

# 西藏龙马拉 Cu-Fe-Pb-Zn 多金属矿床金云母 Ar-Ar 定年及其地球动力学意义

付 强<sup>1,2</sup> 杨竹森<sup>3</sup>, 郑远川<sup>4</sup>, 黄克贤<sup>4</sup>, 段连峰<sup>4</sup>

(1. 中国地质科学院 地质研究所, 北京 100037; 2. 北京大学 地球与空间科学学院, 北京 100871;  
3. 中国地质科学院 矿产资源研究所, 北京 100037; 4. 中国地质大学 地球科学与资源学院, 北京 100083)

**摘要:** 冈底斯北缘 Pb-Zn-Ag-Cu-Fe 多金属成矿带内发育有大量的矽卡岩矿床。本文研究的龙马拉矿床便是位于该成矿带东侧典型的层控式矽卡岩型 Cu-Fe-Pb-Zn 多金属矿床。对矿床成矿时代的精确厘定, 是理解矿床成因机制和冈底斯北缘大规模矽卡岩型成矿地质背景的关键。本文首先对龙马拉矿床中与磁铁矿共生的蚀变云母进行了电子探针分析, 结果显示这些云母为金云母, 金云母的 Ar-Ar 同位素测年显示, 其 Ar-Ar 坪年龄为  $56.32 \pm 0.48$  Ma, 等时线年龄为  $55.58 \pm 0.93$  Ma。根据金云母与矿石矿物的共生关系可知, 该年龄应代表龙马拉多金属矿床的成矿时代。综合前人的研究结果, 认为龙马拉多金属矿床形成于印-亚陆陆碰撞的主碰撞汇聚成矿阶段, 新特提斯洋壳板片的回卷很可能是该矿床形成的深部动力学机制。

**关键词:** Ar-Ar 测年; 电子探针; 龙马拉矿床; 地球动力学背景; 西藏

中图分类号: P578.959; P597+.3; P618.4 文献标识码: A 文章编号: 1000-6524(2014)02-0283-11

## Ar-Ar age of phlogopite from the Longmala copper-iron-lead-zinc deposit in Tibet and its geodynamic significance

FU Qiang<sup>1,2</sup>, YANG Zhu-sen<sup>3</sup>, ZHENG Yuan-chuan<sup>4</sup>, HUANG Ke-xian<sup>4</sup> and DUAN Lian-feng<sup>4</sup>

(1. Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2. School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China; 3. Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 4. School of Earth Science and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

**Abstract:** The north Gangdise Pb-Zn-Ag-Cu-Fe belt is one of the most important metallogenic belt in the Tibetan collisional orogenic belt. The Longmala deposit is located in the eastern part of the Gangdise metallogenetic belt. Constraining the timing of mineralization of this deposit is crucial to the better understanding of the genesis of the deposit and the deep geodynamic processes which controlled the large-scale mineralization of this area. The electron microprobe analyses reveal that the altered mica is phlogopite. This paper presents the Ar-Ar dating results for magnetite mineralization conducted on phlogopites collected from the Longmala deposit. Phlogopite from the Longmala deposit yielded a well-defined  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  plateau age of  $56.32 \pm 0.48$  Ma and an isochron age of  $55.58 \pm 0.93$  Ma. These ages suggest that the Longmala deposit was developed in the period of main collisional orogenic setting in Tibetan orogenic belt. Combined with the former research and the data of regional geology, the authors hold that the deep geodynamic process which controlled the formation of this deposit

收稿日期: 2013-03-30; 修订日期: 2013-11-02

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973计划)(2011CB403100); IGCP/SIDA600; 国家自然科学青年基金(41102033); 中国地质调查局地质调查项目(1212011121253, 12120113037900)

作者简介: 付 强(1987-), 男, 在读博士研究生, 矿物学、岩石学、矿床学专业, E-mail: fuqiang\_cugb@163.com; 通讯作者: 郑远川(1982-), 男, 博士, 主要从事矿床学、岩石学、矿物学研究, E-mail: zheng\_yc@126.com。

was the rollback of the Neo-Tethys slab.

**Key words:** phlogopite Ar-Ar age; electron microprobe; Longmala deposit; geodynamic setting; Tibet

随着新特提斯洋的闭合,从古新世初期开始印度板块便与欧亚板块发生强烈的陆陆碰撞(Allegre *et al.*, 1984; Yin and Harrison, 2000; Chung *et al.*, 2005)。在印-亚板块碰撞过程中,青藏高原内发生强烈的火山活动、岩浆侵入及独特的成矿作用(侯增谦等,2003,2006a,2006b,2006c,2006d; Hou and Cook, 2009; Hou *et al.*, 2012; Zheng *et al.*, 2012a, 2012b, 2014)。近十年的研究与勘探表明,在冈底斯斑岩铜矿北侧,发育了一条极具规模的Cu-Mo-Fe-Pb-Zn-Ag多金属成矿带(孟祥金等,2003;杜欣等,2004;侯增谦等,2006b;杨竹森等,2006;郑有业等,2007;张林奎等,2008;唐菊兴等,2009;高一鸣等,2009;2011;王立强等,2010;黄克贤等,2012;郑远川,2012),其中蒙亚阿、亚贵拉、洞中拉、沙让、恰功等矿床均已达到大型规模。按照矿床的金属组合可进一步分为Pb-Zn(Ag)多金属矿床、Fe-Cu矿床及Mo矿床。其中,亚贵拉Pb-Zn-Ag矿床的形成可能经历了白垩纪的成矿作用(锆石U-Pb年龄 $132.1\pm1$  Ma),但其主成矿期无疑发生于古新世( $62.4\pm0.6$  Ma)(黄克贤等,2012);纳如松多Pb-Zn矿床形成于古新世( $57.81\pm0.66$  Ma);恰功铁矿形成于白垩纪晚期( $67.8\pm0.7$  Ma)(李应栩等,2011);加拉普铁矿形成于古新世( $63.4\pm0.5$  Ma)(付强等,2013);加多捕勒Fe-Cu矿床同样形成于始新世( $50.9\pm1.8$  Ma,于玉帅等,2011)。成矿带内的Pb-Zn矿床与Fe-Cu矿床相似的成矿时代,表明两类矿床具有非常紧密的成因联系。然而,前人对冈底斯北缘多金属成矿带内各矿床的成矿时代研究,大多数利用矿区岩体的锆石U-Pb年龄间接限定,在一定程度上可能会产生一定误差。故本文通过对龙马拉矿床中与磁铁矿共生的蚀变金云母进行Ar-Ar同位素定年,直接限定其形成时代。

目前,付强等(2013)通过对西藏加拉普矽卡岩型铁矿床的研究,认为在冈底斯北缘因印-亚陆陆碰撞的主碰撞汇聚成矿作用形成了大量的矽卡岩矿床,其中Fe-Cu矿床的形成主要受幔源物质的控制,而Pb-Zn矿床主要体现了壳源物质的贡献(郑远川,2012)。但是Fe-Cu矿床与Pb-Zn矿床是两个相对独立的成矿系统,还是由同一成矿地质背景控制?现有的研究资料尚不能解决这一问题。龙马拉Cu-

Fe-Pb-Zn矿床作为冈底斯北缘Cu-Mo-Fe-Pb-Zn-Ag多金属成矿带内的一个重要组成部分,是使成矿带内Pb-Zn矿床与Fe-Cu矿床具有成因联系的重要纽带。然而,目前龙马拉矿床仅有少量关于S、Pb同位素的报道资料(付强等,2012),本文在详细描述龙马拉矿床地质情况的前提下,通过对蚀变金云母的Ar-Ar同位素定年工作,精确厘定了矿床的形成时代。在此基础上,探讨了控制成矿作用的深部动力学过程,希望可以进一步促进对冈底斯北缘多金属成矿带内矽卡岩型Pb-Zn矿床与Fe-Cu矿床的认识。

## 1 区域地质背景

龙马拉Cu-Fe-Pb-Zn多金属矿床位于冈底斯岩浆弧北侧,地处念青唐古拉山脉南侧支脉北坡,大地构造位置隶属于冈底斯-念青唐古拉板片中部的隆格尔-念青唐古拉中生代岛链带东段(潘桂棠等,2006),位于冈底斯北成矿带东部,门巴-多其木断裂北侧(图1)。

区内岩浆活动强烈,其成岩时代主要集中于侏罗纪—始新世。侏罗纪—白垩纪岩浆活动主要以形成中酸性的闪长岩、花岗闪长岩、花岗斑岩为特征,并与新特提斯洋持续向北俯冲相关(莫宣学等,2005;纪伟强等,2009)。区内古新世—始新世岩浆则以酸性岩为主并与印-亚陆陆初始强烈碰撞有关(莫宣学等,2003;侯增谦等,2006e)。区内分布有大量火山岩地层,古新世—始新世陆相林子宗火山岩几乎覆盖全区,它们角度不整合于白垩纪或更古老地质体之上。林子宗火山岩总体属钙碱性系列,但自火山岩系底部至顶部,岩石系列由钙碱性系列经高钾钙碱性系列向钾玄岩系列演变。底部典中组火山岩以安山岩系为主,中部年波组以英安岩系为主,而顶部帕那组则以流纹岩为主(莫宣学等,2003,2005;周肃等,2004;董国臣等,2005)。

区域地层在奥陶系、石炭系、三叠系为浅海相碎屑沉积序列,主要分布于冈底斯北侧。晚石炭世—早二叠世盖层为古特提斯活动边缘海沉积,以上石炭统诺错组和下二叠统洛巴堆组火山碎屑沉积岩及碳酸盐岩为典型代表。晚侏罗世—早白垩世火山岩系主要分布于桑日—谢通门一带。晚白垩世火山岩

分布广泛, 夹于海相碳酸盐岩和碎屑岩之中。第三系以碰撞期火山岩为主, 广泛分布在林周-狮泉河地区(丁林等, 2003)。区域构造线总体呈近东西向, 以线性复式褶皱和压扭性逆冲推覆构造为主要特征(图1)。沿冈底斯花岗岩基北缘发育了旁多-措勤逆冲推覆系, 这套系统可能是新生代大陆碰撞造山和地壳强烈缩短的产物(侯增谦等, 2006a; 孟祥金等, 2007)。东部由中生带地层组成的墨竹工卡复式向斜构成近东西向的构造格架。

## 2 矿区地质

矿区内地层主要为上二叠统列龙沟组( $P_2l$ )黑色中-厚层状灰岩、杂砂岩夹粉砂岩、砾岩, 下二叠统洛巴堆组灰白色薄-中层状白云质灰岩、乌鲁龙组大理岩, 石炭系旁多群黑色板岩夹砂岩、石英晶屑岩以及第四系冰碛层。矿区范围内与成矿关系密切的地层为下二叠统洛巴堆组灰岩及乌鲁龙组大

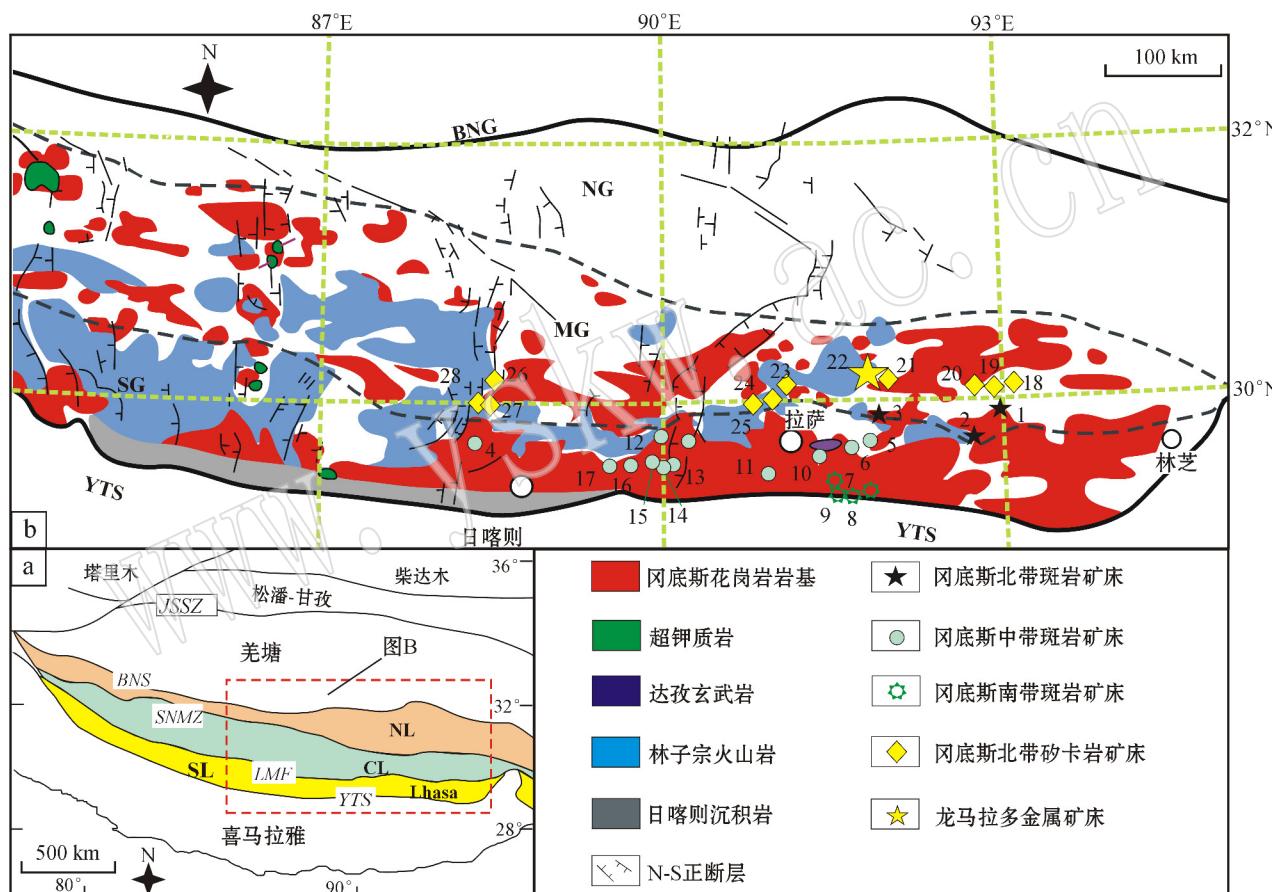


图 1 青藏高原简要构造格架图[a, 据 Zhu 等(2011)]和冈底斯中段地质简图及矿床分布[b, 据侯增谦等(2008)、Zhu 等(2011)和 Zheng 等(2012a)]

Fig. 1 Geological sketch map of Tibetan Plateau (a, after Zhu et al., 2011) and tectonic outline and distribution of deposits in the Gangdise belt (b, after Hou Zengqian et al., 2008; Zhu et al., 2011; Zheng et al., 2012a)

NG—北冈底斯; MG—中冈底斯; SG—南冈底斯; JSSZ—金沙江缝合带; BNS—班公湖-怒江缝合带; SNMZ—狮泉河-纳木错蛇绿混杂岩带; LMF—落巴堆-米拉山断裂带; YTS—雅鲁藏布江缝合带: 1—沙让; 2—汤不拉; 3—邦浦; 4—朱诺; 5—甲马; 6—驱龙; 7—努日; 8—冲木达; 9—明则; 10—拉亢俄; 11—南木; 12—白容; 13—厅宫; 14—岗讲; 15—冲江; 16—南木林; 17—吉如; 18—亚贵拉; 19—洞中松多; 20—洞中拉; 21—蒙亚啊; 22—龙马拉; 23—勒青拉; 24—加拉普; 25—热玛; 26—纳如松多; 27—加多捕勒; 28—恰功  
NG—Northern Gangdise; CL—Middle Gangdise; SL—Southern Gangdise; JSSZ—Jinsha River suture zone; BNS—Banggong-Nujiang River suture zone; SNMZ—Shiquan River-Nam Co ophiolite mélange zone; LMF—Luobadui-Mila Mountain Fault; YTS—Yarlung Zangbo Suture Zone; 1—Sharang; 2—Tangbula; 3—Bangpu; 4—Zhunuo; 5—Jiamu; 6—Qulong; 7—Nuri; 8—Chongmuda; 9—Mingze; 10—Lakange; 11—Nanmu; 12—Bairong; 13—Tinggong; 14—Gangjiang; 15—Chongjiang; 16—Nanmulin; 17—Jiru; 18—Yaguila; 19—Dongzhongsongduo; 20—Dongzhongla; 21—Mengyaa; 22—Longmala; 23—Leqingla; 24—Jialapu; 25—Rema; 26—Narusongduo; 27—Jiaoduobule; 28—Qiagong

理岩,地层倾向南东,倾角 $60^{\circ}\sim75^{\circ}$ 。矿区尺度内未发现有侵入岩体露头。

矿区发育有多个顺层产于大理岩地层中的矿体,其中1号、2号为磁铁矿矿体,4号铅锌矿体为龙马拉矿床的主矿体(图2)。矿体与围岩无明显界限,呈渐变过渡关系,由内到外依次为矿体、矽卡岩、矽卡岩化大理岩、大理岩,最后过渡到灰岩地层(图3a)。矿体内矿石主要呈块状构造、似条带状构造、团斑状构造及浸染状构造,不同构造的矿石在金属矿物组合上存在一定的差异。块状矿石基本为磁铁矿,主要产于石榴子石化、透辉石化矽卡岩带内;条带状矿石以磁铁矿为主,其次为黄铜矿,方铅矿、闪锌矿含量较少,通过显微镜下观察,发现互层的条带中不含地层组分,而是共生的磁铁矿、黄铜矿、方铅矿等矿石矿物与石榴子石矽卡岩相间定向排列(图3c、3g);团斑状及浸染状矿石主要为呈共生关系的方铅矿、闪锌矿、黄铜矿(图3b),矿石发生强烈的矽

卡岩化,部分团斑状矿石被后期方解石、石英脉所穿切(图3e、3f)。块状矿石和条带状矿石主要分布于层状矿体内侧,而由矿体向围岩方向块状矿石逐渐过渡为团斑状、浸染状以及脉状矿石,其内矿石矿物的含量也逐渐减少。在垂直剖面上,矿石矿物成分存在明显的分带现象,深部矿石主要以磁铁矿和黄铜矿为主,而越向浅部,矿石中磁铁矿和黄铜矿所占比例逐渐减少,方铅矿和闪锌矿则逐渐增加。赋矿围岩受到强烈的矽卡岩化和大理岩化,矽卡岩矿物主要为石榴子石、透辉石以及符山石、绿帘石、云母、绿泥石、石英和方解石等矿物(图3d、3e、3f、3h、3i)。

龙马拉Cu-Fe-Pb-Zn多金属矿床与成矿最为密切的围岩蚀变类型为矽卡岩化,矽卡岩主要为交代乌鲁龙组大理岩形成。交代大理岩形成的矽卡岩类型主要包括致密块状钙铝榴石矽卡岩、透辉石-石榴子石矽卡岩和矽卡岩化大理岩。矽卡岩带分布局限并存在一定的空间分带性,即大理岩-矽卡岩化大理岩-透辉石-石榴子石矽卡岩-致密块状钙铝榴石矽卡岩-矿体,显示出矽卡岩的形成与岩浆热液交代作用有密切的成因联系。岩浆期后中低温热液硫化物阶段发育的围岩蚀变主要有硅化、金云母化、碳酸盐化,次为绿泥石化、绿帘石化。龙马拉多金属矿床经历了早期的岩浆侵入热变质作用、岩浆早期的高温岩浆流体交代作用和岩浆期后中低温热液充填交代作用。依据野外的接触关系、各阶段矿石矿物和脉石矿物组合以及脉体的穿切,将该矿床的成矿过程从早到晚划分为以下5个阶段(图4):①干矽卡岩阶段。矿物组合为石榴子石+透辉石+硅灰石+符山石等,该阶段的矽卡岩矿物在矿区最为发育。②湿矽卡岩阶段。矿物组合为阳起石+绿帘石+绿泥石等。③氧化物阶段。矿物组合主要为磁铁矿+蚀变金云母。该阶段为龙马拉多金属矿床Fe矿化的主要阶段。④硫化物阶段。矿石矿物发育有方铅矿、闪锌矿、黄铜矿、黄铁矿、磁黄铁矿等,并伴有强烈的绿泥石化、绿帘石化及硅化蚀变。该阶段为矿区最主要的成矿阶段。⑤石英-方解石碳酸盐阶段。该阶段为成矿最晚阶段,矿物组合为石英+方解石+少量黄铁矿,石英和方解石多以脉状或团斑状赋存于矽卡岩裂隙中,并强烈交代早期矿石矿物和脉石矿物,对早期成矿起到破坏的作用。

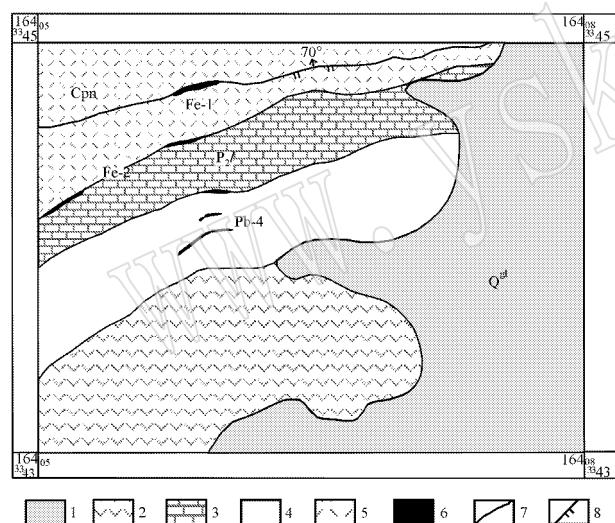


图2 龙马拉矿区地质简图(据付强等,2012)

Fig. 2 Geological sketch map of the Longmala deposit  
(after Fu Qiang et al., 2012)

1—第四系;2—早二叠世列龙沟组板岩、灰岩;3—下二叠统洛巴堆组灰岩、矽卡岩化大理岩;4—下二叠统乌鲁龙组白云岩;5—石炭系旁多群板岩、砂岩;6—矿体;7—地质界线;8—逆断层  
1—Quaternary; 2—Early Permian Lielonggou Formation slate, limestone; 3—Late Permian Luobadui Formation limestone; 4—Late Permian Wulukong Formation dolostone; 5—Carboniferous Pangduo Group slate, limestone; 6—ore body; 7—geological boundary; 8—reverse fault

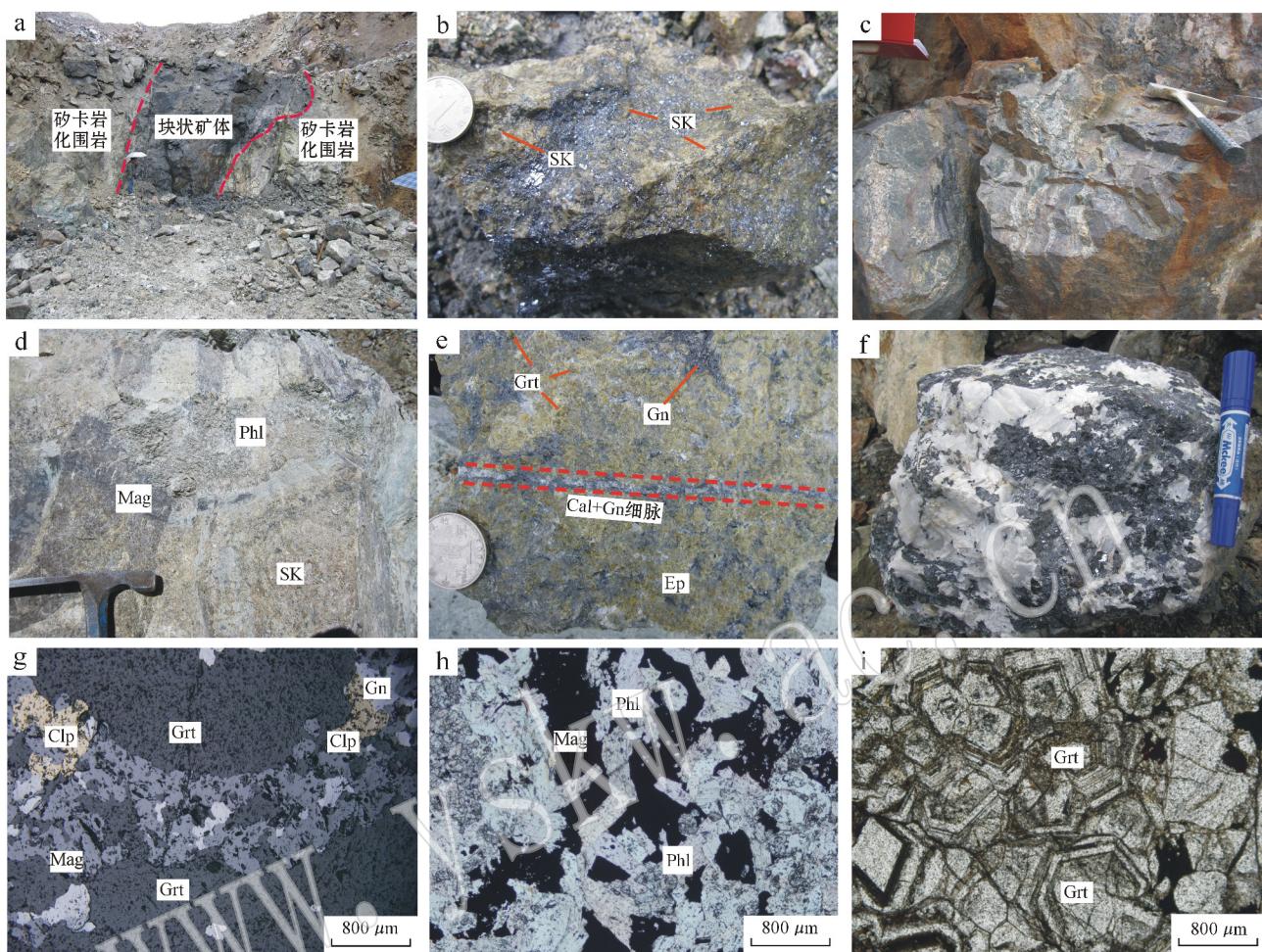


图3 龙马拉矿区野外地质和岩相学照片

Fig. 3 Petrographic photos of the Longmala deposit

a—矿体与围岩接触关系; b—硫化物呈浸染状分布于强烈矽卡岩(SK)化的矿石中; c—一条带状磁铁矿矿石; d—矽卡岩(SK)矿石中含有大量蚀变金云母(Phl); e—方解石(Cal)+方铅矿(Gn)细脉穿切绿帘石(Ep)化矽卡岩; f—后期团斑状方解石交代矽卡岩矿物; g—石榴子石(Grt)矽卡岩中黄铜矿(Cl<sub>1</sub>)交代磁铁矿(Mag), 方铅矿(Gn)与黄铜矿共生; h—磁铁矿(Mag)与金云母(Phl)共生; i—石榴子石具有典型的环带结构(—)

a—contact relationship between the ore body and wall rocks; b—sulfide minerals disseminated in skarn; c—banded magnetite ore of the Longmala deposit; d—altered phlogopite in skarn; e—calcite-galena vein in epidote skarn; f—galena replaced by calcite; g—magnetite replaced by chalcopyrite, chalcopyrite coexisting with galena; h—association of magnetite and phlogopite in the Longmala deposit; i—zonal texture garnet (under transmitted light)

nA, 束斑直径为 5 μm。

龙马拉矽卡岩床蚀变云母的电子探针分析结果(表1)显示 SiO<sub>2</sub> 含量在 39.74% ~ 40.95% 之间, MgO 含量在 24.39% ~ 25.61% 之间, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量在 15.29% ~ 15.99% 之间, FeO 含量在 2.15% ~ 2.76% 之间。依据云母的分类边界 [Mg/Fe > 2 或 Mg/(Mg + Fe) > 0.66 为金云母; Mg/Fe < 2 或 Mg/(Mg + Fe) < 0.66 为黑云母](图5), 得出龙马拉多

### 3 样品分析及结果

#### 3.1 电子探针实验

首先用代表性样品(LM-43)制作电子探针片, 从中挑选出云母单矿物, 并利用中国地质科学院矿产资源研究所的 JXA-8800 型电子探针开展成分测试。该仪器测试加速电压为 20 kV, 束电流为 20

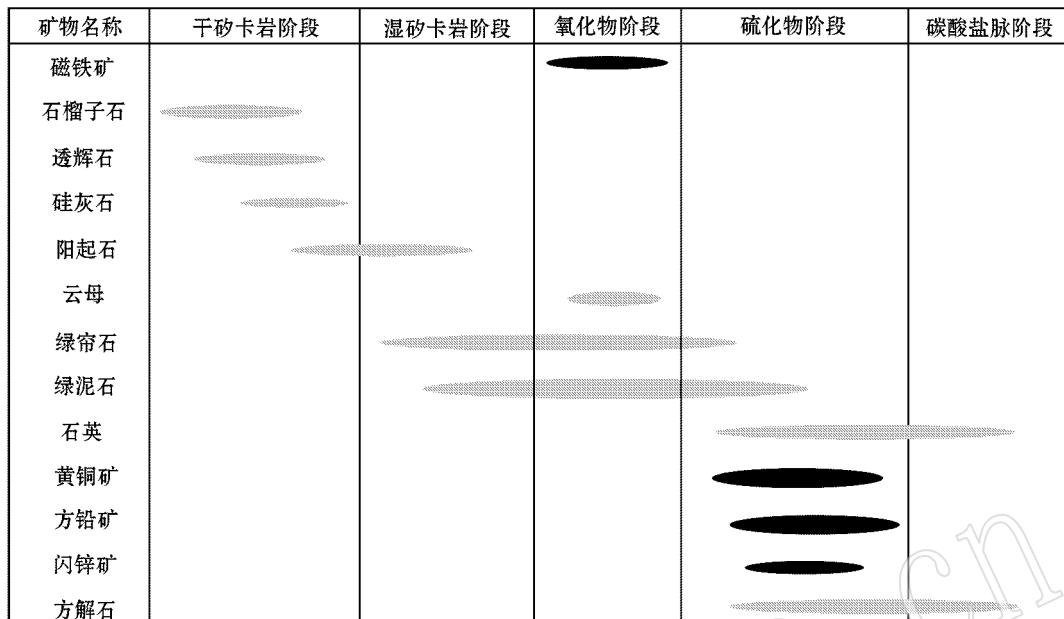


图4 龙马拉多金属矿床矽卡岩矿物及矿石矿物生成世代表

Fig. 4 Generations of skarn minerals and ore minerals in the Longmala deposit

表1 龙马拉矿床中蚀变云母的电子探针分析结果

 $w_B / \%$ 

Table 1 Electron microprobe analyses of phlogopite from the Longmala deposit

样品号	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO	MnO	FeO	NiO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O
LM43-1.1	40.76	0.13	15.99	0	25.61	0	0.12	2.15	0.03	0.16	10.03
LM43-1.2	40.95	0.04	15.29	0.04	25.46	0.09	0.15	2.76	0.01	0.10	9.82
LM43-1.3	39.74	0.10	15.73	0.01	24.39	0.01	0.19	3.70	0	0.15	9.86

金属矿床中与磁铁矿共生的强烈蚀变的云母为金云母。

### 3.2 金云母 Ar-Ar 定年实验

金云母单矿物挑选由河北省区域地质调查所实验室完成。挑选出的金云母先用超声波清洗干净后, 放入中国原子能科学研究院的“游泳池堆”中完成中子照射。照射时使用H8孔道, 在中子流密度约为

$6.0 \times 10^{12} \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$  的条件下照射 3 223 min, 其积分中子通量为  $1.16 \times 10^{18} \text{ n/cm}^2$ 。同期接受中子照射的还有用作监控样的标准样黑云母 ZBH-25 标样, 其标准年龄为  $132.7 \pm 1.2 \text{ Ma}$ , K 含量为 7.6%。

金云母的 Ar-Ar 定年测试由国土资源部同位素地质重点实验室完成。样品的阶段升温加热使用电子轰击炉, 样品分析在 MM-1200B 质谱计上完成。所有数据均经过质量歧视校正、大气氩校正、空白校正和干扰元素同位素校正。中子照射过程中所产生的干扰同位素校正系数通过分析照射过的  $\text{K}_2\text{SO}_4$  和  $\text{CaF}_2$  获得, 其值为:  $(^{36}\text{Ar}/^{37}\text{Ar}_o)_{\text{Ca}} = 0.000\,238\,9$ ,  $(^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar})_K = 0.004\,782$ ,  $(^{39}\text{Ar}/^{37}\text{Ar}_o)_{\text{Ca}} = 0.000\,806$ .  $^{37}\text{Ar}_o$  表示经过放射性衰变校正的  $^{37}\text{Ar}$  值。采用的半衰期为 35.1 d, 衰变常数 =  $5.543 \times 10^{-10} \text{ a}^{-1}$  (Steiger and Jager, 1977); 用 Isoplot 程序计算坪年龄及正、反等时线年龄 (Ludwig, v3)。坪年龄误差以  $2\sigma$  为标准, 详细的实验流程见有关文献 (Chen et al., 2002)。

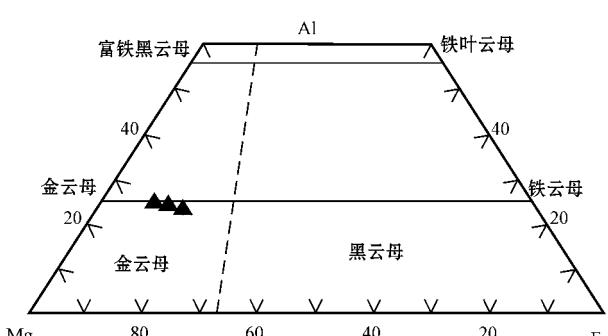


图5 龙马拉矿床中与磁铁矿共生的蚀变云母种属划分的 Mg - Al - Fe 图解(底图据 Sheppard, 1992)

Fig. 5 Mg - Al - Fe diagram for classification of phlogopite-biotite species (after Sheppard, 1992)

对金云母样品进行了 12 个  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  阶段的加热分析氩实验(表 2)。在其年龄图谱(图 6a)上,较低温度( $<700^\circ\text{C}$ )出现一些氩同位素的变化,说明矿物颗粒边缘有一定量的氩丢失,从而引起视年龄的波动(Faure, 1998)。中-高温区的视年龄构成了平坦的坪年龄图谱,表明矿物内部的氩同位素组成稳定,边缘氩的丢失未影响到矿物的内部,说明其在 56 Ma 形成之后未受到高于其封闭温度的构造-热事件。

的影响。6 个中-高温阶段谱线的坪年龄为  $56.32 \pm 0.48\text{ Ma}$ , 等时线年龄值为  $55.58 \pm 0.93\text{ Ma}$ ,  $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$  的初始值为  $304.2 \pm 6.9$ , 与尼泊尔值(295.5)相当, 表明坪区的氩同位素不含显著的过剩氩。 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$  与  $^{39}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$  的相关系数为 0.999 98, 坪年龄与等时线年龄一致, 说明数据可信。根据云母与矿石矿物的密切关系, 笔者认为蚀变云母的  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  年龄代表了龙马拉矿床的形成时代。

表 2 西藏龙马拉矿区蚀变金云母(LM-43)  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  阶段升温测年数据  
Table 2  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  analytical data of phlogopite samples from the Longmala ore district, Tibet

$t/\text{℃}$	$(^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar})_{\text{m}}$	$(^{36}\text{Ar}/^{39}\text{Ar})_{\text{m}}$	$(^{37}\text{Ar}/^{39}\text{Ar})_{\text{m}}$	$(^{38}\text{Ar}/^{39}\text{Ar})_{\text{m}}$	$^{40}\text{Ar}/\%$	F	$^{39}\text{Ar}/10^{-14}\text{mol}$	$^{39}\text{Ar}$ 积累/%	$t/\text{Ma}$	$\pm 1\sigma/\text{Ma}$
700	526.745 1	1.757 5	0.261 2	0.357 7	1.41	7.429 2	0.16	0.38	87.1	5.0
800	1 107.599 0	3.702 7	0.174 3	0.730 7	1.22	13.469 4	0.20	0.87	155.0	7.7
850	261.500 8	0.859 3	0.078 2	0.182 2	2.90	7.593 5	0.35	1.72	89.0	3.6
900	36.598 2	0.105 9	0.007 3	0.034 3	14.48	5.298 7	1.74	5.97	62.56	0.79
950	11.377 2	0.021 8	0.006 7	0.017 7	43.25	4.921 0	3.65	14.91	58.17	0.59
1 000	7.954 6	0.010 6	0.010 4	0.015 6	60.69	4.828 0	5.13	27.45	57.09	0.58
1 040	9.279 3	0.015 1	0.048 8	0.017 4	51.87	4.813 6	7.90	46.77	56.92	0.57
1 070	5.995 0	0.004 3	0.009 7	0.014 4	78.97	4.734 6	7.57	65.30	56.00	0.56
1 100	5.598 4	0.003 0	0.009 9	0.014 2	84.17	4.712 2	5.58	78.95	55.74	0.57
1 150	5.280 9	0.002 0	0.017 4	0.014 1	88.90	4.694 7	6.05	93.75	55.53	0.56
1 200	5.153 9	0.001 2	0.081 3	0.014 4	93.22	4.804 7	2.00	98.64	56.81	0.64
1 400	6.486 2	0.007 4	0.686 4	0.016 9	67.03	4.349 9	0.56	100.00	51.5	1.3

注:  $w = 32.53\text{ mg}$ ;  $J = 0.006\,659$ , 表中 m 代表样品中测定的同位素比值;  $F = {^{40}\text{Ar}}^*/{^{39}\text{Ar}}$ 。

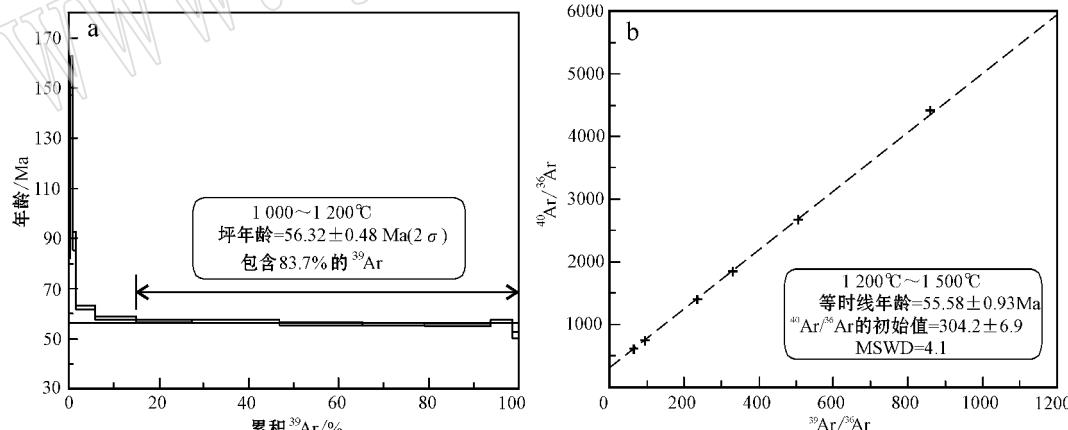


图 6 龙马拉矿区蚀变金云母  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  坪年龄(a)及等时线年龄(b)图解

Fig. 6  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  spectrum and isochron ages of phlogopite from the Longmala ore district

## 4 讨论

青藏高原造山带是早新生代以来印度和亚洲板块陆-陆碰撞的结果(Allegre *et al.*, 1984; Yin and Harrison, 2000), 并由 3 个地体、复理石杂岩带和岛

弧依次增生在欧亚大陆南缘上形成。从北往南, 这 3 个地体依次为松潘-甘孜地体、羌塘地体和拉萨地体, 并分别被金沙江缝合带(JS)和班公-怒江缝合带(BNS)所隔(Yin and Harrison, 2000; 潘桂棠等, 2006)。以印-亚大陆对接碰撞为代表的陆-陆碰撞造山, 显示了清楚明确的 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)(侯增谦等, 2006a, 2006b, 2006c; Hou and Cook, 2009)。冈底斯带位于青藏高原南部, 它是整个青藏高原上陆/洋转换和地体拼贴最复杂、壳/幔物质-能量交换最活跃、岩浆-流体活动最强烈的地区, 同时也是大规模成矿作用最强烈和金属矿产资源最集中的地带(侯增谦等, 2006a, 2006b, 2006c)。冈底斯北缘的 Cu-Mo-Fe-Pb-Zn-Ag 多金属成矿带内随着其中大量重要矿床的发现和勘探, 也逐渐成为国内学者研究的热点区域。该成矿带内存在大量的 Fe(Cu)矿床以及 Pb-Zn 矿床, 这两类矿床具有相似的成矿时代, 且大多数矿床都形成于主碰撞阶段, 表明它们具有非常紧密的联系。付强等(2013)通过对成矿带内的加拉普铁矿床(形成于  $63.4 \pm 0.5$  Ma)的研究发现, 在 65~52 Ma 时段平缓俯冲的新特提斯洋的回卷(Roll-Back)导致软流圈物质大规模上涌, 并经减压部分熔融形成大量镁铁质岩浆岩。这些镁铁质岩浆岩具有较高的 Cu、Fe 丰度, 并进一步上侵至地幔和地壳结合部位, 沿莫霍面侧向底侵。底侵的镁铁质岩浆携带巨量热能导致地壳发生大规模的部分熔融, 镁铁质岩浆与部分熔融的地壳物质发生混合, 形成壳幔混源的岩浆。此类岩浆有大量幔源物质贡

献, 为成矿系统提供了大量的 Fe-Cu 等金属元素, 进而形成以 Fe(Cu)矿化为主的矿床(图 7)。而前人通过对亚贵拉(主成矿期在古新世)(高一鸣等, 2009; 黄克贤等, 2012)、洞中拉(高一鸣等, 2009; 2011)等 Pb-Zn(Ag)矿床的研究则发现, 在冈底斯北缘形成以 Pb-Zn-Ag 矿化为特征的矽卡岩型或斑岩型矿床主要受部分熔融后的以壳源物质贡献为主的岩浆岩控制。蚀变金云母的  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  年龄( $56.32 \pm 0.48$  Ma)显示, 龙马拉 Pb-Zn-Cu-Fe 多金属矿床形成于主碰撞陆陆汇聚成矿阶段, 与冈底斯北缘多金属成矿带内的 Fe(Cu)矿床及 Pb-Zn 矿床具有相似的成矿时代。而龙马拉矿床既存在 Fe-Cu 矿化又存在 Pb-Zn 成矿作用, 表明冈底斯北缘的 Cu-Mo-Fe-Pb-Zn-Ag 多金属成矿带内的 Fe(Cu)成矿作用与 Pb-Zn 成矿作用存在着紧密的成因联系。然而, 受矿床勘查程度及矿区范围的限制, 我们未发现成矿岩体, 有关龙马拉多金属矿床的岩浆起源及演化过程的研究工作有待进一步加强。现阶段笔者依据区域地质背景及前人的研究成果初步推断, 龙马拉 Pb-Zn-Cu-Fe 矿床的多金属矿床的形成可能同样受回卷的新特提斯洋壳板片所控制, 其源区岩浆为壳幔混源的岩浆, 壳源岩浆的加入为成矿提供了 Fe、Cu 等元素, 而 Pb-Zn 矿化则主要受部分熔融的壳源物质贡献(图 7)。

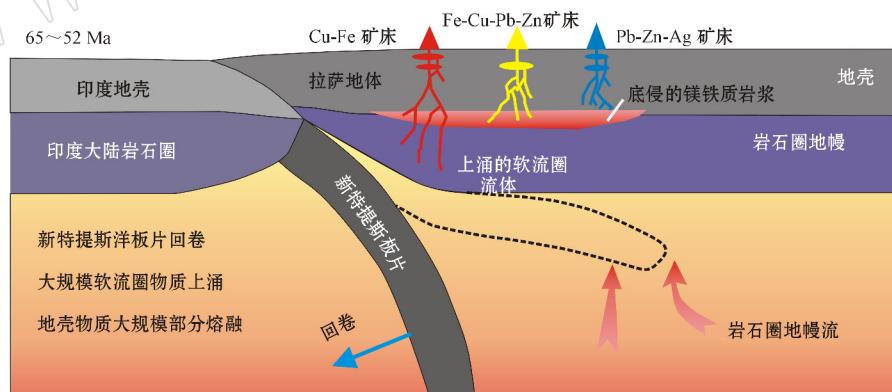


图 7 青藏高原主碰撞阶段拉萨地体构造-岩浆岩演化示意图

Fig. 7 Tectonomagmatic evolution model of Lhasa terrane at the onset of the main collision orogenic phase in the Tibetan plateau

## 5 结论

(1) 龙马拉 Pb-Zn-Cu-Fe 多金属矿床蚀变云母  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  定年结果为  $56.32 \pm 0.48$  Ma, 表明龙马拉

矿床形成于印-亚陆陆碰撞的主碰撞汇聚成矿阶段。

(2) 印-亚陆陆碰撞时新特提斯洋壳板片的回卷很可能是龙马拉 Pb-Zn-Cu-Fe 多金属矿床形成的深部动力学机制; 成矿带内各矿床成矿金属组合的差异可能是成矿的岩浆源区不同所致, Fe-Cu 矿床主要

与幔源岩浆有关,而 Pb-Zn 矿床主要受壳源物质控制,Pb-Zn-Cu-Fe 多金属矿床则与壳幔混源岩浆密切相关。

致谢 在野外工作期间,西藏中凯矿业公司及江万老师给予了很多关心和帮助, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  测试得到了陈文研究员的大力帮助,在此一并表示感谢。

## References

- Allegre C, Courtillot V, Tapponnier P, et al. 1984. Structure and evolution of the Himalaya-Tibet orogenic belt [J]. *Nature*, 307: 17~22.
- Chen Wen, Zhang Yan, Ji Qiang, et al. 2002. The magmatism and deformation times of the Xidatan rock series, East Kunlun Mountain [J]. *Science in China (B)*, 45: 20~27.
- Chung Sunlin, Chu Meifei, Zhang Yuquan, et al. 2005. Tibetan tectonic evolution inferred from spatial and temporal variations in post-collisional magmatism [J]. *Earth-Science Review*, 68: 173~196.
- Ding Lin and Lai Qingzhou. 2003. New geological evidence of crustal thickening in the Gangdese block prior to the Indo-Asian collision [J]. *Chinese Science Bulletin*, 48(15): 1 604~1 610 (in Chinese with English abstract).
- Dong Guochen, Mo Xuanxue, Zhao Zhidan, et al. 2005. A new understanding of the stratigraphic successions of the Linzizong volcanic rocks in the Linzhou basin, northern Lhasa, Tibet, China [J]. *Geological Bulletin of China*, 24: 549~557 (in Chinese with English abstract).
- Du Xin, Liu Juntao and Wang Yaping. 2004. Geological Character and Ore Genesis of the Lawu Copper-Lead-Zinc Polymetallic Ore Deposit [J]. *Mineral Resources and Geology*, 18(5): 410~415 (in Chinese with English abstract).
- Faure G. 1998. Isotope geochronology and its applications to geology [J]. *Earth Science Frontiers*, 5(1~2): 17~39.
- Fu Qiang, Yang Zhusen, Huang Kexian, et al. 2013. Zircon U-Pb Ages Hf isotope and geochemistry of granodiorite in the Jialapu Deposit, Tibet [J]. *Mineral Deposits*, 32(3): 564~578 (in Chinese with English abstract).
- Fu Qiang, Zheng Yuanchuan and Huang Kexian. 2012. Sulfur and lead isotopic composition of Longmala Polymetallic Deposit, Tibet and its geological significance [J]. *Nonferrous Metals (Mining Section)*, 64(4): 26~30 (in Chinese with English abstract).
- Gao Yiming, Chen Yuchuan, Tang Juxing, et al. 2009. SHRIMP U-Pb dating of zircon from quartz porphyry in the Yaguila Pb-Zn-Mo Deposit, Gongbujiangda County, Tibet and its geological implication [J]. *Acta Geologica Sinica*, 83(10): 1 437~1 444 (in Chinese with English abstract).
- Gao Yiming, Chen Yuchuan, Wang Chenhui, et al. 2011. Zircon Hf isotopic characteristics and constraints on petrogenesis of Mesozoic-Cenozoic magmatic rocks in Nyainqntanglha region, Tibet [J]. *Mineral Deposits*, 30(2): 280~291 (in Chinese with English abstract).
- Hou Zengqian 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.
- Hou Zengqian, Lü Qingtian, Wang Anjian, et al. 2003. Continental collision and related metallogenesis: A case study of mineralization in Tibetan orogen [J]. *Mineral Deposits*, 22(4): 319~333 (in Chinese with English abstract).
- Hou Zengqian, Mo Xuanxue, Yang Zhiming, et al. 2006d. Metallogenesis in the collisional orogen of the Qinghai-Tibet Plateau: Tectonic setting, tempo-spatial distribution and ore deposit types [J]. *Geology in China*, 33(2): 340~351 (in Chinese with English abstract).
- Hou Zengqian, Yang Zhusen, Xu Wenyi, et al. 2006a. 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 Zengqian, Pan Guitang, Wang Anjian, et al. 2006b. 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, Yang Zhusen, et al. 2006c. 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 Zengqian, Mo Xuanxue, Gao Yongfeng, et al. 2006e. Early processes and tectonic Model for the Indian-Asian continental collision: Evidence from the Cenozoic Gangdese igneous rocks in Tibet [J]. *Acta Geologica Sinica*, 80(9): 1 233~1 248 (in Chinese with English abstract).
- Hou Zengqian, Zheng Yuanchuan, Yang Zhiming, et al. 2012. Contribution of mantle components within juvenile lower-crust to collisional zone porphyry Cu systems in Tibet [J]. *Mineralium Deposita*, doi: 10.1007/s00126-012-0415-6.
- Huang Kexian, Zheng Yuanchuan, Zhang Song, et al. 2012. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating of two types of porphyry in the Yaguila mining area, Tibet [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 31(3): 348~360 (in Chinese with English abstract).
- Li Yingxu, Xie Yuling, Chen Wei, et al. 2011. U-Pb age and geochemical characteristics of zircon in monzonogranite porphyry from Qiganggong Deposit, Tibet, and geological implication [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 30(7): 2 023~2 033 (in Chinese with English abstract).
- Meng Xiangjin, Hou Zengqian, Gao Yongfeng, et al. 2003. Development of porphyry copper-molybdenum-lead-zinc ore-forming system in east Gangdese belt, Tibet: Evidence from Re-Os age of molybdenum

- ite in Bangpu copper polymetallic deposit [J]. Mineral Deposits, 22(3):246~252 (in Chinese with English abstract).
- Meng Xiangjin, Hou Zengqian, Ye Peisheng, et al. 2007. Characteristics and ore potentiality of Gangdese silver-polymetallic mineralization belt in Tibet [J]. Mineral Deposits, 22(3): 246~252 (in Chinese with English abstract).
- Mo Xuanxue, Zhao Zhidan, Deng Jinfu, et al. 2003. Response of volcanism to the India-Asia collision [J]. Earth Science Frontiers (China University of Geoscience, Beijing), 10(3): 135~148 (in Chinese).
- 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(3): 281~290 (in Chinese with English abstract).
- Pan Guitang, Mo Xuanxue, Hou Zengqian, et al. 2006. Spatial-temporal framework of the Gangdese orogenic belt and its evolution [J]. Acta Petrologica Sinica, 22(3): 521~530 (in Chinese with English abstract).
- Sheppard S. 1992. Barium and LREE-rich, olivine-mica-lamprophyres with affinities to lamproites, Mt. Bunney, Northern Territory, Australia [J]. Lithos, 28: 303~325.
- Steiger R H and Jager E. 1977. Subcommission on geochronology: convention on the use of decay constants in geo- and cosmochemistry [J]. Earth Planet and Science Letters 36: 359~362.
- Tang Juxing, Chen Yuchuan, Wang Dengehong, et al. 2009. Re-Os dating of molybdenite from the Sharang porphyry molybdenum deposit in Gongbogymada county, Tibet and its geological significance [J]. Acta Geologica Sinica, 83(5): 698~704 (in Chinese with English abstract).
- Wang Liqiang, Gu Xuexiang, Cheng Wenbin, et al. 2010. Sulfur and lead isotope composition and tracing for the sources of ore-forming materials in the Mengya 'a Pb-Zn deposit, Tibet [J]. Geoscience, 24(1): 52~58 (in Chinese with English abstract).
- Yang Zhusen, Hou Zengqian, Gao Wei, et al. 2006. Metallogenetic characteristics and genetic of antimony and gold deposits in south Tibetan detachment system [J]. Acta Geologica Sinica, 80: 1377~1391 (in Chinese with English abstract).
- Yin A and Harrison T M. 2000. Geologic evolution of the Himalayan Tibetan orogen [J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 28: 211~280.
- Yu Yushuai, Yang Zhusen, Duo Ji, et al. 2011. Age and petrogenesis of magmatic rocks from Jiaduobule skarn Fe-Cu deposit in Tibet: Evidence from zircon SHRIMP U-Pb dating, Hf isotope and REE [J]. Mineral Deposits, 30(3): 420~434 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Linkui, Fan Wenyu and Gao Dafa. 2008. Geology and genesis of Leqingla Pb-Zn polymetallic deposit in the Linzhou Country, Tibet [J]. Geology and Prospectng, 44(5): 10~16 (in Chinese with English abstract).
- lisch abstract).
- Zheng Youye, Zhang Gangyang, Xu Rongke, et al. 2007. Geochronologic constraints on magmatic intrusions and mineralization of the Zhunuo porphyry copper in Gangdese, Tibet [J]. Chinese Science Bulletin, 52(22): 3139~3147.
- Zheng Yuanchuan. 2012. Metallogenesis and Geological Processes in the Eastern Gangdese Belt, Tibet [D]. Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences (in Chinese).
- Zheng Yuanchuan, Hou Zengqian, Gong Yingli, et al. 2014. Petrogenesis of Cretaceous adakite-like intrusions of the Gangdese Belt, southern Tibet: Implications for midocean ridge subduction and crustal growth [J]. Lithos, 190~191: 249~263.
- Zheng Yuanchuan, Hou Zengqian, Li Wei, et al. 2012a. 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.
- Zheng Yuanchuan, Hou Zengqian, Li Qiuyun, et al. 2012b. Origin of Late Oligocene adakitic intrusions in the southeastern Lhasa terrane: evidence from in situ zircon U-Pb dating, Hf-O isotopes, and whole-rock geochemistry [J]. Lithos, 148: 296~311.
- Zhou Su, Mo Xuanxue, Dong Guochen, et al. 2004.  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  geochronology of Cenozoic Linzizong volcanic rocks from Linzhou basin, Tibet, China, and their geological implications [J]. Chinese Science Bulletin, 49(18): 1970~1979 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Dicheng, Zhao Zhidan, Niu Yaoling, et al. 2011. The Lhasa Terrane: Record of a microcontinent and its histories of drift and growth [J]. Earth and Planetary Science Letters, 301: 241~255.

## 附中文参考文献

- 丁林, 来庆洲. 2003. 冈底斯地壳碰撞前增厚及隆升的地质证据: 岛弧拼贴对青藏高原隆升及扩展历史的制约 [J]. 科学通报, 48(15): 1604~1610.
- 董国臣, 莫宣学, 赵志丹, 等. 2005. 拉萨北部林周盆地林子宗火山岩层序新议 [J]. 地质通报, 24: 549~557.
- 杜欣, 刘俊涛, 王亚平. 2004. 西藏拉屋铜铅锌多金属矿床地质特征及成因研究 [J]. 矿产与地质, 18(5): 410~449.
- 付强, 杨竹森, 黄克贤, 等. 2013. 西藏加拉普铁矿区花岗闪长岩锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素及地球化学研究 [J]. 矿床地质, 32(3): 564~578.
- 付强, 郑远川, 黄克贤. 2012. 西藏龙马拉多金属矿床硫、铅同位素组成及其地质意义 [J]. 有色金属(矿山部分), 64(4): 26~30.
- 高一鸣, 陈毓川, 唐菊兴, 等. 2009. 西藏工布江达县亚贵拉铅锌、钼多金属矿床石英斑岩锆石 SHRIMP 定年及其地质意义 [J].

- 地质学报,83(10):1 436~1 444.
- 高一鸣,陈毓川,王成辉,等. 2011. 亚贵拉-沙让-洞中拉矿区中新生代岩浆岩 Hf 同位素特征与岩浆源区示踪[J]. 矿床地质,30(2):279~291.
- 侯增谦,吕庆田,王建安,等. 2003. 初论陆-陆碰撞与成矿作用[J]. 矿床地质,22(4):319~333.
- 侯增谦,莫宣学,高永丰,等. 2006c. 印度大陆与亚洲大陆早期碰撞过程与动力学模型——来自西藏冈底斯新生代火成岩的证据[J]. 地质学报,80(9):1 233~1 248.
- 侯增谦,莫宣学,杨志明,等. 2006d. 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[J]. 中国地质,33(2):340~351.
- 侯增谦,潘桂棠,王安建,等. 2006b. 青藏高原碰撞造山带: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,等. 2006c. 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,王二七,莫宣学,等. 2008. 青藏高原碰撞造山与成矿作用 [M]. 北京:地质出版社.
- 侯增谦,杨竹森,徐文艺,等. 2006a. 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.
- 黄克贤,郑远川,张松,等. 2012. 西藏亚贵拉矿区两期岩体 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及地质意义[J]. 岩石矿物学杂志,31(3):348~360.
- 纪伟强,吴福元,钟孙霖,等. 2009. 西藏南部冈底斯岩基花岗岩时代与岩石成因[J]. 中国科学 D 辑,39(7):849~871.
- 李应栩,谢玉玲,陈伟,等. 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[J]. 岩石学报,27(7):2 023~2 033.
- 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):246~252.
- 孟祥金,侯增谦,叶培盛,等. 2007. 西藏冈底斯银多金属矿化带的基本特征与成矿远景分析[J]. 矿床地质,26(2):153~162.
- 莫宣学,赵志丹,邓晋富,等. 2003. 印度-亚洲大陆主碰撞过程的火山作用影响[J]. 地学前缘,10(3):135~148.
- 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(3):281~290.
- 潘桂棠,莫宣学,侯增谦,等. 2006. 冈底斯造山带的时空结构及演化[J]. 岩石学报,22(03):521~533.
- 唐菊兴,陈毓川,王登红,等. 2009. 西藏工布江达县沙让斑岩钼矿床辉钼矿铼-锇同位素年龄及其地质意义[J]. 地质学报,83(5):698~704.
- 王立强,顾雪祥,程文斌,等. 2010. 西藏蒙亚啊铅锌矿床 S、Pb 同位素组成及对成矿物质来源的示踪[J]. 现代地质,24(1):52~58.
- 杨竹森,侯增谦,高伟,等. 2006. 藏南拆离系锑金成矿特征与成因模式[J]. 地质学报,80:1 377~1 391.
- 于玉帅,杨竹森,多吉,等. 2011. 西藏加多捕勒铁铜矿成矿岩体时代与成因:锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素与稀土元素证据[J]. 矿床地质,30(3):420~434.
- 张林奎,范文玉,高大发. 2008. 西藏林周县勒青拉铅锌多金属矿床地质特征及成因[J]. 地质与勘探,44(5):10~16.
- 郑有业,张刚阳,许荣科,等. 2007. 西藏冈底斯朱诺斑岩铜矿床成岩成矿时代约束[J]. 科学通报,52(21):2 542~2 548.
- 郑远川. 2012. 西藏冈底斯东段成矿作用与地质背景研究(博士后出站报告)[D]. 北京:中国地质科学院地质研究所.
- 周肃,莫宣学,董国臣,等. 2004. 西藏林周盆地林子宗火山岩  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  年代格架[J]. 科学通报,49(5):2 095~2 103.