

文章编号: 0258-7106(2012)02-0337-10

西藏努日矽卡岩型铜钨钼矿辉钼矿 Re-Os 定年及其地质意义*

张松^{1,2} 郑远川² 黄克贤³ 李为³ 孙清钟² 李秋耘³ 付强³ 梁维³

(1 中国地质大学地学实验中心, 北京 100083; 2 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037;

3 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083)

摘要 西藏努日层状矽卡岩型铜钨钼矿床是冈底斯东段南缘斑岩-矽卡岩铜多金属成矿带上规模最大的矿床。笔者对采自该矿床的9件不同产状、不同形态含钼矿石中的辉钼矿进行了Re-Os同位素组成分析, 获得其模式年龄为23.46~24.77 Ma, 等时线年龄为(23.36±0.49) Ma (MSWD=0.60) 模式年龄与等时线年龄结果基本一致。由于辉钼矿与黄铜矿、白钨矿呈共生关系, 并考虑到该区内黄铜矿的年龄((23.75±0.18) Ma (作者未发表数据))表明努日矽卡岩型铜钨钼矿床的成矿时代为23~24 Ma。结合前人研究资料可见, 冈底斯南缘克鲁-冲木达斑岩-矽卡岩铜多金属成矿带从32 Ma至23 Ma发生了强烈的成矿作用。该成矿带的成矿时代明显有别于后碰撞期地壳伸展环境下形成的冈底斯斑岩铜矿带, 显示出其为一套独立的成矿事件。该成矿事件可能主要受冈底斯南缘的晚碰撞走滑环境的控制。努日矿床成矿时代的确定及晚碰撞成矿事件的厘定, 为今后研究和勘查该成矿带内同类型矿床提供了重要依据。

关键词 地球化学 辉钼矿 Re-Os 同位素定年 层状矽卡岩铜钨钼矿床 努日 冈底斯 西藏

中图分类号: P618.41; P618.67; P618.65

文献标志码: A

Re-Os dating of molybdenite from Nuri Cu-W-Mo deposit and its geological significance

ZHANG Song^{1, 2}, ZHENG YuanChuan², HUANG KeXian³, LI Wei³, SUN QingZhong²,
LI QiuYun³, FU Qiang³ and LIANG Wei³

(1 Geological Laboratory Center, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2 Institute of Geology, CAGS, Beijing 100037, China; 3 School of Geosciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract

The Nuri layered skarn Cu-W-Mo deposit is one of the most important deposits on the southern margin of the eastern Gangdese belt, Tibet. Molybdenite was separated from 9 samples collected from various types of ores. These molybdenite samples were dated by Re-Os isotopic analysis. Mode ages of the 9 samples vary from 23.46 Ma to 24.77 Ma. Meanwhile, these samples yielded an isochron age of (23.36±0.49) Ma (MSWD=0.60). The isochron age should represent the formation age of the Nuri Cu-W-Mo deposit. Therefore, the Nuri ore deposit should have occurred at the late-collisional stage of the Indian-Asian collision process. Combined with

* 本文得到国家重点基础研究发展计划(973计划)青藏高原南部大陆聚合和成矿作用(2011CB403100)(973计划)三江特提斯复合造山与成矿作用(2009CB421008)中国地质调查局地质调查项目“青藏高原碰撞造山及成矿地质背景研究(1212011121253)和行业基金项目“中国大陆环境典型斑岩型矿床成矿规律和找矿模式(2010011011)的联合资助

第一作者简介 张松,男,1985年生,硕士研究生,主要从事矿床学研究。Email: B-52116@163.com

收稿日期 2011-05-17; 改回日期 2011-12-18。许德焕编辑。

the results of former researchers, Cu-W-Mo mineralization must have occurred during 32 Ma to 23 Ma in the Kelu Chongmuda area on the southern margin of the eastern Gangdise belt, which is different from the Gandise porphyry copper belt which was developed in a crustal extensional environment at the post-collisional stage. Mineralization of the Kelu Chongmuda belt might have been dominantly controlled by large-scale strike-slip faults system along the Yarlung Zangbo suture. Studies of the Nuri ore deposit indicate that intense Cu-W-Mo mineralization must have also taken place during the late-collisional stage of Indian-Asian collision in the Gangdese belt.

Key words: geochemistry, molybdenite, Re-Os isotopic ages, layered skarn Cu-W-Mo ores, Nuri ore deposit, Gangdese, Tibet

青藏高原不仅是全球规模最大的大陆碰撞造山带(Yin et al., 2000; Chung et al., 2005; Yin, 2006), 而且是全球巨型成矿域——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、全球罕见的世界级成矿省, 并成为研究大陆碰撞与成矿作用的理想场所(Hou et al., 2009)。冈底斯成矿带是青藏高原一条规模宏大、颇有找矿前景的成矿带, 随着国土资源大调查的深入开展, 其成矿前景越来越明朗(王方国等, 2005)。在该带内陆续发现了驱龙、甲玛、冲江、厅宫、白容等多个大型-超大型斑岩铜钼矿床, 暗示冈底斯是一条资源潜力巨大的铜多金属矿带(侯增谦等, 2001; 李光明等, 2003; 郑有业等, 2002; 黄志英等, 2004)。冈底斯斑岩铜钼矿带以其巨大的成矿规模(Cu资源量超2 200万t)、独特的成矿环境(大陆碰撞带)、集中的矿化时限以及典型的斑岩成矿特征, 引起了国内外学者的广泛关注(Hou et al., 2003; 2006; 2009; 侯增谦等, 2006b; 2008; 李光明等, 2004; 2005; 姜耀辉等, 2006; 杨志明等, 2008; Richards, 2009; 秦克章等, 2008)。前人研究表明, 冈底斯斑岩铜钼矿带的成矿作用主要集中于18~12 Ma(侯增谦等, 2006b; 芮宗瑶等, 2003; 李金祥等, 2007; Hou et al., 2004; Qu et al., 2004), 即形成于印度-亚洲大陆碰撞的“后碰撞”阶段(25~0 Ma, 侯增谦等, 2006b)。

随着找矿勘探的深入, 一批新的矿床和成矿带陆续被发现, 其中, 冈底斯南缘克鲁-冲木达斑岩-矽卡岩型铜-钨-钼多金属成矿带便是其重要成果之一。该成矿带的主体沿拉萨地体南缘产出, 南邻雅鲁藏布江缝合带, 其东西向延伸大于60 km, 宽10~20 km。目前, 该带内已发现十余处矿床和矿点, 其中以努日铜-钨-钼矿床规模最大。由于受勘探程度的制约, 目前对这些矿床的研究程度还较低。已有的少量测年资料显示, 与成矿相关的岩浆作用主要发

生于32~23 Ma(Harrison et al., 2000; 李光明等, 2006a; 2006b; 莫济海等, 2008; Chung et al., 2009; 闫学义等, 2010), 即在侯增谦等(2006b)认为的青藏高原的晚碰撞阶段(40~26 Ma)。这表明, 晚碰撞转换阶段的成矿作用不仅仅主要集中于青藏高原东缘“三江”地区(侯增谦等, 2006b; Hou et al., 2009), 而且也发育于青藏高原主碰撞带的南缘。因此, 对冈底斯南缘克鲁-冲木达矽卡岩-斑岩型成矿带进行详细研究, 为深入探讨和重新理解青藏高原大陆碰撞成矿作用是十分必要的。

本文以努日铜-钨-钼矿床为研究对象, 通过系统的辉钼矿Re-Os同位素定年, 力求准确厘定不同产状、不同形态辉钼矿的形成时代, 以精确确定该矿床的成矿时代, 解释其成因, 为研究其成矿物质来源、成矿条件、成矿机理等提供资料, 同时为矿区和外围找矿以及今后研究该成矿带内其他同类型矿床提供重要依据。

1 区域地质背景

克鲁-冲木达斑岩-矽卡岩型铜-钨-钼多金属成矿带地处西藏山南地区, 位于主碰撞带冈底斯构造-岩浆带东段的南缘, 南邻雅鲁藏布江缝合带(图1)。区域内出露的地层主要为: 三叠系碎屑岩、碳酸盐岩建造, 侏罗系—白垩系麻木下组(J_3-K_1m)钙碱性岛弧火山岩夹碳酸盐岩、碎屑岩建造, 零星分布在雅鲁藏布江两岸, 厚度大于1 740 m; 白垩系比马组(K_1b)含煤碎屑岩、碳酸盐岩及钙碱性岛弧火山岩建造, 分布广泛, 厚度大于4 155 m(王少怀等, 2003; 李光明等, 2006a; 2006b)。

该成矿带内岩浆作用发育。碰撞前的大洋俯冲主要形成了岛弧型辉长岩、辉长闪长岩和花岗闪长岩, 构成了现今冈底斯花岗岩基的主体。同碰撞期,

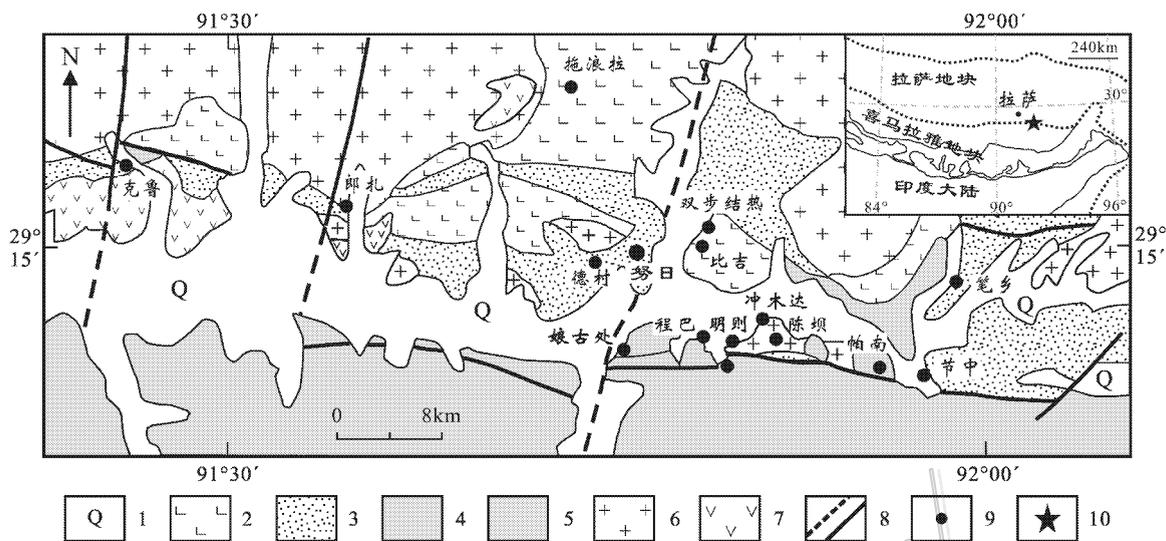


图 1 西藏冈底斯南缘多金属成矿带地质简图

1—第四系沉积物；2—第三系火山岩；3—白垩系火山-沉积岩；4—侏罗系火山岩；5—三叠系碎屑岩、碳酸盐岩；6—始新世花岗岩类；7—晚白垩世花岗岩类；8—断裂及编号；9—矿床(点)；10—研究区

Fig. 1 Simplified geological map of the polymetallic ore belt in southeastern Gangdese, Tibet

1—Quaternary；2—Tertiary volcanic rocks；3—Cretaceous volcanoclastic rocks；4—Jurassic volcanic rocks；5—Triassic clastic rocks and carbonate rocks；6—Eocene granitoids；7—Late Cretaceous granitoids；8—Fault and its serial number；9—Deposit(ore spot)；10—Study area

以花岗闪长岩、石英二长闪长岩和二长花岗岩为主，主要呈岩基产出。后碰撞和(或)晚碰撞期，岩浆以浅成侵位为主，多呈岩株、岩筒、岩脉产出，岩性主要为闪长玢岩和石英闪长玢岩，其次为花岗闪长岩、石英闪长岩和石英斑岩(李光明等, 2006b)。这些岩浆岩主要与新特提斯大洋板片俯冲(120~70 Ma)及65 Ma前后印度-亚洲大陆碰撞密切相关。这些多期次(120~30 Ma)多类型(俯冲型、同碰撞型、后碰撞型)的火山活动和中和-酸性岩浆侵入作用形成了沿现今冈底斯展布的规模巨大的火山岩-花岗岩带。在冈底斯南缘成矿带，火山岩和侵入岩占总面积的75%左右(雍永源, 2007)，该带的成矿作用大多与后(晚)碰撞期花岗质岩浆作用有关(图1)。

2 矿区地质特征

努日矿区内出露的地层比较简单，主要为上白垩统一古近系旦师庭组(K_2-Ed)和下白垩统桑日群比马组(K_1b)。旦师庭组(K_2-Ed)主要为安山岩、安山质凝灰岩、安山质火山角砾岩夹灰岩、硅质岩、砂岩，主要分布在该矿区的西部。比马组(K_1b)在该矿区出露3个岩性段，自古至新为： K_1b^3 ，为泥质灰

岩、变质粉砂岩、绿泥石板岩； K_1b^4 ，上部为含石榴子石大理岩和泥质灰岩，见辉钼矿化，下部为长英质角岩与层砂卡岩互层，夹粉砂岩、泥质灰岩(赋矿层位)； K_1b^5 ，为红柱石绢云母角岩、绢云母绿泥石石英角岩夹安山岩、含角砾安山质熔岩、次安山岩、凝灰岩。

该区断裂非常发育，主体表现为沿雅鲁藏布江发育的NEE向主干断裂，常被后期的NWW向断裂错断。该矿区主要受3组断裂控制(图2)。NNE向的 F_1 断裂带是主要的控矿导矿断裂，控制了整个矿区层状矿体的空间展布。沿该断裂带主要发育层状砂卡岩，如透辉石砂卡岩和石榴子石砂卡岩，顺碳酸盐相与碎屑岩相的层间剥离带或层间破碎带产出。EW向的 F_b^{1-1} 断裂横切整个矿区，并将矿床分割成南、北2个矿段。该断裂因左行走滑，导致矿体发生明显位错(图2)，破坏了矿体的连续性，但为后期岩浆热液的充填提供了良好空间(闫学义等, 2010)。沿 F_b^{1-1} 断裂西段发育有含矿角砾岩筒，其角砾成分主要为安山岩、灰岩和砂岩。角砾岩筒型矿体与旦师庭组内的通道相潜火山岩彼此相伴(闫学义等, 2010)。 F_b^{4+2} 断裂呈NW向展布，将北矿段一分为二，由于其左行走滑和牵引作用，导致北矿段南、北矿体的展布方向出现较大变化(图2)。

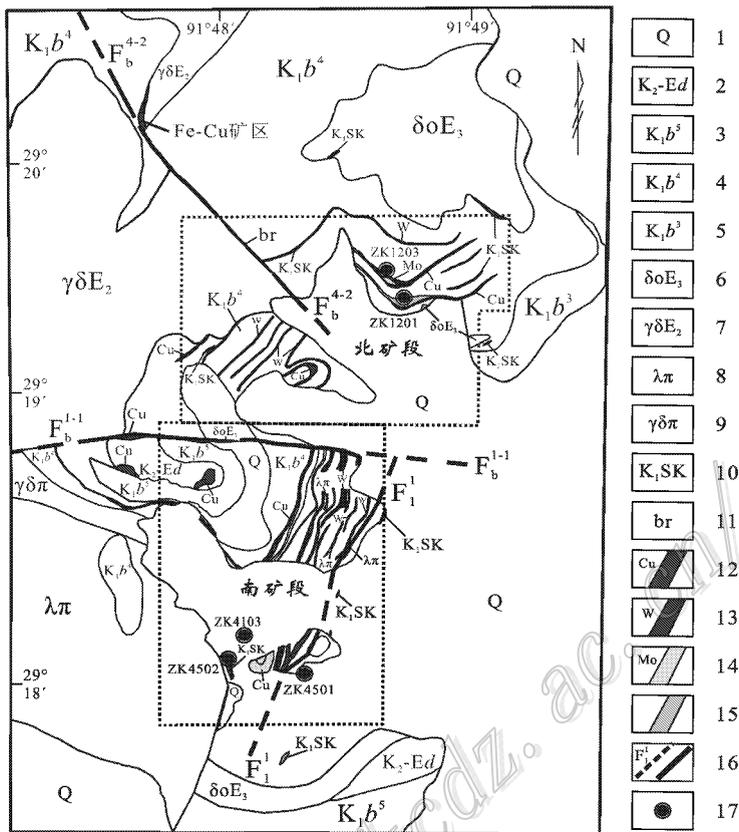


图2 努日砂卡岩型铜钨钼矿床地质简图及辉钼矿采样位置示意图

(据中国冶金地质总局第二地质勘察院 2009 年资料简化)

- 1—第四系；2—上白垩统—古近系旦师庭组；3—5—下白垩统比马组第 5—3 段；6—渐新世石英闪长(玢)岩；7—始新世花岗闪长岩；8—晚白垩世石英斑岩；9—渐新世花岗闪长斑岩；10—砂卡岩；11—破碎带；12—铜矿体；13—钨矿体；14—钼矿体；15—铜多金属矿体；16—实测或推测断裂；17—采样点

Fig. 2 Geological sketch map of the Nuri skarn Cu-W-Mo deposit and sampling locations

(modified after No. 2 Geological Exploration Institute of CMGB, 2009)

- 1—Quaternary; 2—Upper Cretaceous—Paleogene Danshiting Formation; 3—5—5th to 3rd member of Lower Cretaceous Bima Formation; 6—Oligocene quartz diorite (porphyrite); 7—Eocene granodiorite; 8—Late Cretaceous quartz porphyry; 9—Oligocene granodiorite-porphyry; 10—Skarn; 11—Crushed zone; 12—Copper ore body; 13—Tungsten ore body; 14—Molybdenum ore body; 15—Copper polymetallic ore body; 16—Measured or inferred fault; 17—Sampling location

努日矿区内岩浆活动频繁,自燕山晚期至喜马拉雅期均有发育,主要由燕山晚期海相喷发的比马组和喜马拉雅期陆相喷发的旦师庭组中-酸性火山岩系及以岩株或复式岩基形式侵位于弧火山岩内的中-酸性岩体等组成。南矿段主要发育石英闪长岩、石英斑岩和闪长玢岩,北矿段主要发育花岗闪长岩。该矿区内地表出露岩体的矿化较弱,局部可见石英-硫化物脉。矿区内的火山岩以喜马拉雅期为主,岩性为一套中-酸性的火山熔岩及火山碎屑岩,具有岩浆弧活动大陆边缘火山岩的特征。

3 矿化特征

努日矿床分为南、北 2 大矿段(图 2)。南矿段规模最大,南北总长约 2 000 m,东西总宽 360~900 m(江化寨等,2010),矿体主要受 NEE 向断裂带的控制,并被 NWW 向断裂错断,与地层产状一致,呈层状-似层状产于透辉石石榴子石砂卡岩中。北矿段的矿体也具有顺层产出的特征,矿体主要位于层状石榴子石砂卡岩中。该矿床现已达大型规模(铜金属量 > 50 万 t),诸金属的平均品位分别为: $w(\text{WO}_3)$

0.22%、 $w(\text{Cu})$ 0.7%、 $w(\text{Mo})$ 0.065% (陈金标等, 2010)。

该矿床的矿石矿物组合比较简单, 矿石矿物主要为黄铜矿(图 3D)、黄铁矿(图 3G)、磁黄铁矿、辉钼矿(图 3A、图 3B)、白钨矿(图 3E)等。钼是以白钨

矿出现, 主要呈浑圆粒状、他形不规则粒状, 粒径较小, 通常分布于黄铁矿和石榴子石等矿物颗粒的间隙或裂隙中。黄铜矿、辉钼矿和白钨矿既可呈浸染状共生在中粒石榴子石矽卡岩中(图 3C)或呈脉状穿切灰岩地层(图 3F), 也有白钨矿沿层矽卡岩单独

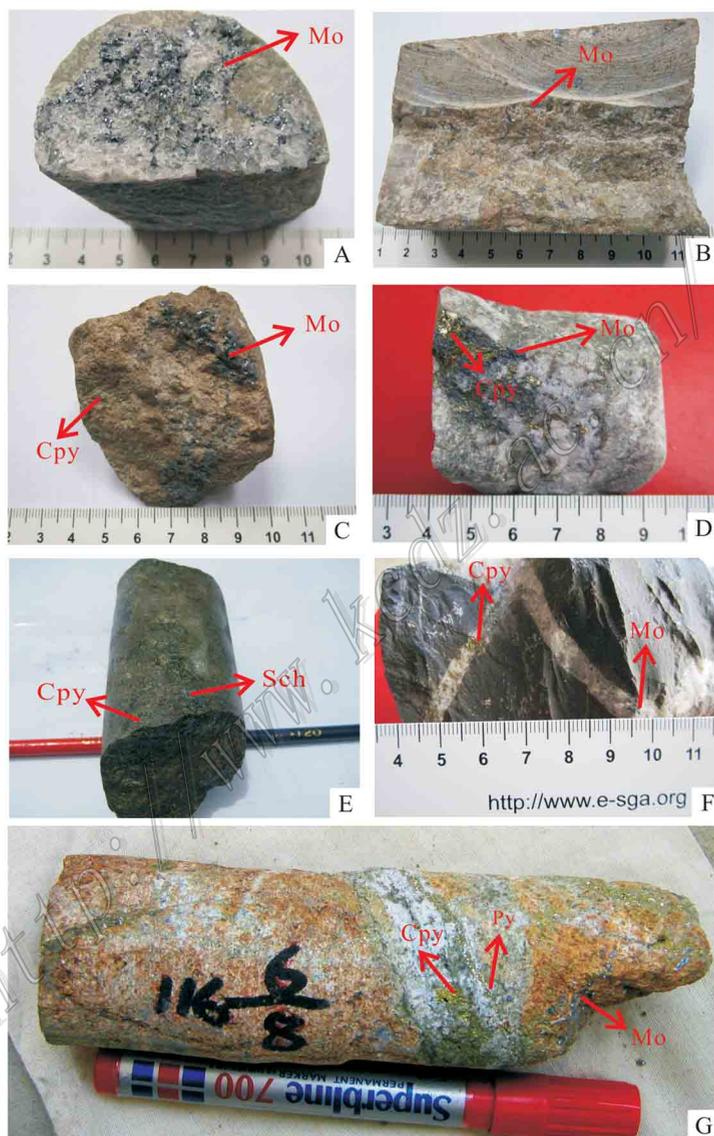


图 3 努日矽卡岩型辉钼矿的手标本特征

- A. 穿切灰岩地层的含辉钼矿的平直石英脉; B. 石榴子石矽卡岩内浸染状辉钼矿; C. 石榴子石矽卡岩内呈浸染状共生的辉钼矿与黄铜矿;
D. 穿切灰岩地层的含辉钼矿和黄铜矿的石英脉; E. 呈共生产出的白钨矿和黄铜矿; F. 穿切灰岩地层的含辉钼矿和黄铜矿的网脉状石英脉;
G. 矽卡岩内发育脉状黄铜矿、黄铁矿和辉钼矿; Cpy—黄铜矿; Mo—辉钼矿; Py—黄铁矿; Sch—白钨矿

Fig. 3 Photographs of molybdenite ores from the Nuri skarn deposit

- A. Molybdenite in straight quartz veins cutting across limestone; B. Disseminated molybdenite in the garnet skarn ores; C. Disseminated molybdenite and chalcopyrite in garnet skarn ores; D. Molybdenite and chalcopyrite in quartz veins cutting across limestone; E. Scheelite and chalcopyrite in ores; F. Molybdenite and chalcopyrite in stockwork quartz veins cutting across limestone; G. Chalcopyrite, pyrite and molybdenite in veins of garnet skarn ores; Cpy—Chalcopyrite; Mo—Molybdenite; Py—Pyrite; Sch—Scheelite

产出。在 ZK4501 钻孔中,可见白钨矿以石英脉的形式出现,与黄铁矿、黄铜矿伴生。脉石矿物为绿泥石、绿帘石、石榴子石、透辉石、透闪石、石英、硅灰石、阳起石、方解石及长石等。矿石构造主要为浸染状、细脉浸染状、条带状、团块状、脉状、角砾状等。

根据矿物共生组合和产出特征,可将蚀变作用分为 2 个阶段:早期为石榴子石化、透辉石化、橄榄石化、阳起石化、绿帘石化,晚期为绿泥石化、碳酸盐化、绢云母化、硅化和黄铁硫化。晚期是成矿的主要阶段,绿泥石化与矿化关系密切,钻孔中可见黄铜矿、黄铁矿呈脉状和浸染状分布在绿泥石化砂卡岩中。

4 辉钼矿样品的描述及测试方法

4.1 样品描述

用于 Re-Os 同位素测年的 9 件样品都采自努日矿床的铜钨钼多金属层砂卡岩矿体(表 1),均为钻孔

中的岩芯样品。北矿段的采样钻孔为 ZK1201 和 ZK1203,南矿段的采样钻孔为 ZK4501 和 ZK4103(图 2)。

本次研究对不同类型的含辉钼矿矿石(图 3)进行了系统采样,样品取自不同的钻孔和不同的深度,因此,极具代表性。

4.2 测试方法

辉钼矿样品的 Re-Os 同位素测试工作在国家地质实验测试中心 Re-Os 同位素实验室完成。分析方法及流程参照有关文献(Stein et al., 2003; Selby et al., 2004; Shirey et al., 1995; Du et al., 2004; 杜安道等, 1994, 2001; 屈文俊等, 2003)。

4.3 测试结果

9 件辉钼矿样品的测试结果见表 2。实验室的流程用国标 JDC(BGW04436)控制。由 9 件辉钼矿样品所得出的模式年龄为 23.46~24.77 Ma(表 2)。值得注意的是,北矿段 5 件辉钼矿样品的等时线年

表 1 取样位置及样品简要特征

Table 1 Locations and characteristics of samples from the Nuri ore deposit for Re-Os isotopic dating

编号	取样位置	样品描述
NR-39	ZK1203(359 m)	砂卡岩内含辉钼矿平直石英脉
NR-40	ZK1203(360 m)	砂卡岩内含辉钼矿平直石英脉
NR-41	ZK1203(362 m)	砂卡岩内含辉钼矿平直石英脉
NR-49	ZK1201(69 m)	辉钼矿呈浸染状产于石榴子石砂卡岩中
NR-50	ZK1201(54 m)	辉钼矿呈浸染状产于石榴子石砂卡岩中
ZK4501-217	ZK4501(217 m)	与黄铜矿、黄铁矿共生的辉钼矿呈浸染状产于石榴子石砂卡岩中
CB-63	ZK4103(468 m)	砂卡岩内含辉钼矿平直石英脉
CB-65	ZK4103(455 m)	辉钼矿呈浸染状产于石榴子石砂卡岩中
CB-68	ZK4103(444 m)	辉钼矿呈浸染状产于石榴子石砂卡岩中

表 2 努日铜钨钼层砂卡岩矿床中辉钼矿 Re-Os 同位素数据

Table 2 Re-Os isotopic data of molybdenite from the Nuri skarn Cu-W-Mo deposit

编号	原样名	m/g	$\alpha(\text{Re})(\mu\text{g/g})$		$\alpha(\text{普 Os})(\text{ng/g})$		$\alpha(^{187}\text{Re})(\mu\text{g/g})$		$\alpha(^{187}\text{Os})(\text{ng/g})$		模式年龄/Ma	
			测定值	2 σ	测定值	2 σ	测定值	2 σ	测定值	2 σ	测定值	不确定度
091127-15	CB-63	0.00648	447.5	3.3	3.706	0.094	281.3	2.1	115.7	0.9	24.70	0.34
091127-16	CB-65	0.00684	315.3	2.4	5.078	0.062	198.2	1.5	81.58	0.66	24.71	0.34
091127-17	CB-68	0.00538	395.6	3.4	0.1179	0.0299	248.6	2.1	102.6	0.8	24.77	0.36
110218-15	NR-41	0.00399	396	4	0.018	0.1212	248.9	2.5	99.04	1.29	23.88	0.44
110308-1	NR-39	0.00447	554.3	5.2	0.358	0.0721	348.4	3.3	136.2	1.4	23.46	0.38
110308-2	NR-40	0.00426	605.5	5.5	0.1454	0.0553	380.6	3.5	149.7	1.3	23.61	0.36
110308-3	NR-49	0.00418	416.5	3.4	3.955	0.065	261.8	2.2	103.4	0.9	23.71	0.35
110308-4	NR-50	0.00426	285	2.4	17.27	0.21	179.1	1.5	70.96	0.58	23.77	0.34
110308-5	ZK4501-217	0.00444	337.5	2.7	2.082	0.129	212.1	1.7	86.16	0.76	24.37	0.35

注:Os 是根据 Nier 值的钨同位素丰度,通过测量 $^{192}\text{Os}/^{190}\text{Os}$ 比值计算得出, ^{187}Os 是 ^{187}Os 同位素总量; Re 和 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。置信水平 95%, 不确定度是 2 σ 。模式年龄的不确定度还包括衰变常数的不确定度(1.02%), 置信水平 95%。模式年龄计算中 ^{187}Re 衰变常数 $\lambda = 1.666 \times 10^{-11} \text{a}^{-1}$ 。

龄为 (23.36 ± 0.49) Ma (MSWD = 0.60) (图 4), 模式年龄加权平均值为 (23.68 ± 0.16) Ma (MSWD = 0.66); 南矿段 4 件辉钼矿样品的等时线年龄为 (25 ± 1) Ma (MSWD = 1.9) (图 5), 模式年龄加权平均值为 (24.64 ± 0.17) Ma (MSWD = 1.07)。南、北矿段辉钼矿的 Re-Os 年龄相差不到 1 Ma, 可能存在成矿时间的微小差异, 但考虑到不确定度, 两者模式年龄有重合, 难以完全区分, 并且结合矿区内黄铜矿

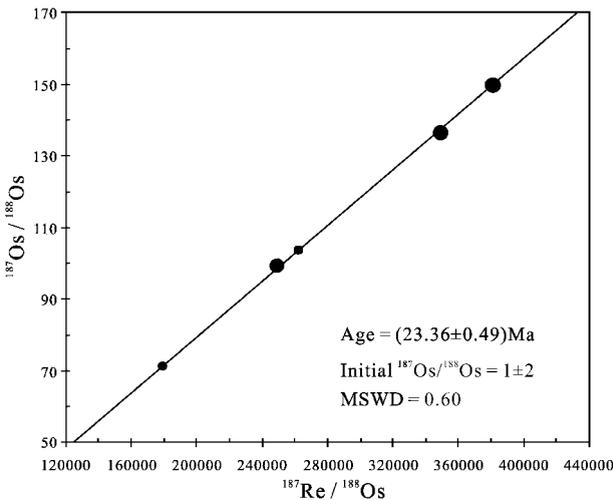


图 4 努日矽卡岩型铜钨钼矿床北矿段辉钼矿 Re-Os 等时线年龄

Fig. 4 Re-Os isotopic isochron diagram of molybdenite from north ore block of the Nuri skarn Cu-W-Mo deposit

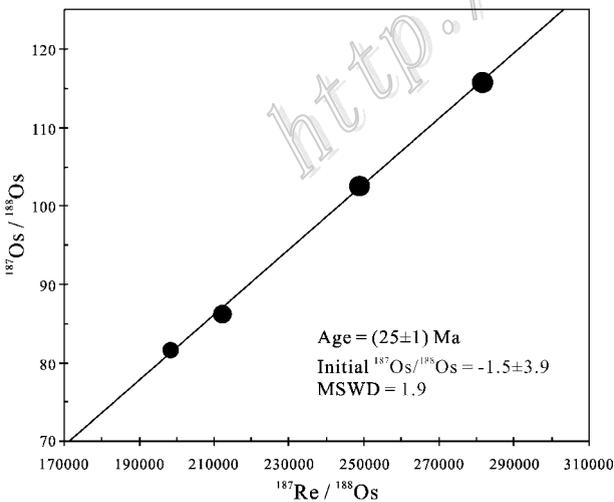


图 5 努日矽卡岩型铜钨钼矿床南矿段辉钼矿 Re-Os 等时线年龄

Fig. 5 Re-Os isotopic isochron diagram of molybdenite from south ore block of the Nuri skarn Cu-W-Mo deposit

(黑云母 Ar-Ar 法)的成矿时代 (23.75 ± 0.18) Ma (作者未发表数据), 因此, 可以认为南、北矿段的辉钼矿为同一期成矿事件的产物。

4.4 努日铜钨钼矿床的成矿时代

(1) 通过对该矿床主要含钼矿体的 9 件不同产状、不同形态辉钼矿的 Re-Os 同位素分析, 获得其模式年龄为 23.46~24.77 Ma, 北矿段 5 件样品的等时线年龄为 (23.36 ± 0.49) Ma (MSWD = 0.60), 南矿段 4 件样品的等时线年龄为 (25 ± 1) Ma (MSWD = 1.9)。等时线 ^{187}Os 初始值在误差范围内接近 0, 表明辉钼矿形成时基本上不含普通 Os (非放射性成因), 辉钼矿中 ^{187}Os 都是 ^{187}Re 的衰变产物, 这符合计算模式年龄的条件, 也说明所获得的模式年龄是有效的。等时线年龄与模式年龄基本一致。

(2) 对该矿区内含黑云母、黄铜矿石英脉中的黑云母进行了 Ar-Ar 定年, 获得其年龄为 (23.75 ± 0.18) Ma (作者未发表数据), 这一年龄可代表黄铜矿的形成时代。本文所测得的辉钼矿的年龄与黄铜矿的十分接近, 表明辉钼矿和黄铜矿为同期产物。

(3) 根据野外矿石组合观察, 该矿区内的钼矿化主要产在矽卡岩、长英质角岩和围岩破碎带中, 辉钼矿呈细脉状、浸染状、团块状产出, 在一些矿段中与黄铁矿、黄铜矿、白钨矿呈共生结构关系 (见图 3E、图 3F), 表明其为同期成矿作用的产物。

综上所述, 努日矽卡岩型矿床的形成时代为 23~24 Ma。

5 讨论

研究表明, 自印度大陆与亚洲大陆于 65 Ma 碰撞 (莫宣学等, 2003) 至今, 喜马拉雅-青藏高原造山带相继经历了主碰撞陆陆汇聚 (65~41 Ma)、晚碰撞构造转换 (40~26 Ma) 和后碰撞地壳伸展 (25~0 Ma) 演化历程 (侯增谦等, 2006a, 2006b), 并伴随有强烈的成矿作用。青藏高原后碰撞成矿作用的典型代表是冈底斯中新世斑岩铜矿带, 形成于后碰撞地壳伸展环境 (18~12 Ma), 受 NS 向断裂的控制 (侯增谦等, 2006b; 芮宗瑶等, 2003; 李金祥等, 2007; Hou et al., 2004; Qu et al., 2004)。此外, 作为后碰撞阶段成矿作用的另一代表, 山南地区的热液脉型 Sb-Au-Pb-Zn 矿床, 无论在成矿类型方面, 还是在控矿构造 (NS 向断裂) 方面 (侯增谦等, 2006b; 杨竹森等, 2006) 都明显区别于努日矿床的成矿作用。本次研

究发现,努日矿床形成于 (23.36 ± 0.49) Ma,总体上处于晚碰撞成矿作用的尾声,或后碰撞成矿作用的开端,受冈底斯东段 NEE 向和 NWW 向陆缘走滑断裂的影响,与青藏高原后碰撞成矿作用的典型代表有明显区别。努日矿区在控矿构造上严格受雅鲁藏布江走滑断裂的影响,与晚碰撞时期青藏高原东缘发育有大规模走滑、剪切并控制矿床形成与分布的构造环境十分相似。因此,从成矿时代和控矿特征上进行对比,将努日铜钨钼矿床的成矿作用纳入到青藏高原晚碰撞成矿阶段更为合理。

有证据表明,冈底斯南缘成矿带内除了努日铜钨钼矿床外,还发育有大量 30 Ma 左右的成矿作用。前人研究表明,明则大型斑岩铜钨钼矿床的成岩年龄为 ~ 30 Ma(Harrison et al., 2000; Chung et al., 2009; 闫学义等, 2010),而且,其东侧的帕南斑岩钼铜矿床的成矿年龄为 ~ 32 Ma(郑远川,未发表资料)。与冲木达矽卡岩矿体直接接触的黑云角闪二长花岗岩岩体的锆石 U-Pb 年龄也为 30 Ma(郑远川,未发表数据)。另外,据陈金标等(2010)报道,温区、藏巴等矿床的特征和成矿金属组合与努日、明则等其他形成于 ~ 30 Ma 的矿床极为相似。虽然温区、藏巴等矿床目前尚无年龄数据报道,但其同样应该形成于 30 Ma 左右。由此可见,冈底斯南缘成矿带的成矿作用至少从 32 Ma 一直持续到 23 Ma 左右,与晚碰撞成矿作用时限大体相当,而且,从这些矿床的规模来看,该成矿带在晚碰撞期具有较强的成矿作用。

侯增谦等(2006b)指出,晚碰撞成矿作用主要出现于构造转换环境,集中发育在青藏高原东缘的三江地区,并以大规模走滑、剪切和推覆断裂构造为特征。这些大规模走滑断裂系统不仅控制了区内强烈的岩浆作用,而且控制着区内多个大型-超大型斑岩铜-钨-金矿带的形成与分布(Hou et al., 2003; 2005)。最近的研究表明,伴随着印度-亚洲大陆的斜向碰撞,沿着雅鲁藏布江缝合带也曾发育大规模的走滑断裂活动,并可能控制了冈底斯南缘斑岩-矽卡岩铜多金属成矿带的形成和发育(闫学义等, 2010)。努日矿区位于冈底斯岩浆弧东段南缘 NEE 向陆缘走滑断裂带与 NWW 向陆缘走滑断裂带的复合地段,其在早期 NEE 向拉分型转换构造环境和晚期 NWW 向推闭型转换构造环境下构成了一个以走滑断裂为特点的转换构造成矿系统。闫学义等(2010)认为,冈底斯东段南缘成矿带是陆缘走滑

转换成矿作用的结果。在印度-亚洲大陆的斜向碰撞期间,由于雅鲁藏布江走滑断裂的左旋剪切作用,冈底斯东段先后形成了 NEE 向朗县基底剥离断层、泽当层间剥离断层和与 NEE 向剥离断层有关的达孜-甲马“类双峰”玄武-流纹质次火山岩脉带(侯增谦等, 2006a),三者共同组成雅鲁藏布江的拉分型转换构造。晚碰撞期 NEE 向剥离断层后期的正断式左旋走滑作用,在 NWW 走向形成了以叠瓦状逆冲断层组合为特征的推闭型转换构造,构成了斑岩型成矿所必备的封闭式构造环境条件。本文的 Re-Os 同位素测年资料以及前人的岩浆岩年代学研究表明,该带的走滑断裂可能在 32~23 Ma 期间活动最为强烈。向北陡倾的 NEE 向左行韧性剪切带和 NEE 向、NW 向脆性断裂系统的发育(侯增谦等, 2006a),为晚碰撞期中-酸性岩浆的侵位和斑岩-矽卡岩成矿系统的发育提供了重要环境。

经过对努日矿区南矿段 ZK4502 钻孔(图 2)的岩芯编录,发现孔深 790 m 处发育石英闪长玢岩(24 Ma,作者未发表数据),发育零星的铜矿化;在近地表钻孔中已发现斑岩型铜钨钼矿化,局部构成了低品位的斑岩型铜矿体(NZK4102)(江化寨等, 2010)。这暗示着努日矽卡岩型铜钨钼矿床的深部或下部,很可能发育有斑岩型矿体,其与矽卡岩型铜钨钼矿床可能构成了一个以石英闪长斑岩为核心的斑岩型-矽卡岩型成矿系统。努日矿床与该成矿带内其他矿床的广泛类似性,反映出该矿床乃至该成矿带是一个早于冈底斯斑岩铜矿(18~12 Ma)的独立成矿事件。犹如三江地区的晚碰撞斑岩型铜-钨-金成矿带,努日矿区深部斑岩型矿化的发育,以及明则矿区含矿斑岩中大量中-基性包体的存在,都暗示着冈底斯南缘成矿带具有找到大型斑岩型铜钨钼矿床的可能性。

6 结 论

使用 Re-Os 同位素体系测得努日矿床内 9 件辉钼矿样品的模式年龄为 23.46~24.77 Ma,其北矿段 5 件样品的等时线年龄为 (23.36 ± 0.49) Ma(MSWD=0.60),南矿段 4 件样品的等时线年龄为 (25 ± 1) Ma(MSWD=1.9),模式年龄与等时线年龄基本一致,结合该区内黄铜矿的年龄为 (23.75 ± 0.18) Ma(作者未发表数据),表明努日矽卡岩型铜钨钼矿床的成矿时代为 23~24 Ma。

努日矿床与明则、帕南、冲木达等矿床限制了冈底斯东段南缘斑岩-砂卡岩铜多金属成矿带的形成时限,介于 32~23 Ma 之间。该成矿带代表了一个有别于后碰撞期冈底斯斑岩铜矿带的独立成矿事件,应为形成于青藏高原晚碰撞阶段的受走滑断裂系统控制的成矿事件,具有巨大的成矿潜力。

志 谢 野外工作得到了中国冶金地质总局第二地质勘察院的大力支持。在成文过程中得到了江化寨工程师的大力帮助。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亦给予了很大帮助。两位评审者对本文提出了宝贵意见。在此表示由衷的感谢。

参考文献/References

陈金标,方树元,陈银来. 2010. 西藏东冈底斯山南矿集区成矿地质特征及找矿前景展望[A]. 见:经济发展方式转变与自主创新[C]. 第十二届中国科学技术协会年会(第一卷). 1-8.

杜安道,何红菱,殷宁万,邹晓秋,孙亚利,孙德忠,陈少玲,屈文俊. 1994. 辉钼矿的铼-钨同位素地质年龄测定方法研究[J]. 地质学报, 68(4): 339-347.

杜安道,赵敦敏,王淑贤,孙德忠,刘敦一. 2001. Carius 管溶样和负离子热表面电离质谱准确测定辉钼矿铼-钨同位素地质年龄[J]. 岩矿测试, 20(4): 247-252.

侯增谦,曲晓明,黄卫,高永丰. 2001. 冈底斯斑岩铜矿成矿带有望成为西藏第二条“玉龙”铜矿带[J]. 中国地质, 28(10): 27-30.

侯增谦,潘桂荣,王安建,莫宣学,田世洪,孙晓明,丁林,王二七,高永丰,谢玉玲,曾善胜,秦克章,许继峰,曲晓明,杨志明,杨竹森,费红彩,孟祥金,李振清. 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,杨竹森,孟祥金,李振清,杨志明,郑绵平,郑有业,聂凤军,高永丰,江思宏,李光明. 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,莫宣学,丁林,高永丰,董方浏,李光明,曲晓明,赵志丹,江思宏,孟祥金,李振清,秦克章,杨志明. 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.

侯增谦,王二七. 2008. 印度-亚洲大陆碰撞成矿作用主要研究进展[J]. 地质学报, 29(3): 275-292.

黄志英,李光明. 2004. 西藏雅鲁藏布江成矿区斑岩型铜矿基本特征与找矿潜力[J]. 地质与勘探, 40(1): 1-6.

江化寨,曾海良,吴志山. 2010. 西藏山南努日矿区层砂卡岩型铜钼钨矿地质特征及深部找矿预测[J]. 地质与勘探, 47(1): 71-77.

姜耀辉,蒋少涌,凌宏飞,戴宝章. 2006. 陆-陆碰撞造山环境下的含

铜斑岩岩石成因-以藏东玉龙斑岩铜矿带为例[J]. 岩石学报, 22: 697-706.

李光明,杨家瑞,丁俊. 2003. 西藏雅鲁藏布江成矿区矿产资源评价新进展[J]. 地质通报, 22(9): 699-703.

李光明,芮宗瑶. 2004. 西藏冈底斯成矿带斑岩铜矿的成矿成矿年龄[J]. 大地构造与成矿学, 28(2): 165-170.

李光明,芮宗瑶,王高明,林方成,刘波,余宏全,丰成友,屈文俊. 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): 482-488.

李光明,刘波,余宏全,丰成友,屈文俊. 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,李金祥,王少怀,江善元,林金灯,江化寨,方树元,张兴春. 2006b. 冈底斯东段南部第三纪砂卡岩型 Cu-Mo-W(Au) 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.

李金祥,秦克章,李光明,等. 2007. 冈底斯中段尼木斑岩铜矿田的 $\text{K-Ar}, ^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄,对岩浆-热液系统演化和成矿构造背景的制约[J]. 岩石学报, 23(5): 953-966.

莫济海,梁华英,喻亨祥,陈勇,孙卫东. 2008. 西藏冲木达铜-钼-钨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,赵志丹,邓晋福,董国臣,周肃,郭铁鹰,张双全,王亮亮. 2003. 印度-亚洲大陆主碰撞过程的火山作用响应[J]. 地学前缘, 10(3): 136-148.

秦克章,李光明,赵俊兴,李金祥,薛国强,严刚,粟登奎,肖波,陈雷,范新. 2008. 西藏首例独立钼矿-冈底斯沙让大型斑岩钼矿的发现及其意义[J]. 中国地质, 35(6): 1101-1112.

屈文俊,杜安道. 2003. 高温密闭溶样电感耦合等离子体质谱准确测定辉钼矿铼-钨地质年龄[J]. 岩矿测试, 22(4): 254-262.

芮宗瑶,侯增谦,曲晓明,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, 22(30): 217-225.

王方国,李光明,林方成. 2005. 西藏冈底斯地区砂卡岩型矿床资源潜力初析[J]. 地质通报, 24(4): 378-385.

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钨铜钼矿新发现及走滑型陆缘成矿新认识[J]. 地质评论, 56(1): 9-20.

杨志明,侯增谦,宋玉财,李振清,夏代祥,潘凤雏. 2008. 西藏驱龙超大型斑岩铜矿床地质、蚀变与矿化[J]. 矿床地质, 27: 279-318.

杨竹森,侯增谦,高伟,王海平,李振清,孟祥金,曲晓明. 2006. 藏南拆离系锦金成矿特征与成因模型[J]. 地质学报, 80: 1377-1391.

雍永源. 2007. 锡和钨:西藏冈底斯潜在的优势矿种[J]. 沉积与特提斯地质, 27(1): 1-8.

郑有业,王保生,樊子理,张华平. 2002. 西藏冈底斯东段构造演化及铜金多金属成矿潜力分析[J]. 地质科技情报, 21(2): 55-64.

- Chung S L , Chu M F , Zhang Y Q , Xie Y W , Lo C H , Lee T Y , Lan C Y , Li X H , Zhang Q and Wang Y Z. 2005. Tibetan tectonic evolution inferred from spatial and temporal variations in post-collisional magmatism[J]. *Earth Science Reviews* , 68 : 173-196.
- Chung S L , Chu M F , Ji J Q , O'Reilly S Y , Pearson N J , Liu D Y , Lee T Y and Lo C H. 2009. The nature and timing of crustal thickening in Southern Tibet[J]. *Tectonophysics* , 477 : 36-48.
- 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.
- Harrison T M , Yin A , Grove M , Lovera O M , Ryerson F J and Zhou X H. 2000. The Zedong Window : A record of superposed Tertiary convergence in southeastern Tibet[J]. *Journal of Geophysical Research* , 105 : 19211-19230.
- 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 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 , Zeng P S , Gao Y F and Dong F L. 2006. The Himalayan Cu-Mo-Au mineralization in the eastern Indo-Asian collision zone : constraints from Re-Os dating of molybdenite[J]. *Mineralium Deposita* , 22 : 177-199.
- Hou Z Q , Zhong D L , Deng W M and Khin Zaw. 2005. A tectonic model for porphyry copper-molybdenum-gold deposits in the eastern Indo-Asian collision zone[A]. In : Porter T M. ed. *Super porphyry copper and gold deposits : A global perspective*[J]. Adelaide : PGC Publishing House. 423-440.
- Hou Z Q and Cook N J. 2009. Metallogenesis of the Tibetan collisional orogen : A review and introduction to the special issue[J]. *Ore Geology Reviews* , 36 : 2-24.
- Maheo G , Guillot S , Blichert-Toft J , Rolland Y and Pecher A. 2002. A slab breakoff model for the Neogene thermal evolution of Southern Kailash and South Tibet[J]. *Earth Planet. Sci. Lett.* , 195 : 45-48.
- Miller C , Schuster R , Klotzli U , Frank W and Purtscher F. 1999. Post-collisional potassic and ultrapotassic magmatism in SW Tibet : Geochemical and Sr-Nd-Pb-O isotopic constraints for mantle source characteristics and petrogenesis[J]. *J. Petrol.* , 40 : 1399-1424.
- Qu X M , Hou Z Q and Li Y G. 2004. Melt components from a subducted slab in late orogenic ore-bearing porphyries in the Gangdese copper belt , southern Tibetan plateau[J]. *Lithos* , 74 : 131-148.
- Richards J P. 2009. Postsubduction porphyry Cu-Au and epithermal Au deposits : Products of remelting of subduction- modified lithosphere [J]. *Geology* , 37 : 247-250.
- Selby D and Creaser R A. 2004. Macroscale NTIMS and microscale LA-MC-ICP-MS Re-Os isotopic analysis of molybdenite : Testing spatial resolutions for reliable Re-Os age determinations and implications for the decoupling of Re and Os within molybdenite[J]. *Geochim. Cosmochim. Acta* , 68 : 3897-3908.
- Shirey S B and Walker R J. 1995. Carius tube digestion for low-blank rhenium-osmium analysis[J]. *Ana. Chem.* , 67 : 2136-2141.
- Stein H J , Scherst N A , Hannah J , et al. 2003. Subgrainscale decoupling of Re and ¹⁸⁷Os and assessment of laser ablation ICP-MS spot dating in molybdenite[J]. *Geochim. Cosmochim. Acta* , 67 : 3673-3686.
- 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.