1000-0569/2013/029(04)-1439-49 *Acta Petrologica Sinica* 岩石学报

西藏冈底斯南部陆陆碰撞早期成矿作用分析*

黄文婷[1,2] 梁华英[1**] 伍静[1] 王春龙[1,2] 邹银桥[1,2] 王秀璋[1] 许继峰[3] Charllote M ALLEN[4]

HUANG WenTing[1,2], LIANG HuaYing[1**], WU Jing[1], WANG ChunLong[1,2], ZOU YinQiao[1,2], WANG XiuZhang[1], XU JiFeng[3] and Charllote M ALLEN[4]

1. 中国科学院广州地球化学研究所,中国科学院矿物学与成矿学重点实验室,广州 510640
2. 中国科学院大学,北京 100049
3. 中国科学院广州地球化学研究所,同位素地球化学国家重点实验室,广州 510640
4. Research School of Earth Sciences, Australian National University, Canberra ACT 0200
1. *Key Laboratory of Mineralogy and Metallogeny*, *Guangzhou Institute of Geochemistry*, *Chinese Academy of Sciences*, *Guangzhou* 510640, *China*
2. *University of Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100049, *China*
3. *State Key Laboratory of Isotope Geochemistry*, *Guangzhou Institute of Geochemistry*, *Chinese Academy of Sciences*, *Guangzhou* 510640, *China*
4. *Research School of Earth Sciences*, *Australian National University*, *Canberra ACT* 0200, *Australia*

2012-09-07 收稿, 2013-01-21 改回.

Huang WT, Liang HY, Wu J, Wang CL, Zou YQ, Wang XZ and Xu JF and Allen CM. 2013. Study on the metallogenesis during the early stage of continental collision in southern Gangdese, Tibet. *Acta Petrologica Sinica*, 29(4):1439－1449

Abstract Many porphyry Cu-Mo and Cu-Pb-Zn polymetal deposits have been found in the southern Gangdese belt, forming a porphyry copper ore belt and a polymetal ore belt, respectively. Previous geochronologic results indicate that most deposits in the southern Gangdese belt were formed after 30Ma and in post-collisional extension evnironment. In this paper, we analyze zircon U-Pb age of igneous rocks closely associate with the Jialong skarn Fe deposit and the Sadang Au-Ag deposit, respectively, and molybdenite Re-Os age of the Duodigou skarn Mo deposit in the southern Gangdese. The Jialong biotite monzonite granite closely associated with skarn Fe deposit has zircon LA-ICP-MS U-Pb age of 61.1 ± 0.4Ma with MSWD = 0.94. The Sadang andesite closely associated with Au-Ag mineralization has zircon LA-ICP-MS U-Pb age of 62.6 ± 0.5Ma with MSWD = 1.51. The molybdenite Re-Os model ages of the Duodigou skan Mo deposit varies from 64.3 ± 0.8Ma to 69.2 ± 3.3Ma, with an average weight age of 66.7 ± 6.4Ma, MSWD = 8.1. Our new results suggest that the three deposits own their origin to the magmatic events triggered by early Indus-Eurasia collision. Our results, together with former work, reveal that the southern Gangdese has undergone large-scale mineralization associated with the strong magmatic activities during the early Indus-Eurasia collision. It is, therefore, suggested that the southern Gangdese could be an important target area for mineralization related to early Indus-Eurasia collision.

Key words Gangdese; Continental collision; Ore forming age; Tibet

摘 要 冈底斯带南部发育有大量的斑岩铜钼矿床和矽卡岩型铜铅锌多金属矿床,形成了斑岩铜矿带和多金属矿带。前人的研究表明,成矿带内的矿床形成年代大都小于30Ma,处于碰撞后期伸展构造环境。本文对冈底斯带中南部的甲龙矽卡岩型铁矿、撒当金银矿床(点)和多底沟矽卡岩型钼矿床(点)开展了年代学研究,结果显示:甲龙铁矿黑云母二长花岗斑岩的锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄为 61.1 ± 0.4Ma,MSWD = 0.94;撒当赋矿安山岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄为 62.6 ± 0.5Ma,MSWD = 1.51;多底沟钼矿床(点)3 件辉钼矿 Re-Os 模式年龄为 64.3 ± 0.8Ma ~ 69.2 ± 3.3Ma,加权平均模式年龄为 66.7 ± 6.4Ma (MSWD = 8.1)。三个矿床(点)的同位素年龄表明成岩成矿事件和印度-欧亚板块陆陆碰撞早期构造岩浆事件有关。结合前人工作,我们提出冈底斯中南部发生了大规模与陆陆碰撞早期岩浆事件有关的成矿作用,形成了大面积分布的矿床,具有良

* 本文受 973 项目(2009CB421000)、中国科学院战略性先导科技专项(B 类)(XDB03010302)、中国科学院广州地球化学研究所 135 项目(Y234022A07)、中国科学院重点国际合作项目(GJHZ1127)和国家自然科学基金项目(41172080、41121002、41272099)联合资助.

第一作者简介: 黄文婷,女,1987 年生,博士生,矿床学专业,E-mail: ita19@163.com

** **通讯作者**:梁华英,男,1962 年生,研究员,博士生导师,矿床地质及矿床地球化学专业, E-mail: lianghy@gig.ac.cn

好的找矿前景,应引起更多关注。

关键词 冈底斯带;陆陆碰撞;成矿时代;西藏

中图法分类号 P597.3; P611

1 引言

近年来在冈底斯南部发现一系列斑岩铜钼矿床及多金属矿床,形成了巨型冈底斯金属成矿带,引起了人们的广泛关注。目前工作表明,冈底斯成矿带矿床主要形成于后碰撞构造环境,成矿时代集中在 18 ~ 13Ma 之间(Hou *et al.*, 2009; Yang *et al.*, 2009; 侯增谦等, 2003, 2004, 2012; 芮宗瑶等, 2003; 孟祥金等, 2003; 李光明和芮宗瑶, 2004; 林武等, 2004; 郑有业等, 2007; 杨志明等, 2008; 梁华英等, 2008; 唐菊兴等, 2011),主要以大型超大型斑岩铜钼矿床为主,如驱龙、甲马、冲江、厅宫、邦浦等;部分矿床形成于晚碰撞期,成岩成矿时代在 30 ~ 24Ma 之间(Chung *et al.*, 2009; 李光明等, 2006; 莫济海等, 2006; 闫学义等, 2010; 范新等, 2011; 张松等, 2012),主要分布于冈底斯带南缘克鲁-冲木达矿集区,主要矿床有冲木达矽卡岩铜钼矿床(莫济海等, 2008)、努日矽卡岩型钼铜钨矿床(李光明等, 2011; 陈雷等, 2011)、明则斑岩钼矿床(陈玉水等, 2011)等。许多学者对后碰撞期斑岩矿床的时空分布及成矿岩体地球化学特征开展了工作,认为成矿斑岩具有埃达克岩亲和性(侯增谦等, 2012);而对成矿斑岩形成动力学过程则有不同的看法,主要有:俯冲的新特提斯洋壳板片熔融(Qu *et al.*, 2004)、俯冲的印度下地壳熔融(Xu *et al.*, 2010)、加厚的新生镁铁质下地壳熔融(Hou *et al.*, 2004; Chung *et al.*, 2009)及俯冲板片物质改造的岩石圈地幔熔融(Gao *et al.*, 2007, 2010)等观点。

印度板块与欧亚板块碰撞引发了大规模的岩浆活动,形成了大面积分布的林子宗火山岩及一系列侵入岩(Chung *et al.*, 2005; 莫宣学等, 2003, 2005, 2007; 周肃等, 2004; 潘桂棠等, 2006),强烈岩浆活动为矿床的形成提供了良好的条件。初步工作表明,冈底斯中南部在印度板块与欧亚板块碰撞早期发生了与中酸性岩浆作用有关成矿事件(李应栩等, 2011; 高一鸣等, 2011; 高顺宝等, 2012; 王保弟等, 2012),但目前对该时期成矿的时空分布工作不多。

本文分析了林周县甲龙铁矿和撒当火山岩型金银矿床(点)矿化岩体锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄,以及多底沟矽卡岩型钼矿床(点)辉钼矿 Re-Os 模式年龄,发现这些成矿岩体或矿床均形成于陆陆碰撞早期。结合前人相关成果,我们初步分析了印度-亚欧板块碰撞早期与中酸性岩浆作用有关矿床的时空分布及成矿作用。

2 区域地质概况及矿床地质简介

冈底斯带处于雅鲁藏布江缝合带与怒江-班公湖缝合带之间,是一条东西长达 2500km,南北宽 150 ~ 300km,面积达 45 万平方千米的巨型构造-岩浆带(潘桂棠等, 2006)。冈底斯带岩浆岩主要形成于古新世-始新世,少量形成于中新世和侏罗纪(Chung *et al.*, 2003; Chu *et al.*, 2006)。古新世-始新世火成岩主要有覆盖于上白垩统设兴组的林子宗火山岩及冈底斯花岗岩基。林子宗火山岩主要为钙碱性-钾玄岩系列的中酸性火山、火山碎屑岩,形成时代在 65 ~ 41Ma 之间(莫宣学等, 2003);冈底斯花岗岩岩基主要分布于冈底斯带中南部,东西向 2000 多千米范围内均见出露,形成时代在 53 ~ 47Ma 之间(Mo *et al.*, 2005)。中新世火成岩主要有后碰撞钾质-超钾质火山岩及与斑岩铜钼矿床有关的钾质二长花岗斑岩。

本研究的矿床位于冈底斯带中南部,斑岩铜钼矿带北缘,包括甲龙铁矿床赋矿岩体、撒当金银矿点赋矿火山岩及多底沟钼矿床(点)赋矿岩体(图 1)。甲龙铁矿床位于林周县境内,目前探明储量约为 100Mt,达小型规模。矿区出露地层主要有:白垩系上统设兴组砂岩粉砂岩和塔克那组砂岩、泥岩、灰岩,及白垩系下统楚木龙组石英砂岩。矿区内岩浆岩主要为侵入白垩系地层中的黑云母二长花岗岩及斑状黑云母二长花岗岩(西藏自治区地质矿产局, 1993)。甲龙矽卡岩型铁矿产于斑状黑云母二长花岗岩与楚木龙组石英砂岩的接触带内,矿体为透镜状产于内接触带,金属矿物主要为磁铁矿,矿石具粒状结构、块状构造。斑状黑云母二长花岗岩主要由斜长石、钾长石、石英和黑云母组成。野外观察显示,斑状黑云母二长花岗岩与地层的内接触带发育石榴子石及透辉石等早矽卡岩阶段形成的矿物,远离岩体则阳起石及绿帘石等相对较多。

撒当金银矿床(点)位于林周县境内,拉萨北部约 70km 处。矿区出露的地层主要有第四系沉积物、始新统帕那组凝灰岩、年波组凝灰岩夹砂砾岩及古新统典中组安山岩。矿化主要呈脉状产于典中组安山岩中,目前已发现 3 条长 100 多米、宽数十厘米的矿脉,主要金属矿物有方铅矿、闪锌矿、黄铜矿、黄铁矿、自然金及金银矿等。赋矿火山岩发生了强烈的蚀变,主要蚀变类型有硅化、黄铁矿化、绢云母化、碳酸盐化及沸石化。目前该矿化点为个体企业开采,探矿工程不多,矿床规模不明。

多底沟矽卡岩型钼矿床(点)位于拉萨东部十多千米处。矿区的地层主要有第四系沉积物、白垩系叶巴组中酸性火山岩及侏罗系上统多底沟组灰岩夹粉砂岩;区内第三系岩浆活动较为活跃,出露第三系黑云母二长花岗岩及黑云母花岗闪长岩(西藏自治区地质矿产局,1993)。多底沟矿床钼矿化主要产于角闪黑云母二长花岗岩与侏罗系多底沟组灰岩的接触带中。角闪黑云母二长花岗岩主要由斜长石、钾长石、石

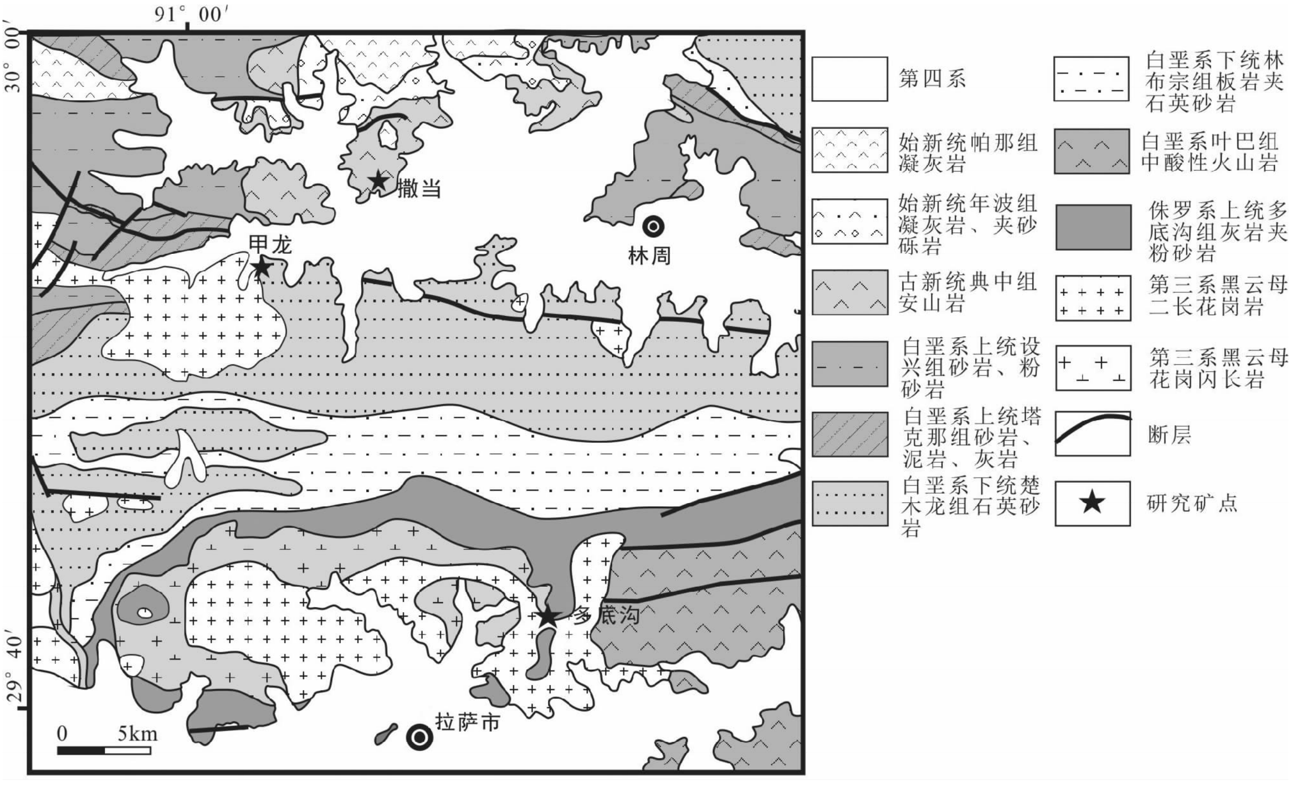

图 1　研究矿点区域地质简图(据西藏自治区地质矿产局,1993 修改)

Fig. 1　Simplified geological map of the study deposits(modified after BGMRX, 1993)

英、黑云母和角闪石组成,岩体与围岩接触带发育矽卡岩化,钼矿化主要呈细脉状及浸染状产于矽卡岩中,局部见厚度超过 10cm 辉钼矿石英脉。

3　样品和分析方法

本文对甲龙铁矿斑状黑云母二长花岗岩和撒当金银矿床(点)赋矿安山岩进行了锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄分析,对多底沟钼矿床(点)的辉钼矿进行了 Re-Os 年龄测定。

甲龙铁矿斑状黑云母二长花岗岩的采样位置为 N29°52′57″,E91°02′30″;撒当金银矿床(点)赋矿安山岩样品采于 N29°55′44.3″,E91°06′24.4″。每个样品选取约 0.5kg 的岩石,研磨至 80 目,经筛选、淘选、磁选等处理后,在显微镜下手选出晶形完整的锆石 70~80 颗,装入环氧树脂中制成靶、磨光,在光学显微镜下选出无裂纹且包裹体不发育的锆石晶体点进行测定。锆石 LA-ICP-MS 定年在澳大利亚国立大学地球科学研究所完成。分析流程见 Harris *et al.* (2004)。为了减少继承铅、铅丢失等对年龄的影响,在 $^{207}Pb/^{235}U$-$^{206}Pb/^{238}U$ 图中,和谐度低于 95% 的年龄数据及观测误差值/预期误差值大于 2 的分析数据点将被排除。在此基础上,使用累积概率统计图对数据进行处理。主群组锆石年龄在累积概率统计图中多沿直线分布,其年龄代表岩体结晶年龄,位于直线上方的被认为是继承铅,位于直线下方的被认为是铅丢失(Harris *et al.*, 2004; Liang *et al.*, 2006)。

多底沟钼矿床(点)的三件辉钼矿样品均取自矿区的钼矿石,采样位置为 N29°42′42.6″,E91°11′59.2″。选取 1kg 左右的样品,用刀片直接从手标本上剥离辉钼矿后,在双目镜下进一步挑选至纯度 98% 以上。辉钼矿同位素分析在中国科学院广州地球化学研究所完成。采用 Carius 管封闭溶样分解样品,样品分解以及 Re 和 Os 的分离等化学处理过程参见文献(Sun *et al.*, 2010; Wu *et al.*, 2012),质谱分析仪器是美国热电公司生产的 X7 型 ICPMS,采用 Ir 和 Os 天然丰度进行在线监测和校正仪器测试过程中的 Re 和 Os 同位素分馏。^{187}Re-^{187}Os 衰变常数 λ 引用的值为 $1.666\times10^{-11}a^{-1}$ (Shen *et al.*, 1996; Smoliar *et al.*, 1996)。

4　分析结果

与甲龙矽卡岩型铁矿紧密共生的斑状黑云母二长花岗岩和撒当金银矿床(点)矿化安山岩的锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄的分析结果见表 1 及表 2。

本文对甲龙铁矿蚀变斑状黑云母二长花岗岩进行了 30 颗锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄分析,所有分析点谐和度均高于 95%。30 个分析点锆石 U-Pb 年龄在 64.9~57.5Ma 之间,用 isoplot 计算加权平均年龄为 60.8±0.7Ma, MSWD =

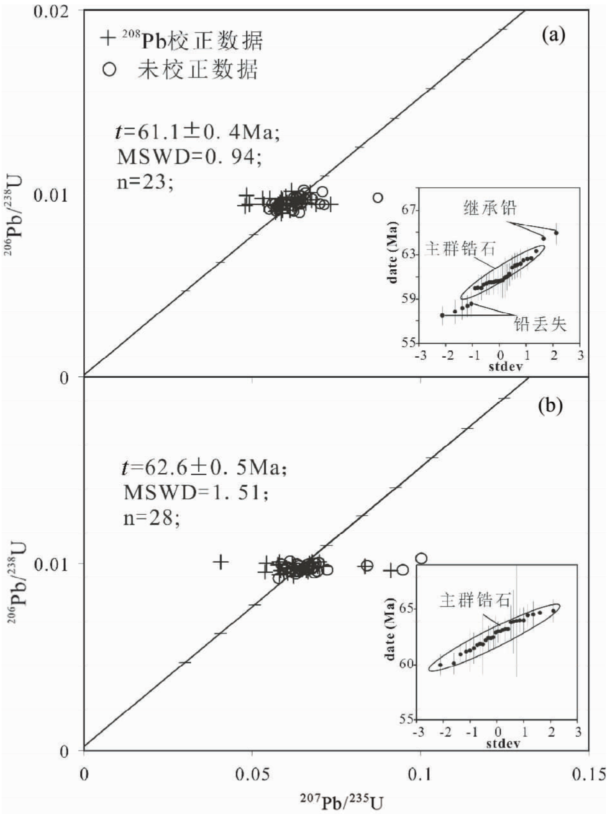

图2 甲龙斑状黑云母二长花岗岩体(a)和撒当安山岩(b)锆石U-Pb年龄谐和图,内插为累计概率统计图

Fig. 2 Condordia plots showing the zircon U-Pb analyses of the Jialong porphyritic biotite monzonite granite (a) and the Sadang andesite (b), the inserts are probability plots

3.01。其MSWD值较大,显示其含有继承铅或铅丢失。为了获得更精确的年龄值,我们用累积概率统计图分析锆石年龄分布特征。在累积概率统计图上,23个数据点沿直线分布,为主群锆石,而位于直线上方的2个数据和位于直线下方的5个数据分别看作继承铅和铅丢失(图2a),均不参与计算。用isoplot软件计算23个点主群锆石年龄为61.1±0.4Ma,MSWD=0.94(图2a)。

撒当金银矿床(点)赋矿安山岩31个锆石LA-ICP-MS U-Pb年龄分析点中,有3个谐和度小于95%,在计算年龄时被排除,其余28个分析点锆石U-Pb年龄变化范围为64.8~60.0Ma,在累积概率统计图上沿直线分布。用isoplot进行加权平均年龄计算结果为62.6±0.5Ma,MSWD=1.51(图2b)。

多底沟钼矿床(点)3件辉钼矿同位素分析结果详见表3。结果显示,辉钼矿^{187}Re的含量为$0.878873\times10^{-6}\sim1.50942\times10^{-6}$;$^{187}Os$的含量为$1.00405\times10^{-9}\sim1.61907\times10^{-9}$,模式年龄为68.5±0.7Ma、69.2±3.3Ma和64.3±0.8Ma,加权平均模式年龄为66.7±6.4Ma(MSWD=8.1)。

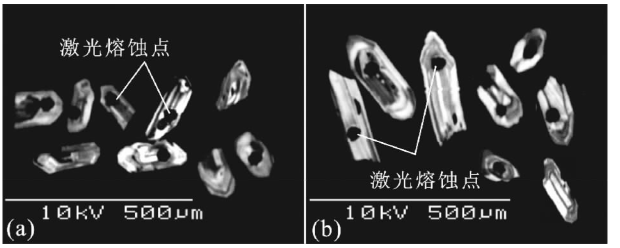

图3 甲龙斑状黑云母二长花岗岩(a)和撒当安山岩(b)锆石样品阴极发光图

Fig. 3 CL photos of analyzed zircon grains from the Jialong porphyritic biotite monzonite granite (a) and from the Sadang andesite (b)

5 讨论

5.1 矿床的形成时代

甲龙铁矿蚀变斑状黑云母二长花岗岩及撒当金银矿床(点)赋矿安山岩锆石样品均为长柱状,晶形较好,Th/U比值较大,在0.41~1.18之间(表1、表2)。锆石CL图韵律环带发育(图3),具有岩浆锆石的一般特征,说明其主要是在岩浆结晶过程中形成的。锆石的U-Pb同位素体系封闭温度较高,抗后期干扰能力强,不易受后期热事件的扰动,因此获得的主群锆石LA-ICP-MS U-Pb年龄可以代表岩体的结晶年龄。甲龙铁矿蚀变斑状黑云母二长花岗岩形成时代为61.1±0.4Ma;撒当金银矿床(点)赋矿安山岩形成时代为62.6±0.5Ma。

甲龙铁矿的测试样品采自与矿化关系密切的蚀变斑状黑云母二长花岗岩。野外观察显示矿体主要赋存于岩体与地层的接触带中,岩体内接触带高温矽卡岩矿物如石榴子石及透辉石等相对发育,向外则阳起石、绿帘石及绿泥石等矿物增多。这表明矽卡岩化与斑状黑云母二长花岗岩有关,斑状黑云母二长花岗岩锆石LA-ICP-MS U-Pb年龄反映矽卡岩铁矿形成时代,即甲龙矽卡岩型铁矿是在61.1±0.4Ma形成的。

撒当金银矿床(点)矿体主要呈脉状及细脉状产于安山岩中。安山岩发生了强烈的黄铁矿化、硅化、绢云母化及沸石化等蚀变。目前未有直接证据表明矿化与安山岩有内在成因联系,考虑到该类矿化主要产于火山岩中,而且火山岩中还发育较大面积的Au-Ag异常,冈底斯南缘沉积地层中未见同类元素组合矿化;加上产于林子宗火山岩中纳如松多银矿床热液蚀变绢云母Ar-Ar年龄(57.8Ma)和火山岩锆石年龄相近(杨勇等, 2010),显示火山活动发生了成矿作用。因此,我们初步认为火山岩中的金银矿化与火山岩有关,金银矿化时代应和赋矿火山岩时代相近,略晚于62.6±0.5Ma。

多底沟矽卡岩型钼矿床(点)三件辉钼矿样品Re-Os模式年龄分别为:68.5±0.7Ma、69.2±3.3Ma及64.3±0.8Ma。三件辉钼矿化样品模式年龄变化不大,加权平均模

表 1 甲龙矽卡岩型铁矿斑状黑云母二长花岗岩锆石 LA-ICP-MS 分析结果

Table 1 Zircon LA-ICP-MS data of the Jialong porphyritic biotite monzonite granite associated with Fe mineralization

测点号	U ($\times10^{-6}$)	$\frac{Th}{U}$	$\frac{^{206}Pb}{^{238}U}$	±1s. e.	$\frac{^{207}Pb}{^{235}U}$	±1s. e.	$\frac{^{208}Pb}{^{232}Th}$	±1s. e.	$\frac{^{206}Pb}{^{238}U}$ age (Ma)	±1s. e.	$\frac{^{207}Pb}{^{235}U}$ age (Ma)	±1s. e.
42-01	658	0.54	0.00897	0.00013	0.06439	0.00440	0.00301	0.00009	57.5	0.8	57.7	3.6
42-02	363	0.67	0.00998	0.00008	0.06613	0.00190	0.00314	0.00007	64.4	1.2	66.2	5.6
42-03	1742	0.46	0.00976	0.00006	0.06324	0.00103	0.00326	0.00004	62.6	1.0	58.9	4.7
42-04	411	0.56	0.00941	0.00013	0.05601	0.00386	0.00316	0.00007	60.2	0.9	48.9	2.5
42-05	2563	1.06	0.00930	0.00006	0.05895	0.00106	0.00298	0.00002	60.0	1.2	56.1	4.7
42-06	955	0.63	0.00931	0.00008	0.06184	0.00143	0.00299	0.00003	59.9	0.9	59.6	3.2
42-07	321	0.69	0.01002	0.00026	0.07100	0.00525	0.00373	0.00012	63.3	1.0	47.7	2.7
42-08	438	0.54	0.00944	0.00012	0.06390	0.00334	0.00294	0.00008	60.9	1.8	64.7	8.7
42-09	303	0.56	0.00942	0.00011	0.06484	0.00354	0.00302	0.00006	60.6	1.1	62.2	4.3
42-10	270	1.13	0.00939	0.00012	0.05926	0.00268	0.00305	0.00005	60.5	1.1	52.7	4.1
42-11	324	0.57	0.00939	0.00011	0.05670	0.00509	0.00323	0.00011	60.0	1.2	47.5	8.2
42-12	333	0.56	0.00935	0.00014	0.05787	0.00488	0.00283	0.00008	60.4	1.1	61.3	6.9
42-13	262	0.67	0.00949	0.00013	0.06499	0.00396	0.00312	0.00009	61.0	1.2	59.4	5.7
42-14	253	0.49	0.00963	0.00011	0.06311	0.00343	0.00307	0.00011	62.0	1.2	61.4	5.5
42-15	296	0.62	0.00900	0.00011	0.05736	0.00379	0.00281	0.00012	58.2	1.1	58.3	4.6
42-16	225	0.56	0.00962	0.00020	0.06805	0.00668	0.00304	0.00011	62.0	1.1	66.5	5.8
42-17	376	0.63	0.00940	0.00006	0.05802	0.00200	0.00298	0.00005	60.6	1.5	57.4	8.3
42-18	371	0.57	0.00935	0.00013	0.07137	0.00720	0.00292	0.00009	60.3	0.9	71.6	3.6
42-19	263	0.57	0.00909	0.00009	0.06202	0.00330	0.00290	0.00009	58.5	1.2	60.2	7.4
42-20	230	0.52	0.00908	0.00012	0.05530	0.00306	0.00283	0.00009	58.3	1.0	56.4	4.8
42-21	377	0.63	0.00902	0.00012	0.06235	0.00345	0.00299	0.00007	57.8	1.1	56.0	4.6
42-22	195	0.44	0.00940	0.00016	0.07018	0.00550	0.00300	0.00012	60.4	1.1	67.7	4.6
42-23	209	0.48	0.00972	0.00013	0.06262	0.00363	0.00334	0.00010	62.2	1.3	54.4	6.3
42-24	475	0.71	0.00977	0.00012	0.06414	0.00329	0.00334	0.00008	62.4	1.2	52.6	4.4
42-25	260	0.65	0.00964	0.00008	0.06610	0.00278	0.00322	0.00008	61.8	1.1	58.2	5.0
42-26	250	0.52	0.00942	0.00010	0.06020	0.00294	0.00305	0.00007	60.5	1.0	57.0	4.4
42-27	740	0.72	0.00939	0.00008	0.06319	0.00170	0.00299	0.00005	60.6	1.0	61.2	3.9
42-28	262	0.53	0.01010	0.00011	0.06540	0.00284	0.00331	0.00008	64.9	1.0	60.7	3.8
42-29	233	0.48	0.00977	0.00011	0.06475	0.00307	0.00329	0.00008	62.6	1.1	57.8	3.7
42-30	223	0.56	0.00969	0.00010	0.08747	0.00493	0.00384	0.00014	61.2	1.1	62.2	3.8

式年龄为 66.7±6.4Ma，MSWD=8.1。辉钼矿模式年龄基本可代表多底沟矽卡岩型钼矿床（点）的形成时代，多底沟矽卡岩型钼矿床（点）是在 66.7±6.4Ma 左右形成的。

5.2 冈底斯带南缘陆陆碰撞早期成矿作用讨论

冈底斯带经历了复杂地质构造演化历史，在中新生代先后受雅鲁藏布江洋壳向南俯冲、洋壳消亡和期后的弧-陆碰撞及陆-陆碰撞作用，在冈底斯带南缘形成了与洋壳俯冲及陆陆碰撞有关的火山岩和侵入岩（潘桂棠等，2002；Ding *et al.*，2003，2005；Hou *et al.*，2004，2006，2007；Mo *et al.*，2005，2007；Zhu *et al.*，2008；Ji *et al.*，2009）。虽经多年工作，但目前对新特提斯洋最终消亡乃致印度板块与欧亚板块发生碰撞的时代仍有不同看法（Rowley，1998；Yin and Harrison，2000；Aitchison *et al.*，2007）。Lee and Lawver (1995) 提出，印度板块与欧亚板块在约 65Ma 时发生“软碰撞”，而在约 45Ma 时发生“硬碰撞”。莫宣学等（2003，2009）、Mo *et al.*（2007）提出两大陆在 70～65Ma 左右开始碰撞，经过约二十多个百万年，在 40Ma 左右完成两个大陆碰撞，新特提斯洋完全消失；侯增谦等（2006a，b，c，d）把西藏碰撞分为主碰撞（65～41Ma）、晚碰撞（40～26Ma）和后碰撞（25～0Ma）三期。总的来说，目前较多地质、地球物理及地球化学证据支持印度板块与欧亚板块在 70～65Ma 左右时发生碰撞。

甲龙铁矿床赋矿岩体锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄 61.1±0.4Ma、撒当赋金银矿（点）火山岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄 62.6±0.5Ma、多底沟钼矿（点）辉钼矿 Re-Os 年龄在 66.7±6.4Ma 左右。三个矿床成岩成矿时代和印度板块与欧亚板块开始碰撞时代（70～65Ma）相近，因此，这些矿床应是印度板块与欧亚板块碰撞早期形成的，是碰撞早期构造岩浆事件的产物。已有的工作表明查个勒铜铅锌矿床（高顺宝等，2012；王保弟等，2012）、亚贵拉铅锌钼多金属矿床（高一鸣等，2011；黄克贤等，2012）及恰功矽卡岩型铁矿床（李应栩

表 2 撒当金银矿床安山锆石 LA-ICP-MS 分析结果

Table 2 Zircon LA-ICP-MS data of the Sadang andesite associated with Au-Ag mineralization

测点号	U (×10⁻⁶)	Th/U	$^{206}Pb/^{238}U$	±1s. e.	$^{207}Pb/^{235}U$	±1s. e.	$^{208}Pb/^{232}Th$	±1s. e.	$^{206}Pb/^{238}U$ age (Ma)	±1s. e.	$^{207}Pb/^{235}U$ age (Ma)	±1s. e.	备注
44-01	36	1.17	0.00888	0.00038	0.17327	0.02230	0.00320	0.00023	55.7	0.8	131.3	3.9	剔除
44-02	32	1.18	0.00958	0.00040	0.09507	0.01190	0.00303	0.00021	61.8	2.7	88.7	25.7	
44-03	28	0.96	0.01023	0.00036	0.10061	0.01332	0.00377	0.00036	63.9	2.9	56.9	20.1	
44-04	545	0.58	0.00959	0.00008	0.06471	0.00209	0.00305	0.00005	61.8	2.9	63.1	30.1	
44-05	126	0.20	0.10803	0.00086	0.95682	0.02688	0.03671	0.00094	660.2	8.6	660.1	9.1	剔除
44-06	334	0.60	0.00996	0.00008	0.05894	0.00195	0.00331	0.00006	63.9	5.1	53.7	15.4	
44-07	192	0.41	0.00953	0.00012	0.06959	0.00426	0.00315	0.00012	61.2	1.0	65.4	6.7	
44-08	152	1.06	0.00994	0.00017	0.06705	0.00553	0.00319	0.00009	64.0	1.2	60.9	5.7	
44-09	245	0.58	0.00958	0.00008	0.06313	0.00269	0.00317	0.00007	61.5	1.4	57.6	8.9	
44-10	785	1.33	0.00918	0.00007	0.05813	0.00166	0.00288	0.00003	60.0	0.9	61.5	3.6	
44-11	256	0.55	0.01200	0.00024	0.28108	0.01995	0.01099	0.00080	64.8	1.0	40.7	6.9	
44-12	434	0.73	0.00964	0.00020	0.07251	0.00797	0.00345	0.00007	61.2	1.9	53.2	28.0	
44-13	341	0.52	0.00977	0.00010	0.06058	0.00290	0.00309	0.00008	62.9	1.5	59.4	8.9	
44-14	302	0.47	0.01003	0.00011	0.06972	0.00301	0.00324	0.00008	64.5	1.1	66.5	4.0	
44-15	144	0.85	0.00991	0.00011	0.06672	0.00433	0.00312	0.00008	64.0	1.1	65.6	4.1	
44-16	271	0.62	0.00969	0.00011	0.06060	0.00433	0.00307	0.00010	62.4	1.1	59.7	6.0	
44-17	645	0.95	0.00970	0.00008	0.06241	0.00150	0.00299	0.00004	63.1	1.1	68.3	5.8	
44-18	257	0.65	0.00973	0.00008	0.06708	0.00299	0.00299	0.00006	63.0	1.0	70.0	4.7	
44-19	297	0.93	0.00975	0.00007	0.06845	0.00262	0.00311	0.00005	63.0	1.0	65.3	4.5	
44-20	145	0.76	0.00950	0.00014	0.06860	0.00375	0.00314	0.00008	60.9	0.9	59.5	4.6	
44-21	192	0.63	0.00959	0.00012	0.06642	0.00382	0.00303	0.00011	61.8	1.2	65.0	5.9	
44-22	144	0.38	0.01001	0.00020	0.10251	0.01141	0.00624	0.00048	60.9	1.2	33.3	5.8	剔除
44-23	237	0.69	0.00998	0.00009	0.06919	0.00312	0.00343	0.00007	63.8	1.5	57.4	14.2	
44-24	117	0.56	0.00937	0.00035	0.06311	0.00823	0.00305	0.00021	60.1	1.0	57.1	4.2	
44-25	287	0.60	0.00981	0.00008	0.06365	0.00204	0.00316	0.00006	63.2	2.4	61.4	11.6	
44-26	302	0.61	0.00966	0.00009	0.06824	0.00323	0.00314	0.00007	62.2	1.0	65.0	4.1	
44-27	172	0.86	0.01004	0.00012	0.06141	0.00393	0.00323	0.00007	64.7	1.0	57.1	5.0	
44-28	398	0.97	0.00993	0.00011	0.06348	0.00294	0.00304	0.00007	64.5	1.2	68.4	7.0	
44-29	289	0.59	0.00968	0.00007	0.06509	0.00223	0.00307	0.00006	62.4	1.1	63.6	6.1	
44-30	78	0.44	0.00981	0.00016	0.08441	0.00628	0.00312	0.00016	63.1	1.0	81.5	3.4	
44-31	242	0.75	0.00971	0.00011	0.06786	0.00347	0.00317	0.00007	62.4	1.3	61.8	7.0	

表 3 多底沟矽卡岩型钼矿床(点)辉钼矿 Re-Os 年龄分析结果

Table 3 Re-Os data of molybdenite from the Duodigou skarn deposit

Sample	Re (×10⁻⁶)	^{187}Re (×10⁻⁶)	^{187}Os (×10⁻⁹)	模式年龄 (Ma)	ΔT (Ma)
LHY-1	1.40395	0.878873	1.00405	68.5	0.7
LHY-40	2.16881	1.35768	1.56723	69.2	3.3
LHY-80	2.41121	1.50942	1.61907	64.3	0.8

等, 2011)形成时代都在 65Ma 左右(表 4),与本文报道的甲龙铁矿、撒当金银矿床(点)、多底沟钼矿床(点)同位素年龄相近。这些矿床的形成也和印度板块与欧亚板块碰撞早期构造岩浆事件有关。

印度板块与欧亚板块碰撞早期与中酸性岩浆活动有关的矿床类型及元素组合较多,有矽卡岩型铁矿床、矽卡岩型铅锌钼矿床、斑岩-矽卡岩型铜(钼)铅锌矿床及火山岩型银金矿床;碰撞早期矿床分布面积较大,在空间上在冈底斯带中南部形成了一条东西向伸展近 800km、南北宽近 80km 的成矿带(图 4);碰撞早期岩浆活动也形成大型-特大型矿床,如亚贵拉铅锌钼矿床达特大型规模(黄克贤等, 2012),恰功铁矿达大型规模(王方国等, 2005)。这表明印度板块与欧亚板块碰撞早期在冈底斯中南部发生了与中酸性岩浆活动有关的较大规模成矿作用,形成一系列不同元素组合矿床。

冈底斯南部碰撞早期岩浆活动强烈,发育广泛分布的林子宗组火山岩及冈底斯花岗岩岩基(Zhou *et al.*, 2004; 董国臣, 2002; 莫宣学等, 2005; 潘桂棠等, 2006)。冈底斯带古新世-始新世侵入岩和火山岩多为钙碱性,富集大离子亲石元素(LILE) 和相对亏损高场强元素(HFSE),具岛弧岩浆岩的一般特征 (莫宣学等, 2003)。目前对碰撞早期岩浆形成

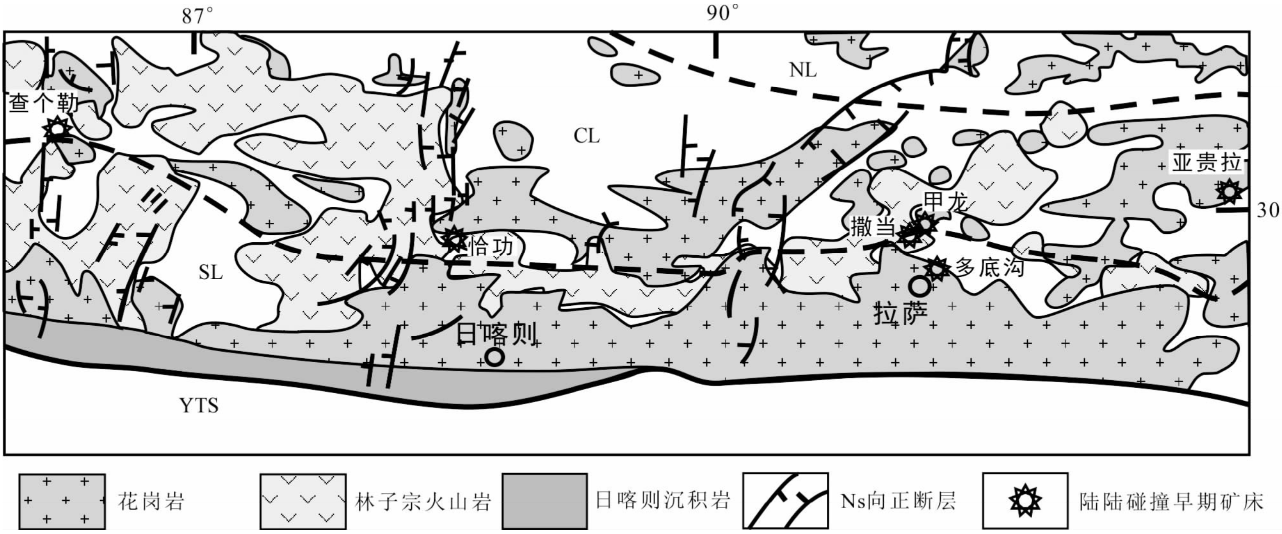

图4 冈底斯带南缘地质及碰撞早期矿床布简图(据 Zheng *et al.*, 2012 修改)

NL-北拉萨微地体；CL-中拉萨微地体；SL-南拉萨微地体；YTS-雅鲁藏布缝合带

Fig.4 Simplified geological map of the southern Gangdese ore belt, Tibet (modified after Zheng *et al.*, 2012)

NL-northern Lhasa subterrane; CL-central Lhasa subterrane; SL-southern Lhasa subterrane; YTS-Yarlung-Tsangpo suture

表4 印度-欧亚板块碰撞早期矿床

Table 4 The deposits formed in the early stage of India-Eurasia collision

矿床名称	矿化类型	赋矿岩体	成矿年代	资料来源
甲龙铁矿	矽卡岩型铁矿化	斑状黑云母二长花岗岩与地层接触带	61.1±0.4Ma(锆石 LA-ICP-MS)	本文
撒当金银矿床	火山岩型金银矿化	安山岩	略晚于62.6±0.5Ma(锆石 LA-ICP-MS)	
多底沟钼矿床	矽卡岩型钼矿化	角闪黑云母二长花岗岩	66.7±6.4Ma(辉钼矿 Re-Os 加权平均模式年龄)	
查个勒铜铅锌矿床	矽卡岩型铜铅锌矿化 斑岩型铜钼矿化	花岗斑岩与围岩接触带及构造破碎带 花岗斑岩	61.5±0.6Ma(辉钼矿 Re-Os 等时线) 62.1±1.1Ma(锆石 LA-ICP-MS) 63.3±0.9Ma(锆石 LA-ICP-MS)	高顺宝等,2012
亚贵拉铅锌钼矿床	矽卡岩型钼矿化,局部伴生铅锌矿化	石英斑岩与地层接触带的角岩、大理岩、矽卡岩等	65.0±1.9Ma(辉钼矿 Re-Os 等时线) 62.4±0.6Ma(锆石 LA-ICP-MS)	高一鸣等,2011; 黄克贤等,2012;
恰功铁矿	矽卡岩型铁矿化	二长花岗斑岩与灰岩的接触带	66.8±0.7Ma(锆石 LA-ICP-MS) 67.4±0.8Ma(锆石 LA-ICP-MS)	李应栩等,2011;

过程主要有下列两种观点:(1)向北俯冲雅江洋板块发生回转或断离,软流圈上涌,诱发拉萨地体下地壳发生部分熔融(Chung *et al.*, 2005; Ji *et al.*, 2009);(2)雅江洋板块向北俯冲过程中地幔楔发生部分熔融形成的基性岩浆底侵至加厚的下地壳并诱发其部分熔融(Mo *et al.*, 2005, 2007;董国臣等, 2006)。

主碰撞中晚期沙让斑岩钼矿床(辉钼矿 Re-Os 年龄:51.0±1.0Ma, Zhao *et al.*, 2012)成矿斑岩微量元素成特征表明成矿岩浆形成时冈底斯带中部地体没有明显加厚(侯增谦等, 2012)。主碰撞早期与中酸岩浆作用有关矿床主要位于冈底斯带中部北纬30°线附近(图4),和沙让斑岩钼矿床处于同一纬度区域,因此,主碰撞早期成矿岩浆形成应不是加厚下地壳熔融形成的。印度板块与欧亚板块在约70~65Ma时发生初始碰撞,因此,冈底斯中带碰撞早期中酸性岩体及有关矿床可能是向北俯冲的雅江洋板块在70~65Ma发生岛弧碰撞时受阻,俯冲洋壳由于推动力减弱而发生调整,俯冲洋壳前缘(可能位于北纬30°线附近)发生下沉(回转)、后退或断离,软流圈上涌导致冈底斯带中部下地壳物质熔融形成的岩浆,经结晶分异形成的。

冈底斯带中部碰撞早期中酸性岩浆活动强烈,现有工作表明,碰撞早期中酸性岩浆活动伴随一系列成矿作用,形成一系列不同元素组合的矿床。不同元素组合矿床成岩成矿过程有一定的差异,因此,冈底斯带在碰撞早期发生了复杂多样的岩浆成矿事件,有形成碰撞早期与中酸性岩浆活动有关矿床的良好成矿条件,今后应注意在冈底斯带中部地区碰撞早期中酸性岩浆作用有关矿床的找矿工作。

6 结论

(1)甲龙矽卡岩型铁矿斑状黑云母二长花岗岩的锆石LA-ICP-MS U-Pb 年龄为 61.1 ±0.4Ma,MSWD = 0.94;撒当赋金银床(点)矿化安山岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄为62.6 ±0.5Ma,MSWD = 1.51;多底沟钼矿床(点)辉钼矿 Re-Os 模式年龄为 64.3 ±0.8Ma ~69.2 ±3.3Ma,加权平均模式年龄为66.7 ±6.4Ma(MSWD = 8.1)。三个矿床(点)与印度-亚洲板块碰撞早期构造岩浆活动有关;

(2)冈底斯中部陆陆碰撞早期岩浆作用伴随大规模成矿作用,形成一系列与陆陆碰撞早期中酸性岩浆作用有关的矿床。这些矿床的形成可能与俯冲洋壳在 70 ~65Ma 发生岛弧碰撞时受阻,俯冲洋壳前缘由于推动力减弱下沉(回转)或断离诱发岩浆活动有关。

References

Aitchison JC, Ali JR and Davis AM. 2007. When and where did India and Asia collide? Journal of Geophysical Research, 112(B5): B05423, doi:10.1029/2006JB004706

Bureau of Geology and Mineral Resources of Xizang Autonomous Region (BGMRX). 1993. Regional Geology of Xizang (Tibet) Autonomous Region. Beijing: Geological Publishing House, 1 - 638 (in Chinese)

Chen L, Qin KZ, Li GM, Xiao B, Li JX, Jiang HZ, Chen JB, Zhao JX, Fan X, Han FJ, Huang SF and Ju YT. 2011. Geochemical characteristics and origin of skarn rocks in the Nuri Cu-Mo-W deposit, southern Tibet. Geology and Prospecting, 47(1): 78 - 88 (in Chinese with English abstract)

Chen YS, Wang CD and DU QA. 2011. Geological characteristics of the Mingze porphyry molybdenum deposit and prospecting prognosis in its adjacent area, Shannan, Tibet. Geology and Prospecting, 47(1): 31 - 35 (in Chinese with English abstract)

Chu MF, Chung SL, Song B, Liu DY, O'Reilly SY, Pearson NJ, Ji JQ and Wen DJ. 2006. Zircon U-Pb and Hf isotope constraints on the Mesozoic tectonics and crustal evolution of southern Tibet. Geology, 34(9): 745 - 748

Chung SL, Liu DY, Ji JQ, Chu MF, Lee HY, Wen DJ, Lo CH, Lee TY, Qian Q and Zhang Q. 2003. Adakites from continental collision zones: Melting of thickened lower crust beneath southern Tibet. Geology, 31(11): 1021 - 1024

Chung SL, Chu MF, Zhang YQ, Xie YW, Lo CH, Lee TY, Lan CY, Li XH, Zhang Q and Wang YZ. 2005. Tibetan tectonic evolution inferred from spatial and temporal variations in post-collisional magmatism. Earth-Science Reviews, 68(3 - 4): 173 - 196

Chung SL, Chu MF, Ji JQ, O'Reilly SY, Pearson NJ, Liu DY, Lee TY and Lo TH. 2009. The nature and timing of crustal thickening in Southern Tibet: Geochemical and zircon Hf isotopic constraints from postcollisional adakites. Tectonophysics, 477(1 - 2): 36 - 48

Ding L, Kapp P, Zhong DL and Deng WM. 2003. Cenozoic volcanism in Tibet: Evidence for a transition from oceanic to continental subduction. Journal of Petrology, 44(10): 1833 - 1865

Ding L, Kapp P and Wan XP. 2005. Paleocene-Eocene record of ophiolite obduction and initial India-Asia collision, south central Tibet. Tectonics, 24(3): 1 - 18

Dong GC. 2002. Linzizong volcanic rocks in Linzhou basin, Tibet and implications for India-Asia continental collision. Ph. D. Dissertation. Beijing: China University of Geosciences, 1 - 134 (in Chinese with English summary)

Dong GC, Mo XX, Zhao ZD, Zhu DC, Wang LL, Chen T and Li B. 2006. Magma mixing in middle part of Gangdise magma belt: Evidences from granitoid complex. Acta Petrologica Sinica, 22(4): 835 - 844 (in Chinese with English abstract)

Fan X, Chen L, Qin KZ, Xiao B, Li JX, Li QP, Chen YS, Chen JB, Zhao JX, Li GM, Huang SF and Ju YT. 2011. Characteristics of alteration and mineralization and chronology of the Mingze porphyry Mo deposit in the Shannan area of southern Tibet. Geology and Exploration, 47(1): 89 - 99 (in Chinese with English abstract)

Gao SB, Zheng YY, Yuan LM, Zhang Z, Qu WJ, Liu MY, Zheng HT, Zheng L and Zhu JH. 2012. Geochronology of magmatic intrusions and mineralization of Chagele copper-lead-zinc deposit in Tibet and its implications. Earth Science, 37(3): 507 - 514 (in Chinese with English abstract)

Gao YF, Hou ZQ, Kamber BS, Wei RH, Meng XJ and Zhao RS. 2007. Adakite-like porphyries from the southern Tibetan continental collision zones: Evidence for slab melt metasomatism. Contributions to Mineralogy and Petrology, 153(1): 105 - 120

Gao YF, Yang ZS, Santosh M, Hou ZQ, Wei RH and Tian SH. 2010. Adakitic rocks from slab melt-modified mantle sources in the continental collision zone of southern Tibet. Lithos, 119(3 - 4): 651 - 663

Gao YM, Chen YC, Tang JX, Li C, Li XF, Gao M and Cai ZC. 2011. Re-Os dating of molybdenite from the Yaguila porphyry molybdenum deposit in Gongbo'gyamda area, Tibet, and its geological significance. Geological Bulletin of China, 30(7): 1027 - 1036 (in Chinese with English abstract)

Harris AC, Allen CM, Bryan SE, Campbell IH, Holcombe RJ and Plain MJ. 2004. ELA-ICP-MS U-Pb zircon geochronology of regional volcanism hosting the Bajo de la Alumbrera Cu-Au deposit: Implications for porphyry-related mineralization. Mineralium Deposita, 39(1): 46 - 67

Huang KX, Zheng YC, Zhang S, Li W, Sun QZ, Li QG, Liang W, Fu Q and Hou ZQ. 2012. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating of two types of porphyry in the Yaguila mining area, Tibet. Acta Petrologica et Mineralogica, 31(3): 348 - 360 (in Chinese with English abstract)

Hou ZQ, Qu XM, Wang SX and Gao YF. 2003. Re-Os age for molybdenite from the Gangdese porphyry copper belt on Tibetan Plateau: Duration of the Cu mineralization and implication for geodynamic setting. Science in China (Series D), 33(7): 609 - 618 (in Chinese)

Hou ZQ, Gao YF, Qu XM, Rui ZY and Mo XX. 2004. Origin of adakitic intrusives generated during mid-Miocene east-west extension in Southern Tibet. Earth and Planetary Science Letters, 220(1 - 2): 139 - 155

Hou ZQ, Gao YF, Meng XJ, Qu XM and Huang W. 2004. Genesis of adakitic porphyry and tectonic controls on the Gangdese Miocene porphyry copper belt in the Tibetan orogen. Acta Petrologica Sinica, 20(2): 1 - 10 (in Chinese with English abstract)

Hou ZQ, Zeng PS, Gao YF, Du AD and Fu DM. 2006. Himalayan Cu-Mo-Au mineralization in the eastern Indo-Asian collision zone: Constraints from Re-Os dating of molybdenite. Mineralium Deposita, 41(1): 33 - 45

Hou ZQ, Mo XX, Yang ZM, Wang AJ, Pan GT, Qu XM and Nie FJ. 2006a. Metallogenesis in the collisional orogen of the Qinghai-Tibet Plateau: Tectonic setting, tempo-spatial distribution and ore deposit types. Geology in China, 33(2): 340 - 351 (in Chinese with English abstract)

Hou ZQ, Yang ZS, Xu WY, Mo XX, Ding L, Gao YF, Dong FL, Li GM, Qu XM, Li GM, Zhao ZD, Jiang SH, Meng XJ, Li ZQ, Qin KZ and Yang ZM. 2006b. Metallogenesis in Tibetan collisional orogenic belt: I. Mineralizationin main collisional orogenic setting. Mineral Deposits, 25(4): 337 - 358 (in Chinese with English abstract)

Hou ZQ, Tang GT, Wang AJ, Mo XX, Tian SH, Sun XM, Ding L, Wang EQ, Gao YF, Xie YL, Zeng PS, Qin KZ, Xu JF, Yang ZM, Yang ZS, Fei HC, Meng JX and Li ZQ. 2006c. Metallogenesis in

Tibetan collisional orogenic belt: II. Mineralization in late-collisional transformation setting. Mineral Deposits, 25(5): 521 – 543 (in Chinese with English abstract)

Hou ZQ, Qu XM, Yang ZS, Meng XJ, Li ZQ, Yang ZM, Zheng MP, Zheng YY, Nie FJ, Gao YF and Jiang SH. 2006d. Metallogenesis in Tibetan collisional orogenic belt: III. Mineralization in post-collision extension setting. Mineral Deposits, 25(6): 629 – 651 (in Chinese with English abstract)

Hou ZQ, Xie YL, Xu WY, Li YQ, Zhu XK, Khin Z, Beaudoin G, Rui ZY, Wei HA and Ciren L. 2007. Yulong deposit, eastern Tibet: A high-sulfidation Cu-Au porphyry copper deposit in the eastern Indo-Asian collision zone. International Geology Review, 49(3): 235 – 258

Hou ZQ, Yang ZM, Qu XM, M eng XJ, Li ZQ, Beaudoin G, Rui ZY, Gao YF and Zaw K. 2009. The Miocene Gangdese porphyry copper belt generated during post-collisional extension in the Tibetan Orogen. Ore Geology Reviews, 36(1 – 3): 25 – 51

Hou ZQ, Zheng YC, Yang ZM and Yang ZS. 2012. Metallogenesis of continental collision setting: Part IV. Gangdese Cenozoic porphyry Cu-Mo systems in Tibet. Mineral Deposits, 31(4): 647 – 670 (in Chinese with English abstract)

Ji WQ, Wu FY, Chung SL, Li JX and Liu CZ. 2009. Zircon U-Pb geochronology and Hf isotopic constraints on petrogenesis of the Gangdese batholith, southern Tibet. Chemical Geology, 262(3 – 4): 229 – 245

Lee TY and Lawver LA. 1995. Cenozoic plate reconstruction of Southeast Asia. Tectonophysics, 251(1 – 4): 85 – 138

Li GM and Rui ZY. 2004. Diagenetic and mineralization ages for the porphyry copper deposits in the Gangdise metallogenic belt, Southern Xizang. Geotectonica et Metallogenia, 28(2): 165 – 170 (in Chinese with English abstract)

Li GM, Qin KZ, Ding KS, Li JX, Wang SH, Jiang SY, Lin JD, Jiang HZ, Fang SY and Zhang XC. 2006. Geology and mineral assemblage of Tertiary skarn Cu-Au ± Mo deposits in the southeastern Gangdese arc: Implications for deep exploration. Acta Geologica Sinica, 80(9): 1407 – 1421 (in Chinese with English abstract)

Li GM, Duan ZM, Liu B, Zhang H, Dong SL and Zhang L. 2011. The discovery of Jurassic accretionary complexes in Duolong area, northern Bangong Co-Nujiang suture zone, Tibet, and its geologic significance. Geological Bulletin of China, 30(8): 1256 – 1260 (in Chinese with English abstract)

Li YX, Xie YL, Chen W, Tang YW, Li GM, Zhang L, Liu YF and Liu XM. 2011. U-Pb age and geochemical characteristics of zircon in monzogranite porphyry from Qiagong deposit, Tibet, and geological implication. Acta Petrologica Sinica, 27(7): 2023 – 2033 (in Chinese with English abstract)

Liang HY, Campbell IH, Allen C, Sun WD, Liu CQ, Yu HX, Xie YW and Zhang YQ. 2006. Zircon Ce^{4+}/Ce^{3+} ratios and ages for Yulong ore-bearing porphyries in eastern Tibet. Mineralium Deposita, 41(2): 152 – 159

Liang HY, Yu HX, Mo JH, Zeng T and Hu GQ. 2008. Study on the metallogenesis and resource perspective of the Gangdese ore deposit belt in Tibet. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 27(3): 289 – 293 (in Chinese with English abstract)

Lin W, Liang HY, Zhang YQ and Xie YW. 2004. Petrochemistry and SHRIMP U-Pb zircon age of the Chongjiang ore-bearing porphyry in the Gangdese porphyry copper belt. Geochimica, 33(6): 585 – 592 (in Chinese with English abstract)

Meng XJ, Hou ZQ, Gao YF, Huang W, Qu XM and Qu WJ. 2003. Development of porphyry copper-molybdenum-lead-zinc ore-forming system in East Gangdese belt, Tibet: Evidence from Re-Os age of molybdenite in Bangpu copper polymetallic deposit. Mineral Deposits, 22(3): 246 – 252 (in Chinese with English abstract)

Mo JH, Liang HY, Yu HX, Xie YW and Zhang YQ. 2006. Comparison of ELA-ICP-MS and SHRMP U-Pb zircon ages of the Chongjiang and Qulong ore-bearing porphyries in the Gangdese porphyry copper belt. Geotectonica et Metallogenia, 30(4): 504 – 509 (in Chinese with English abstract)

Mo JH, Liang HY, Yu HX, Chen Y and Sun WD. 2008. Zircon U-Pb age of biotite hornblende monzonitic granite for Chongmuda Cu-Au (Mo) deposit in Gangdese belt, Xizang, China and its implications. Geochimica, 37(3): 206 – 212 (in Chinese with English abstract)

Mo XX, Zhao ZD, Deng JF, Dong GC, Zhou S, Guo TY, Zhang SQ and Wang LL. 2003. Response of volcanism to the India-Asia collision. Earth Science Frontiers, 10(3): 135 – 148 (in Chinese with English abstract)

Mo XX, Dong GC, Zhao ZD, Guo TY, Wang LL and Chen T. 2005. Timing of magma mixing in the Gangdisê magmatic belt during the India-Asia collision: Zircon SHIRMP U-Pb dating. Acta Geologica Sinica, 79(1): 66 – 76

Mo XX, Dong GC, Zhao ZD, Zhou S, Wang LL, Qiu RZ and Zhang FQ. 2005. Spatial and temporal distribution and characteristics of granitoids in the Gangdese, Tibet and implication for crustal growth and evolution. Geological Journal of China Universities, 11(3): 281 – 290 (in Chinese with English abstract)

Mo XX, Hou ZQ, Niu YL, Dong GC, Qu XM, Zhao ZD and Yang ZM. 2007. Mantle contributions to crust al thickening in South Tibet in response to the India-Asia collision. Lithos, 96(1 – 2): 225 – 242

Mo XX, Zhao ZD, Zhou S, Dong GC and Liao ZL. 2007. On the timing of India-Asia continental collision. Geological Bulletin of China, 26(10): 1240 – 1244 (in Chinese with English abstract)

Mo XX, Zhao ZD, Zhu ZD, Yu XH, Dong GC and Zhou S. 2009. On the lithosphere of Indo-Asia collision zone in southern Tibet: Petrological and geochemical constraints. Earth Science, 34(1): 17 – 27 (in Chinese with English abstract)

Pan GT, Li XZ, Wang LQ, Ding J and Chen ZL. 2002. Preliminary division of tectonic units of the Qinghai-Tibet Plateau and its adjacent regions. Geological Bulletin of China, 21(11): 701 – 707 (in Chinese)

Pan GT, Mo XX, Hou ZQ, Zhu DC, Wang LQ, Li GM, Zhao ZD, Geng QR and Liao ZL. 2006. Spatial-temporal framework of the Gangdese Oregenic belt and its evolution. Acta Petrologica Sinica, 22(3): 521 – 533 (in Chinese with English abstract)

Qu XM, Hou ZQ and Li YG. 2004. Melt components derived from a subducted slab in late orogenic ore-bearing porphyries in the Gangdese copper belt, southern Tibetan Plateau. Lithos, 74(3 – 4): 131 – 148

Rowley DB. 1998. Minimum age of initiation of collision between India and Asia north of Everest based on the subsidence history of the Zhepure Mountain section. The Journal of Geology, 106(2): 229 – 235

Rui ZY, Hou ZQ, Qu XM, Zhang LS, Wang LS and Liu YL. 2003. Metallogenetic epoch of Gangdese porphyry copper belt and uplift of Qinghai-Tibet Plateau. Mineral Deposits, 22(3): 217 – 224 (in Chinese with English abstract)

Shen JJ, Papanastassiou DA and Wasserburg GJ. 1996. Precise Re-Os determinations and systematics of iron meteorites. Geochimica et Cosmochimica Acta, 60(15): 2887 – 2900

Smoliar MI, Walker RJ and Morgan JW. 1996. Re-Os ages of Group IIA, IIIA, IVA, and IVB iron meteorites. Science, 271(5252): 1099 – 1102

Sun YL, Xu P, Li J, He K, Chu ZY and Wang CY. 2010. A practical method for determination of molybdenite Re-Os age by inductively coupled plasma-mass spectrometry combined with Cariustube-HNO_3 digestion. Analytical Methods, 2(5): 575 – 581

Tang JX, Deng SL, Zheng WB, Ying LJ, Wang XW, Zhong KH, Qin ZP, Ding F, Li FJ, Tang XQ, Zhong YF and Peng HJ. 2011. An exploration model for Jiama copper polymetallic deposit in Maizhokunggar County, Tibet. Mineral Deposits, 30(2): 179 – 196 (in Chinese with English abstract)

Wang BD, Guo L, Wang LQ, Li B, Huang HX, Chen FQ, Duan ZM and Zeng QG. 2012. Geochronology and petrogenesis of the ore-bearing pluton in Chagele deposit in middle of the Gangdese metallogenic belt. Acta Petrologica Sinica, 28(5): 1647 – 1662 (in Chinese with English abstract)

Wang FG, Li GM and Lin FC. 2005. Ore potential of skarn-type ore

deposit in the Gangdise metallogenic belt, Tibet. Geological Bulletin of China, 24(4): 378-385 (in Chinese with English abstract)
Wu J, Liang HY, Huang WT, Wang CL, Sun WD, Sun YL, Li J, Mo JH and Wang XZ. 2012. Indosinian isotope ages of plutons and deposits in southwestern Miaoershan-Yuechengling, northeastern Guangxi and implications on Indosinian mineralization in South China. Chinese Science Bulletin, 57(9): 1024-1035
Xu WC, Zhang HF, Guo L and Yuan HL. 2010. Miocene high Sr/Y magmatism, South Tibet: Product of partial melting of subducted Indian continental crust and its tectonic implication. Lithos, 114(3-4): 293-306
Yan XY, Huang SF and Du AD. 2010. Re-Os ages of large Tungsten, copper and molybdenum deposit in the Zetang. Acta Geologica Sinica, 84(3): 398-406 (in Chinese with English abstract)
Yang Y, Luo TY, Huang ZL, Yang ZS, Tian SH and Qin ZK. 2010. Sulfur and lead isotope compositions of the Narusongduo silver zinc-lead deposit in Tibet: Implications for the sources of plutons and metals in the deposit. Acta Mineralogica Sinica, 30(3): 311-318 (in Chinese with English abstract)
Yang ZM, Hou ZQ, Song YC, Li ZQ, Xia DX and Pan FC. 2008. Qulong superlarge porphyry Cu deposit in Tibet: Geology, alteration and mineralization. Mineral Deposits, 27(3): 279-318 (in Chinese with English abstract)
Yang ZM, Hou ZQ, White NC, Chang ZS, Li ZQ and Song YC. 2009. Geology of the post-collisional porphyry copper-molybdenum deposit at Qulong, Tibet. Ore Geology Reviews, 36(1-3): 133-159
Yin A and Harrison TM. 2000. Geologic evolution of the Himalayan-Tibetan orogen. Annual Reviews of Earth and Planetary Sciences, 28: 211-280
Zhang S, Zheng YC, Huang KX, Li W, Sun QZ, Li QY, Fu Q, Liang W and Hou ZQ. 2012. Re-Os dating of molybdenite from Nuri Cu-W-Mo deposit and its geological significance. Mineral Deposits, 31(2): 337-346 (in Chinese with English abstract)
Zhao JX, Qin KZ, Li GM, Li JX, Xiao B and Chen L. 2012. Geochemistry and petrogenesis of granitoids at Sharang Eocene porphyry Mo deposit in the main-stage of India-Asia continental collision, northern Gangdese, Tibet. Resource Geology, 62(1): 84-98
Zheng YC, Hou ZQ, Li QY, Sun QZ, Liang W, Fu Q, Li W and Huang KX. 2012. Orogin of Late Oligocene adakitic intrusives in the southeastern Lhasa terrane: Evidence from in situ zircon U-Pb dating, Hf-O isotopes, and whole-rock geochemistry. Lithos, 148: 296-311
Zheng YY, Zhang GY, Xu RK, Gao SB, Pang YC, Cao L, Du AD and Shi YR. 2007. Age limit of ore-forming and rock-forming in Zhuruo porphyry copper deposit, Gangdese, Tibet. Chinese Science Bulletin, 52(21): 2542-2548 (in Chinese)
Zhou S, Mo XX, Dong GC, Zhao ZD, Qiu RZ, Wang LL and Guo TY. 2004. $^{40}Ar/^{39}Ar$ geochronology of Cenozoic Linzizong volcanic rocks from Linzhou basin, Tibet, China, and their geological implications. Chinese Science Bulletin, 49(18): 1970-1979
Zhu DC, Pan GT and Chung SL. 2008. SHRIMP zircon age and geochemical constraints on the origin of Lower Jurassic volcanic rocks from the Yeba Formation, southern Gangdese, South Tibet. International Geology Review, 50(5): 442-471

附中文参考文献

陈雷，秦克章，李光明，肖波，李金祥，江化寨，陈金标，赵俊兴，范新，韩逢杰，黄树峰，琚宜太. 2011. 西藏山南努日铜钼钨矿床矽卡岩地球化学特征及成因. 地质与勘探，47(1)：78-88
陈玉水，王成东，杜庆安. 2011. 西藏山南明则矿区斑岩型钼矿地质特征及外围找矿预测. 地质与勘探，47(1)：31-35
董国臣. 2002. 西藏林周盆地林子宗火山岩及其所含的印度-亚洲碰撞信息. 博士学位论文. 北京：中国地质大学，1-134
董国臣，莫宣学，赵志丹，朱弟成，王亮亮，陈涛，李冰. 2006. 冈底斯岩浆带中段岩浆混合作用：来自花岗杂岩的证据. 岩石学报，22(4)：835-844
范新，陈雷，秦克章，肖波，李金祥，李秋平，陈玉水，陈金标，赵俊兴，李光明，黄树峰，琚宜太. 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. 地质与勘探，47(1)：89-99
高顺宝，郑有业，田立明，张众，屈文俊，刘敏院，郑海涛，郑磊，朱继华. 2012. 西藏查个勒铜铅锌矿成岩成矿时代及意义. 地球科学，37(3)：507-514
高一鸣，陈毓川，唐菊兴，李超，李新法，高明，蔡志超. 2011. 西藏工布江达地区亚贵拉铅锌钼矿床辉钼矿 Re-Os 测年及其地质意义. 地质通报，30(7)：1027-1036
黄克贤，郑远川，张松，李为，孙清钟，李秋耘，梁维，付强，侯增谦. 2012. 西藏亚贵拉矿区两期岩体 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年及地质意义. 岩石矿物学杂志，31(3)：348-360
侯增谦，曲晓明，王淑贤，高永丰，杜安道，黄卫. 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. 中国科学(D辑)，33(7)：609-618
侯增谦，高永丰，孟祥金，曲晓明，黄卫. 2004. 西藏冈底斯中新世斑岩铜矿带：埃达克质斑岩成因与构造控制. 岩石学报，20(2)：1-10
侯增谦，莫宣学，杨志明，王安建，潘桂棠，曲晓明，聂凤军. 2006a. 青藏高原碰撞造山带成矿作用：构造背景、时空分布和主要类型. 中国地质，33(2)：340-351
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，李光明，赵志丹，江思宏，孟祥金，李振清，秦克章，杨志明. 2006b. 青藏高原碰撞造山带：I. 主碰撞造山成矿作用. 矿床地质，25(4)：337-358
侯增谦，潘桂棠，王安建，莫宣学，田世洪，孙晓明，丁林，王二七，高永丰，谢玉玲，曾普胜，秦克章，许继峰，曲晓明，杨志明，杨竹森，费红彩，孟祥金，李振清. 2006c. 青藏高原碰撞造山带：II. 晚碰撞转换成矿作用. 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. 2006d. 青藏高原碰撞造山带：III. 后碰撞伸展成矿作用. 矿床地质，25(6)：629-651
侯增谦，郑远川，杨志明，杨竹森. 2012. 大陆碰撞成矿作用：I. 冈底斯新生代斑岩成矿系统. 矿床地质，31(4)：647-670
李光明，芮宗瑶. 2004. 西藏冈底斯成矿带斑岩铜矿的成岩成矿年龄. 大地构造与成矿学，28(2)：165-170
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. 2006. 冈底斯东段南部第三纪夕卡岩型 Cu-Au-Mo 矿床地质特征、矿物组合及其深部找矿意义. 地质学报，80(9)：1407-1421
李光明，段志明，刘波，张晖，董随亮，张丽. 2011. 西藏班公湖-怒江结合带北缘多龙地区侏罗纪增生杂岩的特征及意义. 地质通报，30(8)：1256-1260
李应栩，谢玉玲，陈伟，唐燕文，李光明，张丽，刘云飞，柳小明. 2011. 西藏恰功铁矿二长花岗斑岩锆石的 U-Pb 年代学与地球化学特征及意义. 岩石学报，27(7)：2023-2033
梁华英，喻亨祥，莫济海，曾提，胡光黔. 2008. 西藏冈底斯矿带成矿作用及远景分析. 矿物岩石地球化学通报，27(3)：289-293

林武，梁华英，张玉泉，谢应雯. 2004. 冈底斯铜矿带冲江含矿斑岩的岩石化学及锆石 SHRIMP 年龄特征. 地球化学，33(6)：585－592

孟祥金，侯增谦，高永丰，黄卫，曲晓明，屈文俊. 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. 矿床地质，22(3)：246－252

莫济海，梁华英，喻亨祥，谢应雯，张玉泉. 2006. 冈底斯斑岩铜矿带冲江及驱龙含矿斑岩体锆石 ELA-ICP-MS 及 SHRMP 定年对比研究. 大地构造与成矿学，30(4)：504－509

莫济海，梁华英，喻亨祥，陈勇，孙卫东. 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. 地球化学，37(3)：206－212

莫宣学，赵志丹，邓晋富，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. 地学前缘，10(3)：135－148

莫宣学，董国成，赵志丹，周肃，王亮亮，邱瑞照，张风琴. 2005. 西藏冈底斯带花岗岩的空间分布特征及地壳生长演化信息. 高校地质学报，11(3)：281－290

莫宣学，赵志丹，周肃，董国臣，廖忠礼. 2007. 印度-亚洲大陆碰撞的时限. 地质通报，26(10)：1240－1244

莫宣学，赵志丹，朱弟成，喻学惠，董国臣，周肃. 2009. 西藏南部印度-亚洲碰撞带岩石圈：岩石学-地球化学约束. 地球科学，34(1)：17－27

潘桂棠，李兴振，王立全，丁俊，陈智梁. 2002. 青藏高原及邻区大地构造单元初步划分. 地质通报，21(11)：701－707

潘桂棠，莫宣学，侯增谦，朱弟成，王立全，李光明，赵志丹，耿全如，廖忠礼. 2006. 冈底斯造山带的时空结构及演化. 岩石学报，22(3)：521－533

芮宗瑶，侯增谦，曲晓明，张立生，王龙生，刘玉琳. 2003. 冈底斯斑岩铜矿成矿时代及青藏高原隆升. 矿床地质，22(3)：217－224

唐菊兴，邓世林，郑文宝，应立娟，汪雄武，钟康惠，秦志鹏，丁枫，黎枫佶，唐晓倩，钟裕峰，彭慧娟. 2011. 西藏墨竹工卡县甲玛铜多金属矿床勘查模型. 矿床地质，30(2)：179－196

王保弟，郭琳，王立全，李冰，黄瀚霄，陈富琦，段志明，曾庆高. 2012. 中冈底斯成矿带查个勒矿床含矿岩体的年代学及成因. 岩石学报，28(5)：1647－1662

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

西藏自治区地质矿产局. 1993. 西藏自治区区域地质志. 北京：地质出版社，1－638

闫学义，黄树峰，杜安道. 2010. 冈底斯泽当大型钨铜钼矿 Re-Os 年龄及陆缘走滑转换成矿作用. 地质学报，84(3)：398－406

杨勇，罗泰义，黄智龙，杨竹森，田世洪，钱志宽. 2010. 西藏纳如松多银铅矿 S、Pb 同位素组成：对成矿物质来源的指示. 矿物学报，30(3)：311－318

杨志明，侯增谦，宋玉财，李振清，夏代详，潘凤雏. 2008. 西藏驱龙超大型斑岩铜矿床：地质、蚀变与成矿. 矿床地质，27(3)：279－318

张松，郑远川，黄克贤，李为，孙清钟，李秋耘，付强，梁维，侯增谦. 2012. 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. 矿床地质，31(2)：337－346

郑有业，张刚阳，许荣科，高顺宝，庞迎春，曹亮，杜安道，石玉若. 2007. 西藏冈底斯朱诺斑岩铜矿床成岩成矿时代约束. 科学通报，52(21)：2542－2548

周肃，莫宣学，董国臣，赵志丹，邱瑞照，王亮亮，郭铁鹰. 2004. 西藏林周盆地林子宗火山岩 $^{40}Ar/^{39}Ar$ 年代格架. 科学通报，49(20)：2095－2103