age; Pa'nán deposit; Tibet

始于晚白垩世晚期的印度-欧亚大陆板块的强烈碰撞造就了宏伟壮观的青藏高原,使其成为全球规模最宏大的陆陆碰撞造山带(Yin and Harrison, 2000; Chung *et al.*, 2005; Yin, 2006)。同时,青藏高原也是全球巨型成矿带特提斯-喜马拉雅成矿域的重要组成部分,堪称中国最重要的多金属富集区以及全球罕见的世界级多金属成矿省(Hou and Cook, 2009),因而其一直是基础地质理论研究和国家找矿突破的热点地区。前人研究表明,以印度-亚洲大陆对接碰撞为代表的陆-陆碰撞造山,具有清楚而明确的 3 阶段演化特征,即主碰撞陆陆汇聚(65~41 Ma)、晚碰撞构造转换(40~26 Ma)和后碰撞地壳伸展(25~0 Ma)阶段,与之对应发育了主碰撞造山、晚碰撞构造转换和后碰撞伸展 3 期强烈的成矿作用(侯增谦等, 2006a, 2006b, 2006c; Hou and Cook, 2009)。

晚碰撞阶段的岩浆与成矿作用主要集中在“三江”地区,成矿作用以与大规模走滑断裂系统有关的斑岩型 Cu-Mo 矿化、与碳酸盐-正长杂岩有关的 REE 成矿、与逆冲推覆有关的热卤水有关的 Pb-Zn-Ag-Cu 成矿以及与大规模剪切系统有关的造山带型 Au 矿床成矿为特征(Hou and Ma, 2003; 侯增谦等, 2006b; 宋玉财等, 2011)。然而,在冈底斯带内,区域岩浆和成矿作用主要集中在主碰撞和后碰撞阶段,而晚碰撞阶段则通常被认为缺乏强烈的岩浆和成矿作用(莫宣学等, 2005; 侯增谦等, 2006a, 2006b, 2006c; Hou and Cook, 2009; Zhao *et al.*, 2009; Zheng *et al.*, 2012)。最近,研究者发现在冈底斯主碰撞带的晚碰撞阶段,实际上也存在一定规模的岩浆作用(38~30 Ma)(Chung *et al.*, 2009; 姜子琦等, 2011; Guan *et al.*, 2012; Zheng *et al.*, 2012),尤以冈底斯东段南缘的冲木达-努日一带最为发育,并伴随有强烈的成矿作用(李光明等, 2006a, 2006b; 莫济海等, 2008; 闫学义等, 2010; 范新等, 2011; 陈雷等, 2011; Jiang *et al.*, 2012; 张松等, 2012)。

随着冲木达-努日一带岩浆-成矿事件的发现,研究者开始对冲木达-努日矿集区进行大量研究。研究表明,冲木达-努日成矿带以斑岩型 Mo-Cu、矽卡岩型 W-Cu-Mo 和矽卡岩型 Cu-Au 矿化为特征。已有的精确定年工作表明区内成矿作用主要集中于 30~23 Ma(李光明等, 2006b; 闫学义等, 2010; 陈雷等, 2011; 张松等, 2012; Zheng *et al.*, 2012)。帕南矿床是成矿带内新近发现的与二长花岗岩岩有密切成因联系的钼矿,虽然现有规模明显小于区内的明则斑岩钼矿床,但其矿化特征却与之十分相似。笔者对采于帕南矿区石英脉体中的辉钼矿进行了精确的 Re-Os 同位素年龄测定,厘定了矿床的形成时代,补充了该成矿带矿床时代的资料,为研究和讨论区内矿床成因以及成矿作用等提供了基础信息,亦可为区内找矿勘查提供一定的理论指导。

## 1 区域地质背景

青藏高原碰撞造山带是由多个板块依次拼贴而成,包括松潘-甘孜地块、羌塘地块和拉萨地块,从北到南依次被金沙江缝合带、班公湖-怒江缝合带和雅鲁藏布江缝合带分隔开(Yin and Harrison, 2000)。西藏冈底斯带处于亚洲大陆的最南缘,位于弧陆碰撞雅江结合带北侧的冈底斯火山-岩浆弧带内,北以班公湖-怒江缝合带、南以雅鲁藏布江缝合带为界,为一条东西长约 2 000 km、南北宽 100~300 km 的巨型岩浆岩带。中生代以来经历了三叠纪—白垩纪复合火山-岩浆弧、白垩纪末—始新世弧-陆碰撞、中新世碰撞后伸展、上新世以来的高原全面隆升等多个构造体制演化阶段(李光明等, 2006b)。拉萨地块结晶基底为中元古代和早寒武纪,上覆有奥陶纪至三叠纪的浅海相碎屑沉积,安多片麻岩作为拉萨地块结晶基底只出露在北部边缘,奥陶纪至三叠纪的沉积地层则在北拉萨地体和南拉萨地体中广泛出露。受新特提斯洋壳的俯冲,形成了雅鲁藏布江缝合带、日喀则弧前盆地以及安第斯型弧型岩基(120

~70 Ma; Chu *et al.*, 2006; Zhu *et al.*, 2009) 随后 65 Ma 开始印亚大陆对接碰撞造成地壳的加厚和平行于雅鲁藏布江缝合带东西长逾 1 500 km 的冈底斯岩浆岩带展布( Chung *et al.*, 2005; 莫宣学等, 2005)。同碰撞过程( 65~41 Ma)中岩浆活动强烈, 导致古近纪花岗岩基、近 5 000 m 厚的林子宗火山岩以及少量渐新世达孜玄武岩的出露。晚碰撞过程( 40~26 Ma)中, 拉萨地块岩浆活动并不强烈, 然而在冈底斯东段南缘的冲木达-努日一带较为发育, 以花岗闪长岩和二长花岗斑岩的出露为主。而在后碰撞过程( 25~0 Ma)中, 以广泛分布的中新世钾质超钾质火山岩( Zhao *et al.*, 2009)和呈东西带状分布的与斑岩铜矿有关的埃达克岩( Hou *et al.*, 2004)两类岩浆作用活动强烈, 均侵入到冈底斯岩基和火山岩沉积地层中, 并严格受南北向正断层的控制。

山南地区冲木达-努日成矿带处于冈底斯岩浆弧构造带之东南缘( 图 1), 紧邻雅鲁藏布江缝合带, 距该缝合带最近处仅 6 km, 产于泽当火山岩弧上。区域出露的地层有: 三叠系姐德秀组的碎屑岩、碳酸盐岩建造, 侏罗-白垩系麻木下组的钙碱性岛弧火山岩夹碳酸盐岩、碎屑岩建造, 厚度大于 1 740 m,

零星分布于雅鲁藏布江两岸; 白垩系比马组的碎屑岩、碳酸盐岩及岛弧钙碱性火山岩建造, 厚度达 4 155 m, 分布较为广泛( 王少怀等, 2003; 李光明等, 2006a)。受区域构造影响, 区域地层主体呈近东西向展布。区域岩浆活动频繁, 自燕山晚期至喜马拉雅期均有分布, 对应于新特提斯洋向北俯冲消减、印度板块与欧亚板块碰撞。岩浆活动集中在 120~20 Ma( Harrison *et al.*, 2000), 岩浆侵位高峰在 65~45 Ma 和 30~24 Ma 两个阶段( Chung *et al.*, 2005; Yin and Harrison, 2000)。侵入作用可分为 3 个主要侵入期: 碰撞以前以辉长岩、辉长闪长岩、花岗闪长岩为主, 同碰撞期以花岗闪长岩、石英二长闪长岩、二长花岗岩为主, 晚碰撞期和( 或)后碰撞期以闪长玢岩、石英闪长玢岩、花岗闪长斑岩、二长花岗斑岩为主, 并多呈岩株、岩筒及岩脉产出。

冲木达-努日成矿带沿雅鲁藏布江两岸构成一条近东西向, 长大于 60 km、宽 10~20 km 的铜多金属成矿带( 图 1), 并已发现有数十处矿床( 点)。主要矿床( 点): 西段有多吉扎、克鲁、普隆、桑伊寺, 中段有努日、双布结热、明则、车门、娘古处, 东段有程巴-明则、比吉、冲木达、陈坝、节中、帕南等。其中规模

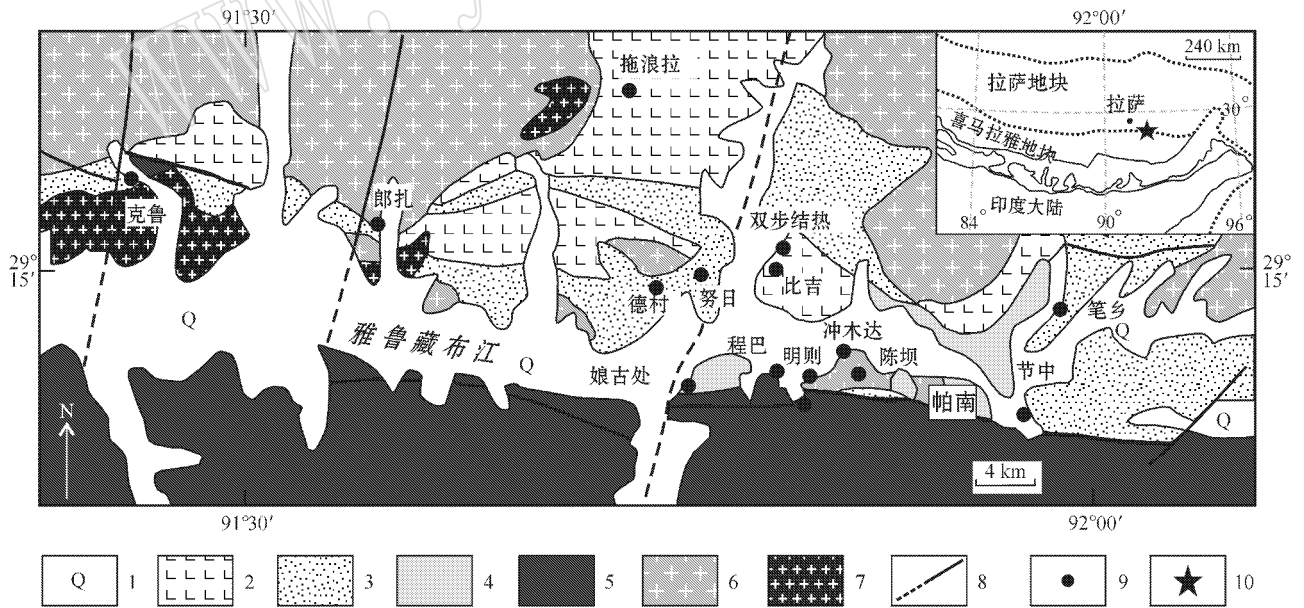


图 1 西藏冈底斯南缘多金属成矿带地质简图( 据张松等, 2012 修编)

Fig. 1 Simplified geological map of the polymetallic ore belt in southern Gangdise, Tibet( after Zhang Song *et al.*, 2012)

1—第四系沉积物; 2—第三系火山岩; 3—白垩纪火山-沉积岩; 4—侏罗纪火山岩; 5—三叠纪火山岩; 6—始新世花岗岩类; 7—晚白垩世花岗岩类; 8—断裂; 9—矿床( 点); 10—研究区

1—Quaternary ( Q); 2—Tertiary volcanic rocks; 3—Cretaceous volcanogene sedimentary rocks; 4—Jurassic volcanic rocks; 5—Triassic volcanic rocks; 6—Eocene granitoids; 7—Late Cretaceous granitoids; 8—fault; 9—deposit; 10—study area

较大的矿床有努日砂卡岩型钨铜钼多金属矿床、克鲁砂卡岩型铜金矿床、冲木达砂卡岩型铜金矿床以及明则斑岩型钼铜矿床等。该成矿带以砂卡岩型和斑岩型矿化为主要特征,矿化元素组合主要为 W-Cu-Mo、Mo-Cu 和 Cu-Au 矿化,其中努日矿区钨资源量可达超大型,铜资源量可达大型规模。已有研究表明,冲木达-努日成矿带从白垩纪到渐新世均有强烈的成矿作用(李光明等,2006a,2006b;梁华英等,2010;Jiang *et al.*,2012;张松等,2012),而主成矿期集中在渐新世,矿化以 Cu-Mo-W 为特征。帕南矿床位于该成矿带最东侧,紧邻明则斑岩钼矿床。二者之间具有相似的成矿特征,虽然目前勘查工作还不详细,但帕南矿床也是该成矿带的一个重要组成部分。

## 2 矿床地质特征

帕南矿床位于冲木达-努日矿集区东部,目前矿床勘探程度较低,布置的 3 条勘探线仅开展了 5 个钻孔工作。该矿床矿化以 Mo 为主,Cu 为辅。矿区内出露的地层主要为白垩系桑日群比马组( $K_1b$ )和麻木下组( $K_1m$ ) (图 2)。比马组为一套火山-沉积岩系,由安山岩、英安岩、火山角砾岩、凝灰岩、纹层状灰岩、灰质角砾岩和少量细碎屑岩、硅质岩组成,火山岩属于钙碱性系列,具有安第斯陆缘弧火山岩的特征。麻木下组主要由安山岩、英安岩、凝灰岩夹凝灰质砾岩、灰质砾岩组成。矿区南部为罗布莎砾岩,为一套沉积混杂岩,逆冲推覆到岩体顶部。

矿区内构造活动强烈,近于平行的东西走向冈底斯逆冲断层和雅江缝合带大断裂为区内最主要的构造样式。构造破碎带在本区内很发育,且主要分布于西北部地区逆冲断层 F2 两侧,在地表破碎带内可发现 W(Cu) 矿化体。

矿区主要发育有古新世-始新世花岗闪长岩和二长花岗斑岩两套岩浆岩。前者在矿区大面积分布,而后者在地表并未出露,仅在钻孔中可见,而且呈脉状穿切前者。花岗闪长岩分布于整个矿区,出露面积约 7 km<sup>2</sup>,侵入于白垩系麻木下组地层中,被二长花岗斑岩侵入穿切。岩石主要矿物组成为斜长石(35%~45%)、石英(15%~20%)、角闪石(20%~25%)、黑云母(7%~10%)、钾长石(5%~10%),副矿物主要为磁铁矿、榍石、磷灰石等。二长花岗斑岩主要以小岩脉形式侵入于花岗闪长岩中,岩石具

斑状结构,斑晶主要由斜长石、石英、钾长石等组成,斑晶含量 20%~30%;基质为长英质,以石英为主,含少量钾长石,黑云母很少(<1%)。斜长石斑晶呈自形,含量约 5%~10%,双晶发育,局部出现粘土化和石英-绢云母化,钾长石斑晶呈自形,粒径为 0.1~0.3 cm,含量约 5%~10%,浅红色,镜下可见钾长石内有钠长石出熔条纹,局部发生粘土化,石英斑晶半自形-自形,粒径为 0.1~0.4 cm,含量约 10%~15%,部分石英斑晶成浑圆状、港湾状。

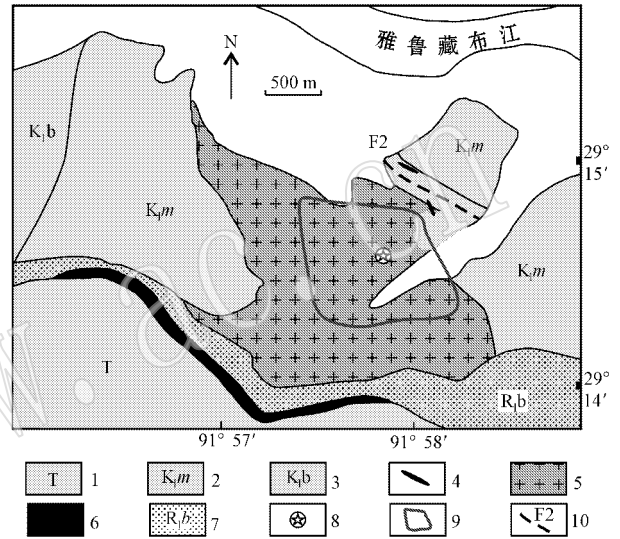


图 2 帕南斑岩 Mo 矿床地质图和辉钼矿采样点

Fig. 2 Geological map of the Pa'nan porphyry Mo deposit and sampling points of molybdenite

- 1—三叠系姐德秀组; 2—白垩系麻木下组; 3—白垩系比马组; 4—石英脉; 5—古新世花岗闪长岩; 6—蛇绿岩; 7—罗布莎砾岩; 8—辉钼矿采样点; 9—强烈蚀变矿化区; 10—断层
- 1—Triassic Jiedexiu Formation; 2—Cretaceous Mamuxia Formation; 3—Cretaceous Bima Formation; 4—quartz veins; 5—Paleocene granodiorite; 6—ophiolite; 7—Luobusha conglomerate; 8—sampling point of molybdenite; 9—strongly altered and mineralized zone; 10—fault

矿化主要分布于二长花岗斑岩及其紧邻的花岗闪长岩中。矿石主要以细脉状、细脉浸染状矿化为特征。矿区脉体极其发育且主要为石英脉,并可分为含辉钼矿石英脉、石英黄铁矿脉、无矿石英脉等。金属矿物主要为辉钼矿、黄铜矿、黄铁矿等,脉石矿物为石英、斜长石。成矿过程伴随着强烈的蚀变作用。由于矿床工作程度较低,矿区蚀变分带机制尚不清楚,从地表上看,矿区地表有大量的青磐岩化、绢英岩化及小范围的泥化现象。根据矿床蚀变填图显示,青磐岩化主要分布于矿区北东部,主要表

现为绿泥石化、绿帘石化及碳酸盐化，绢英岩化主要分布于南西部，主要表现为绢云母化、伊利石化等。部分伊利石化分布于矿区北侧的地层中，主要受断裂构造控制。小范围泥化（蒙脱石化）主要分布于断裂带附近，明显受断裂构造控制。目前已有钻孔深度未见钾化蚀变带，仅在深部发现少量弱的钾化蚀变。由此可判断，成矿作用与二长花岗斑岩密切相关，并显示出斑岩矿床矿化特征。为了限定矿床的

形成时代，我们对帕南石英脉型的矿石进行了系统采样，并对其开展了辉钼矿 Re-Os 同位素定年。

### 3 Re-Os 同位素定年

#### 3.1 样品特征和分析方法

帕南矿床辉钼矿用于 Re-Os 同位素年龄测试的 4 件样品均采于钻孔 PZK701 中，具体采样的信息见表 1。

表 1 取样位置及样品简要特征

Table 1 Location and characteristics of samples collected for dating

编号	赋存岩性	取样位置	产状	辉钼矿形态	石英脉矿物组合
cb-2	花岗闪长岩	352 m 处	含辉钼矿平直石英脉	细粒状	辉钼矿 + 石英
cb-6	二长花岗斑岩	325 m 处	含辉钼矿石英-钾长石脉	片状	辉钼矿 + 石英 + 钾长石
cb-9	二长花岗斑岩	320 m 处	含辉钼矿平直石英脉	片状、细粒状	辉钼矿 + 石英
cb-19	二长花岗斑岩	69 m 处	细脉-浸染状辉钼矿	细粒状	辉钼矿 + 黄铜矿 + 石英

辉钼矿单矿物挑选工作在河北廊坊完成。采集的样品经粉碎后采用重法分选，之后在双目镜下人工分离挑选，辉钼矿纯度达 98% 以上。辉钼矿单矿物 Re-Os 同位素测试在国家地质实验测试中心电感耦合等离子体质谱仪 TJA X-series ICP-MS 上完成，Re、Os 化学分离步骤、质谱测定方法和流程见 Shirey 和 Walker(1995) 以及 Du 等(2004)。普 Os 根据原子量表和同位素丰度表通过测量比计算得出 (Bohlkea *et al.*, 2005)。Re、Os 含量的置信水平 95%，模式年龄的置信水平 95%。

#### 3.2 分析结果

4 件辉钼矿样品的 Re-Os 同位素测定结果见表 2。辉钼矿的含量  $^{187}\text{Re}$  为 150.1~209.1  $\mu\text{g/g}$ ， $^{187}\text{Os}$  的含量为 78.4~110.6  $\text{ng/g}$ ，辉钼矿的模式年龄分布在 31.34~31.83 Ma 的范围内，模式年龄较为一

致，加权平均年龄为  $31.66 \pm 0.22 \text{ Ma}$ 。4 个样品所得的较好等时线年龄为  $32.4 \pm 1.5 \text{ Ma}$  (MSWD = 1.5) (图 3)。等时线年龄与模式年龄在误差范围内的一致，因而可代表帕南矿床的成矿时代。该年龄与冲木达-努日成矿带主成矿期年龄 (30~23 Ma) 大致相当，表明帕南矿床不论在成矿时代上还是在成矿地质背景上均属于冲木达-努日成矿带的一部分，说明冲木达-努日成矿带的成矿作用应始于 32 Ma 左右。

### 4 讨论

#### 4.1 成矿时代

前人对冲木达-努日成矿带的形成时代已做了一些工作，位于成矿带北部的努日矽卡岩铜钼钨矿

表 2 帕南斑岩钼(铜)矿床的辉钼矿 Re-Os 年龄数据

Table 2 Re-Os isotopic data of molybdenite from the Pa'nan porphyry Mo deposit

原样名	样重/g	$\alpha(\text{Re})/\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	$\alpha(\text{普 Os})/\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$	$\alpha(^{187}\text{Re})/\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	$\alpha(^{187}\text{Os})/\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$	模式年龄/Ma
cb-2	0.00526	$269.5 \pm 2.3$	$0.0133 \pm 0.0299$	$169.4 \pm 1.5$	$89.85 \pm 0.85$	$31.83 \pm 0.48$
cb-6	0.00592	$238.9 \pm 2.0$	$0.0390 \pm 0.0405$	$150.1 \pm 1.2$	$78.42 \pm 0.71$	$31.34 \pm 0.46$
cb-9	0.00522	$332.7 \pm 2.5$	$0.0138 \pm 0.0619$	$209.1 \pm 1.6$	$110.6 \pm 0.9$	$31.74 \pm 0.44$
cb-19	0.00568	$243.3 \pm 1.9$	$0.0262 \pm 0.0277$	$152.9 \pm 1.2$	$80.91 \pm 0.71$	$31.75 \pm 0.45$

注：Os 是根据 Nier 值的 Os 同位素丰度，通过  $^{192}\text{Os}/^{190}\text{Os}$  测量比计算得出， $^{187}\text{Os}$  是  $^{187}\text{Os}$  同位素总量。Re-Os 含量的不确定度包括样品稀释剂的称量误差、稀释剂的标定误差、质谱测量的分馏校正误差、待分析样品同位素比值测量误差。不确定度是  $2\sigma$ 。模式年龄的不确定度还包括衰变常数的不确定度 (1.02%)。模式年龄计算中  $^{187}\text{Re}$  衰变常数  $\lambda = 1.666 \times 10^{-11} \text{ a}^{-1}$ 。

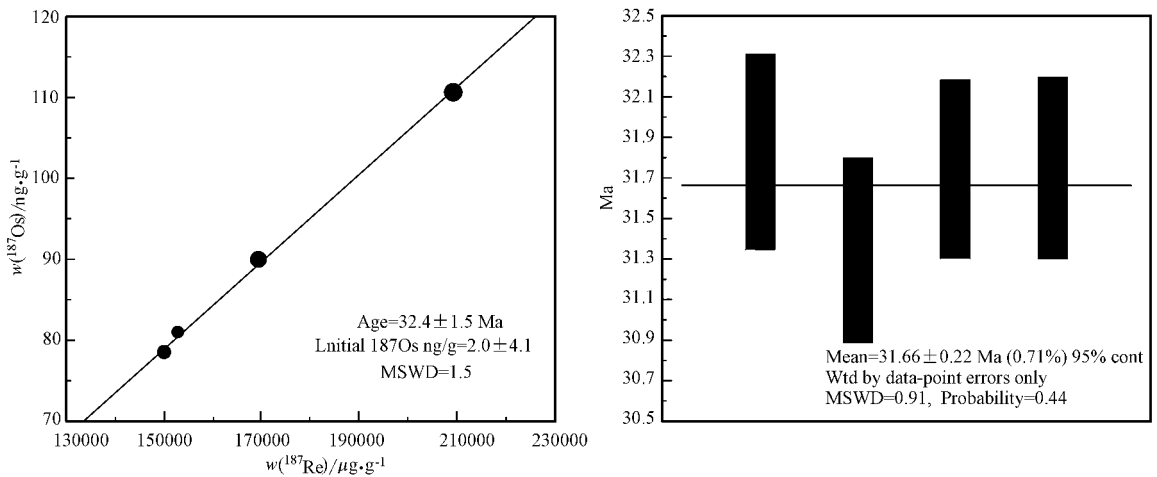


图 3 帕南斑岩钼矿床的辉钼矿等时线图 and 加权平均年龄

Fig. 3 Re-Os isotopic isochron diagram and weighted average age of molybdenite from the Pa'nan porphyry Mo deposit

床形成时代为 23.6 Ma(闫学义等, 2010; 陈雷等, 2011; 张松等, 2012); Zheng 等(2012)对明则钼矿含矿二长花岗斑岩锆石 LA-ICP-MS 的定年结果显示, 斑岩体的年龄为  $30.44 \pm 0.29$  Ma, 这一年龄值与范新等(2011)应用黑云母 Ar-Ar 法测得的成矿年龄和闫学义等(2010)应用 Re-Os 同位素测年法对辉钼矿所测得年龄相一致。Zheng 等(2012)同时对带内冲木达矿区的花岗闪长岩锆石 LA-ICP-MS 定年, 测得年龄值为 30.3 Ma, 与莫继海等(2008)测得冲木达与矽卡岩矿化有关岩体锆石 U-Pb 年龄为 27.7 Ma 基本一致。已有研究表明, 冲木达-努日成矿带从白垩纪到 23 Ma 均发育有成矿作用(李光明等, 2006a, 2006b; 梁华英等, 2010; Jiang *et al.*, 2012; 张松等, 2012), 但是该成矿带主成矿期无疑应集中

在印亚陆碰撞以来的渐新世—中新世早期(30~23) Ma。本文报道的帕南斑岩(铜)矿床的辉钼矿 Re-Os 年龄结果显示, 该矿床应形成于  $32.4 \pm 1.5$  Ma, 这一年龄值略早于区内渐新世—中新世早期其它矿床的形成时代, 表明冈底斯南缘冲木达-努日成矿带的成矿作用在 32 Ma 左右便已存在, 本文的研究结果向前拓宽了前人对于冈底斯南缘渐新世—中新世成矿作用的时限(30~23 Ma)(表 3)。

#### 4.2 成矿动力学

冈底斯成矿带多个大型-超大型的斑岩 Cu-Mo 矿床和矽卡岩型 Cu-Mo-W 矿床, 通常与渐新世—中新世埃达克质岩浆有密切的成因联系(Hou *et al.*, 2004, 2009b, 2013; 曲晓明等, 2004; Yang *et al.*, 2009)。然而对于这些岩浆形成的地球动力学过程

表 3 冈底斯斑岩铜矿带主要成矿事件

Table 3 Major metallogenic events in the Gandise porphyry ore belt

矿床	时代	成矿类型	成矿元素组合	参考文献
帕南	32.4 Ma( Re-Os )	斑岩型 Mo 矿床	Mo + Cu 少量 W	本次研究
明则	30.26 Ma( Re-Os )	斑岩 Mo 矿床	Mo + Cu	Zheng 等(2012)
冲木达	27.7 Ma( U-Pb )	矽卡岩型	Cu + Au ± Mo	莫继海等(2008)
努日	23.36 Ma( Re-Os )	斑岩型矿床	Cu + W + Mo	张松等(2012)
驱龙	$15.99 \pm 0.32$ Ma( Re-Os )	斑岩 Cu-Mo	Cu + Mo	侯增谦等(2009b)
甲马	$15.18 \pm 0.98$ Ma( Re-Os )	斑岩 Cu-Mo 矽卡岩 Pb-Zn	Cu + Mo + Pb + Zn	侯增谦等(2009b)
知不拉	$16.90 \pm 0.64$ Ma( Re-Os )	斑岩 Cu-Mo	Cu + Mo	李光明等(2005)
厅官	$15.49 \pm 0.36$ Ma( Re-Os )	斑岩型 Cu-Mo	Cu + Mo	侯增谦等(2009b)
南木	$14.76 \pm 0.22$ Ma( Re-Os )	斑岩型 Cu-Mo	Cu + Mo	侯增谦等(2003)
冲江	$14.04 \pm 0.16$ Ma( Re-Os )	斑岩型 Cu-Mo	Cu + Mo	侯增谦等(2003)
帮浦	$15.3 \pm 0.8$ Ma( Re-Os )	斑岩 Mo 矽卡岩 Pb + Zn	Mo + Cu + Pb + Zn	孟祥金等(2003)

仍有较大的争议,并有多种成因模型被提出。有学者认为,俯冲的印度岩石圈断裂是控制中新世岩浆活动的主要因素(Kohn and Parkinson, 2002; Zhao *et al.*, 2009; Replumaz *et al.*, 2010);另有部分学者则提出中新世的岩浆作用主要受拉萨地体岩石圈地幔拆沉导致软流圈上涌的动力学模型控制(Turner *et al.*, 1996; Chung *et al.*, 2003, 2005; Ji *et al.*, 2009);此外,Ding(2003)认为后碰撞的埃达克岩是俯冲印度岩石圈板片回卷造成的。

首先,拉萨地块渐新世—中新世的岩浆作用以钾质—超钾质火山岩和埃达克岩的发育为主要特征,自西向东的剪刀式板片断离模型(Kohn and Parkinson, 2002; Replumaz *et al.*, 2010)的提出主要依据钾质超钾质年龄变化趋势所得。然而,事实上拉萨地体西段的钾质超钾质岩始终伴随着埃达克岩岩浆作用,因而不能将两者分离开来讨论。因此,Zheng等(2012)重新比较完整地统计了拉萨地块渐新世—中新世岩浆作用发生地点与时限,发现实际上当将埃达克岩和钾质超钾质整体考虑时,年龄变化的趋势并不明显,但埃达克岩自东向西呈现出由老变年轻的特征,这与提出的断离模型不符合,不适合解释拉萨地块内部后碰撞岩浆岩的成因。因而我们认为拉萨地块同一时间不同岩浆类型的大量出现并非受不同动力学背景所控制的,应该由统一的深部过程所控制。

其次,笔者对冲木达—努日至厅宫—甲马—驱龙斑岩铜矿带的成矿世代系统进行对比发现,这一线成矿作用可能是一连续地质作用的结果。冲木达—努日成矿带主要成矿时代为 33~23 Ma,而冈底斯斑岩铜矿带含矿斑岩主要侵位结晶时代主要为 20~12 Ma,侵位的高峰在 16±1 Ma(曲晓明等, 2003; 芮宗瑶等, 2003; 2004),成矿年龄主要为 13.5~10.7 Ma,主要集中在 15±1 Ma(侯增谦等, 2003; 孟祥金等, 2003; 芮宗瑶等, 2004)。由以上精确的成矿作用时间可见,由南向北呈现出明显连续的逐渐由老变新趋势(图 4)。这一年龄变化趋势用 Ding(2003)的板片回卷模型很难解释。如若回卷模型成立,应造成冈底斯东部成矿带成矿作用时间由南向北有逐渐变老的趋势,这与地质事实不符。因此,冈底斯斑岩砂卡岩成矿带受统一的地球动力学背景所控制,以至成矿事件由南到北逐渐发生,因此我们认为至少在 32 Ma 开始,在加厚的拉萨地块岩石圈地幔从南到北逐渐拆沉的机制控制下形成了冈底斯由南到

北的连续的岩浆—成矿作用。

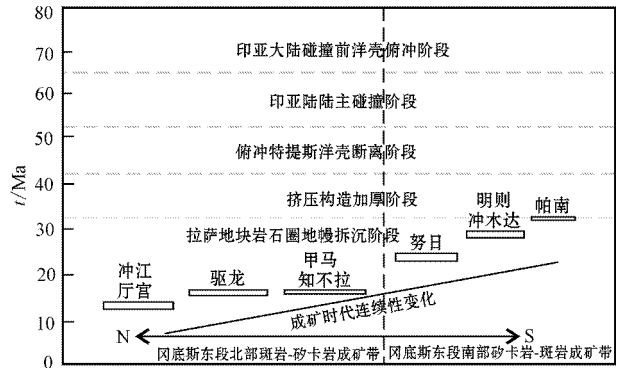


图 4 西藏冈底斯成矿带主要成矿事件示意图  
Fig. 4 Sketch diagram of the major metallogenic events in the Gandise ore belt, Tibet

再次,Zheng等(2012)对于冲木达—努日成矿带中明则及冲木达长英质岩体中大量的镁铁质包体进行了详细的岩石地球化学分析,证明了镁铁质包体是拉萨地体富集岩石圈地幔部分熔融的产物。而且,在北部研究程度更高的中新世斑岩铜矿带中,驱龙斑岩铜矿中幔源包体的出现(Hou *et al.*, 2009b; Yang *et al.*, 2009)以及帮浦斑岩钼矿床中新世辉绿玢岩的侵位(冷秋锋等, 2012),显示出幔源物质的贡献在整个冈底斯成矿带是普遍的,大量地幔物质加入和热驱动可能是区域形成强烈岩浆和成矿的驱动机制,从而证实了加厚的岩石圈地幔拆沉导致大量富集地幔岩浆上涌,形成了大量镁铁质包体。

随着勘探工作的开展和深入,晚碰撞的成矿作用不断被发现,成矿带的规模也不断在提高,结合大量带内幔源包体的发现,我们推测晚碰撞的成矿作用可能并非独生子,可能与中新世厅宫—甲马—驱龙一带的斑岩铜矿床有关。冲木达—努日成矿带在区域上沿东西向展布长度大于 60 km,宽度达 10~20 km,成矿区域范围大,成矿持续时间长,且矿化在整条带上几乎是连续发育,在该带上已发现努日、明则、克鲁、冲木达等大中型斑岩—砂卡岩型矿床及一系列的矿化点。成矿带东缘帕南矿床的发现,显示冲木达—努日成矿带的成矿作用在东西向上还可以进一步延伸,成矿带内仍有较大的成矿潜力。

## 5 结论

(1) 4 件采于帕南矿床钻孔中的辉钼矿所测试的 Re-Os 同位素模式年龄为 31.34±0.46~31.83±

0.48 Ma, 平均值为  $31.66 \pm 0.22$  Ma, 其等时线年龄为  $32.4 \pm 1.5$  Ma (MSWD = 1.5); 两个年龄基本一致, 表明冈底斯南缘冲木达-努日成矿带渐新世成矿作用实际上从 32 Ma 左右就已经开始, 拓宽了前人对于冈底斯南缘成矿作用的时限集中在 30~23 Ma 的认识。

(2) 冈底斯渐新世末—中新世的斑岩-矽卡岩成矿带可能形成于统一的地球动力学背景, 即与碰撞后的加厚岩石圈地幔拆沉作用有关。这一深部动力学过程至少于 32 Ma 开始, 促使成矿作用由南到北逐渐发生。

(3) 随着勘探工作的开展和深入, 晚碰撞的成矿作用不断被发现, 成矿带的规模也不断在提高, 结合幔源包体的发现, 我们认为晚碰撞的成矿作用可能与中新世厅宫-甲马-驱龙一带的斑岩铜矿床的有关, 具有很大的成矿潜力。

**致谢** 实验过程中国家地质实验测试中心的屈文俊和周利敏在样品处理及测试中给予了大力帮助, 评审专家给予悉心的指导和宝贵建议, 在此向他们表示衷心的感谢。

## References

- Bohlkea J K, de Lacter J R, De Bievre P, *et al.* 2005. Isotopic compositions of the elements [J]. *J. Phys. Chem. Ref. Data*, 34(1): 57~67.
- Chen Lei, Qin Kezhong, Li Guangming, *et al.* 2011. Geochemical characteristics and origin of skarn rocks in the Nuri Cu-Mo-W deposit, southern Tibet [J]. *Geology and Exploration*, 47(1): 78~88 (in Chinese with English abstract).
- Chu M F, Chung S L, Song B, *et al.* 2006. Zircon U-Pb and Hf isotope constraints on the Mesozoic tectonics and crustal evolution of southern Tibet [J]. *Geology*, 34: 745~748.
- Chung S L, Chu M F, Ji J Q, *et al.* 2009. The nature and timing of crustal thickening in Southern Tibet: Geochemical and zircon Hf isotopic constraints from postcollisional adakites [J]. *Tectonophysics*, 477: 36~48.
- Chung S L, Chu M F, Zhang Y Q, *et al.* 2005. Tibetan tectonic evolution inferred from spatial and temporal variations in post-collisional magmatism [J]. *Earth Science Reviews*, 68: 173~196.
- Chung S L, Liu D Y, Ji J Q, *et al.* 2003. Adakites from continental collision zones: Melting of thickened lower crust beneath southern Tibet [J]. *Geology*, 31: 1 021~1 024.
- Ding L, Kapp P, Zhong D L, *et al.* 2003. Cenozoic volcanism in Tibet: Evidence for a transition from oceanic to continental subduction [J]. *Journal of Petrology*, 44(10): 1 833~1 865.
- Du A D, Wu S Q and Sun D Z. 2004. Preparation and certification of Re-Os dating reference material: Molybdenite HLP and JDC [J]. *Geostandard and Geoanalytical Research*, 28: 41~52.
- Fan Xin, Chen Lei, Qin Kezhong, *et al.* 2011. Characteristics of alteration and mineralization and chronology of the mingze porphyry Mo deposit in the Shannan area of southern Tibet [J]. *Geology and Exploration*, 47(1): 89~99 (in Chinese with English abstract).
- Guan Q, Zhu D C, Zhao Z D, *et al.* 2012. Crustal thickening prior to 38 Ma in southern Tibet: Evidence from lower crust-derived adakitic magmatism in the Gangdese Batholith [J]. *Gondwana Research*, 21(1): 89~99.
- Harrison T M, Yin A, Grove M, *et al.* 2000. The Zedong Window: A record of superposed Tertiary convergence in southeastern Tibet [J]. *Journal of Geophysical Research*, 105: 19 211~19 230.
- Hou Z Q and Cook N J. 2009. Metallogensis of the Tibet an collisional orogen: A review and introduction to the special issue [J]. *Ore Geology Reviews*, 36: 2~24.
- Hou Z Q, Gao Y F and Qu X M. 2004. Origin of adakitic intrusives generated during mid-Miocene East-west extension in southern Tibet [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 220: 139~155.
- Hou Z Q and Ma H W. 2003. The Himalayan Yulong porphyry copper belt: Product of large-scale strike-slip faulting in eastern Tibet [J]. *Econ. Geol.*, 98: 125~145.
- Hou Zengqian, Pan Guitang, Wang Anjian, *et al.* 2006a. Metallogenesis in Tibetan collisional orogenic belt: II. Mineralization in late-collisional transformation setting [J]. *Mineral Deposits*, 25(5): 521~543 (in Chinese with English abstract).
- Hou Zengqian, Qu Xiaoming, Wang Shuxian, *et al.* 2003. Re-Os dating of molybdenite from Gangdese porphyry copper belt in Tibet plateau: Timing of mineralization and dynamic background application [J]. *Scientia Sinica Terrae*, 33(7): 609~618 (in Chinese with English abstract).
- Hou Zengqian, Qu Xiaoming, Yang Zhensen, *et al.* 2006b. Metallogenesis in Tibetan collisional orogenic belt: III. Mineralization in post-collisional extension setting [J]. *Mineral Deposits*, 25(6): 629~651 (in Chinese with English abstract).
- Hou Z Q, Yang Z M, Qu X M, *et al.* 2009. The Miocene Gangdese porphyry copper belt generated during post-collisional extension in the Tibetan Orogen [J]. *Ore Geology Reviews*, 36: 25~51.
- Hou Zengqian, Yang Zhensen, Xu Wenyi, *et al.* 2006c. Metallogenesis in Tibetan collisional orogenic belt: I. Mineralization in main collisional orogenic setting [J]. *Mineral Deposits*, 25(4): 337~358 (in Chinese with English abstract).
- Hou Z Q, Zheng Y C, Yang Z M, *et al.* 2013. Contribution of mantle



- components within juvenile lower-crust to collisional zone porphyry Cu systems in Tibet [J]. *Miner. Deposita*, 48: 173~192.
- Ji W Q, Wu F Y, Chung S L, *et al.* 2009. Zircon U-Pb geochronology and Hf isotopic constraints on petrogenesis of the Gangdese batholith, southern Tibet [J]. *Chem. Geol.*, 262: 229~245.
- Jiang Z Q, Wang Q, Li Z X, *et al.* 2012. Late Cretaceous (ca. 90 Ma) adakitic intrusive rocks in the Kelu area, Gangdese Belt (southern Tibet): Slab melting and implications for Cu-Au mineralization [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 53: 67~81.
- Jiang Ziqi, Wang Qiang, Wyman D A, *et al.* 2011. Origin of ~30 Ma chongmuda adakitic intrusive rocks in the southern Gangdese region, southern Tibet: Partial melting of the northward subducted Indian continental crust? [J]. *Geochimica*, 40(2): 126~146 (in Chinese with English abstract).
- Kohn M J and Parkinson C D. 2002. Petrologic case for Eocene slab breakoff during the Indo-Asian collision [J]. *Geology*, 30(7): 591~594.
- Leng Qiufeng, Wang Liqiang, Ying Lijuan, *et al.* 2012. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating of allgovite in the bangpu molybdenum (copper) deposit in Tibet and its geological significance [J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 33(4): 559~568 (in Chinese with English abstract).
- Li Guangming, Liu Bo, She Hongquan, *et al.* 2006a. Early Himalayan mineralization on the southern margin of the Gangdese metallogenic belt, Tibet, China: Evidence from Re-Os ages of the Chongmuda skarn-type Cu-Au deposit [J]. *Geological Bulletin of China*, 25(12): 1481~1486 (in Chinese with English abstract).
- Li Guangming, Qin Kezhang, Ding Kuishou, *et al.* 2006b. Geology and mineral assemblage of Tertiary skarn Cu-Au ± Mo deposits in the southeastern Gangdese arc: Implications for deep exploration [J]. *Acta Geologica Sinica*, 80: 1407~1421 (in Chinese with English abstract).
- Li Guangming, Rui Zongyao, Wang Gaoming, *et al.* 2005. Molybdenite Re-Os dating of Jiama and Zhibula polymetallic copper deposits in Gangdese metallogenic belt of Tibet and its significance [J]. *Mineral Deposits*, 24(5): 481~489 (in Chinese with English abstract).
- Liang Huaying, Wei Qirong, Xu Jifeng, *et al.* 2010. Study on zircon LA-ICP-MS U-Pb age of skarn Cu mineralization related intrusion in the southern margin of the Gangdese ore belt, Tibet and its geological implication [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(6): 1692~1698 (in Chinese with English abstract).
- Meng Xiangjin, Hou Zengqian, Gao Yongfeng, *et al.* 2003. Development of porphyry Cu-Mo-Pb-Zn ore-forming system in east Gangdese belt, Tibet: Evidence from Re-Os age of molybdenite in bangpu copper polymetallic deposit [J]. *Mineral Deposits*, 22(3): 246~251 (in Chinese with English abstract).
- Mo Jihai, Liang Huaying, Yu Hengxiang, *et al.* 2008. Zircon U-Pb age of biotite hornblende monzonitic granite for Chongmuda Cu-Au (Mo) deposit in Gangdese belt, Xizang, China and its implications [J]. *Geochimica*, 37(3): 206~212 (in Chinese with English abstract).
- Mo Xuanxue, Dong Guochen, Zhao Zhidan, *et al.* 2005. Spatial and temporal distribution and characteristics of granitoids in the Gangdese, Tibet and implication for crustal growth and evolution [J]. *Geological Journal of China Universities*, 11: 281~290 (in Chinese with English abstract).
- Qu Xiaoming, Hou Zengqian, Guo Lianjie, *et al.* 2004. Source compositions and crustal contaminations of adakitic ore-bearing porphyries in the gangdese copper belt: Nd, Sr, Pb and O isotope constraints [J]. *Acta Geologica Sinica*, 78(6): 813~821 (in Chinese with English abstract).
- Qu Xiaoming, Hou Zengqian and Li Zhenqing. 2003. <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar ages of the ore-bearing porphyries of the Gangdese porphyry copper belt and their geological significance [J]. *Acta Geologica Sinica*, 77(2): 246~252 (in Chinese with English abstract).
- Replumaz A, Negrodo A M, Guillot S, *et al.* 2010. Multiple episodes of continental subduction during India/Asia convergence: Insight from seismic tomography and tectonic reconstruction [J]. *Tectonophysics*, 483: 125~134.
- Rui Zongyao, Li Guangming, Zhang Lisheng, *et al.* 2004. The response of porphyry copper deposits to important geological events in Xizang [J]. *Earth Science Frontiers*, 11(1): 145~152 (in Chinese with English abstract).
- Rui Zongyao, Qu Xiaoming, Hou Zengqian, *et al.* 2003. Metallogenetic epoch of gangdese porphyry copper belt and uplift of Qinghai-Tibet plateau [J]. *Mineral Deposits*, 21: 217~225 (in Chinese with English abstract).
- Shirey S B and Walker R J. 1995. Carius tube digestion for low-blank rhenium-osmium analysis [J]. *Ana. Chem.*, 67: 2136~2141.
- Song Yucai, Hou Zengqian, Yang Tiannan, *et al.* 2011. Sediment-hosted Himalayan base metal deposits in Sangjiang region: characteristics and genetic types [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 30(3): 355~380 (in Chinese with English abstract).
- Turner S, Arnaud N, Liu J, *et al.* 1996. Post-collision, shoshonitic volcanism on the Tibetan Plateau: Implications for convective thinning of the lithosphere and the source of ocean island basalts [J]. *Journal of Petrology*, 37: 45~71.
- Wang Shaohuai and Chen Zikang. 2003. Geological characters and metallogenetic regulation of Kelu-Chongmuda copper and gold belt in Tibet [J]. *Geology and Prospecting*, 39(2): 21~25 (in Chinese with English abstract).
- Yan Xueyi and Huang Shufeng. 2010. Discovery of large Zedang W-Cu-Mo orefield, eastern Gangdese arc, and new understanding on strike-slip type epicontinental mineralization [J]. *Geological Review*, 56(1): 9~20 (in Chinese with English abstract).
- Yang Z M, Hou Z Q, White N C, *et al.* 2009. Geology of the post-col-

- lisional porphyry copper-molybdenum deposit at Qulong, Tibet[ J ]. *Ore Geology Reviews*, 36 : 133~159.
- Yin A. 2006. Cenozoic tectonic evolution of the Himalayan orogen as constrained by along-strike variation of structural geometry, exhumation history, and foreland sedimentation[ J ]. *Earth-Science Reviews*, 76 : 1~131.
- Yin A and Harrison T M. 2000. Geologic evolution of the Himalayan-Tibetan orogen[ J ]. *Annual Review of Earth and Planetary Science*, 28 : 211~280.
- Zhang Song, Zheng Yuanchuan, Huang Kexian, et al. 2012. Re-Os dating of molybdenite from nuri Cu-W-Mo deposit and its geological significance[ J ]. *Mineral Deposits*, 31(2) : 337~346( in Chinese with English abstract ).
- Zhao Z D, Mo X X, Yildirim D, et al. 2009. Geochemical and Sr-Nd-Pb-O isotopic compositions of the post-collisional ultrapotassic magmatism in SW Tibet: Petrogenesis and implications for India intra-continental subduction beneath southern Tibet[ J ]. *Lithos*, 113 : 190~212.
- Zheng Y C, Hou Z Q, Li W, et al. 2012. Petrogenesis and geological implications of the Oligocene Chongmuda-Mingze adakite-like intrusions and their mafic enclaves, southern Tibet[ J ]. *The Journal of Geology*, 120(6) : 647~669.
- Zhu D C, Mo X X, Niu Y L, et al. 2009. Geochemical investigation of early Cretaceous igneous rocks along an east-west traverse throughout the central Lhasa terrane Tibet[ J ]. *Chem. Geol.*, 268 : 298~312.
- 陈雷, 秦克章, 李光明, 等. 2011. 西藏山南努日铜钼钨矿床砂卡岩地球化学特征及成因[ J ]. *地质与勘探*, 47(1) : 78~88.
- 范新, 陈雷, 秦克章, 等. 2011. 西藏山南地区明则斑岩钼矿床蚀变矿化特征与成矿时代[ J ]. *地质与勘探*, 47(1) : 89~99.
- 侯增谦, 潘桂棠, 王安建, 等. 2006a. 青藏高原: II. 晚碰撞转换成矿作用[ J ]. *矿床地质*, 25(5) : 521~543.
- 侯增谦, 曲晓明, 王淑贤, 等. 2003. 西藏高原冈底斯斑岩铜矿带辉钼矿 Re-Os 年龄: 成矿作用时限与动力学背景应用[ J ]. *中国科学(D 辑)* 33(7) : 609~618.
- 侯增谦, 曲晓明, 杨竹森, 等. 2006b. 青藏高原碰撞造山带: III. 后碰撞伸展成矿作用[ J ]. *矿床地质*, 25(6) : 629~651.
- 侯增谦, 杨竹森, 徐文艺, 等. 2006c. 青藏高原碰撞造山带: I. 主碰撞造山成矿作用[ J ]. *矿床地质*, 25(4) : 337~358.
- 姜子琦, 王强, Wyman D A, 等. 2011. 西藏冈底斯南缘冲木达约 30 Ma 埃达克质侵入岩的成因: 向北俯冲的印度陆壳的熔融?[ J ]. *地球化学*, 40(2) : 126~146.
- 冷秋锋, 王立强, 应丽娟, 等. 2012. 西藏帮铺钼(铜)矿床辉绿玢岩脉体 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年及其地质意义[ J ]. *地球科学*, 33(4) : 559~568.
- 李光明, 刘波, 余宏全, 等. 2006a. 西藏冈底斯成矿带南缘喜马拉雅早期成矿作用——自冲木达铜金矿床的 Re-Os 同位素年龄证据[ J ]. *地质通报*, 25(12) : 1481~1486.
- 李光明, 秦克章, 丁奎首, 等. 2006b. 冈底斯东段南部第三纪砂卡岩型 Cu-Au ± Mo 矿床地质特征、矿物组合及其深部找矿意义[ J ]. *地质学报*, 80 : 1407~1421.
- 李光明, 芮宗瑶, 王高明, 等. 2005. 西藏冈底斯成矿带甲马和知不拉铜多金属矿床的 Re-Os 同位素年龄及其意义[ J ]. *矿床地质*, 24(5) : 481~489.
- 梁华英, 魏启荣, 许继峰, 等. 2010. 西藏冈底斯成矿带南缘砂卡岩型铜矿床含矿岩体锆石 U-Pb 年龄及意义[ J ]. *岩石学报*, 26(6) : 1692~1698.
- 孟祥金, 侯增谦, 高永丰, 等. 2003. 西藏冈底斯东段斑岩铜钼铅锌成矿系统的发育时限: 帮浦铜多金属矿床辉钼矿 Re-Os 年龄证据[ J ]. *矿床地质*, 22(3) : 246~251.
- 莫济海, 梁华英, 喻亨祥, 等. 2008. 西藏冲木达铜-金-钼矿床黑云角闪二长花岗岩锆石 U-Pb 年龄及其意义[ J ]. *地球化学*, 37(3) : 206~212.
- 莫宣学, 董国臣, 赵志丹, 等. 2005. 西藏冈底斯带花岗岩的时空分布特征及地壳生长演化信息[ J ]. *高校地质学报*, 11 : 281~290.
- 曲晓明, 侯增谦, 国连杰, 等. 2004. 冈底斯铜矿带埃达克质含矿斑岩的源区组成与地壳混染: Nd, Sr, Pb, O 同位素约束[ J ]. *地质学报*, 78(6) : 813~821.
- 曲晓明, 侯增谦, 李振清. 2003. 冈底斯铜矿带含矿斑岩的<sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar 年龄及地质意义[ J ]. *地质学报*, 77(2) : 246~252.
- 芮宗瑶, 李光明, 张立生, 等. 2004. 西藏斑岩铜矿对重大地质事件的响应[ J ]. *地学前缘*, 11(1) : 145~152.
- 芮宗瑶, 曲晓明, 侯增谦, 等. 2003. 冈底斯斑岩铜矿成矿时代及青藏高原隆升[ J ]. *矿床地质*, 21 : 217~225.
- 宋玉财, 侯增谦, 杨天南, 等. 2011. “三江”喜马拉雅期沉积岩容矿贱金属矿床基本特征与成因类型[ J ]. *岩石矿物学杂志*, 30(3) : 355~380.
- 王少怀, 陈自康. 2003. 西藏克鲁-冲木达铜金矿带矿床地质特征及其成矿规律[ J ]. *地质与勘探*, 39(2) : 21~25.
- 闫学义, 黄树峰. 2010. 冈底斯东段泽当大型钼铜钼矿新发现及走滑型陆缘成矿新认识[ J ]. *地质论评*, 56(1) : 9~20.
- 张松, 郑远川, 黄克贤, 等. 2012. 西藏努日砂卡岩型铜钼钨矿床 Re-Os 定年及其地质意义[ J ]. *矿床地质*, 31(2) : 337~346.

## 附中文参考文献