

# 岩浆演化对成矿作用的控制

## ——以西藏冈底斯北缘铅锌矿带为例

周金胜<sup>1,2</sup>, 纪现华<sup>3</sup>, 杨竹森<sup>4</sup>, 侯增谦<sup>1</sup>, 庄亮亮<sup>5</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. 河北省地质调查院, 河北 石家庄 050081; 4. 中国地质科学院 矿产资源研究所, 北京 100037; 5. 中国地质大学 地球科学与资源学院, 北京 100083)

**摘要:** 与岩浆-热液或热液矿床有关的岩浆,大都经历了不同程度的演化(如结晶分异、同化混染等),其岩石学和地球化学特征只是岩浆演化终态的反映,针对这些岩浆岩本身的研究有时很难刻画出其详细的演化过程及该过程中关键成矿元素的地球化学行为。已有研究显示,同时代同区域大面积分布的火成岩可能记录着含矿岩浆演化早期或演化不同阶段的岩石学和地球化学信息,为解决上述难题提供了可能。基于此,本文以发育于大陆碰撞初期(即主碰撞)的西藏冈底斯北缘铅锌矿带为例,通过对主碰撞阶段冈底斯带大量火成岩地球化学数据的统计学研究,初步展示了岩浆演化过程及其对成矿的控制作用。研究结果表明,除了自身体系的分离结晶,陆壳混染作用是大陆碰撞早期岩浆由基性向酸性演化的另一关键控制因素,主碰撞岩浆中普遍不具有高的含水量和氧逸度,但演化到中后期,岩浆的氧逸度会逐渐升高;富S和H<sub>2</sub>O的幔源岩浆底侵,诱发具有较高Zn含量的陆壳物质熔融,产生的岩浆再经历高度的演化(以达到Pb的富集),最终浅成就位形成岩浆-热液成矿系统。这是形成冈底斯北缘铅锌矿带的成矿动力学机制。

**关键词:** 岩浆演化; 冈底斯; 铅锌矿; 主碰撞; 西藏

**中图分类号:** P168.4; P588.11

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-6524(2015)04-0557-11

## The control of magma evolution on metallogenesis: A case study of the northern Gangdise Pb-Zn ore belt in Tibet

ZHOU Jin-sheng<sup>1,2</sup>, JI Xian-hua<sup>3</sup>, YANG Zhu-sen<sup>4</sup>, HOU Zeng-qian<sup>1</sup>, ZHUANG Liang-liang<sup>5</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. Hebei Institute of geological Survey, Shijiazhuang 050081, China; 4. Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 5. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

**Abstract:** In the magma-related deposits, the ore-forming plutons generally experienced high-degree evolution and differentiation, so its petrologic and geochemical characteristics can only reflect the final state of magma evolution. The evolution of ore-hosted magma and the geochemical behavior of main metallogenic elements in the evolution remain unclear. However, the study of contemporaneous and sympatric magmatic rocks provides a potential solution for this question. Here the authors made a case study of the northern Gangdise Pb-Zn ore belt in Tibet formed in the early period of continental collision. Based on the statistical study of lots of published geochemical analyses of magmatic rocks from the Gangdise belt, this paper presents the evolution of magma and its

收稿日期: 2015-03-03; 修订日期: 2015-05-18

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2011CB403104); 地质调查计划项目(1212010918014); IGCP/SIDA/600 项目

作者简介: 周金胜(1989-), 男, 在读博士研究生, 矿物学、岩石学、矿床学专业, E-mail: zhoujinshengyx@sina.com; 通讯作者: 杨竹森(1964-), 男, 博士, 研究员, 主要从事矿床学和矿床地球化学研究, E-mail: yangzhusen@vip.sina.com。

control of metallogensis. The results suggest that, besides the crystallization differentiation of magma itself, crustal contamination was another factor controlling the evolution from basic magma to acid magma during differentiation. It is also found that most of the magmatic rocks formed in the early period of continental collision are less oxidized and less hydrous; nevertheless, when magma evolved to the middle and late period, the oxidation of magma increased with progressive evolution. Mantle-derived magmas are enriched in S and  $H_2O$ , which experienced underplating at the base of Zn-enriched crust materials and induced partial melting. Crust-derived magmas experienced high-degree evolution, and finally resulted in the formation of the northern Gangdise Pb-Zn ore belt.

**Key words:** magma evolution; Gangdise; Pb-Zn deposit; main collisional period; Tibet

成矿岩体的研究是揭示与岩浆相关的热液矿床成矿深部过程和动力学机制最为有效的“探针”。然而矿床中成矿岩体大都经历了高度的演化和分异,其岩石学和地球化学特征只是岩浆演化终态的反映,因而仅通过对单一矿床中成矿岩体的解剖,难以细致地勾勒出岩浆演化过程以及关键成矿元素的地球化学行为。基于大量地球化学数据的统计,弧岩浆的演化以及 Cu 在演化过程中的地球化学行为得到了很好的约束 (Lee *et al.*, 2010; Chiaradia, 2014),发现初始的弧岩浆并不具有高的 Cu 含量和氧逸度,这也对产于“俯冲工厂”之上的弧环境斑岩铜矿提供了新的成矿模型 (Lee *et al.*, 2012; Lee, 2014)。然而,类似的工作在其它构造背景下却鲜有提及,尤其是岩浆活动和成矿事件都极其发育的大陆碰撞造山带。

近年来,青藏高原找矿突破取得了一系列重大进展,基于大量的地质观察和系统的综合研究,一套新的大陆碰撞成矿理论业已形成 (侯增谦等, 2006a, 2006b, 2006c, 2012; 侯增谦, 2010; Hou and Cook, 2009)。作为青藏高原上矿床最为发育的冈底斯带,在主碰撞阶段、晚碰撞阶段和后碰撞阶段发育有 3 条规模不等的成矿带,分别对应亚贵拉式斑岩-矽卡岩型 Pb-Zn 矿床、明则式斑岩 Mo 矿和驱龙式斑岩 Cu-Mo 矿床 (侯增谦等, 2012)。后碰撞阶段的斑岩 Cu-Mo 矿床因其巨大的成矿潜力吸引了众多学者的关注 (侯增谦等, 2006a, 2012; 杨志明等, 2008, 2009)。然而主碰撞阶段在冈底斯带北缘发育的一系列与岩浆相关的铅锌矿床的研究却较为薄弱,目前大多数工作仅限于矿区或矿床尺度的研究,从区域角度探讨岩浆起源、岩浆演化及浅成就位对区域成矿的控制作用却鲜有报道。本文通过对冈底斯带主碰撞阶段大量火成岩地球化学数据的统计学分析和研究,以岩浆演化过程中关键成矿元素的地球化

学行为为视角,对冈底斯北缘铅锌成矿的关键控制因素做一探讨,以期增进冈底斯北缘铅锌矿带内岩浆演化与成矿之间耦合关系的认识和理解。

## 1 地质背景

冈底斯北缘铅锌矿带位于拉萨地体腹地。拉萨地体夹于北部羌塘地体和南部喜马拉雅地体之间,分别以班公湖-怒江缝合带和雅鲁藏布缝合带为界 (Yin and Harrison, 2000)。其内由北向南又可分为北拉萨地体、中拉萨地体和南拉萨地体 (Zhu *et al.*, 2012)。拉萨地体的基底以念青唐古拉群和安多片麻岩为代表,时代为中元古代至早寒武世 (Yin and Harrison, 2000)。其上发育有古生代和中生代浅海相沉积序列及新生代陆相火山-沉积岩系。石炭系和二叠系主要分布在中拉萨地体,以碎屑岩为主,次为浅海碳酸盐岩 (中二叠统及上二叠统局部),东部夹有大量中基性火山岩。三叠系以碎屑岩为主,零星分布在拉萨地体北部和中部。侏罗系和白垩系以碎屑岩和碳酸盐岩为主,局部发育大量中酸性火山岩,大面积分布在拉萨地体北部和南部,其中北部的上白垩统为陆相磨拉石建造。古近系主要为林子宗群陆相中酸性火山岩,大面积分布在拉萨地体南部和中部。新近系为河湖相沉积,局部发育钾质和超钾质火山岩。

拉萨地体在经历了中生代雅鲁藏布江洋壳北向俯冲和班公湖-怒江洋壳南向俯冲以及与羌塘地体碰撞拼贴 (Yin and Harrison, 2000; Zhu *et al.*, 2012) 之后,自新生代始,发生了与印度大陆的强烈碰撞,历经主碰撞期 (65~41 Ma) 挤压逆冲、晚碰撞期 (40~26 Ma) 走滑转换和后碰撞期 (25~0 Ma) 伸展断陷 (侯增谦等, 2006a, 2006b, 2006c), 造就了现今的构造格局。地体内展布有一系列近东西向的断

裂带,其中规模较大的有永珠-纳木错-嘉黎断裂带、扎日南木错-措麦断裂带、洛巴堆-米拉山断裂带等;近南北向的断裂同样分布广泛(图1),较大的有当雄-羊八井断裂,但其整体规模远不及东西向断裂。

拉萨地体内最引人注目的是大面积分布的中新生代火成岩,占整个西藏火成岩出露面积的80%以上(莫宣学,2011),由中生代洋壳俯冲和新生代大陆碰撞伴随的强烈岩浆活动形成。冈底斯南带是整个地体内火成岩带的主体(图1),由大规模岩基和岩株构成的花岗岩带及同碰撞中酸性火山岩带构成(莫宣学,2011),因其具有全岩正的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 和锆石正的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值,一般认为岩浆来源于新生地壳或新特提斯洋壳的部分熔融(朱弟成等,2012)。主碰撞期大规模火山喷发形成的林子宗火山岩系构成了中酸性火山岩带的主体,东西向绵延上千公里。最厚达5000 m的林子宗火山岩从下至上分为典中组、年波组、帕那组3个岩性组,精细的年代学工作已经确定

3个岩性组的形成时代分别为65~60、60~50和50~40 Ma(莫宣学,2011)。林子宗火山岩总体上从典中组到帕那组,呈现从钙碱性系列到高钾钙碱性系列再到钾玄岩系列的演变特征,岩性上则呈现从中基性到酸性的演化趋势(侯增谦等,2006b)。地球化学性质上,林子宗火山岩具有弧火山岩的特征(莫宣学等,2003),但不同的是,Ba和Sr含量明显较低(侯增谦等,2006b),这可能是岩浆源区的差异,也有可能是林子宗火山岩经历了更强的长石类分离结晶作用。放射性同位素证据显示,典中组安山岩具有岛弧型地幔楔的特征,年波组英安岩则遭受了上地壳物质的混染,帕那组流纹岩则有可能来自于岛弧岩浆和壳源岩浆的混合(莫宣学等,2003; Mo *et al.*, 2006)。对应林子宗火山岩,冈底斯带主碰撞阶段同样分布有3个岩浆组合序列,分别为壳源花岗岩组合、壳幔混源花岗岩-辉长岩组合、幔源玄武质次火山岩-辉绿岩脉组合(侯增谦等,2006b)。

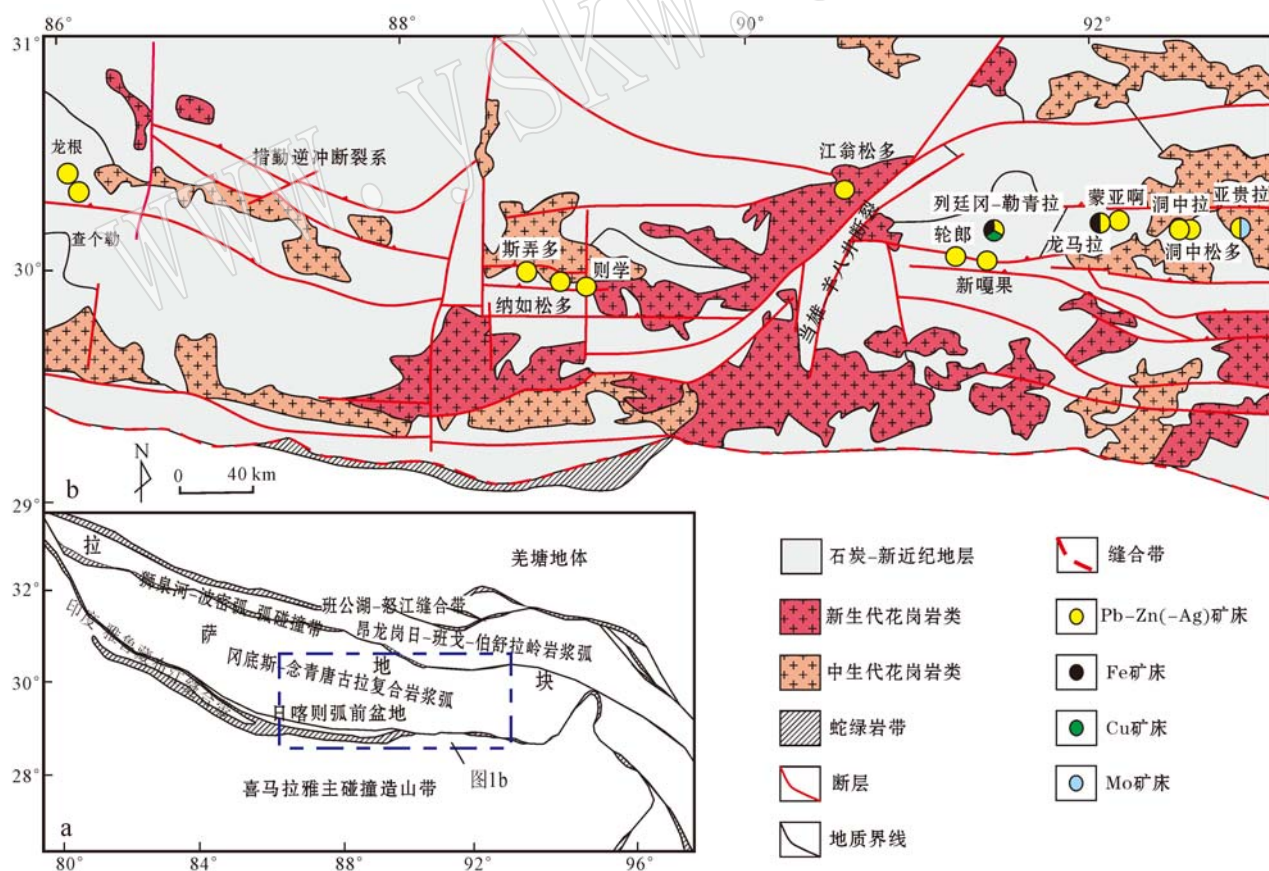


图1 青藏高原简要构造格架图(a, 据潘桂棠等, 2006)和西藏冈底斯北缘铅锌成矿带地质简图(b, 据侯增谦等, 2006)

Fig. 1 Geological sketch map of the Tibetan Plateau (a, modified after Pan Guitang *et al.*, 2006) and simplified geological map of the northern Gangdise Pb-Zn ore belt in Tibet (b, modified after Hou Zengqian *et al.*, 2006)

## 2 区域矿床分布

冈底斯北缘铅锌矿带集中分布在中拉萨地体内,中西段主要分布在扎日南木错-措麦断裂带与洛巴堆-米拉山断裂带之间,东段则控制在永珠-纳木错-嘉黎断裂带和洛巴堆-米拉山断裂带之间,东西向延伸近 600 km(图 1)。带内发育一系列与岩浆相关的铅锌矿床(图 1、表 1),成岩成矿年龄大多集中在 63~42 Ma 之间,即主碰撞期。经过 10 多年的地质调查工作,该成矿带内发现了具有超大型潜力的铅锌银矿床 1 个、大型矿床 12 个、中型矿床 5 个(段志明等,2014),这是继冈底斯斑岩铜矿带之后,该地区发现的又一具有巨大潜力的金属成矿带。

矿带上铅锌矿床成因类型以矽卡岩型为主,个别矿床内发育规模较大的隐爆角砾岩型矿体(例如纳如松多铅锌矿)。与成矿相关的岩体主要为花岗

斑岩、石英斑岩和花岗闪长岩,已有的成岩年龄主要集中在 62.7~61.4 Ma,个别为 68.2 Ma(表 1)。大部分矿床铅锌矿体与成矿岩体具有一定的距离,少部分矿床在岩体附近,个别矿床矿区内至今尚未发现成矿岩体(例如龙马拉铅锌矿),这在矽卡岩型铅锌矿床中是十分普遍的现象(Meinert *et al.*, 2005)。矿体主要呈似层状或筒状,分别产于顺层发育的矽卡岩带内或近直立的隐爆角砾岩筒内。矽卡岩主要由阳起石、绿帘石、蔷薇辉石、硅灰石等组成,个别矿床内见有石榴子石和透辉石。金属矿物方铅矿、闪锌矿和少量黄铁矿、黄铜矿等与石英、方解石共生,呈浸染状和团块状充填于矽卡岩矿物间隙,或呈胶结物胶结隐爆角砾。无论是稳定同位素还是放射性同位素特征皆指示成矿流体以及关键成矿物质(硫和金属)均来自于岩浆(连永牢等,2009;杨勇等,2010a;王立强等,2010;费光春等,2011;付强等,2012)。成矿年龄介于 61.5~42.2 Ma 之间。

表 1 冈底斯北缘与岩浆相关的铅锌矿床

Table 1 Magmatic Pb-Zn deposits in northern Gangdise

| 矿床   | 位置 | 成因类型        | 成矿岩体  | 成岩年龄    | 成矿年龄    | 围岩地层         | 参考文献                  |
|------|----|-------------|-------|---------|---------|--------------|-----------------------|
| 查个勒  | 西段 | 矽卡岩型        | 花岗斑岩  | 62.1 Ma | 61.5 Ma | 下拉组灰岩        | 高顺宝等(2012)            |
| 龙根   | 西段 | 矽卡岩型        | 花岗斑岩  | 61.4 Ma |         | 下拉组灰岩        | 段志明等(2014)            |
| 斯弄多  | 中段 | 矽卡岩型        | 花岗斑岩  | 68.2 Ma |         | 下拉组灰岩、典中组火山岩 | 刘波等(2010)             |
| 纳如松多 | 中段 | 矽卡岩型、隐爆角砾岩型 | 花岗斑岩  | 62.5 Ma | 57.8 Ma | 下拉组灰岩、典中组火山岩 | 纪现华等(2012, 2014)      |
| 勒青拉  | 中段 | 矽卡岩型        | 花岗闪长岩 | 62.7 Ma | 60.4 Ma | 洛巴堆组灰岩       | 费凡(2014)              |
| 龙马拉  | 东段 | 矽卡岩型        | ?     |         | 56.3 Ma | 洛巴堆组灰岩       | 付强等(2014)             |
| 洞中拉  | 东段 | 矽卡岩型        | ?     |         | 42.2 Ma | 洛巴堆组灰岩       | 费光春等(2010)            |
| 亚贵拉  | 东段 | 矽卡岩型        | 石英斑岩  | 62.4 Ma | 58.7 Ma | 来姑组灰岩        | 黄克贤等(2011);唐菊兴等(2009) |

## 3 岩浆演化

冈底斯北缘铅锌矿带各矿床的成矿岩体大都是酸性花岗岩类,通过对其本身的地球化学及锆石年代学研究已经获取了一些成因信息(高一鸣等,2011;纪现华等,2012;王保弟等,2012;段志明等,2014)。然而,由于成矿岩体通常经历了高度的演化和分异,因而仅通过对这些高分异的岩浆进行研究,很多关键的控矿因素及其详细的演化过程都难以限定。由于该矿带内铅锌成矿作用与酸性花岗岩类侵入活动密切相关,且其成岩成矿时代与区域上大规模的林子宗火山岩的喷发时代一致,显示成矿作用过程与林子宗火山岩大规模喷发过程相伴,因此,通过对研究程度较高的林子宗火山岩和同时代侵入体

的地球化学特征的剖析,可以揭示控制该矿带形成的主碰撞期岩浆演化过程及关键成矿元素的地球化学行为。本文系统收集了冈底斯带林子宗火山岩及同时代侵入岩的地球化学数据,选择分析精度较高实验室的数据,在剔除烧失量较大的样品后,对其岩石地球化学特征进行了统计分析。

### 3.1 岩浆系列

在 $(K_2O + Na_2O) - SiO_2$ 图(图 2a)中,绝大部分样品点都落在了亚碱性区域,但部分基性岩脉的数据却落在了碱性区域,从基性向中酸性演化过程中,大致呈现出从碱性到亚碱性的趋势。在 $(FeO^* / MgO) - SiO_2$ 图(图 2b)中,样品点分布在拉斑和钙碱性区域,从基性到中酸性演化过程中也并未呈现一定的趋势性。主碰撞早期冈底斯带火成岩(即典中组火山岩)具有陆缘弧岩浆的特征(莫宣学等,2003;

侯增谦等, 2006d), 因为印度-亚洲大陆汇聚速率的第一次骤降发生在 60 Ma (侯增谦等, 2006d), 在这之前冈底斯带下部的洋壳俯冲作用依然存在。最新的研究表明, 厚的陆缘弧更易形成钙碱性岩浆 (Chiaradia, 2014), 理论上而言, 冈底斯带主碰撞早期的火成岩应具有很强的钙碱性, 然而主碰撞火成岩样品在  $(\text{FeO}^*/\text{MgO})-\text{SiO}_2$  图 (图 2b) 中的钙碱性和拉斑区域均有分布, 即使是与弧岩浆具有高度相似性的典中组火山岩, 也与总体分布相近。虽然图 2b 中相当数量的数据点落在了拉斑区域, 但在主碰撞阶段冈底斯带岩浆演化的早期, 并未出现 Fe 的

富集过程 (图 2c)。因此, 基于岩浆自身体系的结晶分异作用, 难以解释主碰撞阶段岩浆的演化趋势。

岩浆中的含水量和氧逸度控制了其向钙碱性演化的趋势, 通过抑制斜长石的分离结晶和促进磁铁矿 (或尖晶石)、铁质角闪石的分离结晶 (Muñtener *et al.*, 2001; Berndt *et al.*, 2005; Zimmer *et al.*, 2010), 这一经典结论是基于对环太平洋俯冲带之上弧岩浆的研究而提出的, 但难以解释大陆碰撞造山带的岩浆作用, 即使是与弧岩浆具有高度类似性的碰撞早期火山岩 (上文)。对比俯冲带和初期的大陆碰撞造山带, 后者具有两个显著的特征: 巨厚的上伏

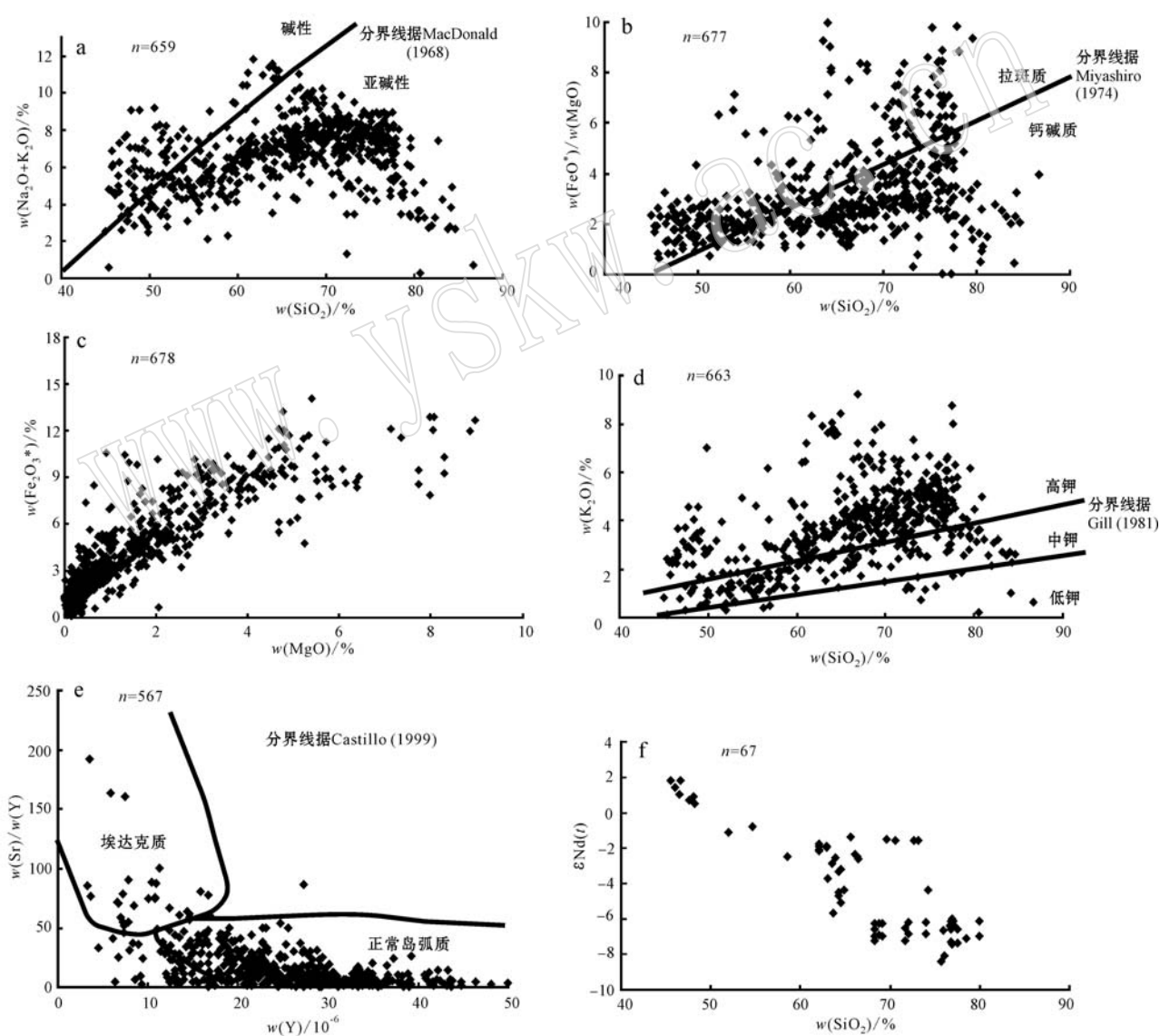


图 2 冈底斯带主碰撞阶段火成岩  $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})-\text{SiO}_2$ 、 $\text{FeO}^*/\text{MgO}-\text{SiO}_2$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3^*/\text{MgO}$ 、 $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ 、 $\text{Sr}/\text{Y}-\text{Y}$  和  $\epsilon\text{Nd}(t)-\text{SiO}_2$  图解

Fig. 2 Plots of  $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$  versus  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{FeO}^*/\text{MgO}$  versus  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3^*/\text{MgO}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  versus  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Sr}/\text{Y}$  versus  $\text{Y}$  and  $\epsilon\text{Nd}(t)$  versus  $\text{SiO}_2$  for the main collisional period magmatic rocks of the Gangdise belt

陆壳和强的挤压环境,在该背景下,探讨岩浆演化时则存在一个不容忽视的关键因素——陆壳混染,这在弧岩浆演化研究中却是次要的(Zimmer *et al.*, 2010)。为了判别陆壳混染对大陆碰撞造山带早期岩浆作用的影响,我们用  $\epsilon\text{Nd}(t)$  对  $\text{SiO}_2$  进行了投图(图 2f),发现  $\epsilon\text{Nd}(t)$  随着  $\text{SiO}_2$  的升高而呈近线性降低,这充分说明陆壳混染在岩浆演化过程中起到了关键的控制作用。挤压背景下深部岩浆房具有更长的寿命和更大的规模(Lee *et al.*, 2013),使得深部来源的岩浆在不同地壳尺度形成岩浆房后,具有足够的时间和接触面积与周围的陆壳发生同化混染作用,这一过程也很好解释了主碰撞阶段冈底斯带火成岩普遍高钾(图 2d)的地球化学特征。

在  $\text{Sr}/\text{Y}-\text{Y}$  图(图 2e)中,绝大部分数据点都落在了正常的弧岩浆区域,不具有埃达克质岩的亲石性。基于此,初步可以判断,主碰撞阶段冈底斯带岩浆演化过程中,岩浆源区不存在石榴子石的大量残留(Defant and Drummond, 1990),演化过程中并未出现大量石榴子石和角闪石的分离结晶(Macpherson *et al.*, 2006; Rodríguez *et al.*, 2007; Alonso-Perez *et al.*, 2009)。缺少埃达克质岩的分布,同时意味着主碰撞阶段冈底斯带火成岩大都不具有高的含水量和氧逸度(Richards, 2011),Wang 等(2014a)通过对主碰撞和后碰撞火成岩的对比研究证实了这一点,这也与冈底斯带主碰撞阶段并未出现具有规模斑岩型铜矿化的基本事实相一致。

### 3.2 氧逸度

估算岩浆的氧逸度具有很多的方法(Wang *et al.*, 2014b),浅成就位岩体的研究能获取岩浆演化终态的氧化还原状态,火山岩中的斑晶则能刻画岩浆演化早期的氧化还原状态(Kelley and Cottrell, 2009),但利用一些对氧化还原状态敏感的金属元素比值则能完整展示出岩浆演化过程中氧化还原状态的变化(Lee *et al.*, 2010)。在岩浆演化过程中,  $\text{Fe}^{3+}$  的相容性会增加,而 Zn 和  $\text{Fe}^{2+}$  具有中等不相容性,磁铁矿和角闪石的分离结晶则能引起  $\text{Fe}_T(\text{Fe}_T = \text{Fe}^{3+} + \text{Fe}^{2+})$  的亏损和  $\text{Zn}/\text{Fe}_T$  值的同步增加(Lee *et al.*, 2010),它们的分离结晶则需要使体系中的  $\text{Fe}^{3+}$  饱和,换言之,  $\text{Zn}/\text{Fe}_T$  值的升高和  $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}_T$  值升高具有同步性,  $\text{Zn}/\text{Fe}_T$  值就间接反映了体系的氧逸度,这也得到大量弧岩浆地球化学数据的验证(Lee *et al.*, 2010)。对冈底斯带主碰撞阶段大量火成岩的  $\text{Zn}/\text{Fe}_T$  对 MgO 投图(图 3),发现随着 MgO

的逐渐降低,岩浆中  $\text{Zn}/\text{Fe}_T$  值呈现逐渐升高的趋势,这意味着,岩浆从基性向中酸性演化过程中,岩浆的氧逸度会逐渐升高。这与弧岩浆的演化趋势具有相似性,说明岩浆演化有助于体系氧逸度的升高具有普遍性。

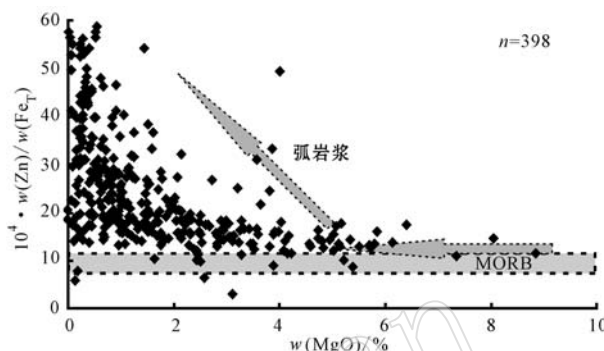


图 3 冈底斯带主碰撞阶段火成岩  $\text{Zn}/\text{Fe}_T$  对 MgO 图解 (底图据 Lee 等, 2010)

Fig. 3 Plots of  $\text{Zn}/\text{Fe}_T$  versus MgO for the main collisional period magmatic rocks of the Gangdise belt (modified from Lee *et al.*, 2010)

仔细对比弧岩浆和冈底斯带主碰撞阶段火成岩的  $\text{Zn}/\text{Fe}_T$  值对 MgO 图解,发现二者存在着一个较大的差别:弧岩浆中,当 MgO 演化到 5% 时,体系中  $\text{Zn}/\text{Fe}_T$  值开始急剧上升,然而在冈底斯带,岩浆中 MgO 演化到 2% 时,  $\text{Zn}/\text{Fe}_T$  值才开始急剧上升(图 3)。这说明冈底斯带岩浆中  $\text{Fe}^{3+}$  的饱和比弧岩浆的要迟缓,意味着主碰撞冈底斯带岩浆的氧逸度比弧岩浆要低很多。除了岩浆源区的差别,另一个重要的因素就是体系的含水量,深部岩浆体系的含水量和氧逸度具有正相关关系(Kelley and Cottrell, 2009),上文讨论得出的冈底斯带主碰撞岩浆中具有低的含水量与其低的氧逸度是一致的。但当岩浆演化到晚期,体系的含水量和氧逸度则会发生脱耦,因为当岩浆上升到地壳浅部,岩浆中含水量的控制因素变成了压力(Zimmer *et al.*, 2010),压力的降低会使得岩浆中水的饱和线急剧降低,发生强烈的去气作用。

主碰撞冈底斯带岩浆演化到  $\text{MgO} < 2\%$  时,体系中  $\text{Zn}/\text{Fe}_T$  值开始急剧上升(图 3),这一现象是值得探讨的。  $\text{Zn}/\text{Fe}_T$  值的升高和  $\text{Fe}_T$  (图 2c)的同时降低仅仅能通过磁铁矿和角闪石的分离结晶实现(Lee *et al.*, 2010),对主碰撞阶段冈底斯带,岩浆演化中发生过大规模角闪石分离结晶是可以排除的,因为角闪石的分离结晶需要岩浆中具有高的含水量

(Davidson *et al.*, 2007), 已有的研究并不支持这一点(Wang *et al.*, 2014a), 缺少埃达克质岩的分布同样也否定了这种可能。对于磁铁矿, 若 MgO 演化到  $<2\%$ , 其开始大量分离结晶, 必定会造成体系中  $\text{Fe}_T$  含量的急剧降低, 然而在图 2c 中, MgO 在  $2\%$  前后, 并未出现  $\text{Fe}_T$  亏损速率的变化。因此, 结晶分异模型难以解释大陆碰撞造山带早期岩浆体系氧逸度的演化过程, 对于控制岩浆氧逸度升高的机制, 还有待进一步研究。

#### 4 对成矿作用的控制

众所周知, 岩浆中高的含水量( $>4\%$ )和氧逸度是形成斑岩型矿床的必要条件(Sillitoe, 2010; 侯增谦等, 2012)。主碰撞阶段冈底斯带发育的火成岩普遍具有低的含水量和氧逸度, 然而在冈底斯带北缘却发育有一系列与岩浆相关的铅锌矿床, 显然, 经典的弧环境斑岩成矿模型在冈底斯带北缘不具有适用性。

为探究关键成矿元素在岩浆演化过程中的地球化学行为, 分别用火成岩中的 Pb、Zn 含量对 MgO 值进行了投图(图 4)。随着岩浆演化, 体系中的 Pb 含量会逐渐升高(图 4a), 意味着高度演化的岩浆更利

于 Pb 的富集, 这也与冈底斯北缘铅锌矿成矿岩体普遍具有极高  $\text{SiO}_2$  含量( $>75\%$ )(杨勇等, 2010b; 王保弟等, 2012; 段志明等, 2014)的基本事实相一致。对于 Zn, 随着岩浆演化, 其在岩浆体系中的含量却逐渐降低(图 4b), 说明高度演化的岩浆不利于 Zn 的富集, 这与冈底斯北缘普遍发育铅锌共生矿化的现象相矛盾。但若存在一个富 Zn 的岩浆源区, 初始岩浆中高的 Zn 含量可平衡晚期演化过程造成的亏损, 使得最后体系中 Pb、Zn 均具有较高的浓度。冈底斯北缘轧龙铅锌矿成矿岩体中富 Zn 角闪石岩捕虏体的发现(周金胜等, 待刊资料), 就证实了这种可能。

Zn 来自于异常富集的岩浆源区, Pb 的富集则需要岩浆经历高度的演化, 但这里 Pb 的富集存在两种机制: 其一, 由于 Pb 元素具不相容性, 岩浆体系自身不断的结晶分异便会使得残余熔体中的 Pb 含量逐渐升高; 另一种机制则是陆壳混染, 与富 Pb 的上地壳之间的同化混染作用会增加体系中的 Pb 含量, 上文的讨论也证实了陆壳混染在大陆碰撞造山初期岩浆演化中起到了关键控制作用。虽然已有的铅同位素数据(杨勇等, 2010)支持后者, 但笔者更倾向于认为, Pb 的富集是两种机制共同作用的结果。

以上主要探讨了金属元素的富集机制, 但除了金属元素, 成矿还需要足够的 S 和  $\text{H}_2\text{O}$ 。地壳物质的熔融产生了冈底斯北成矿带的含矿岩浆, 但其难以提供足够的成矿所需的 S 和  $\text{H}_2\text{O}$ (侯增谦等, 2012)。已有研究表明, 地幔楔起源的初始岩浆, 含有  $>4\,000 \times 10^{-6}$  的 S 和  $6.5\%$  的  $\text{H}_2\text{O}$ (Zimmer *et al.*, 2010), 因而富 S 和  $\text{H}_2\text{O}$  的幔源岩浆底侵诱发地壳物质熔融或许是产生冈底斯北缘铅锌矿带含矿岩浆可能的机制。然而产生富水幔源岩浆最为理想的机制是大洋板片的俯冲, 冈底斯带主碰撞早期( $>60\text{ Ma}$ ), 深部大洋俯冲作用依然存在, 为富水幔源岩浆的产生提供了可能, 这也很好解释了为什么冈底斯北缘铅锌矿成岩年龄大都集中在主碰撞早期( $60 \sim 65\text{ Ma}$ )的基本事实。综上所述, 富 S 和  $\text{H}_2\text{O}$  的幔源岩浆底侵, 诱发含有较高 Zn 含量的陆壳物质熔融, 产生的岩浆经历高度的演化(结晶分异和同化混染), 最终浅成就位, 形成冈底斯北缘铅锌矿带。

#### 5 结论

基于对冈底斯带主碰撞阶段大量火成岩地球化学数据和关键成矿元素的分析, 得到如下几

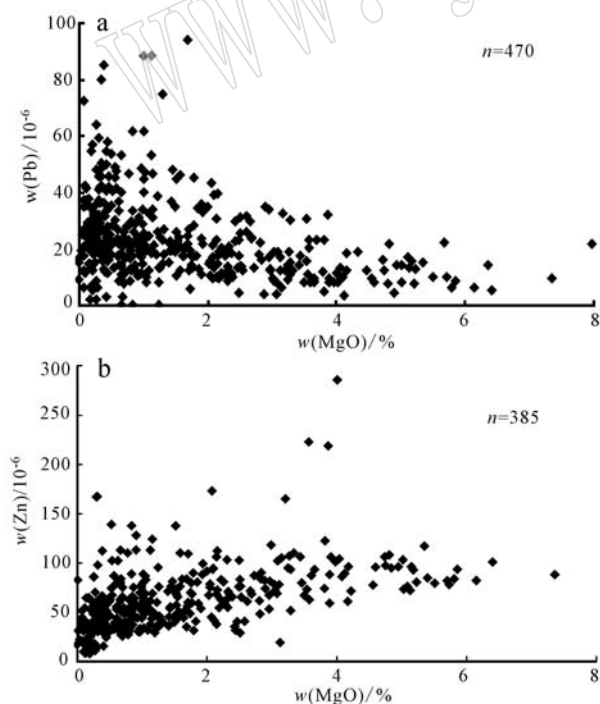


图 4 冈底斯带主碰撞阶段火成岩 Pb(a)、Zn(b)对 MgO 图解

Fig. 4 Plots of Pb (a) and Zn (b) versus MgO for the main collisional period magmatic rocks of the Gangdise belt

点初步认识:

(1) 陆壳混染作用是主碰撞期控制岩浆演化的关键因素。

(2) 主碰撞期岩浆中含水量和氧逸度普遍不高,但演化到中后期,岩浆氧逸度会逐渐升高。

(3) 富 S 和  $H_2O$  的幔源岩浆底侵,诱发含有较高 Zn 含量的陆壳物质熔融,产生的岩浆经历高度的演化(以达到 Pb 的富集),最终浅成就位形成岩浆-热液成矿系统,这是形成冈底斯北缘铅锌矿带的成矿动力学机制。

**致谢** 本文统计数据来自于莫宣学等 44 位学者在 1998~2014 年间公开发表的 45 篇文章,由于文章篇幅限制,参考文献未能一一列出,谨表歉意。杨天南研究员和郑远川副教授为本文提出了很多宝贵的修改意见,使本人受益匪浅,杨志明副研究员在成文过程中给予了大力支持,马旺同学在文章图表制作中提供了帮助,在此一并表示由衷的感谢。

## References

- Alonso-Perez R, Müntener O and Ulmer P. 2009. Igneous garnet and amphibole fractionation in the roots of island arcs: experimental constraints on andesitic liquids[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 157(4): 541~558.
- Berndt J, Koepke J and Holtz F. 2005. An experimental investigation of the influence of water and oxygen fugacity on differentiation of MORB at 200 MPa[J]. *Journal of Petrology*, 46(1): 135~167.
- Chiaradia M. 2013. Copper enrichment in arc magmas controlled by overriding plate thickness[J]. *Nature Geoscience*, 7(1): 43~46.
- Davidson J, Turner S, Handley H, *et al.* 2007. Amphibole "sponge" in arc crust? [J]. *Geology*, 35(9): 787~790.
- Defant M J and Drummond M S. 1990. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere[J]. *Nature*, (6 294): 662.
- Duan Zhiming, Li Guangming, Li Yingxu, *et al.* 2014. Geochronology and geochemical characteristics of ore-bearing porphyry in Longgen lead-zinc deposit of middle-Gangdese metallogenic belt, Tibet[J]. *Mineral Deposits*, 33(3): 625~638 (in Chinese with English abstract).
- Fei Fan. 2014. Tibet Leqingla and Mengyaa Pb-Zn Deposit Metallogenic Characteristics of the Contrast[D]. Beijing: China University of Geosciences(in Chinese with English abstract).
- Fei Guangchun, Duo Ji, Wen Chunqi, *et al.* 2011. S, Pb and Sr isotopic compositions for tracing sources of ore-forming materials in Dongzhongla Lead-Zinc deposit in Tibet[J]. *J. Mineral Petrol.*, 31(4): 52~57 (in Chinese with English abstract).
- Fei Guangchun, Wen Chunqi, Zhou Xiong, *et al.* 2010. Laser Microprobe Ar-Ar geochronology of quartz from Dongzhongla Lead-Zinc deposit in Tibet and its significance[J]. *J. Mineral Petrol.*, (3): 38~43(in Chinese with English abstract).
- Fu Qiang, Zheng Yuanchuan and Huang Kexian. 2012. Sulfur and lead isotopic compositions of Longmala polymetallic deposit, Tibet and its geological significance[J]. *Nonferrous Metals(Mining Section)*, 64(4): 26~30(in Chinese with English abstract).
- Fu Qiang, Yang Zhusen, Zheng Yuanchuan, *et al.* 2014. Ar-Ar age of phlogopite from the Longmala copper-iron-lead-zinc deposit in Tibet and its geodynamic significance[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 33(2): 283~293(in Chinese with English abstract).
- Gao Shunbao, Zheng Youye, Tian Liming, *et al.* 2012. Geochronology of magmatic intrusions and mineralization of Chagale copper-lead-zinc deposit in Tibet and its implications[J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 37(3): 507~514(in Chinese with English abstract).
- Gao Yiming, Chen Yuchuan, Wang Chenghui, *et al.* 2011. Zircon Hf isotopic characteristics and constraints on petrogenesis of Mesozoic-Cenozoic magmatic rocks in Nyainqentanglha region, Tibet[J]. *Mineral Deposits*, 30(2): 279~291 (in Chinese with English abstract).
- Hou Zengqian. 2010. Metallogensis of continental collision[J]. *Acta Geologica Sinica*, 84(1): 30~58(in Chinese with English abstract).
- 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.
- Hou Zengqian, Mo Xuanxue, Gao Yongfeng, *et al.* 2006d. 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, Pan Guitang, Wang Anjian, *et al.* 2006b. 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, Qu Xiaoming, Yang Zhusen, *et al.* 2006a. Metallogenesis

- sis in Tibetan collisional orogenic belt: III. Mineralization in post-collisional extension setting[J]. *Mineral Deposits*, 25(5): 629~651(in Chinese with English abstract).
- Hou Zengqian, Yang Zhusen, Xu Wenyi, *et al.* 2006b. Metallogenesis in Tibetan collisional orogenic belt: II. Mineralization in late-collisional transformation setting[J]. *Mineral Deposits*, 25(4): 521~543(in Chinese with English abstract).
- Hou Zengqian, Zheng Yuanchuan, Yang Zhiming, *et al.* 2012. Metallogenesis of continental setting: Part I. Gangdese Cenozoic porphyry Cu-Mo systems in Tibet[J]. *Mineral Deposits*, 31(4): 647~670(in Chinese with English abstract).
- 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).
- Ji Xianhua, Meng Xiangjin, Yang Zhusen, *et al.* 2014. The Ar-Ar geochronology of sericite from the cryptoexplosive breccias type Pb-Zn deposit in Narusongduo and its significance[J]. *Geology and Prospecting*, 50(2): 281~290(in Chinese with English abstract).
- Ji Xianhua, Yang Zhusen, Yu Yushuai, *et al.* 2012. Formation mechanism of magmatic rocks in Narusongduo lead-zinc deposit of Tibet: Evidence from magmatic zircon[J]. *Mineral Deposits*, 31(4): 758~774(in Chinese with English abstract).
- Kelley K A and Cottrell E. 2009. Water and the oxidation state of subduction zone magmas[J]. *Science*, 325(5940): 605~607.
- Lee C T A. 2014. Economic geology: Copper conundrums[J]. *Nature Geoscience*, 7(1): 10~11.
- Lee C T A, Lee T C and Wu C T. 2013. Modeling the compositional evolution of recharging, evacuating, and fractionating (REFC) magma chambers: implications for differentiation of arc magmas[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 143: 8~22.
- Lee C T A, Luffi P, Chin E J, *et al.* 2012. Copper systematics in arc magmas and implications for crust-mantle differentiation[J]. *Science*, 336(6077): 64~68.
- Lee C T A, Luffi P, Le Roux V, *et al.* 2010. The redox state of arc mantle using Zn/Fe systematics[J]. *Nature*, 468(7324): 681~685.
- Lian Yonglao, Cao Xinzh, Yan Changhai, *et al.* 2009. Geological characteristics and genesis of Yaguila lead-zinc deposit in the Gongbujiangda Country of Tibet province[J]. *Geology and Exploration*, 45(5): 570~576(in Chinese with English abstract).
- Liu Bo, Dong Suiliang, Li Guangming, *et al.* 2010. Geochronology and geochemical characteristics of ore-bearing porphyry in Sinongduo lead-zinc deposit, Tibet [J]. *Mineral Deposits*, (S): 472~473(in Chinese).
- Macpherson C G, Dreher S T and Thirlwall M F. 2006. Adakites without slab melting: High pressure differentiation of island arc magma, Mindanao, the Philippines[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 243: 581~593.
- Meinert L D, Dipple G M and Nicolescu S. 2005. World skarn deposits [A]. *Economic Geology 100th Anniversary Volume* [C], 299~336.
- Mo Xuanxue. 2011. Magmatism and evolution of the Tibetan Plateau [J]. *Geological Journal of China Universities*, 17(3): 351~367(in Chinese with English abstract).
- Mo X, Hou Z, Niu Y, *et al.* 2006. Mantle contributions to crustal thickening during continental collision: evidence from Cenozoic igneous rocks in southern Tibet[J]. *Lithos*, 96(1): 225~242.
- Mo Xuanxue, Zhao Zhidan, Deng Jinfu, *et al.* 2003. Response of volcanism to the India-Asia collision[J]. *Earth Science Frontiers*, 10(3): 135~148(in Chinese with English abstract).
- Muñtener O, Kelemen P B and Grove T L. 2001. The role of H<sub>2</sub>O during crystallization of primitive arc magmas under uppermost mantle conditions and genesis of igneous pyroxenites: an experimental study[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 141(6): 643~658.
- 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): 521~533(in Chinese with English abstract).
- Richards J P. 2011. High Sr/Y arc magmas and porphyry Cu±Mo±Au deposits: just add water[J]. *Economic Geology*, 106(7): 1075~1081.
- Rodríguez C, Sellés D, Dungan M, *et al.* 2007. Adakitic dacites formed by intracrustal crystal fractionation of water-rich parent magmas at Nevado de Longavi volcano, Andean Southern Volcanic Zone, central Chile[J]. *Journal of Petrology*, (11): 2033~2061.
- Sillitoe R H. 2010. Porphyry copper systems[J]. *Economic Geology*, 105(1): 3~41.
- Tang Juxing, Chen Yuchuan, Wang Denghong, *et al.* 2009. Re-Os dating of Molybdenite from the Sharang porphyry molybdenum deposit in Gongbogyamda County, Tibet and its geological significance [J]. *Acta Geologica Sinica*, 83(5): 698~704(in Chinese with English abstract).

- Wang Baodi, Guo Lin, Wang Liquan, *et al.* 2012. Geochronology and petrogenesis of the ore-bearing pluton in Chagale deposit in middle of the Gangdese metallogenic belt[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 28(5): 1 647~1 662(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).
- Wang R, Richards J P, Hou Z, *et al.* 2014b. Increasing magmatic oxidation state from Paleocene to Miocene in the eastern Gangdese Belt, Tibet: Implication for collision-related porphyry Cu-Mo±Au mineralization[J]. *Economic Geology*, 109(7): 1 943~1 965.
- Wang R, Yang Z, Andrew DuFrane S, *et al.* 2014a. Increased magmatic water content-The key to Oligo-Miocene porphyry Cu-Mo±Au formation in the eastern Gangdese Belt, Tibet[J]. *Economic Geology*, 109(5): 1 315~1 339.
- Yang Yong, Luo Taiyi, Huang Zhilong, *et al.* 2010a. Sulfur and lead isotope compositions of the Narusongduo silver zinc-lead deposit in Tibet: Implications for the sources of plutons and metal in the deposit[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 30(3): 311~318(in Chinese with English abstract).
- Yang Yong, Luo Taiyi, Yang Zhushen, *et al.* 2010b. A comparison of porphyries between Pb-Zn-Ag metallogenic system and Cu-Mo-Au metallogenic system in Gangdese orogen, Tibet[J]. *Mineral Deposits*, 29(2): 195~206(in Chinese with English abstract).
- Yang Zhiming and Hou Zengqian. 2009. Qulong superlarge porphyry Cu deposit in Tibet: Geology, alteration and mineralization[J]. *Mineral Deposits*, 28(5): 515~538(in Chinese with English abstract).
- Yang Zhiming, Hou Zengqian, Song Yucai, *et al.* 2008. Qulong superlarge porphyry Cu deposit in Tibet: Geology, alteration and mineralization[J]. *Mineral Deposits*, 27(3): 279~318(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(1): 211~280.
- Zhu D C, Zhao Z D, Niu Y, *et al.* 2012. The origin and pre-Cenozoic evolution of the Tibetan Plateau[J]. *Gondwana Research*, 23(4): 1 429~1 454.
- Zhu Dicheng, Zhao Zhidan, Niu Yaoling, *et al.* 2012. Origin and Paleozoic Tectonic Evolution of the Lhasa Terrane[J]. *Geological Journal of China Universities*, 18(1): 1~15(in Chinese with English abstract).
- Zimmer M M, Plank T, Hauri E H, *et al.* 2010. The role of water in generating the calc-alkaline trend: new volatile data for Aleutian magmas and a new tholeiitic index[J]. *Journal of Petrology*, 51(12): 2 411~2 444.

## 附中文参考文献

- 段志明, 李光明, 李应翔, 等. 2014. 中冈底斯成矿带龙根铅锌矿床含矿斑岩年代学与地球化学特征[J]. *矿床地质*, 33(3): 625~638.
- 费凡. 2014. 西藏勒青拉与蒙亚啊 Pb-Zn 矿床成矿特征对比[D]. 中国地质大学(北京).
- 费光春, 多吉, 温春齐, 等. 2011. 西藏洞中拉铅锌矿床 S, Pb, Sr 同位素组成对成矿物质来源的示踪[J]. *矿物岩石*, 31(4): 52~57.
- 费光春, 温春齐, 周雄, 等. 2010. 西藏洞中拉铅锌矿床石英激光探针<sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar 定年及地质意义[J]. *矿物岩石*, (3): 38~43.
- 付强, 杨竹森, 郑远川, 等. 2014. 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[J]. *岩石矿物学杂志*, 33(2): 283~293.
- 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.
- 高顺宝, 郑有业, 田立明, 等. 2012. 西藏查个勒铜铅锌矿成岩成矿时代及意义[J]. *地球科学: 中国地质大学学报*, 37(3): 507~514.
- 高一鸣, 陈毓川, 王成辉, 等. 2011. 亚贵拉-沙让-洞中拉矿集区中新世代岩浆岩 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. 2010. 大陆碰撞成矿论[J]. *地质学报*, 84(1): 30~58.
- 侯增谦, 莫宣学, 高永丰, 等. 2006d. 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证据[J]. *地质学报*, 80(9): 1 233~1 248.
- 侯增谦, 潘桂棠, 王安建, 等. 2006c. 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. 2006a. 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. 2006b. 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, 郑远川, 杨志明, 等. 2012. 大陆碰撞成矿作用: I. 冈底斯新生代斑岩成矿系统[J]. *矿床地质*, 31(4): 647~670.
- 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 定年及地质意义[J]. 岩石矿物学杂志, 31(3): 348~360.
- 纪现华, 孟祥金, 杨竹森, 等. 2014. 西藏纳如松多隐爆角砾岩型铅锌矿床绢云母 Ar-Ar 定年及其地质意义[J]. 地质与勘探, 51(2): 281~290.
- 纪现华, 杨竹森, 于玉帅, 等. 2012. 西藏纳如松多铅锌矿床成矿岩体形成机制: 岩浆锆石证据[J]. 矿床地质, 31(4): 758~774.
- 连永牢, 曹新志, 燕长海, 等. 2009. 西藏工布江达县亚贵拉铅锌矿床地质特征及成因分析[J]. 地质与勘探, 45(5): 570~576.
- 刘 波, 董随亮, 李光明, 等. 2010. 西藏斯弄多铅锌矿岩体地球化学特征及年龄地质意义[C]. 矿床地质, (S): 472~473.
- 莫宣学. 2011. 岩浆作用与青藏高原演化[J]. 高校地质学报, 17(3): 351~367.
- 莫宣学, 赵志丹, 邓晋福, 等. 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): 135~148.
- 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(3): 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-钨同位素年龄及其地质意义[J]. 地质学报, 83(5): 698~704.
- 王保弟, 郭 琳, 王立全, 等. 2012. 中冈底斯成矿带查个勒矿床含矿岩体的年代学及成因[J]. 岩石学报, 28(5): 1647~1662.
- 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 勇, 罗泰义, 黄智龙, 等. 2010a. 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[J]. 矿物学报, 30(3): 311~318.
- 杨 勇, 罗泰义, 杨竹森, 等. 2010b. 冈底斯造山带两套不同成矿体系的含矿斑岩对比研究[J]. 矿床地质, 29(2): 195~206.
- 杨志明, 侯增谦. 2009. 初论碰撞造山环境斑岩铜矿成矿模型[J]. 矿床地质, 28(5): 515~538.
- 杨志明, 侯增谦, 宋玉财, 等. 2008. 西藏驱龙超大型斑岩铜矿床: 地质、蚀变与成矿[J]. 矿床地质, 27(3): 279~318.
- 朱弟成, 赵志丹, 牛耀龄, 等. 2012. 拉萨地体的起源和古生代构造演化[J]. 高校地质学报, 18(1): 1~15.