

青藏高原冈底斯带南缘泽当多金属矿田 多期岩浆活动及年代意义

赵 珍¹⁾, 吴珍汉^{1)*}, 胡道功²⁾, 陆 露¹⁾

1)中国地质科学院, 北京 100037; 2)中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081

摘要: 通过近3年野外观测、测试分析及综合研究, 在西藏泽当矿田鉴别出五期中酸性岩浆活动; 应用LA-MC-ICPMS(激光探针)锆石U-Pb同位素测年方法分别测定各期岩浆形成时代, 并分析不同时期岩浆形成的构造背景及资源效应。泽当西奥长花岗岩锆石U-Pb年龄为(156 ± 1.0)~(152.5 ± 1.3) Ma, 为埃达克岩, 其岩浆演化与特提斯古大洋板块北向俯冲存在成因联系, 形成于洋内弧构造环境; 泽当北部桑布加拉砂卡岩铜矿成矿母岩花岗闪长岩锆石U-Pb年龄(94.10 ± 0.96) Ma, 显示埃达克岩特征, 源于俯冲板块熔融, 并在上升过程中受到了地幔楔物质的混染, 岩浆演化可能与桑日岛弧洋内俯冲相关; 在泽当东侧发现古新世和始新世两期花岗闪长岩, 锆石U-Pb年龄分别为(63.0 ± 1.0) Ma和(50.2 ± 1.3)~(45.93 ± 0.21) Ma, 均显示陆缘弧岩浆岩特征, 与印度—亚洲大陆初始碰撞有关; 在泽当东获得石英二长岩锆石U-Pb年龄为(31.64 ± 0.47)~(29.88 ± 0.39) Ma, 其中冲木达岩体为埃达克质岩, 而明则岩体显示高钾特征, 前者可能与碰撞中晚期俯冲到拉萨地块之下的印度板块的熔融有关, 但这两者很可能是外来岩体(浆), 不能代表泽当矿田的构造演化特征。综合锆石U-Pb同位素年龄及岩石地球化学特征推断, 泽当矿田前四期岩浆活动可能分别与多期新特提斯洋内俯冲、印度—亚洲大陆初始碰撞有关, 并且存在受后期断层影响的外来渐新世岩体(浆)。

关键词: 多期岩浆作用; 激光探针测年; 区域构造演化; 泽当矿田; 冈底斯带; 青藏高原

中图分类号: P511.4; P597.1 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2014.06.05

Multistage Magmatism of the Zetang Polymetallic Orefield on the Southern Margin of the Gangdise Belt in the Tibetan Plateau and Its Chronological Significance

ZHAO Zhen¹⁾, WU Zhen-han^{1)*}, HU Dao-gong²⁾, LU Lu¹⁾

1) Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037;
2) Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081

Abstract: Five-phase acidic magmatism was identified through nearly three years' field observation, test analysis and study in the Zetang orefield on the southern margin of the Gangdise belt. The LA-MC-ICPMS (laser probes) method was used to determine the zircon U-Pb isotope magma formation age and analyze the magma-forming tectonic background and the effects of natural resources. The zircon U-Pb isotope age of trondhjemites in the west of Zetang County is (156 ± 1.0)~(152.5 ± 1.3) Ma. The rocks are adakites, suggesting that the Paleo-Tethys ocean plate subducted northward and formed an intra-oceanic arc tectonic setting in Jurassic. The zircon U-Pb isotope age of host granodiorite rocks (adakites) of the Sangbjiala deposit located in the north of Zetang County is (94.1 ± 0.96) Ma. The magma probably originated from melting of subduction block, and was contaminated by mantle wedge material. Magmatic evolution was closely related to the intra-oceanic subduction

本文由中国地质调查局地质矿产调查评价专项(编号: 1212011120185)资助。

收稿日期: 2014-04-03; 改回日期: 2014-08-17。责任编辑: 魏乐军。

第一作者简介: 赵珍, 女, 1987年生。博士研究生。主要从事青藏高原地质构造研究。E-mail: zhaozhen03@126.com。

*通讯作者: 吴珍汉, 男, 1965年生。研究员, 博士生导师。长期从事青藏高原区域地质调查与地质构造研究工作。

E-mail: zhenhanwu@cags.ac.cn。

of Sangri Island Arc. There existed two phases of magmatic activities in the east of Zetang County, with the zircon isotope age of granodiorite being (63.0 ± 1.0) Ma and $(50.2\pm1.3) \sim (45.93\pm0.21)$ Ma respectively, both of them exhibited continental margin arc features, which indicates initial India-Asian collision. The zircon isotope age of adamellite in the east of Zetang Country is $(31.64\pm0.47) \sim (29.88\pm0.39)$ Ma, and the petrogeochemistry of these two kinds of rocks shows different characteristics. The Chongmuda granites are adakitic rocks, while the Mingze granites are potassium-rich rocks. It is estimated that the adakitic magma came from the melting of India plate underneath the Lhasa Block. However, the two intrusive rocks are probably exotic blocks or are not original magma, whose geochemistry can not represent the tectonic and magmatic evolution of the Zetang polymetallic orefield. Based on the zircon isotope ages, petrology and geochemistry, the authors have reached the conclusion that the first four phases of magmatic activities had close dynamic relationship with the multistage ocean subduction and initial India-Asian continent collision, and the Late Oligocene alien rocks were affected by the faults in the Zetang orefield.

Key words: multistage magmatism; Laser microprobe dating; regional tectonic evolution; Zetang orefield; Gangdise belt; Tibetan Plateau

青藏高原是国际公认的大陆动力学研究天然实验室,尤其是青藏高原南部,发育规模巨大的冈底斯岩浆带,并分为北、中、南等三个亚带(莫宣学等,2005),其中南带与冈底斯岩基(Chu et al., 2006; Wen et al., 2008)和南冈底斯花岗岩带(朱弟成等,2008)类同。由于花岗岩能够反映大陆地壳的形成和演化,因此许多学者对冈底斯岩基进行了大量研究,以探讨新特提斯洋俯冲消减以及印度—亚洲大陆碰撞过程。

Scharer 等(1984)获得 Ladakh 地区和日喀则地区花岗岩锆石 U-Pb 年龄分别为 101~61 Ma 和 94~41 Ma, 岩浆活动与特提斯俯冲有关; Harris 等(1988)认为冈底斯岩基与地壳同化作用有关; 至 21 世纪, 莫宣学等(2005)、Chung 等(2005)、朱弟成等(2008)、Wen 等(2008)基本查明了冈底斯岩基花岗岩的时空分布及相关地球化学特征, 认为冈底斯侵入活动集中在晚白垩世($103\sim80$ Ma)和早第三纪($65\sim46$ Ma), 并对其可能的形成模式进行了探讨。除了区域性研究之外, 在泽当铜多金属矿田, 前人也做了许多工作。Aitchison 等(2000)认为泽当地区在白垩纪发生了一期洋内俯冲作用; 而 McDermid 等(2002)获得泽当岩群基性火山岩年龄为 $161.9\sim162.5$ Ma, 中酸性侵入岩年龄为 $157.2\sim163.3$ Ma, 将洋内俯冲作用提前到侏罗纪; 韦栋梁等(2007a)、王莉等(2012)认为泽当地体内英云闪长岩和花岗闪长岩(157.5 Ma)可能产于洋内俯冲作用; Wen 等(2008)获得泽当镇及桑日附近花岗闪长岩年龄为 ~60 Ma。在矿产资源和区域性断裂的调查研究中, 获得矿田成岩年龄 $27.7\sim30.4$ Ma(Harrison et al., 2000; 莫济海等, 2008; 姜子琦等, 2011)以及冈底斯断层和仁布—泽当断层活动时限($27\sim23$ Ma 和 $18\sim10$ Ma)(Yin et al., 1994, 1999; Quidelleur et al., 1997)。

不同学者在泽当多金属矿田地区获得不同的

岩浆活动时代, 提出岩浆形成演化的不同认识, 甚至产生学术分歧。作者通过多年野外观测、测试分析和综合研究, 发现该地区存在 5 期岩浆活动, 不同时期岩浆活动和不同时期次构造运动存在密切关系。研究泽当岩浆演化对深化认识雅鲁藏布江缝合带的形成演化规律和构造岩浆成矿关系具有比较重要的学术意义。

泽当铜多金属矿田(以下简称为泽当矿田)位于山南地区泽当镇乃东县与桑日县之间, 包括明则、程巴、努日、冲木达、桑布加拉等钨、铜、钼矿床组合, 大地构造位置紧邻雅鲁藏布江缝合带, 隶属于冈底斯岩基东段和冈底斯成矿带南缘(同学义等, 2010)(图 1)。

雅鲁藏布江洋盆在晚三叠世时开始扩张(Pearce et al., 1988), 并于早中侏罗世发生洋内俯冲, 形成洋内岛弧火山岩系(泽当岩群)(McDermid et al., 2002; 韦栋梁等, 2007a; 王莉等, 2012); 晚白垩世, 特提斯洋壳继续向拉萨地块下俯冲, 泽当矿田发育花岗闪长岩、黑云母二长花岗岩; 白垩纪末—始新世早期, 特提斯洋壳开始闭合, 在泽当矿田南部出露大套的蛇绿岩、复理石建造等, 构成雅鲁藏布江缝合带, 并发育大规模林子宗群火山岩系及同期侵入岩; 印度—欧亚大陆板块于新生代开始碰撞(Rowley et al., 2006), 并导致大规模逆冲推覆构造运动(Wu et al., 2013)和中酸性岩浆侵入活动; 在古近纪晚期到新近纪早期, 冈底斯逆冲断层和仁布—泽当断层依次开始活动(Yin et al., 1994, 1999; Harrison et al., 2000), 并发育花岗闪长岩、石英二长岩等中酸性岩体; 约 $20\sim14$ Ma, 青藏高原发生东西向伸展, 形成近南北走向的地堑系(Coleman et al., 1995), 伴有埃达克质岩浆侵入和铜多金属成矿作用, 形成斑岩-矽卡岩型铜矿带, 成岩成矿时代集中在 $13\sim18$ Ma(侯增谦等, 2004; 唐菊兴等, 2012; 李建康等, 2013)。泽当矿田

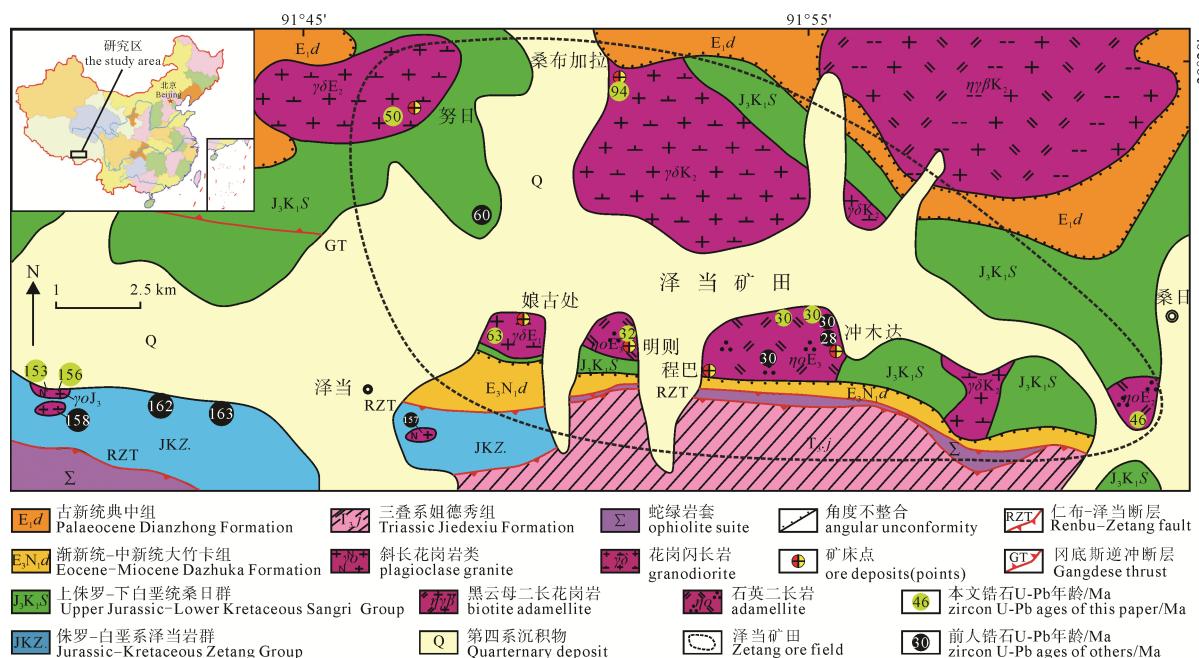


图 1 泽当矿田地质简图(据 1:25 万泽当镇幅及闫学义等, 2010 修改)

Fig. 1 Sketch geological map of the Zetang orefield (modified after 1:250000 Zetang Sheet Map and YAN et al., 2010)

位于铜矿带南缘, 广泛出露晚中生代桑日群火山沉积岩系的比马组和麻木下组, 侵入体与围岩发生热液接触蚀变作用, 形成了以矽卡岩型-斑岩型成因为主的铜多金属矿床(李光明等, 2006)。

1 样品及分析方法

1.1 样品

本文对研究区岩浆岩样品进行了锆石 U-Pb LA-MC-ICPMS 年代学测试和全岩元素地球化学测试。样品大部分取自泽当矿田内, 部分取自泽当以西泽当岩群。样品位置见图 1。所有样品均取自新鲜露头, 结构构造关系较为清楚。

1.2 锆石 U-Pb 同位素测年

从代表性样品中分选出锆石, 经过挑选、制靶和抛光, 然后进行阴极发光观察, 揭示锆石内部结构。在天津地质矿产研究所同位素实验室进行锆石 U-Pb 同位素测试, 所用仪器为 Thermo Fisher 公司制造的 Neptune 激光烧蚀多接收器电感耦合等离子体质谱仪(LA-MC-ICPMS), 激光器为美国 ESI 公司生产的 UP193-FX ArF 准分子激光器, 激光波长 193 nm, 脉冲宽度 5 ns, 束斑直径为 2~150 μm 可调, 脉冲频率 1~200 Hz 连续可调, 采用中国地质大学研发的 ICPMSDataCal 程序和 Ludwig 的 Isoplot 程序进行数据处理, 采用 ^{208}Pb 校正法对普通铅进行校正。分析时每测定 5 个点, 插入一次标样测定。

样品主要由斜长石、石英、角闪石以及黑云母组成, 副矿物包括榍石、磷灰石和锆石等。锆石晶形良好, 以长柱状-短柱状为主, 晶形平均长度

75~130 μm, 长宽比 1:1~3:1, 锆石发育清晰的环带结构(图 2)。锆石 U 含量在 77×10^{-6} ~ 2221×10^{-6} 之间, 其中小于 100×10^{-6} 或大于 2000×10^{-6} 的极少; Th/U 值多 > 0.1。较高的 Th/U 比值和清晰的韵律环带表明样品是岩浆成因。样品在图上相对集中分布(图 2), 可信度较高, 能代表岩浆结晶年龄。

1.3 全岩元素地球化学

样品主量及微量元素测试在中国地质科学院国家地质实验测试中心进行。主量元素通过 XRF(X 荧光光谱仪 3080E)方法测试, 分析精度为 5%。微量元素和稀土元素通过等离子质谱仪(ICP-MS-Excell)分析, 含量大于 10×10^{-6} 的元素的测试精度为 5%, 小于 10×10^{-6} 的元素精度为 10%。测试结果见表 1。

2 结果及分析

2.1 晚侏罗世岩浆活动

本次获得泽当岩群中奥长花岗岩锆石 U-Pb 平均年龄为 (156 ± 1) Ma 和 (152.5 ± 1.3) Ma(图 2a, b), 与岩群内石英闪长岩、花岗闪长岩、基性火山岩年龄 161.9~152.2 Ma(McDermid et al., 2002; 王莉等, 2012)近于一致。

在标准矿物 CIPW 分类上, 样品落入奥长花岗岩区(图 3a), 显示钙碱性和准铝质特征(图 3c, d); 轻重稀土分异明显, LREE 富集, MREE 相对 HREE 亏损, 具有明显的正 Eu 异常, 说明没有斜长石分离结晶, 但可能经历了角闪石分异(图 3e); 富集 Rb、Ba、Th、U、K, 亏损 Ti、Ta、Nb、Ce、P, 显示岛弧岩浆岩特征(图 3f), 应形成于与俯冲有关的背景;

撞时期, 处于特提斯洋演化发展阶段, 不存在下地壳拆沉或底侵玄武岩熔融, 因此也不是陆内环境形成的埃达克岩; 在高硅-低硅埃达克岩特征上(Martin et al., 2005), 样品为高硅埃达克岩, 很可能与俯冲环境有关, 来自大洋板片熔融, 并且岩浆在上升过程中受到了地幔楔物质的混染(Rapp et al., 1999), 导致样品具有较高的 Cr、Ni 含量及 Mg[#]; Th/Yb 比值介于 9.5~17.2 之间, 表明源区可能有沉积物的贡献(Elburg et al., 2002; Guo et al., 2005)。

在 Harker 图解上(图略), 奥长花岗岩与英云闪长岩可能存在成因上的相关, 而英云闪长岩可能来自亏损地幔或具有亏损地幔特征的洋壳(韦栋梁等, 2007a; 王莉等, 2012)。此外, 泽当岛弧火山岩中发育洋内拉斑玄武岩(韦栋梁等, 2007b), 与钙碱性活动陆缘弧构造背景不同; 南侧发育弧前环境下的俯冲消减带之上的 SZZ 型蛇绿岩(韦栋梁等, 2007b), 以上特征均反映了与洋内俯冲有关的构造背景, 与前人提出的泽当地区中侏罗世发育的洋内俯冲背景一致(Aitchison et al., 2000; McDermid et al., 2002; 韦栋梁等, 2007a; 王莉等, 2012)。

156~152 Ma 的奥长花岗岩指示了大洋板片俯冲熔融的背景, 地球化学特征和相关地质背景进一步验证了研究区在中侏罗世可能存在一期洋内俯冲作用。但是与同期岛弧火山系中的英云闪长岩和花

岗闪长岩相比, 在地球化学特征和岩浆来源演化上仍存在差异, 但是要确定这三类花岗岩之间的关系, 需要作下一步同位素地球化学等方面的研究。

2.2 晚白垩世岩浆活动

泽当矿田白垩世侵入岩出露较少, 本文新获得桑布加拉铜矿床成矿母岩花岗闪长岩锆石 U-Pb 平均年龄为(94.10±0.96) Ma(图 2c)。桑布加拉花岗闪长岩为埃达克岩, 可能来自俯冲板片熔融(赵珍等, 2013)。前人对冈底斯南缘其它地区的该阶段花岗岩进行了研究, 并提出可能的形成模式(Wen et al., 2008; 纪伟强等, 2009; Zhang et al., 2010)。然而泽当矿田的实际野外地质情况可能并非如此。

冈底斯南缘桑日至谢通门一带广泛分布火山沉积岩系的桑日群(J₃K₁S), 早期研究认为是活动陆缘岛弧岩系(西藏自治区地质矿产局, 1994), 许继峰等(2009)获得桑日群的活动时限为 155~93.4 Ma, 并进行了系统的地球化学研究, 发现桑日弧火山岩系在地球化学特征上, 更接近 MORB 特征, 且很少有陆壳物质的混染, 因此认为桑日弧可能是洋内弧俯冲系统。此外, 桑日弧火山岩系里发现了~136 Ma 俯冲型埃达克岩(姚鹏等, 2006; Zhu et al., 2009), 由于俯冲型埃达克岩与岛弧岩浆岩代表了不同的构造环境, 两者不可能同时同地共存, 从另一方面也暗示桑日弧可能并非活动陆缘岛弧火山岩系; 而且, 本文

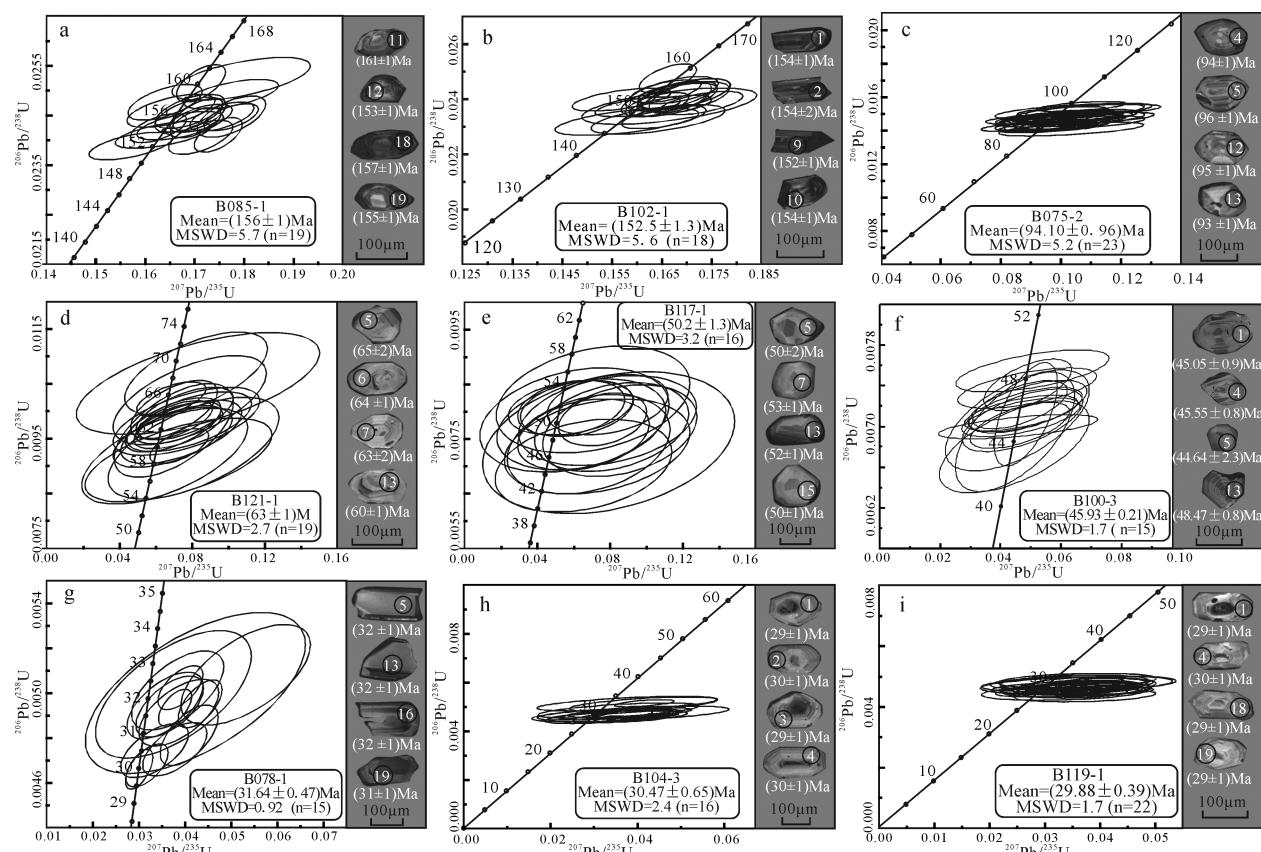


图 2 样品锆石 U-Pb 年龄协和图、锆石阴极图像和靶位
Fig. 2 Zircon U-Pb concordian diagrams, CL images and target of magmatic rocks

发现的与板片俯冲有关的埃达克岩，年龄接近桑日群的上限，说明从早白垩到晚白垩均有埃达克岩的发育，也反应了当时的构造环境应该是相对稳定的，板片俯冲角度不断改变的可能性很小，不可能交替出现陆缘岛弧岩系和埃达克岩。虽然鉴定桑日弧是否为洋内俯冲仍缺少有利证据，但是结合泽当矿田实际情况及岛弧火山岩、埃达克岩代表的构造环境，认为本文获得的~94 Ma 的桑布加拉岩体，很可能是与桑日洋内岛弧同一环境的产物。

在成矿作用方面，桑布加拉矽卡岩型铜矿床辉钼矿 Re-Os 年龄为 93.3 Ma(赵珍等, 2012)，并且与该期埃达克岩密切相关，说明泽当矿田不仅仅是前人认为的第三纪成矿(李光明等, 2006)，也存在晚白垩世成矿。这对于研究泽当矿田的成岩成矿作用，扩大找矿时代和范围也具有重要意义。

2.3 古新世—始新世岩浆活动

泽当矿田新生代早期岩体报道较少。本文获得娘古处花岗闪长岩、努日花岗闪长岩和桑日石英二

长岩锆石 U-Pb 年龄分别为 (63 ± 1) Ma、 (50.2 ± 1.3) Ma 和 (45.93 ± 0.21) Ma(图 2d, e, f)。我们认为泽当矿田在古新世—始新世至少存在两期岩浆活动，一期是 ~63 Ma 的花岗闪长岩，一期是 50~45 Ma 的花岗闪长岩、石英二长岩。而这两期岩浆活动恰巧处于板块俯冲/碰撞的节点，对于研究分析构造-岩浆活动增加了难度。

在岩石分类上，样品主要集中在花岗闪长岩区(图 3b)，显示高钾钙碱性和准铝质特征(图 3c, d)。在稀土元素上，轻重稀土强烈分异，LREE 富集，HREE 强烈亏损(图 3e)。样品 La/Yb 为 9.96~14.21，不符合埃达克质特征($\text{La}/\text{Yb} > 20$)(图 3g, h)；在微量元素特征上，样品具有较为明显的 Nb-Ta 槽、Eu 谷、P 谷，显示弧岩浆岩特征(图 3f)，图 3i 中，微量元素显示样品可能更靠近大陆边缘弧。由于岩体时代的特殊性，所以并不能说明两期岩浆为陆缘弧岩浆，也很有可能是同碰撞型岩浆，由于俯冲碰撞的滞后性，保留了陆缘弧岩浆的特征。

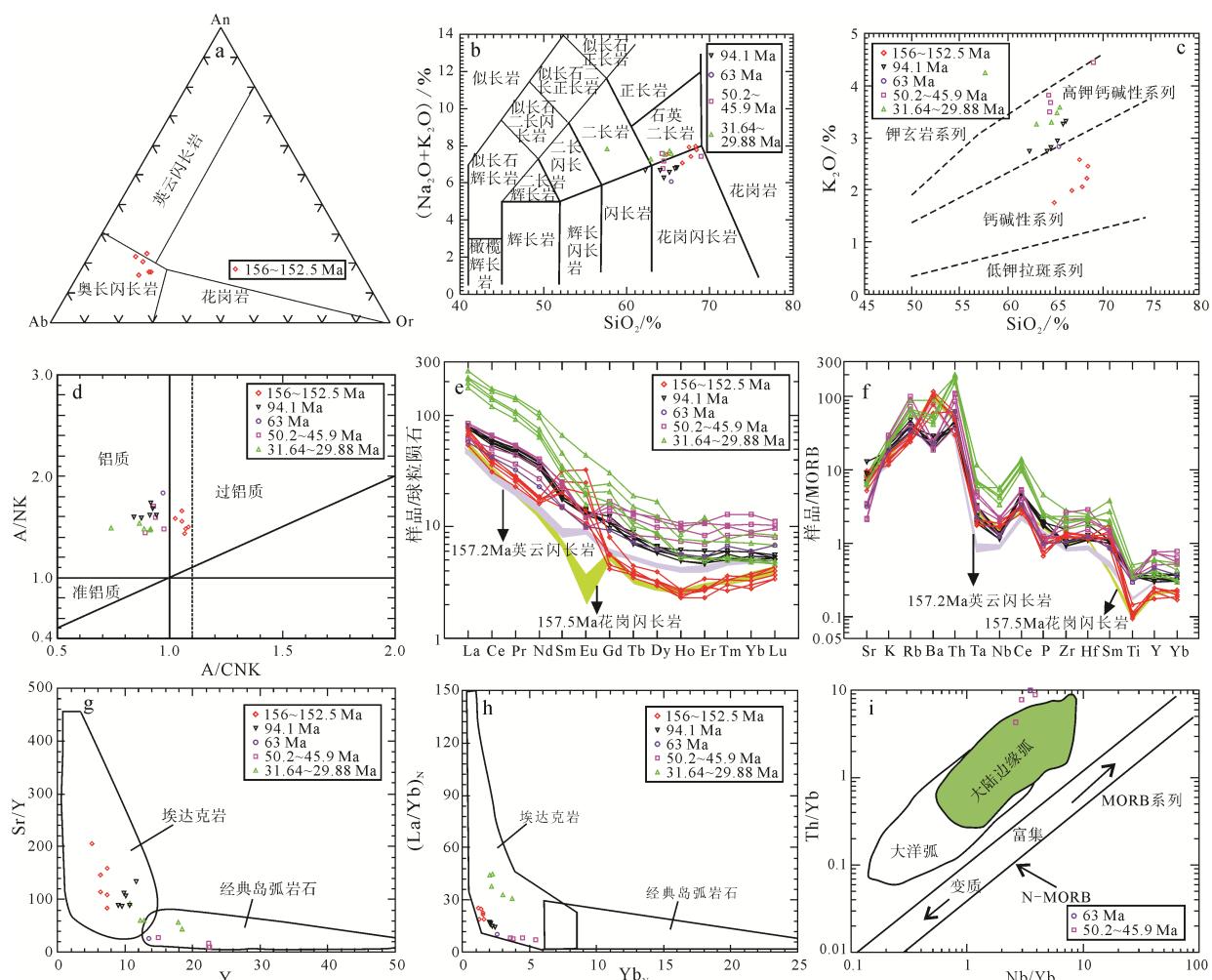


图 3 岩浆岩地球化学特征图解(图 e, g, h 标准化数据引自 Taylor et al., 1977; 图 f 标准化数据引自 Sun et al., 1989; 英云闪长岩、花岗闪长岩、桑布加拉岩体数据分别引自韦栋梁等, 2007a; 王莉等, 2012; 赵珍等, 2013)

Fig. 3 Geochemical characteristic diagram of magmatic rocks in the Zetang orefield (normalizing values of Fig. e/g/h and Fig. f after Taylor et al., 1977 and Sun et al., 1989 respectively; geochemical data of tonalite, granodiorite, and Sangbujiala rocks after WEI et al., 2007a; WANG et al., 2010; ZHAO et al., 2012 respectively)

对于该阶段岩浆活动的成因, 争论较多(莫宣学等, 2003; Chung et al., 2005; Wen et al., 2008)。由于本次研究缺少相关同位素测试数据, 加上该阶段复杂的构造背景, 结合岩体时代及地化特征, 这两期岩浆活动可能是与印度—亚洲大陆碰撞相关的同碰撞花岗岩, 因此对于确定 63 Ma 以及 50.2~45.9 Ma 两期岩浆成因及来源尚需进一步工作。

2.4 渐新世岩浆活动

前人认为冈底斯岩浆带在 40~26 Ma 阶段是岩浆活动间歇期, 只在北部发育零星过铝质花岗岩超钾质火山岩(莫宣学等, 2005; 侯增谦等, 2006)。本文获得明则岩体年龄(31.64 ± 0.47) Ma(图 2g), 冲木达岩体年龄为(30.47 ± 0.65) Ma 和 (29.88 ± 0.39) Ma(图 2h, i), 与泽当矿田成矿年龄及成矿母岩年龄同期(莫济海等, 2008; 同学义等, 2010; 姜子琦等, 2011)。说明泽当矿田在 20~30 Ma 存在大规模的岩浆活动和成矿作用。

该期侵入岩主要为石英二长岩(图 3b), 具有高 Si、Al, 低 Mg 特征, 为准铝质岩浆(图 3d)。明则岩体样品 B078-1 属于钾玄岩, 而冲木达岩体落入高钾钙碱性区(图 3c)。在稀土元素特征上, 样品轻重稀土强烈分异, 显示弱负 Eu 异常, 且冲木达岩体普遍显示高 Sr、低 Y 和 Yb 的埃达克质特征, 而明则岩体不显示埃达克质特征(图 3g, h); 在微量元素特征上(图 3f), 石英二长岩富集 Ba、Rb、Th、U、K、Zr、Hf, 亏损高场强元素 Ta、Nb、Ti, 具有弧岩浆岩特征。然后印度—亚洲大陆在渐新世早已进入碰撞阶段, 岛弧岩浆岩可能受到碰撞过程中的滞后作用影响, 或是早期残留样片熔融混染所致。但是不同的地化特征说明现今的泽当矿田至少存在两类岩浆活动, 一类为钾玄岩, 一类是非板片熔融成因的埃达克质岩(许继峰等, 2014)。

姜子琦等(2011)认为冲木达埃达克质岩可能是向北俯冲到拉萨地块下部的印度下地壳熔融形成的, 板片熔体上升过程中发生了熔体-地幔相互作用, 导致较高的 Cr、Ni 含量以及较大的 Mg[#]; 且与冲木达岩体相关的程巴矿床 Pb 同位素结果也表明有印度岩石圈物质的混染(王立强等, 2014)。

但是明则岩体和冲木达岩体成岩时代一致, 现今地理位置又极为接近, 其地球化学特征却不尽相同, 由于埃达克质岩与正常钙碱性岩浆岩的形成条件不同, 因此两者不可能同时同地共存, 除非泽当矿田恰好处于地壳厚度变化带上或是后期构造所为(张旗, 2011)。

泽当地区出露两条大规模的区域性断裂, 其中倾向北的冈底斯逆冲断层(GT)在 30~24 Ma 开始活

动, 运移距离超过 46 km, 造成冈底斯岩基大规模出露和抬升, 并被晚期(18~10 Ma)向北逆冲的仁布—泽当断层(RZT)掩覆(Yin et al., 1994; Harrison et al., 2000), 冲木达岩体可能受冈底斯逆冲断层影响, 从北部推覆而来(郝杰等, 1996)。而明则岩体表现出高钾特征, 与碰撞演化后期的钾玄岩接近, 并且由于紧邻缝合带, 空间位置也不符合岩浆演化序列, 因此, 明则岩体也可能同冲木达岩体一样, 受到冈底斯逆冲断层作用, 从北部推覆而来, 但是目前尚缺少直接的证据。明则岩体能否代表泽当矿田渐新世的构造-岩浆背景, 尚需要综合野外调查、冈底斯逆冲断层等多方面资料进行深入研究。

3 结论与讨论

泽当矿田 9 件岩浆岩锆石 U-Pb 同位素年龄及相关岩石地球化学特征表明:

(1) 现今泽当矿田至少存在五期岩浆侵入活动, 即晚侏罗世(156~152.5 Ma)、晚白垩世(94.1 Ma)、早古新世(63 Ma)、早始新世(52.6~45.9 Ma)和渐新世($31.64 \sim 29.88$ Ma), 其中, 晚侏罗世和晚白垩世岩浆均为与俯冲板片部分熔融有关的埃达克岩, 渐新世岩浆为非板片熔融相关的埃达克质岩, 虽然均具有埃达克(质)岩特征, 但是代表了完全不同的构造环境(许继峰等, 2014); 古新世—始新世阶段发育钙碱性陆缘弧型岩浆。

纪伟强等(2009)认为 Rb-Y+Nb 判别图解并不能有效地区分冈底斯冈底斯岩基各阶段岩浆活动的构造环境, 本文在投图中也发现, 文中五期岩浆活动均落入火山弧区域(图略), 无法进行有效区分。

(2) 本文认为桑日群可能是洋内岛弧环境的产物, 并且在晚白垩世发育了同期的侵入岩, 即桑布加拉花岗闪长岩。由于桑日岛弧与泽当岛弧现今的地理位置极为接近, 并且时代上也较连续, 有学者建议将两者归为同一个洋内弧环境(许继峰等, 2009)。但是, 由于泽当矿田的构造变形、后期改造和叠加极为强烈, 对于确定两者关系, 尚需要更多可靠证据。现阶段本文认为泽当矿田存在两期洋内弧环境, 一期为中晚侏罗开始的泽当岛弧, 另一期为晚侏罗—早白垩开始的桑日岛弧。

(3) 在板块俯冲碰撞过程中, 岩浆活动存在空间和时间上的演化顺序, 而泽当矿田小范围内却至少存在五期岩浆侵入, 不同时代岩体无序分布, 甚至同时代岩体也具有不同的地球化学特征, 而最可能导致这种情况的原因就是后期的构造活动。由于泽当矿田紧邻雅鲁藏布江缝合带, 经历了特提斯演化、洋内俯冲、印度—亚洲大陆碰撞、区域性深大

逆冲断裂等复杂地质过程，造成了现今泽当矿田复杂的构造格局，各地质单元之间多为构造接触，甚至很多地质体之间接触关系仍存在较大争议。

虽然有观点认为冈底斯逆冲断裂造成冈底斯岩基向南逆冲，但是本文努日、娘古处、桑日岩体是否均像冲木达岩体一样是外来岩体(或远距离原浆)尚存疑问。如果是外来推覆岩体的话，北部至少应该存在相应时代的岩体，由于冈底斯逆冲断层运移距离可达 46 km，泽当矿田北部该距离辐射范围差不多在墨竹工卡地区，该区岩体的时代集中在中新世(侯增谦等, 2006)和晚三叠—早侏罗世(本项目未发表数据)，未大规模出露古新世—始新世的岩体。另一种可能就是原始岩浆把深大断裂作为通道，发生运移，并在泽当矿田发生侵位。

(4)本次获得的锆石 U-Pb 以及地球化学结果，虽然能够确定精确的岩体时代，为泽当矿田甚至整个冈底斯岩体时代提供数据支持和补充，对可能的岩体成因提供佐证，但鉴于冈底斯复杂的构造演化史，很多岩体可能被后期构造改造，能否反映泽当矿田的构造岩浆背景，仍需要作大量深入广泛的工作区分外来岩体和原生岩体，以便更好地研究和解决泽当矿田以及整个冈底斯带的构造-岩浆演化历史。

参考文献：

- 郝杰, 周新华, 李齐, 陈文寄. 1996. 沿雅鲁藏布江(东段)地区推覆与反向冲断构造的地质特征及其形成机制[J]. 地震地质, 18(1): 30-36.
- 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[J]. 岩石学报, 20(2): 239-248.
- 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. 2006. 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): 340-351.
- 纪伟强, 吴福元, 钟孙霖, 刘传周. 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：地球科学, 39(7): 849-871.
- 姜子琦, 王强, WYMAN D A, 唐功建, 贾小辉, 杨岳衡, 喻亨祥. 2011. 西藏冈底斯南缘冲木达约 30 Ma 埃达克质侵入岩的成因：向北俯冲的印度陆壳的熔融？[J]. 地球化学, 40(2): 126-146.
- 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矽卡岩型 Cu-Au±Mo 矿床地质特征、矿物组合及其深部找矿意义[J]. 地质学报, 80(9): 1407-1421.
- 李建康, 王登红, 梁婷, 许以明, 张怡军, 梁华英, 卢焕章, 赵斌, 李建国, 屈文俊, 周四春, 王汝成, 韦龙明, 林锦福. 2013. 南岭区域成矿与深部探测的研究进展及其对西藏钨锡找矿的指示[J]. 地球学报, 34(1): 58-74.
- 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[J]. 地球化学, 37(3): 206-212.
- 莫宣学, 董国臣, 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.
- 莫宣学, 赵志丹, 邓晋福, 董国臣, 周肃, 郭铁鹰, 张双全, 王亮亮. 2003. 印度—亚洲大陆主碰撞过程的火山作用响应[J]. 地学前缘, 10(3): 135-148.
- 唐菊兴, 多吉, 刘鸿飞, 郎兴海, 张金树, 郑文宝, 应丽娟. 2012. 冈底斯成矿带东段矿床成矿系列及找矿突破的关键问题研究[J]. 地球学报, 33(4): 393-410.
- 王立强, 唐菊兴, 陈伟, 罗茂澄, 江化寨, 张凯. 2014. 西藏努日、程巴铜-钼-钨矿床硫铅同位素地球化学[J]. 地球学报, 35(1): 39-48.
- 王莉, 曾令森, 高利娥, 唐索寒, 胡古月. 2012. 藏南侏罗纪残留洋弧的地球化学特征及其大地构造意义[J]. 岩石学报, 28(6): 1741-1754.
- 韦栋梁, 夏斌, 周国庆, 闫俊, 王冉, 钟立峰. 2007a. 西藏泽当英云闪长岩的地球化学和 Sr-Nd 同位素特征：特提斯洋内俯冲的新证据[J]. 中国科学 D 辑：地球科学, 37(4): 442-450.
- 韦栋梁. 2007b. 雅鲁藏布缝合带泽当段蛇绿岩的地球化学特征及构造意义[D]. 北京：中国科学院研究生院.
- 西藏自治区地质矿产局. 1994. 西藏自治区区域地质志[M]. 北京：地质出版社.
- 许继峰, 康志强, 朱弟成, 陈建林, 王保弟. 2009. 桑日群火山岩洋内俯冲的证据——兼论拉萨地块南缘中生代洋弧基底的构造演化[C]. 长春：2009 年全国岩石学与地球动力学研讨会.
- 许继峰, 邬建斌, 王强, 陈建林, 曹康. 2014. 埃达克岩与埃达克质岩在中国的研究进展[J]. 岩石矿物地球化学通报, 30(1): 6-13.
- 闫学义, 黄树峰. 2010. 冈底斯东段泽当大型钨铜钼矿新发现及走滑型陆缘成矿新认识[J]. 地质论评, 56(1): 9-19.
- 姚鹏, 李金高, 王全海, 顾雪祥, 唐菊兴, 惠兰. 2006. 西藏冈底斯南缘火山-岩浆弧带中桑日群 adakite 的发现及其意义[J]. 岩石学报, 22(03): 612-620.
- 张旗. 2011. 关于 C 型埃达克岩成因的再探讨[J]. 岩石矿物学杂志, 30(4): 73-747.
- 赵珍, 胡道功, 陆露, 吴珍汉. 2013. 西藏泽当地区晚白垩世埃达克岩的发现及其成矿意义[J]. 地质力学学报, 19(1): 45-52.
- 赵珍, 胡道功, 吴珍汉, 陆露. 2012. 西藏冈底斯东段南缘桑布加拉辉钼矿 Re-Os 定年及地质意义[J]. 地质力学学报, 18(2): 178-186.
- 朱弟成, 潘桂堂, 王立全, 莫宣学, 赵志丹, 周长勇, 廖忠礼, 董国臣, 袁四化. 2008. 西藏冈底斯带中生代岩浆岩的时空分布和相关问题的讨论[J]. 地质通报, 27(9): 1535-1550.

References:

- AITCHISON J C, BADENGZHU, DAVIS A M, LIU Jian-bing, LUO Hui, MALPAS J G, MCER MID I R C, WU Hi-yun, ZIABREV S V, ZHOU Mei-fu. 2000. Remnants of a Cretaceous intra-oceanic subduction system within the Yarlung-Zangbo suture (southern Tibet)[J]. Earth and Planetary Science Letters, 183: 231-244.
- Bureau of Geology and Mineral Resources of Xizang(Tibet)

- Autonomous. 1994. Regional Geology of Xizang (Tibet) Autonomous Region[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- CHU Mei-fei, CHUNG Sun-lin, SONG Biao, LIU Dun-yi, O'REILLY S Y, PEARSON N J, JI Jian-qing, WEN Da-jen. 2006. Zircon U-Pb and Hf isotope constraints on the Mesozoic tectonics and crustal evolution of southern Tibet[J]. *Geology*, 34(9): 745-748.
- CHUNG Sun-lin, CHU Mei-fei, ZHANG Yu-quan, XIE Ying-wen, LO Ching-hua, LEE Tung-yi, LAN Ching-ying, LI Xian-hua, ZHANG Qi, WANG Yi-zhao. 2005. Tibetan tectonic evolution inferred from spatial and temporal variations in post-collisional magmatism[J]. *Earth-Science Reviews*, 68: 173-196.
- COLEMAN M, HODGES K. 1995. Evidence for Tibetan plateau uplift before 14 Myr ago from a new minimum age for east-west extension[J]. *Nature*, 374: 49-52.
- ELBURG M A, BERGEN M, HOOGEWERFF J, FODEN J, VROON P, ZULKARNAIN I, NASUTION A. 2002. Geochemical trends across an arc-continent collision zone: magma sources and slab-wedge transfer processes below the Pantar Strait volcanoes, Indonesia[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 66(15): 2771-2789.
- GUO Zheng-fu, HERTOGEN J, LIU Jia-qi, PASTEELS P, BOVEN A, PUNZALAN L, HE Huai-yu, LUO Xiang-jun, ZHANG Wen-hua. 2005. Potassic magmatism in western Sichuan and Yunnan provinces, SE Tibet, China: petrological and geochemical constraints on petrogenesis[J]. *Journal of Petrology*, 46(1): 33-78.
- HAO Jie, ZHOU Xin-hua, LI Qi, CHEN Wen-ji. 1996. Geological features and formation mechanism of the nappe and backthrust along the Yarlung Zangpo river (East section)[J]. *Seismology and Geology*, 18(1): 30-36(in Chinese with English abstract).
- HARRIS N W, XU Rong-hua, LEWIS C L, JIN Cheng-wei. 1988. Plutonic rocks of the 1985 Tibet Geotraverse, Lhasa to Golmud[J]. *Phil. Trans. R. Soc. Lond.*, 327: 145-168.
- HARRISON T M, YIN An, GROVE M, LOVERA O M. 2000. The Zedong window: a record of superposed Tertiary convergence in southeastern Tibet[J]. *Journal of Geophysical Research*, 105(B8): 19211-19230.
- HOU Zeng-qian, GAO Yong-feng, MENG Xiang-jin, QU Xiao-ming, HUANG Wei. 2004. Genesis of adakitic porphyry and tectonic controls on the Gangdese Miocene porphyry copper belt in the Tibetan orogen[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 20(2): 239-248(in Chinese with English abstract).
- HOU Zeng-qian, QU Xiao-ming, YANG Zhu-sen, MENG Xiang-jin, LI Zhen-qing, YANG Zhi-ming, ZHENG Mian-ping, ZHENG You-ye, NIE Feng-jun, GAO Yong-feng, JIANG Si-hong, LI Guang-ming. 2006. Metallogenesis in Tibetan collisional orogenic belt: III. Mineralization in post-collisional extension setting[J]. *Mineral Deposits*, 25(6): 340-351(in Chinese with English abstract).
- JI Wei-qiang, WU Fu-yuan, ZHONG Sun-lin, LIU Chuan-zhou. 2009. Geochronology and petrogenesis of granitic rocks in Gangdese batholith, southern Tibet[J]. *Science in China Series D: Earth Sci.*, 39(7): 849-871(in Chinese).
- JIANG Zi-qi, WANG Qiang, WYMAN D A, TANG Gong-jian, JIA Xiao-hui, YANG Yue-heng, YU Heng-xiang. 2011. Origin of ~30 Ma Chongmuda adakitic intrusive rocks in the southern Gangdese region, southern Tibet: Partial melting of the northward subducted Indian continent crust?[J]. *Geochimica*, 40(2): 126-146(in Chinese with English abstract).
- LI Guang-ming, QIN Ke-zhang, DING Kui-shou, LI Jin-xiang, WANG Shao-huai, JIANG Shan-yuan, LIN Jin-deng, JIANG Hua-zhai, FANG Shu-yuan, ZHANG Xing-chun. 2006. Geology and Mineral Assemblage of Tertiary Skarn Cu-Au ± Mo Deposits in the Southeastern Gangdese Arc: Implications for Deep Exploration[J]. *Acta Geologica Sinica*, 80(9): 1407-1421(in Chinese with English abstract).
- LI Jian-kang, WANG Deng-hong, LIANG Ting, XU Yi-ming, ZHANG Yi-jun, LIANG Hua-ying, LU Huan-zhang, ZHAO Bin, LI Jian-guo, QU Wen-jun, ZHOU Si-chun, WANG Ru-cheng, WEI Long-ming, LIN Jin-fu. 2013. Progress of Research on Metallogenic Regularity and Deep Exploration in Nanling Region and Its Indication for W-Sn Exploration in Tibet[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 34(1): 58-74(in Chinese with English abstract).
- MARTIN H, SMITHIES R H, RAPP R H, MOYEN J F, CHAMPION D C. 2005. An overview of adakite, tonalite-trondhjemite-granodiorite(TTG), and sanukitoid: relationships and some implications for crustal evolution[J]. *Lithos*, 79: 1-24.
- MCDERMID I R C, AITCHISON J C, DAVIS A M, HARRISON T M, GROVE M. 2002. The Zedong terrane: a Late Jurassic intra-oceanic magmatic arc within the Yarlung-Tsangpo suture zone, southeastern Tibet[J]. *Chemical Geology*, 187: 267-277.
- MO Ji-hai, LIANG Hua-ying, YU Heng-xiang, CHEN Yong, SUN Wei-dong. 2008. Zircon U-Pb age of biotite hornblende monzonitic granite for Chongmuda Cu-Au(Mo) deposit in Gangdese belt, Xizang, China and its implications[J]. *Geochimica*, 37(3): 206-212(in Chinese with English abstract).
- MO Xuan-xue, DONG Guo-chen, ZHAO Zhi-dan, ZHOU Su, WANG Liang-liang, QIU Rui-zhao, ZHANG Feng-qin. 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).
- MO Xuan-xue, ZHAO Zhi-dan, DENG Jin-fu, DONG Guo-chen, ZHOU Su, GUO Tie-ying, ZHANG Shuang-quan, WANG Liang-liang. 2003. Response of volcanism to the India-Asia collision[J]. *Earth Science Frontiers*, 10(3): 135-148(in Chinese with English abstract).
- PEARCE J A, DENG Wan-ming. 1988. The ophiolites of the Tibetan Geotrades, Lhasa to Golmud(1985) and Lhasa to Kathmandu [J]. *Phil. Trans. R. Soc. Lond.*, 327: 169-201.
- QUIDELLEUR X, GROVE M, LOVERA O M, HARRISON T M, YIN An. 1997. Thermal evolution and slip history of the Renbu Zedong Thrust, southeastern Tibet[J]. *Journal of Geophysical Research*, 102(B2): 2659-2697.
- RAPP R P, SHIMIZU N, NORMAN M D, APPLEGATE G S. 1999. Reaction between slab-derived melts and peridotite in the mantle wedge: experimental constraints at 3.8 GPa[J]. *Chem-*

- Chemical Geology, 160: 335-356.
- ROWLEY D B, CURRIE B S. 2006. Palaeo-altimetry of the late Eocene to Miocene Lunpola basin, central Tibet[J]. *Nature*, 439: 677-681.
- SCHARER U, XU Rong-hua, ALLEGRE C J. 1984. U-Pb geochronology of Gangdese(Transhimalaya)plutonism in the Lhasa-Xigaze region, Tibet[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 69: 311-320.
- SUN S S, MCDONOUGH W F. 1989. Chemical and isotopic systematic of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes[J]. *Geological Society*, 42: 313-345.
- TANG Ju-xing, Durji, LIU Hong-fei, LANG Xing-hai, ZHANG Jin-shu, ZHENG Wen-bao, YING Li-juan. 2012. Mineralogic Series of Ore Deposits in the East Part of the Gangdise Metallogenic Belt[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 33(4): 393-410(in Chinese with English abstract).
- TAYLOR S R, GORTON M P. 1977. Geochemical application of spark source mass spectrography-III. element sensitivity, precision and accuracy[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 41: 1375-1380.
- WANG Li, ZENG Ling-sen, GAO Li-e, TANG Suo-han, HU Gu-yue. 2012. Remnant Jurassic Intra-oceanic Arc System in Southern Tibet: Geochemistry and Tectonic Implications[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 28(6): 1741-1754(in Chinese with English abstract).
- WANG Li-qiang, TANG Ju-xing, CHEN Wei, LUO Mao-cheng, JIANG Hua-zhai, ZHANG Kai. 2014. Sulfur and Lead Isotopic geochemistry of the Nuri and Chengba Cu-Mo-W deposits in Tibet[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 35(1): 39-48(in Chinese with English abstract).
- WEI Dong-liang, XIA Bin, ZHOU Guo-qing, WANG Ran, ZHONG Li-feng. 2007. Geochemistry and Sr-Nd isotope characteristics of tonalites in Zetang, Tibet: New evidence for intra-Tethyan subduction[J]. *Science in China Series D: Earth Science*, 37(4): 442-450 (in Chinese).
- WEI Dong-liang. 2007. Geochemical characteristics and tectonic significance of the Zedong ophiolite, Yarlung-Zangbo suture zone[D]. Beijing: The Graduate school of the Chinese Academy of Sciences(in Chinese with English abstract).
- WEN Da-ren, LIU Dun-yi, CHUNG Sun-lin, CHU Mei-fei, JI Jian-qing, ZHANG Qi, SONG Biao, LEE Tung-yi, YE Meng-wang, LO Ching-hua. 2008. Zircon SHRIMP U-Pb ages of the Gangdese Batholith and implications for Neotethyan subduction in southern Tibet[J]. *Chemical Geology*, 252: 191-201.
- WU Zhen-han, HU Dao-gong, YE Pei-sheng, WU Zhong-hai. 2013. Early Cenozoic Tectonics of the Tibetan Plateau[J]. *Acta Geologica Sinica*, 87(2): 289-303.
- XU Ji-feng, KANG Zhi-qiang, ZHU Di-cheng, CHEN Jian-lin, WANG Bao-di. 2009. The oceanic subduction evidence of Sangri volcanic rocks: the tectonic evolution of Mesozoic oceanic arc basement in southern Lhase terrane[C]. Changchun: National seminar on Science and Geodynamics rock in 2009(in Chinese).
- XU Ji-feng, WU Jian-bin, WANG Qiang, CHEN Jian-lin, CAO Kang. 2014. Research Advances of Adakites and Adakitic Rocks in Chian[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 30(1): 6-13(in Chinese with English abstract).
- YAN Xue-yi, HUANG Shu-feng. 2010. Discovery of Large Zedang Tungsten-Copper-Molybdenum Orefield, Eastern Gangdese Arc, and New Understanding on Strike-Slip Type Epicontinental Mineralization[J]. *Geological Review*, 56(1): 9-19(in Chinese with English abstract).
- YAO Peng, LI Jin-gao, WANG Quan-hai, GU Xue-xiang, TANG Ju-xing, HUI Lan. 2006. Discovery and geological significance of the adakite in Gangdise island arc belt, Xizang (Tibet)[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(03): 612-620(in Chinese with English abstract).
- YIN An, HARRISON T M, MURPHY M A, GROVE M, NIE S, RYERSON F J, WANG Xiao-feng, CHEN Zeng-le. 1999. Tertiary deformation history of southeastern and southwestern Tibet during the Indo-Asian collision[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 111(11): 1644-1664.
- YIN An, HARRISON T M, RYERSON F J, CHEN Wen-ji, KIDD W S F, COPELAND P. 1994. Tertiary structural evolution of the Gangdese thrust system, southeastern Tibet[J]. *Journal of Geophysical Research*, 99(B9): 18175-18201.
- ZHANG Qi. 2011. Reappraisal of the origin of C-type adakitic rocks from East China[J]. *Acta Petrologica et Mineralogia*, 30(4): 73-747(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Ze-ming, ZHAO Guo-chun, SANTOSH M, WANG Jin-li, DONG Xin, SHEN Kun. 2010. Late Cretaceous charnockite with adakitic affinities from the Gangdese batholith, southeastern Tibet: Evidence for Neo-Tethyan mid-ocean ridge subduction?[J]. *Gondwana Research*, 17: 615-631.
- ZHAO Zhen, HU Dao-gong, LU Lu, WU Zhen-han. 2013. Discovery and metallogenic significance of the Late Cretaceous adakites from Zetang, Tibet[J]. *Journal of Geomechanics*, 19(1): 45-52(in Chinese with English abstract).
- ZHAO Zhen, HU Dao-gong, WU Zhen-han, LU Lu. 2012. Molybdenite Re-Os isotopic dating of Sangbjiala copper deposit in the south margin of the eastern Gangdese section, Tibet, and its geological implications[J]. *Journal of Geomechanics*, 18(2): 178-186(in Chinese with English abstract).
- ZHU Di-cheng, PAN Gui-tang, WANG Li-quan, MO Xuan-xue, ZHAO Zhi-dan, ZHOU Chang-yong, LIAO Zhong-li, DONG Guo-chen, YUAN Si-hua. 2008. Tempo-spatial variations of Mesozoic magmatic rocks in the Gandise belt, Tibet, China, with a discussion of geodynamic setting-related issues[J]. *Geological Bulletin of China*, 27(9): 1535-1550(in Chinese with English abstract).
- ZHU Di-cheng, ZHAO Zhi-dan, PAN Gui-tang, LEE Hao-yang, KANG Zhi-qiang, LIAO Zhong-li, WANG Li-quan, LI Guang-ming, DONG Guo-chen, LIU Bo. 2009. Early Cretaceous subduction-related adakite-like rocks of the Gangdese Belt, southern Tibet: Products of slab melting and subsequent melt-peridotite interaction?[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 34: 298-309.