

西藏拉萨地块北部白垩纪火山岩 及其对冈底斯岛弧构造演化的制约

马国林¹, 岳雅慧²

(1. 甘肃煤田地质局, 甘肃 兰州 730000; 2. 中国科学院 青藏高原研究所, 北京 100085)

摘要: 拉萨地块北部广泛分布着白垩纪火山岩。本文及已有年代学研究表明, 这些火山岩主要形成于早白垩世中期(140~110 Ma)和晚白垩世早期(100~80 Ma)两个阶段。早白垩世中期火山岩主要为则弄群和多尼组地层中的火山岩夹层, 岩性组合包括玄武岩、玄武安山岩、安山岩、英安岩和流纹岩, 主体为高钾钙碱和钾玄质系列, 具有初始 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值(0.7068~0.7102)较高、 $\epsilon\text{Nd}(t)$ (-9.3~-1.5)较低和 $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ (7.2‰~9.8‰)较高等同位素组成特征, 源区为受消减沉积物和/或蚀变玄武质洋壳的含水流体/熔体交代的富集岩石圈地幔楔。晚白垩世早期火山岩零星分布在拉萨地块北部和羌塘地块南部, 岩石类型以玄武岩、玄武安山岩、安山岩为主, 有少量的酸性火山岩(英安岩), 主体为典型的钙碱性系列组合(低钾拉斑+中钾钙碱), 具有较高的 $\text{Mg}/\text{Mg}^{\#}$ 可高达59和相容元素Cr(162×10^{-6})、V(216×10^{-6})和Ni(80×10^{-6})含量以及更为原始的Sr-Nd同位素组成($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i=0.7041~0.7048, $\epsilon\text{Nd}(t)$ =0.9~2.2, 指示源区可能为受到上涌软流圈地幔熔体二次交代的交代富集岩石圈地幔。本文将其命名为尼玛火山岩。综合以上白垩纪火山岩和拉萨地块南部叶巴组、桑日群和林子宗群火山岩的时空分布特征, 认为中生代至早第三纪冈底斯岛弧的演化发生了两次大的空间迁移: 中生代早侏罗世以来由南向北变新, 从最南部的叶巴组(早侏罗世, 193~174 Ma)和桑日群火山岩(J₃-K₁)到北部的则弄群和多尼组火山岩(早白垩世中期, 140~110 Ma), 最后到最北部的尼玛火山岩(晚白垩世早期, 100~80 Ma); 早第三纪由北向南跃迁回南部, 从北部的尼玛火山岩迁移到南部的林子宗群火山岩(70~40 Ma)。冈底斯岛弧火山岩的时空分布特征和成分演化规律, 揭示了新特提斯洋板块的俯冲历史, 即早期新特提斯洋壳由南向北低角度俯冲, 然后再高角度反向旋转, 直至最后发生拆沉。

关键词: 拉萨地块; 冈底斯岛弧; 火山岩; 白垩纪; 构造演化

中图分类号: P588.14, P542

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2010)05-0525-14

Cretaceous volcanic rocks in northern Lhasa Block: constraints on the tectonic evolution of the Gangdise Arc

MA Guo-lin¹ and YUE Ya-hui²

(1. Gansu Bureau of Coal Geology, Lanzhou 730000, China; 2. Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China)

Abstract: Before the continental collision between India and Asia, there existed widespread Early Jurassic to Eocene arc magmatism in the Lhasa Block of southern Tibet, which resulted from the northward subduction of the Tethyan oceanic lithosphere beneath Asia. This paper has reported geochronological ($^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating), major and trace elements and Sr-Nd-O isotopic data of the Cretaceous volcanic rocks widely exposed in the north of the Lhasa Block and tried to investigate the tectonic evolution of the Gangdise Arc. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronological data indicate that these Cretaceous volcanic rocks could be divided into two groups, namely Early Cretaceous (140~110 Ma) and Late Cretaceous (100~80 Ma). Early Cretaceous volcanic rocks refer to the interbeds in Zenong Group and Duoni Formation, which are mainly distributed in such central-northern areas of

收稿日期: 2010-03-15; 修订日期: 2010-08-27

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)资助项目(2011CB403100)

作者简介: 马国林(1964-), 男, 撒拉族, 学士, 高级工程师, 构造地质专业, E-mail: dkckcy@sina.com; 通讯作者: 岳雅慧(1979-), 女, 博士, 工程师, 岩石大地构造专业, E-mail: yueyh@itpas.ac.cn

the Lhasa Block as Taruoco, Coqên, Dangruoyongco and Xainza and consist of basalt, basaltic andesite, andesite, dacite and rhyolite (mostly divided into high-K and shoshonitic series and subordinately into medium-K series). The authors focused their study on the basalt and basaltic andesite of Zenong Group ($\text{SiO}_2 = 47.76\% \sim 56.25\%$, high-K calc-alkaline and shoshonitic series in $\text{SiO}_2\text{-K}_2\text{O}$ diagram), which are characterized by relative enrichment of light rare earth elements and large-ion lithophile elements, negative Eu anomaly ($\delta\text{Eu} = 0.77 \sim 0.95$), negative Nb, Ta, Ti anomalies, and relatively high initial ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_t (0.706 3 ~ 0.707 2), low $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ (0.512 4 ~ 0.512 6) ratios and $\epsilon\text{Nd}(t)$ (-5.4 ~ -1.5), and high $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ (7.2‰ ~ 9.8‰), indicating that the magma source was the lithospheric mantle wedge metasomatized by the fluid/melts from the oceanic sediments or/and the oceanic crust. Late Cretaceous volcanic rocks mainly consist of intermediate-basic volcanic rocks in calc-alkaline (low-K tholeiitic and medium-K calc-alkaline, $\text{SiO}_2 = 50.91\% \sim 70.45\%$) series, sparsely exposed in the north of the Lhasa Block and south of the Qiangtang Block. Compared with Zenong Group volcanic rocks, these volcanic rocks are characterized by younger ages, high Mg ($\text{Mg}^\# = 59$) and compatible elements ($\text{Cr} = 162 \times 10^{-6}$, $\text{V} = 216 \times 10^{-6}$, and $\text{Ni} = 80 \times 10^{-6}$) content, relatively primitive Sr-Nd isotopic composition ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_t = 0.704 1 ~ 0.704 9; $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.512 5 \sim 0.512 8$; $\epsilon\text{Nd}(t) = -3.5 \sim -2.2$), suggesting that the magma source might have been the metasomatized lithospheric mantle wedge subsequently metasomatized by the melts from asthenospheric mantle. Such volcanic rocks are named Nima Group volcanic rocks in this study. The temporal-spatial distribution of Mesozoic-Paleogene volcanic rocks of the Lhasa Block implies that Gangdise Arc volcanic rocks have undergone two times of spatial migration. One is the northward migration, i. e., from Yeba Formation (193 ~ 174 Ma) and Sangri Group ($J_3\text{—}K_1$) in the southernmost area through Zenong Group/Duoni Formation in the north (140 ~ 110 Ma) to Nima Group in the northernmost area (100 ~ 80 Ma). The other is the migration from north (Nima Group volcanic rocks, 100 ~ 80 Ma) to south (Linzizong Group volcanic rocks, 70 ~ 40 Ma). The temporal-spatial distribution and geochemical characteristics of volcanic rocks reveal the north-dipping subduction history of the Neo-Tethys oceanic lithosphere, i. e., the evolution from low-angle and north-dipping subduction in the early stage through high-angle roll-back to final detachment.

Key words: Lhasa Block; Gangdise Arc; volcanic rock; Cretaceous; tectonic evolution

拉萨地块北部广泛出露的白垩纪火山岩蕴含了大量关于新特提斯洋岩石圈和青藏高原演化相关的地质信息,详细了解这些火山岩时空分布规律、岩石学成因及其形成环境对揭示青藏高原形成和特提斯演化有非常重要的意义(Murphy *et al.*, 1997; Yin and Harrison, 2000; 丁林等, 2003; Ding *et al.*, 2003, 2005; Leier *et al.*, 2007a, 2007b, 2007c)。以往对于拉萨地块中生代火山岩的研究多集中在拉萨地块中南部地区(Coulon *et al.*, 1986, 等等),近几年拉萨地块北部中生代火山岩越来越引起研究者的关注。目前不同研究者对于拉萨地块北部白垩纪火山岩的地球动力学环境及其同构造时期沉积盆地的形成机制仍存在不同的认识:对于该地区白垩纪火山岩的形成,一些学者将其归结于新特提斯洋岩石圈板片向北俯冲释放流体/熔体,交代诱发上覆岩石圈地幔楔部分熔融而成(Coulon *et al.*, 1986; Ding *et al.*, 2003; Kapp *et al.*, 2003);而另一些学

者认为是班公湖-怒江洋壳向南、新特提斯洋壳向北的双向剪刀式俯冲作用的产物;还有研究者认为是狮泉河-永珠-纳木错-嘉黎蛇绿混杂岩带(Slainajap带)所代表的古洋岩石圈向南俯冲消减而形成。对于这些火山岩同构造时期沉积盆地形成机制也有着不同认识:一种观点认为,拉萨地块北部白垩纪火山岩沉积盆地可能代表一个弧间裂谷盆地系统(Pan, 1993; Zhang, 2004; Zhang *et al.*, 2004);另一种观点认为,该盆地可能是一个周缘前陆盆地系统,是早白垩世拉萨地块和羌塘地块碰撞过程中,羌塘高原向南逆冲加载,引起拉萨地块北部挠曲下降而成的周缘前陆盆地(Leeder *et al.*, 1988; Yin *et al.*, 1994; Murphy *et al.*, 1997);丁林等(2009)研究则指出此火山岩盆地可能是新特提斯洋板片向北俯冲过程形成的弧后前陆盆地。本文试图通过对拉萨地块北部白垩纪火山岩的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代学、主量元素、微量元素和 Sr-Nd-O 同位素组成的研究,探讨这

些火山岩的岩石成因及其形成的构造环境,从而进一步约束冈底斯岛弧的发育历史过程。

1 地质背景

拉萨地块是指南北分别以雅鲁藏布江缝合带和班公湖-怒江缝合带为界的東西向狭长区域,长约2 500 km,东宽西窄,南北宽度变化为150~300 km (Allègre *et al.*, 1984; Dewey *et al.*, 1988)(图1)。

拉萨地块内最古老的地层为念青唐古拉山、安多等地区零星出露的前寒武纪-寒武纪片麻岩结晶基底变质岩系(胡道功等, 2005; Guynn *et al.*,

2006),基底上覆盖了奥陶纪-二叠纪浅海相台地型沉积,念青唐古拉山以西普遍缺失三叠纪及早侏罗世地层。晚侏罗世地层主要沉积在东部的怒江流域,是一套海相碎屑岩沉积,早白垩世地层继承了晚侏罗世地层的沉积特点,但分布范围扩大到整个拉萨地块的北部,主要为一套海相深水复理石碎屑岩沉积,称为俄杀尔补组和多尼组。早白垩世晚期(Aptian-Albian),沉积环境由深水转变为浅水沉积,在纳木错以西的地区沉积了以郎山组灰岩为代表的碳酸盐沉积。晚白垩世以来,拉萨地块北缘普遍发生海退,海相沉积结束,晚白垩世竟柱山组陆相砾岩角度不整合在早白垩世以前的所有地层之上。

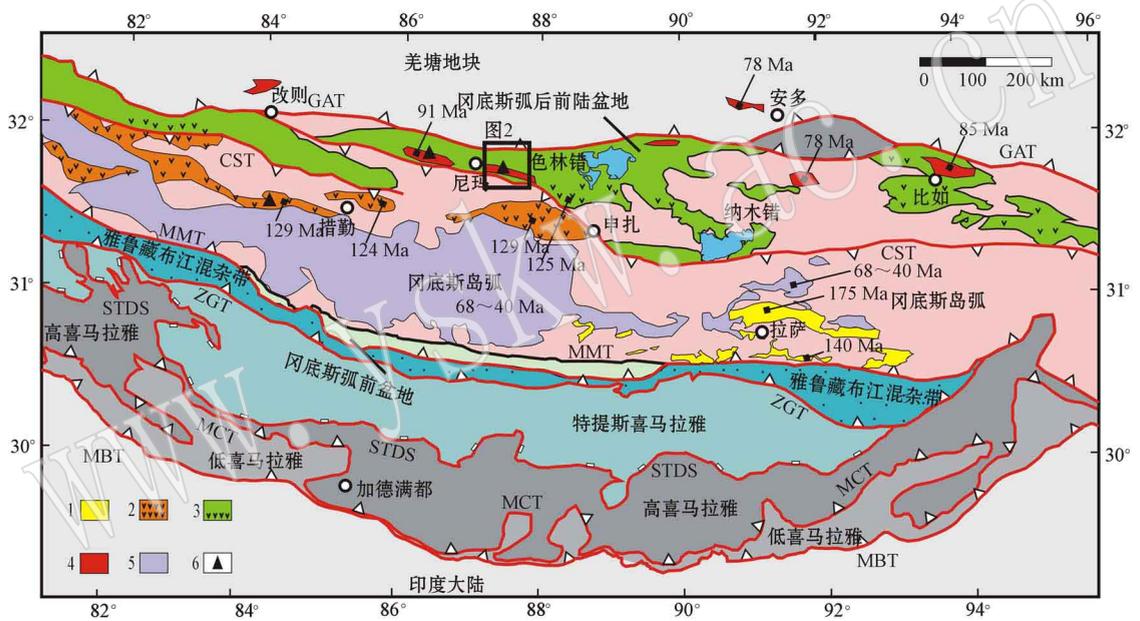


图1 拉萨地块晚侏罗世-白垩纪火山岩分布简图[据Ding等(2003)修改]

Fig. 1 Temporal-spatial distribution of Late Jurassic-Cretaceous volcanic rocks in the Lhasa Block (modified after Ding *et al.*, 2003)

1—冈底斯南部上侏罗统-下白垩统叶巴组、桑日群地层及火山岩; 2—冈底斯中部下白垩统则弄群地层及火山岩; 3—冈底斯北部上白垩统弧后前陆盆地多尼组地层及火山岩; 4—冈底斯北部及羌塘南部尼玛火山岩; 5—早第三纪林子宗群火山岩; 6—采样位置; GAT: 改则-安多逆冲断裂; CST: 措勤-申扎逆冲断裂; MMT: 主地幔断裂; ZGT: 仲巴-江孜逆冲断裂; STDS: 藏南拆离系正断裂; MCT: 主中央逆冲断裂; MBT: 主边界逆冲断裂; 图中火山岩 $\Delta r/\Delta r$ 同位素年龄除本文外,其余引自Coulon等(1986)和朱弟成等(2006a, 2006b)

1—strata and volcanic rocks of Upper Jurassic-Lower Cretaceous Yeba Formation and Sangri Group in southern Gangdise; 2—strata and volcanic rocks of Lower Cretaceous Zengong Group in central Gangdise; 3—strata and volcanic rocks of Duoni Formation of Upper Cretaceous back-arc foreland in northern Gangdise; 4—Nima volcanic rocks in northern Gangdise and southern Qiangtang; 5—volcanic rocks of Paleogene Linzizong Group; 6—sampling site; GAT: Gêzê-Amdo reverse thrust; CST: Coqên-Xainza reverse thrust; MMT: major mantle fault; ZGT: Zhongba-Gyangzê reverse thrust; STDS: normal fault of southern Tibet detachment system; MCT: major central fault; MBT: major boundary reverse fault; $\Delta r/\Delta r$ isotopic ages from Coulon *et al.* (1986) and Zhu Dicheng *et al.* (2006a, 2006b) as well as from this study

拉萨地块内火山岩地层总体呈东西向分布格局,从古生代到第三纪均有出露。石炭纪-三叠纪火山岩规模很局限,侏罗纪晚期开始扩大规模,至白垩纪末期-古近纪极大规模爆发,形成南部大面积分布的林子宗火山岩系(Burg *et al.*, 1983; Allègre *et al.*, 1984; Burg and Chen, 1984; Coulon *et al.*, 1986; Pan,

1993; Murphy *et al.*, 1997)。晚中生代火山岩地层有叶巴组、桑日群、则弄群/多尼组火山岩,这些火山岩时空分布上呈现从南到北逐渐变新的趋势。

叶巴组火山岩主要出露在拉萨以东达孜、墨竹工卡、工布江达等地区,呈带状分布,向西尖灭,时代为早侏罗世(193~174 Ma),是一套岩性连续分布的

钙碱性火山岩,以基性和酸性组合为主,中性安山岩较少,可能是新特提斯洋向北俯冲消滅的产物(Chu *et al.*, 2006;董彦辉等, 2006;耿全如等, 2006;朱弟成等, 2006a;张宏飞等, 2007;Zhu *et al.*, 2008;陈炜等, 2009;曾忠诚等, 2009)。桑日群火山岩位于拉萨地块南部桑日、曲水、尼木、南木林和谢通门一带,近东西向平行于雅鲁藏布江缝合带断续分布,岩性组合以安山岩-英安岩-流纹岩组合为主,具有埃达克质地球化学特征(高 SiO_2 、高 Sr、低 Y 等)时代为晚侏罗世—早白垩世,可能是新特提斯洋壳在俯冲过程中部分熔融的产物(李海平等, 1995;朱弟成等, 2004;姚鹏等, 2006;康志强等, 2009a;Zhu *et al.*, 2009b)。则弄群火山岩自东到西呈面状大面积分布于拉萨地块中北部(中冈底斯带,朱弟成等, 2006b;潘桂棠等, 2006),东西延伸可达 1 000 km,不整合覆盖于石炭、二叠纪地层之上,南北宽数公里到数十公里,平均厚度超过 1 000 m,时代为早白垩世中期(140~110 Ma, Coulon *et al.*, 1986;朱弟成等, 2006b, 2008a, 2008b;康志强等, 2008;Zhu *et al.*, 2009a;刘伟等, 2010)。火山岩厚度和岩性在空间上和时间内变化均较大,西部厚度较大,以中、酸性溢流相岩石最为常见;东部厚度较小,以中酸性的爆发相岩石为主,溢流相次之。岩石类型主要为安山岩、英安岩、流纹岩等中、酸性岩石,同时出露玄武岩、玄武安山岩、橄榄粗面玄武岩等中基性火山岩,这些中基性火山岩多分布于则弄群下部的中上部(朱弟成等, 2006b;康志强等, 2008;刘伟等, 2010)。中基性和中酸性火山岩在地球化学特征上均以高钾钙碱性系列为主,少量为中钾钙碱性系列。此外,多尼组火山岩主要分布在拉萨地块北部色林错-纳木错-比如一带,以中酸性火山岩为主,岩性和时代大致与则弄群相当(郑春子等, 2003;康志强等, 2009b;杨德明等, 2009);

结合区域上的资料(Coulon *et al.*, 1986;朱弟成等, 2006a, 2006b;Zhu *et al.*, 2009a),我们发现,在拉萨地块的北部,普遍出露一套时代较晚的火山岩,时代为晚白垩世早期(100~80 Ma, Coulon *et al.*, 1986;朱弟成等, 2006;Zhu *et al.*, 2009a;本文)。它不受班公湖-怒江缝合线的制约,同时也出露于羌塘地块的南部,主要分布在岷千日、尼玛、蓬错、巴尔达、那曲、安多、比如地区,在主要研究区内自东向西呈带状展布,出露厚度约 900 m,岩性变化不大,主要岩性为玄武岩、玄武安山岩、安山岩和英

安岩,平行不整合接触于上伏丁青湖组第三纪红层和湖相泥岩、页岩、砂岩等沉积地层之上,角度不整合或逆冲断层接触于下覆晚白垩世竞柱山组褐红色厚层状砾岩、早白垩世多尼组碎屑岩夹火山岩和侏罗纪—白垩纪海相浊流碎屑和混杂沉积地层之上(图 2a)。因这套火山岩时空分布和地球化学特征明显区别于则弄群和多尼组火山岩,本文以其出露较集中的尼玛县将其命名为尼玛火山岩。

本文主要重点采集了尼玛县东侧出露的尼玛火山岩,样品采集位置见图 2a,采集剖面见图 2b,采集样品包括玄武岩、玄武安山岩、辉石安山岩和英安岩。同时采集了尼玛县西侧岷千日地区尼玛火山岩,采样位置见图 1。尼玛火山岩野外照片见图 3,采集样品包括玄武岩、辉石安山岩和英安岩。此外还采集了出露在措勤县以西的则弄群火山岩中的玄武岩和橄榄安粗岩,采集位置见图 1。尼玛火山岩和则弄群火山岩岩石岩相学特征描述见表 1。

2 实验方法

2.1 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代学

首先将岩石样品机械破碎至 40~60 目,然后利用摇床、磁选、电选和重液等选矿技术将各种单矿物逐一分离,最后在双目镜下手工将分离出的各种单矿物挑纯,使其纯度达到大于 99%。选纯后的单矿物经过丙酮和去离子水超声波震荡洗涤后,在电热板上烘干。

将前处理阶段准备好的单矿物样品称重后用超纯铝箔包裹,和标准样品一同装入内径为 0.8 cm、长约 2.5 cm 的石英玻璃管中,外部由 0.5 mm 厚的锡皮包裹(以便屏蔽热中子),随后送至中国原子能研究院 49-2 反应堆 H8 孔道照射。照射后的样品放置 2 个月,放射性水平降至安全操作范围后准备上机操作。

$^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 同位素年龄测试在中国科学院地质与地球物理研究所 Ar-Ar 同位素年代学实验室(VG 5400 型质谱仪)完成,年龄误差采用 1σ ,精度可以达到 1%~1.5%。

2.2 岩石地球代学和同位素地球化学

选择均一、没有明显风化和水热蚀变的新鲜样品,选择其中新鲜部分用去离子水洗涤数次,风干后用碳化钨摇摆式研磨机研磨为 200 目的粉末,然后进行上机操作。

主量元素、稀土微量元素和 Sr-Nd-O 同位素分别在中国科学院地质与地球物理研究所 X 荧光光谱

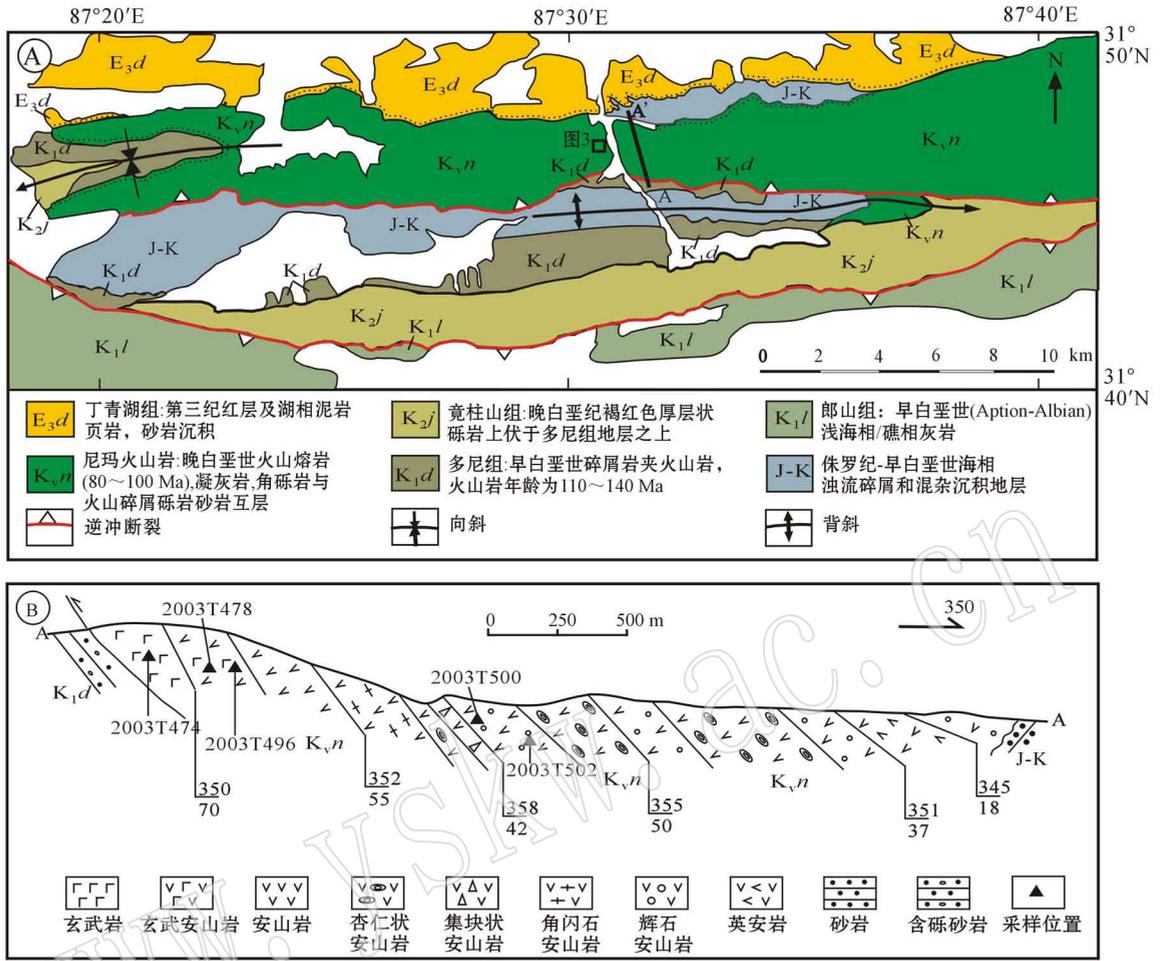


图 2 拉萨地块尼玛地区地质图(a) [据 Kapp 等(2007)修改]和尼玛火山岩剖面图(b)

Fig. 2 Geological map(a) (modified from Kapp *et al.*, 2007) and geologic section (b) of Nima Group volcanic rocks of the Nima area, Lhasa Block, Tibet



图 3 拉萨地块尼玛火山岩野外照片

Fig. 3 Field photo of Nima Group volcanic rocks from Lhasa Block, Tibet

照片位置见图 2a, 主要岩性为玄武岩、玄武安山岩、安山岩和英安岩

the photo position can be found in Fig. 2a, including basalt, basaltic-andesite, andesite and dacite

实验室(XRF-1500)、电感耦合等离子质谱仪(ICP-MS) ELEMENT 实验室、固体同位素地球化学实验室(MAT-262 型质谱计)和稳定同位素实验室(Finnigan MAT 252 型质谱计)完成。主量元素、稀土元素和微量元素的测试精度分别可以达到 1%~3%、5% 和 5%~10%。Sr、Nd 同位素测试结果分别经过 NBS 987 和 Ames 标样进行了标定,测定误差采用 2σ 表示。氧同位素测试数据结果相对于国际标准 V-SMOW 测得,分析精度:标准偏差为 0.1‰。

3 分析结果

3.1 ⁴⁰Ar/³⁹Ar 年代学

测试样品为拉萨地块北部岷千日地区采集的尼玛火山岩酸性组分(英安岩, 2003T468)中挑选出的角闪石单矿物。测试分析结果获得了一致的坪年龄

表 1 拉萨地块白垩纪火山岩岩相学特征描述表

Table 1 Petrographic characteristics of Cretaceous volcanic rocks from Lhasa Block

采样地点	样品号	岩石名称	结构	斑晶	基质
措勤(则弄群火山岩)	2003T432	玄武岩	岩石为斑状结构, 基质为玻璃交织结构	橄榄石(>5%)	橄榄石(2%), 斜长石(>5%) 玻璃(<80%)
	2003T436	玄武岩	岩石为斑状结构, 基质为间粒结构	橄榄石(>10%)	橄榄石(2%), 斜长石(25%) 玻璃(60%)
	2003T437	橄榄安粗岩	岩石为斑状结构, 基质为玻璃交织结构	橄榄石(3%), 斜长石(10%)	橄榄石(2%), 斜长石(15%) 玻璃(70%)
岷千日(尼玛火山岩)	2003T463	玄武岩	岩石为斑状结构, 基质为间隐结构	单斜辉石(2%)	单斜辉石(2%), 斜长石(10%) 玻璃(80%)
	2003T466	安山岩	岩石为斑状结构, 基质为粗面结构	单斜辉石(5%), 斜长石(2%)	单斜辉石(5%), 斜长石(40%) 玻璃(50%)
	2003T467	安山岩	岩石为斑状结构, 基质为粗面结构	单斜辉石(5%), 斜长石(5%)	单斜辉石(2%), 斜长石(30%) 玻璃(60%)
	2003T468	英安岩	岩石为粗面结构, 基质为玻璃交织结构	角闪石(5%), 斜长石(5%)	斜长石(50%) 玻璃(40%)
尼玛(尼玛火山岩)	2003T474	玄武岩	岩石为斑状结构, 基质为间隐结构	斜长石(3%)	斜长石(20%), 玻璃(<80%)
	2003T478	玄武安山岩	岩石为粗面结构, 基质为粗面结构	单斜辉石(5%), 斜长石(15%)	单斜辉石(5%), 斜长石(20%) 玻璃(55%)
	2003T496	玄武安山岩	岩石为斑状结构, 基质为粗面结构	单斜辉石(10%), 斜长石(5%)	单斜辉石(5%), 斜长石(20%) 玻璃(60%)
	2003T500	安山岩	岩石为斑状结构, 基质为间隐结构	单斜辉石(5%), 斜长石(5%)	斜长石(10%) 玻璃(80%)
	2003T502	玄武安山岩	岩石为斑状结构, 基质为间隐结构	单斜辉石(5%), 斜长石(15%)	单斜辉石(2%), 斜长石(5%) 玻璃(70%)

和反等时线年龄, 其中 7~12 阶段构成一个很好的年龄坪, 占³⁹Ar 总释放量的 85%, 坪年龄为 91.2 ± 0.2 Ma, 反等时线年龄为 91.0 ± 0.6 Ma (MSWD = 0.58), 可以代表岩浆形成的时代。因此, 尼玛火山岩的喷发年龄大致为 91 Ma (表 2, 图 4)。

3.2 岩石地球化学和 Sr-Nd-O 同位素特征

3.2.1 主量元素

在 TAS 火山岩分类图解中, 则弄群火山岩分别落在玄武岩、粗面玄武岩和玄武粗安岩区域 (SiO₂ 含量为 47.76%~56.25%); 尼玛火山岩则分别落在玄武岩、玄武安山岩、安山岩和英安岩区域 (SiO₂ 含量为 50.91%~70.45%) (图 5、表 3), 以玄武岩、玄武安山岩等中基性岩石为主。在 K₂O-SiO₂ 图解中, 则弄群火山岩主要落在高钾钙碱性和钾玄质系列, 少量落在中钾钙碱性区域, 和已有研究成果一致 (朱弟成等, 2006b; 康志强等, 2008, 2009b)。则弄群火山岩中酸性岩石较为常见, 同时也出露中基性组分, 这些中基性火山岩多分布于则弄群下部的中上部; 尼玛火山岩则全部落在中钾钙碱性系列和低钾拉斑系列区域 (图 5), 为典型的钙碱性系列岛弧/陆缘弧火山岩组合, 岩石化学计算结果中, 全部呈现 SiO₂

过饱和的特征。此外, 尼玛火山岩和则弄群火山岩均具有高镁 (Mg[#] = 40~60) 中铝 (主体为准铝-弱过铝质, A/CNK = 0.72~1.08) 和低钛 (TiO₂ = 0.41%~1.51%) 特征 (表 3)。

3.2.2 稀土和微量元素

球粒陨石标准化稀土元素配分图解中则弄群火山岩和尼玛火山岩均表现为轻稀土元素相对富集、重稀土元素相对亏损且较为平坦的右倾型稀土元素配分模式 (图 6)。则弄群火山岩稀土元素总含量 ΣREE 为 74.9~341 (× 10⁻⁶), δEu 为 0.77~0.95, (La/Yb)_N 为 18.63~19.58 (玄武岩样品 2003T432 除外, 为 2.77), 指示轻重稀土元素分异较明显, 轻稀土元素相对富集。偏基性火山岩的 Eu 异常表现出极轻微负异常或正异常 (0.93~1.19), 偏酸性火山岩具有较明显负异常 (0.76~0.81), 指示它们可能在岩浆演化过程中发生了少量的斜长石的分异结晶作用。尼玛火山岩稀土元素总含量 ΣREE 为 113~150 (× 10⁻⁶), 变化不大, 平均值为 131 × 10⁻⁶, δEu 为 0.83~0.99, (La/Yb)_N 为 4.27~11.25, 平均值为 6.63, 指示轻重稀土元素有轻度分异, 轻稀土富集 (Gd/Yb)_N 为 0.1~1.8, 指示重稀土元素基本无

表 2 拉萨地块尼玛火山岩⁴⁰Ar/³⁹Ar(角闪石)阶段加热测年数据表
Table 2 Argon isotopic data of Nima volcanic rocks from the Lhasa Block

样品号	质量 0.032 5 g						J = 0.005 86			
t/°C	cum. 39	Atmos/%	³⁶ Ar/ ³⁹ Ar	³⁷ Ar/ ³⁹ Ar	³⁸ Ar/ ³⁹ Ar	⁴⁰ Ar/ ³⁹ Ar	⁴⁰ Ar/ ³⁶ Ar	Date/Ma	error/Ma	
700	0.032	53.94	0.050	0.654	0.020	27.2	547	127.8	0.8	
800	0.062	51.73	0.045	0.703	0.020	25.6	570	126.1	1.0	
900	0.070	78.22	0.129	1.713	0.036	48.7	377	108.9	2.6	
1 000	0.082	66.96	0.067	2.035	0.025	29.2	438	99.2	1.9	
1 040	0.095	62.95	0.051	2.480	0.022	23.6	464	90.3	0.9	
1 080	0.119	50.49	0.029	4.885	0.018	16.2	560	83.0	0.9	
1 120	0.237	17.47	0.009	10.000	0.015	10.2	1 184	87.6	0.5	
1 140	0.300	18.56	0.009	9.907	0.015	10.3	1 141	87.2	0.6	
1 170	0.602	6.44	0.005	10.790	0.014	9.24	1 915	89.6	0.5	
1 200	0.845	7.13	0.005	10.800	0.014	9.27	1837	89.3	0.5	
1 240	0.912	8.69	0.006	10.700	0.014	9.36	1690	88.6	0.6	
1 280	0.966	10.98	0.006	10.760	0.015	9.58	1507	88.4	0.6	
1 350	0.986	26.48	0.012	9.165	0.015	10.8	896	82.1	1.2	
1 500	1.000	34.42	0.016	9.180	0.017	11.9	734	81.2	1.5	

坪年龄 = 91.2 ± 0.2 Ma

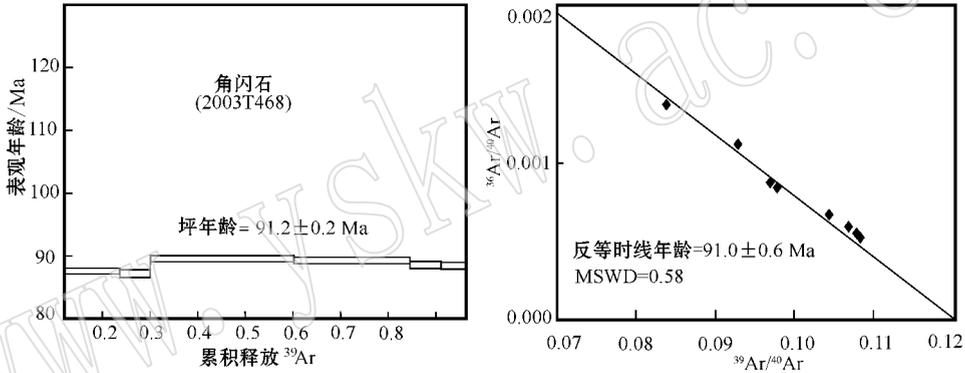


图 4 拉萨地块尼玛火山岩(2003T468)角闪石 Ar 年龄谱和反等时线图

Fig. 4 Ar-Ar dating spectra and isochron age of amphibole of Nima volcanic rocks from the Lhasa Block

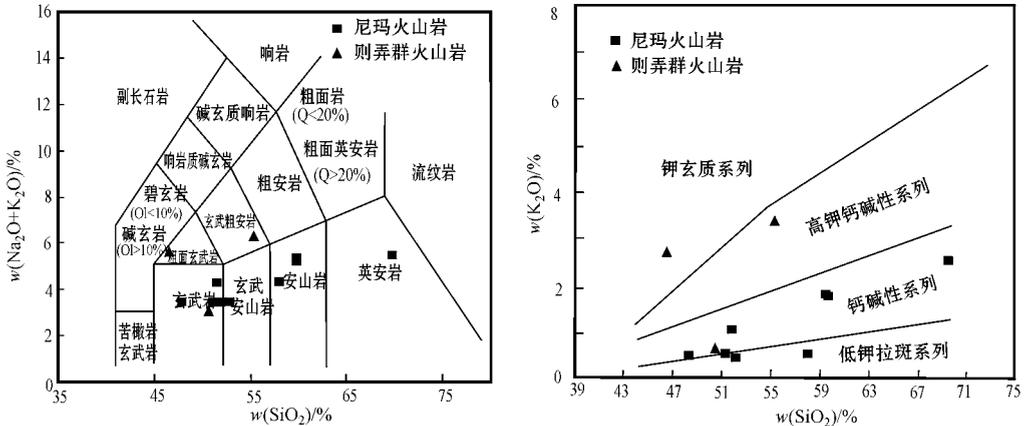


图 5 拉萨地块北部白垩纪火山岩 TAS 图解 (Le Bas 等, 1986) 和 K₂O - SiO₂ 图解 (Ding 等, 2003)
Fig. 5 TAS (after Le Bas *et al.*, 1986) and K₂O - SiO₂ (after Ding *et al.*, 2003) diagrams of Cretaceous volcanic rocks in northern Lhasa Block

明显分异。此外,则弄群火山岩和尼玛火山岩均显示弱的 Ce 负异常 (δCe = 0.90 ~ 0.95), 指示岩浆源

区与海水相互作用可能存在。原始地幔标准化微量元素图解中,尼玛火山岩和

表3 拉萨地块北部白垩纪火山岩主量元素($w_B/\%$)和微量元素($w_B/10^{-6}$)分析结果Table 3 Major ($w_B/\%$) and trace element ($w_B/10^{-6}$) data of Cretaceous volcanic rocks in northern Lhasa Block

采样地点 样品号	措勤(则弄群火山岩)			岷千日(尼玛火山岩)				尼玛(尼玛火山岩)				
	2003T432	2003T436	2003T437	2003T463	2003T466	2003T467	2003T468	2003T474	2003T478	2003T496	2003T500	2003T502
岩石名称	玄武岩	玄武岩	橄榄 安粗岩	玄武岩	安山岩	安山岩	英安岩	玄武岩	玄武 安山岩	玄武 安山岩	安山岩	玄武 安山岩
SiO ₂	51.87	47.76	56.25	53.63	59.97	60.07	70.45	50.91	53.54	54.06	58.98	54.71
TiO ₂	1.03	0.99	1.22	1.51	0.96	0.97	0.41	1.44	1.26	1.03	1.00	1.15
Al ₂ O ₃	18.93	20.79	17.15	17.21	17.63	17.85	14.16	16.98	16.51	16.43	15.97	15.93
Fe ₂ O ₃	9.44	8.84	6.86	8.75	5.69	5.48	2.85	8.43	7.98	6.56	6.66	7.22
MnO	0.16	0.14	0.16	0.10	0.07	0.07	0.04	0.09	0.12	0.10	0.10	0.13
MgO	3.26	4.82	2.69	4.25	3.17	3.05	1.11	2.66	3.95	4.78	3.59	4.79
CaO	8.72	7.18	5.91	5.66	5.76	5.78	3.58	9.73	7.63	8.61	6.69	8.32
Na ₂ O	2.69	3.20	2.99	3.03	3.49	3.54	2.89	3.21	3.63	3.23	3.73	3.16
K ₂ O	0.60	2.65	3.48	0.59	1.87	1.85	2.58	0.46	0.93	0.47	0.58	0.47
P ₂ O ₅	0.18	0.41	0.54	0.28	0.22	0.23	0.14	0.28	0.25	0.22	0.27	0.27
LOI	2.67	2.77	2.28	4.55	0.75	0.75	1.18	6.22	3.82	4.08	2.02	3.32
TOTAL	99.56	99.55	99.52	99.56	99.57	99.63	99.38	100.42	99.63	99.57	99.59	99.47
Mg [#]	41	52	44	49	52	52	44	38	50	59	52	57
σ	1.22	7.19	3.16	1.23	1.69	1.70	1.09	1.70	1.97	1.24	1.16	1.13
A/CNK	0.90	0.98	0.88	1.08	0.97	0.97	1.01	0.72	0.79	0.77	0.84	0.76
U	0.25	0.98	4.25	1.16	1.18	1.41	1.05	0.79	1.01	0.77	1.15	1.06
Co	19.6	25.3	17.0	18.6	15.2	17.1	5.16	30.7	23.1	24.7	19.2	25.8
Ta	0.44	0.54	1.20	0.83	1.42	0.93	0.44	0.50	0.65	0.48	0.57	0.56
Sc	32.8	23.1	16.1	24.6	15.5	14.8	5.87	25.3	22.6	22.8	18.9	22.2
Cs	4.36	8.85	4.64	1.33	4.28	4.59	1.32	0.35	20.4	0.59	19.3	9.64
Hf	2.07	2.84	8.72	4.90	3.85	4.48	2.22	3.68	3.74	3.27	3.89	3.82
Cr	17.8	32.5	32.8	18.5	55.0	81.0	30.4	56.8	74.5	162	75.7	146
V	243	201	157	189	92.8	998.8	51.7	216	173	169	172	185
Ni	5.43	22.4	20.0	2.59	36.2	49.2	20.1	40.0	47.2	69.0	49.0	78.9
Cu	21.6	23.0	22.5	19.8	29.8	39.9	25.7	68.0	37.3	34.1	47.9	22.4
Zn	135	124	195	33.2	62.0	120	73.6	85.4	76.0	73.6	69.0	78.2
Ga	19.0	19.5	19.2	19.6	17.5	17.9	13.7	17.9	16.7	16.6	16.7	16.3
Pb	6.73	5.72	23.1	9.28	12.5	13.6	12.4	9.20	8.55	8.85	11.4	8.59
Th	1.26	4.38	20.9	5.54	5.58	6.40	4.39	3.63	4.06	3.29	5.07	4.72
Nb	3.14	7.32	18.9	11.5	10.2	10.9	5.95	7.78	8.08	6.03	7.97	7.73
Zr	66.5	107	322	172	138	169	78.0	155	158	142	160	159
Sr	322	697	450	315	339	344	304	395	364	397	568	522
Rb	17.2	117	80.1	16.4	70.0	61.9	55.3	3.58	19.7	3.45	14.2	6.57
Ba	205	409	612	193	273	315	423	242	329	281	408	644
La	7.7	36.1	72.8	22.7	21.7	22.6	15.0	19.0	16.1	16.3	20.3	20.1
Ce	17.8	70.8	138.7	46.8	41.4	44.9	28.5	39.6	33.5	33.2	40.7	41.2
Pr	2.6	8.5	15.7	5.9	5.3	5.6	3.1	5.2	4.3	4.3	5.1	5.1
Nd	11.7	31.6	56.5	23.7	21.0	21.5	11.9	21.6	18.5	17.8	20.3	20.6
Sm	3.17	5.67	9.22	5.48	4.45	4.65	2.27	4.90	4.37	4.01	4.41	4.78
Eu	1.01	1.72	2.12	1.77	1.25	1.21	0.65	1.42	1.39	1.24	1.18	1.33
Gd	3.27	4.79	7.18	5.37	3.97	4.10	1.96	4.84	4.52	3.98	4.09	4.54
Tb	0.54	0.53	0.93	0.79	0.63	0.64	0.29	0.76	0.74	0.63	0.66	0.72
Dy	3.37	2.84	5.09	4.78	3.80	3.69	1.67	4.61	4.55	3.80	3.82	4.37
Ho	0.71	0.54	0.97	0.93	0.79	0.73	0.34	0.95	0.94	0.79	0.76	0.94
Er	2.01	1.48	2.72	2.75	2.23	2.08	0.98	2.59	2.70	2.28	2.24	2.60
Tm	0.29	0.20	0.38	0.39	0.30	0.31	0.14	0.37	0.39	0.33	0.33	0.37
Yb	1.88	1.31	2.51	2.54	1.98	2.05	0.90	2.48	2.54	2.02	2.06	2.26
Lu	0.29	0.19	0.38	0.38	0.29	0.29	0.14	0.35	0.37	0.30	0.33	0.33
Y	18.5	15.3	25.6	26.0	20.4	18.7	9.75	26.6	26.3	21.9	22.9	23.6
Σ REE	74.9	182	341	150	129	133	78	135	121	113	129	133
δ Eu	0.95	0.98	0.77	0.99	0.89	0.83	0.93	0.88	0.95	0.94	0.83	0.86
(La/Yb) _N	2.77	18.63	19.58	6.04	7.39	7.41	11.25	5.17	4.27	5.44	6.64	6.01
Sr/Y	17.41	45.52	17.54	12.11	16.64	18.43	31.23	14.84	13.82	18.12	24.84	22.10
δ Ce	0.95	0.94	0.94	0.95	0.90	0.94	0.95	0.95	0.95	0.94	0.94	0.95
(La/Sm) _N	1.50	4.00	5.00	2.60	3.10	3.10	4.20	2.40	2.30	2.60	2.90	2.60
(Gd/Yb) _N	1.40	3.00	0.30	0.10	1.60	1.60	1.80	1.60	1.40	1.60	1.60	1.60

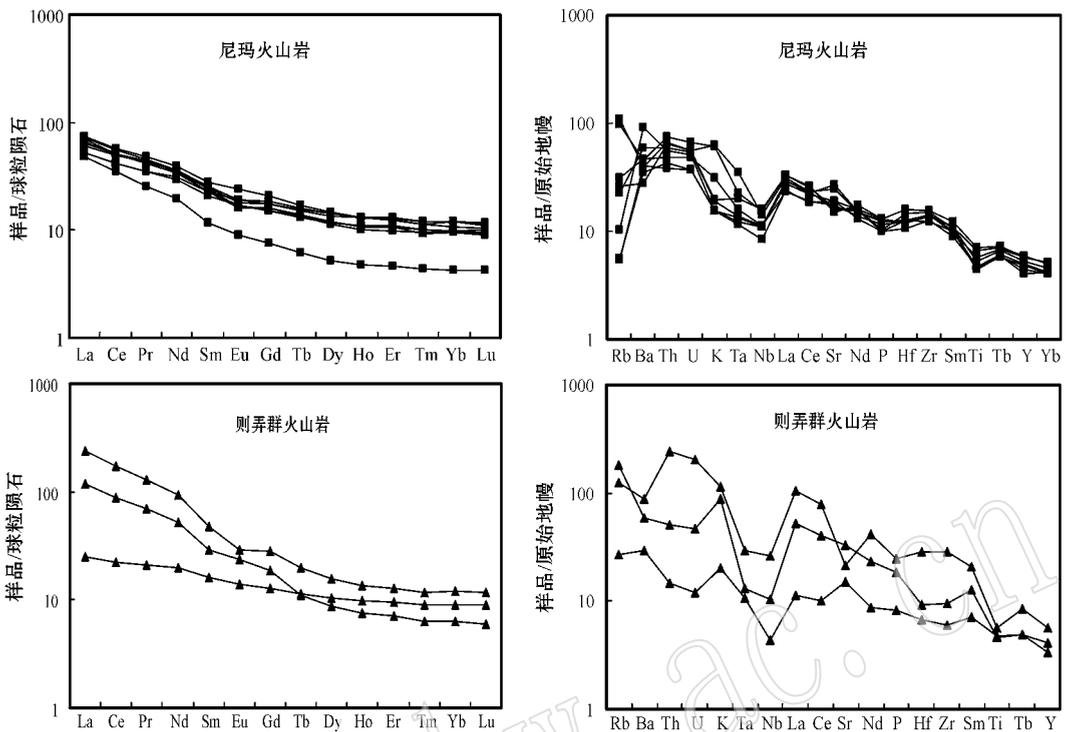


图 6 拉萨地块北部白垩纪火山岩球粒陨石标准化稀土元素配分图解 (Boyton, 1984) 和原始地幔标准化蛛网图解 (Sun 和 McDonough, 1989)

Fig. 6 Chondrite-normalized (Boyton, 1984) rare earth element diagrams and primitive mantle-normalized (Sun and McDonough, 1989) trace element variation diagrams of Cretaceous volcanic rocks in northern Lhasa Block

则弄群火山岩都具有弧火山岩的微量元素配分模式 (图 6) 即大离子亲石元素 (LILE, K, Rb, Sr, Ba, Cs 等) 相对富集, 高场强元素 (Th, Nb, Ta, P, Zr, Hf, HREE) 相对亏损, 同时呈现明显的 Nb, Ta 和 Ti 相对于 K, La, Ce, Sm, Ti 的负异常。

本文及康志强等 (2008) 研究成果显示, 则弄群火山岩偏基性和偏酸性岩石具有类似的稀土和微量元素配分模式, 指示二者可能具有相同的岩浆来源。但是相对偏酸性火山岩, 偏基性火山岩更加富集大离子亲石元素, 并且更加亏损 Nb, Ta, Ti, 同时没有明显 Sr 负异常, 甚至呈现 Sr 的正异常, 而偏酸性火山岩则具有明显的 Sr 负异常, 加之则弄群火山岩具弱的 Eu 负异常的特点, 暗示分异结晶作用在岩浆演化过程中具有一定的贡献。

3.2.3 Sr-Nd-O 同位素

则弄群火山岩和尼玛火山岩均具有相对低的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初始比值和高 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 初始比值, 前者 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_t 比值为 0.7063~0.7072, $\epsilon\text{Nd}(t)$ 为 -5.4~-1.5; 后者 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_t 比值为 0.7041~0.7049, $\epsilon\text{Nd}(t)$ 为 -3.5~2.2, 前者 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初始比值比后者

高 (表 4)。图 7 初始 Sr、初始 Nd 比值计算中则弄群和尼玛火山岩年龄分别采用 130 Ma 和 91.5 Ma。

在图 7 中可以看出, 尼玛火山岩具有较为集中的 Sr 同位素比值, 而 $\epsilon\text{Nd}(t)$ 值较为分散; 则弄群火山岩 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) 比值偏基性组分明显低于偏酸性组分, $\epsilon\text{Nd}(t)$ 值偏基性和偏酸性组分则区别没有 Sr 同位素比值明显, 较为分散的 Sr 同位素比值暗示可能在岩浆上升过程中受到地壳混染的影响。尼玛火山岩 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) 比值落在靠近 EM1 地幔源区范围, 则弄群火山岩偏基性组分 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) 比值落在靠近 EM2 地幔源区范围。EM1 和 EM2 分别为两种不同的富集型地幔端员 (Zindler & Hart, 1986), EM1 具有较低 Rb/Sr, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值和较低 Sm/Nd, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 比值特征, 一般认为起源于陆下岩石圈地幔, 可能与大洋俯冲过程中大洋沉积物脱水熔融产生的流体交代上覆地幔楔的深部物质交换过程有关; EM2 具有较高的 Rb/Sr, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值和较低 Sm/Nd, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 比值, 可能与上部地壳物质再循环过程有关。

对于 Sm-Nd 同位素体系, 假定岩石样品最初来源于亏损地幔, 样品相对于亏损地幔计算出的模式年龄被

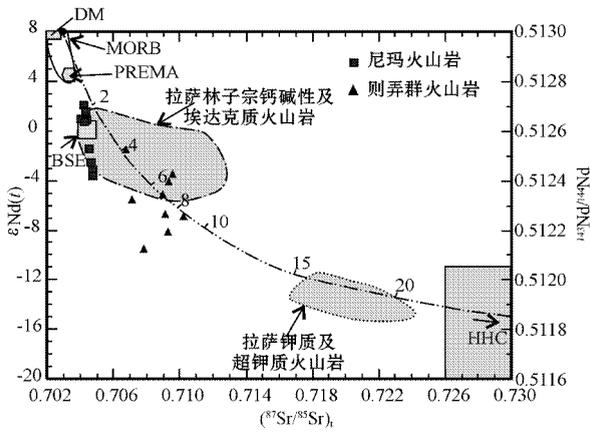


图 7 拉萨地块北部白垩纪火山岩 $\epsilon Nd(t) - (^{87}Sr/^{86}Sr)_t$ 相关图解 [据 Ding 等 (2003) 修改]

Fig. 7 $\epsilon Nd(t) - (^{87}Sr/^{86}Sr)_t$ diagram of Cretaceous volcanic rocks in northern Lhasa Block (modified after Ding *et al.*, 2003)

部分则弄群火山岩数据引自康志强等 (2008); MORB, DM, PREMA 和 BSE 地幔端员和高喜马拉雅结晶岩系 (HHC) 数据来源见 Ding 等 (2003) 及其相关文献, 图中虚线为亏损地幔和高喜马拉雅结晶岩系二者的混合曲线

some data of Zenong Group from Kang Zhiqiang *et al.* (2008); the data source of MORB, DM, PREMA, BSE and high Himalayan crystalline rocks (HHC) can be found from Ding *et al.* (2003), the dot-dash line is a mixing curve between depleted mantle and HHC

称为亏损地幔模式年龄 (t_{DM}), 代表地壳物质从亏损地幔中分离的时代。本文及已有研究成果 (刘伟等 2010) 显示尼玛火山岩亏损地幔模式年龄低于则弄群火山岩, 二者分别为 0.82~1.22 Ga 和 1.1~1.9 Ga。

一般情况下, 氧同位素组成在岩浆岩中呈现一定的规律性, 例如在岩浆分异过程中, 由于 SiO_2 最富集 ^{18}O , 偏酸性相对与偏基性的岩浆岩具有较高的 $\delta^{18}O$ 值。据大量资料统计显示, 不同岩石类型具有不同的 $\delta^{18}O$ 值, 球粒陨石为 3.7‰~6.3‰, 幔源镁铁质岩石具有较窄的 $\delta^{18}O$ 值变化范围 5‰~7‰, 辉长岩、玄武岩、安山岩和粗面岩等中基性岩石具有相似的 $\delta^{18}O$ 组成 5.5‰~7.4‰, 花岗岩类则具有较高的 $\delta^{18}O$ 值, 并具有较大的变化范围 7‰~13‰ (韩吟文等 2003)。则弄群和多尼组火山岩氧同位素特征相差不大, 二者均具有较高的 $\delta^{18}O_{V-SMOW}$ 值 (7.2‰~12.9‰), 少量样品 $\delta^{18}O_{V-SMOW}$ 值较低 (2‰~3‰), 可能受到了后期蚀变作用影响。

4 讨论

4.1 构造背景和岩浆源区

原始岩浆的成分对了解其源区的性质、部分熔融的物理化学条件以及岩浆的演化过程均起着关键

作用。通常将玄武岩的镁值 ($Mg^\#$) 作为识别原始玄武质岩浆的一个重要标志。一般认为, 原始玄武质岩浆的镁值应为 68~75 (Green, 1976)。拉萨地块北部尼玛火山岩和则弄群火山岩绝大部分样品镁值为 40~60, 均稍低于以上原始岩浆判别限定的范围, 指示源区岩石经历了较为复杂的岩浆演化历史。

在 Hf/3 - Th - Ta 判别图解 (图 8) 中, 则弄群火山岩和尼玛火山岩全部落在岛弧火山岩区域, 表明二者都来自洋陆 B 型俯冲构造背景。 $\epsilon Nd(t) - (^{87}Sr/^{86}Sr)_t$ 相关图解 (图 7) 显示, 则弄群和尼玛火山岩均具有相对较低的初始 Sr 和较高的初始 Nd 比值。则弄群火山岩初始 Sr 和初始 Nd 比值落在了相对靠近亏损地幔和 EM2 型富集地幔混合的区域, 非常靠近 EM2 型富集地幔端员, 而尼玛火山岩则落在亏损地幔和 EM1 型富集地幔混合区域, 相对靠近亏损地幔端员。以上同位素组成特征反映则弄群火山岩源区中加入了较多的大陆物质 (沉积物或者其他陆源成分), 可能为俯冲带内俯冲板片带入的陆源沉积物脱水熔融产生的流体/熔体交代岩石圈地幔诱发其发生部分熔融的产物, 也可能反映岩浆上升过程中地壳物质的同化混染作用; 尼玛火山岩源区则表现为更为亏损的同位素比值特征, 可能是 EM1 型富集地幔源区混入了来自软流圈地幔的流体/熔体成分。

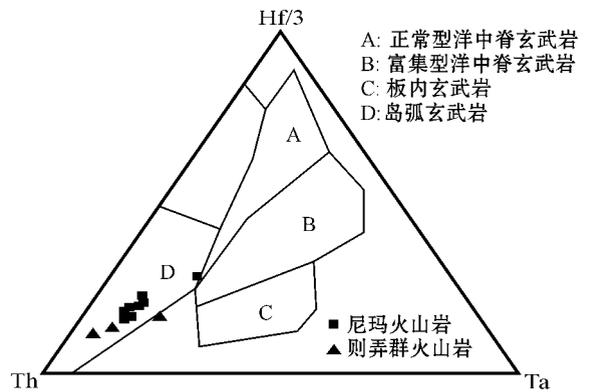


图 8 拉萨地块北部白垩纪火山岩 Hf/3 - Th - Ta 相关图解 (Wood, 1980)

Fig. 8 Hf/3 - Th - Ta diagram of Cretaceous volcanic rocks in northern Lhasa Block (Wood, 1980)

4.2 拉萨地块北部火山岩对冈底斯岛弧构造演化的制约

自早侏罗世以来, 新特提斯洋岩石圈一直向北俯冲消减, 直至印度大陆和亚洲大陆发生碰撞。对比拉萨地块南部叶巴组 and 桑日群火山岩、北部则弄

表 4 拉萨地块北部白垩纪火山岩 Sr-Nd-O 同位素分析结果
Table 4 Sr, Nd and O isotopic data of Cretaceous volcanic rocks in northern Lhasa Block

样品号	措勤(则弄群火山岩)				岷千日(尼玛火山岩)				尼玛(尼玛火山岩)			
	2003T432	2003T436	2003T437	2003T463	2003T466	2003T467	2003T468	2003T474	2003T478	2003T496	2003T500	2003T502
岩石名称	玄武岩	玄武岩	橄榄安粗岩	玄武岩	安山岩	安山岩	英安岩	玄武岩	玄武安山岩	玄武安山岩	安山岩	玄武安山岩
$w(\text{Rb})/10^{-6}$	17.8	108	81.7	15.8	72.3	67.3	67.4	3.42	20.6	3.25	14.3	5.05
$w(\text{Sr})/10^{-6}$	346	767	498	350	364	370	379	409	385	414	597	547
$w(\text{Rb})/w(\text{Sr})$	0.05	0.14	0.16	0.05	0.20	0.18	0.18	0.01	0.05	0.01	0.02	0.01
$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	0.147 18	0.403 47	0.470 86	0.130 60	0.569 10	0.526 89	0.514 62	0.023 88	0.154 36	0.022 60	0.068 57	0.026 51
$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} \pm 2\sigma$	0.707 48 ± 1	0.707 48 ± 1	0.707 18 ± 1	0.704 93 ± 1	0.705 57 ± 1	0.705 55 ± 1	0.705 27 ± 1	0.704 41 ± 1	0.704 67 ± 1	0.704 09 ± 1	0.704 42 ± 1	0.704 45 ± 1
$w(\text{Sm})/10^{-6}$	3.01	5.93	9.64	6.11	4.48	4.56	2.10	5.05	4.44	3.98	4.58	4.63
$w(\text{Nd})/10^{-6}$	11.6	34.5	58.5	32.1	21.3	21.7	9.39	22.3	18.5	17.7	21.2	21.2
$w(\text{Sm})/w(\text{Nd})$	0.26	0.17	0.16	0.19	0.21	0.21	0.22	0.23	0.24	0.22	0.22	0.22
$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	0.157 696	—	0.099 730	0.115 184	0.127 298	0.127 314	0.135 551	0.137 227	0.145 524	0.135 838	0.131 087	0.132 362
$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	0.512 362 ± 11	—	0.512 562 ± 16	0.512 512 ± 13	0.512 460 ± 12	0.512 481 ± 10	0.512 570 ± 12	0.512 690 ± 13	0.512 805 ± 13	0.512 742 ± 13	0.512 683 ± 11	0.512 689 ± 12
$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_t$	0.707 222	0.706 766	0.706 342	0.704 759	0.704 836	0.704 864	0.704 652	0.704 149	0.704 332	0.704 418	0.704 376	0.704 502
$\epsilon_{\text{Nd}}(t)$	-5.4	—	-1.5	-2.5	-3.5	-3.1	-1.3	1.0	2.2	1.7	0.9	1.0
$\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}/\text{‰}$	7.2	9.8	9.1	10.8	8.8	9.7	—	7.4	3.4	2.7	7.9	12.9

群火山岩和尼玛火山岩的时空分布和岩石地球化学、同位素组成特征,我们倾向于认为这些火山岩从南到北时代逐渐变新,岩性组合由钙碱性转变为以高钾钙碱性和钾玄质系列为主导,指示俯冲带深度南浅北深,俯冲极性为由南向北,主要受控于新特提斯洋板片由南向北俯冲过程。

由于新特提斯洋由南向北俯冲,俯冲地幔楔在白垩纪以来也向北移动,因而冈底斯岛弧火山岩也大致表现为由南向北变新的趋势。伴随岛弧火山岩线的北移,拉萨地块从南向北发育一系列弧后前陆盆地。冈底斯最北部的措勤-色林错-比如为一典型的弧后前陆盆地(Leeder *et al.*, 1988; Kapp *et al.*, 2004, 2005, 2007; Leier *et al.*, 2007a, 2007b, 2007c; 丁林等, 2009)。但也有学者认为早白垩世拉萨地块北部处于弧后拉张环境中(Zhang, 2004; Zhang *et al.*, 2004, 2007)。然而,下列几个方面的事实强烈支持其为冈底斯弧后前陆盆地:①色林错盆地内下白垩统地层从南向北逐渐减薄,盆地南部格仁错地区沉积了厚度>3 000 m的复理石地层;②措勤-色林错盆地沉积了一套向上变粗的沉积序列,其主要物源来自南部的冈底斯岛弧;③盆地的褶皱断裂带位于盆地的南部,为措勤-申扎逆冲断裂;④冈底斯弧后前陆盆地发育的时代为144~110 Ma(丁林等, 2009),与冈底斯岛弧中部火山岩的时代也高度一致(则弄群火山岩和多尼组火山岩, 140~110 Ma)。认为早白垩世拉萨地块北部处于弧后拉张盆地的主要证据是盆地多尼组中夹有大量的火山岩,我们认为,与周缘前陆盆地不同,弧后前陆盆地处于岛弧环境中,在沉积过程中出现大量火山岩是非常正常的。

晚白垩世(100~80 Ma)阶段,向北俯冲的新特提斯洋板片发生回转,俯冲地幔楔扩大,软流圈上涌引起地表抬升,上覆岩石圈地幔发生部分熔融形成尼玛火山岩,弧后前陆盆地停止发育。由于俯冲角度不断变陡,于是晚白垩世至早第三纪冈底斯岛弧火山岩发生相反方向的迁移,由北向南变新,在冈底斯南部出现林子宗群火山岩,时代为晚白垩世到早第三纪。晚期的高角度俯冲使得弧后前陆盆地结束,在南部形成日喀则弧前盆地。

5 结论

(1) 拉萨地块中生代至早第三纪火山岩的演化发

生两次大的空间迁移,第一次从南向北变新,从最南部的叶巴组(193~174 Ma)到北部的则弄群、多尼组火山岩(140~110 Ma),最后到最北部的尼玛火山岩(100~80 Ma)。第二次从北再向南迁移,从北部的尼玛火山岩迁移到南部的林子宗火山岩(70~40 Ma)。

(2) 与叶巴组、桑日群火山岩一样,则弄群火山岩为岛弧/陆缘弧火山岩,但则弄群火山岩呈现为富钾的岩石组合特征,指示为贝尼奥夫带加深期间岩浆源区较低部分熔融程度下的产物;尼玛火山岩初始 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 同位素比值较低, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 同位素比值较高,靠近MORB区域,指示晚期北部火山岩可能来源较深,受软流圈影响较大。

(3) 中生代至早第三纪冈底斯岛弧火山岩时空分布特征和成分演化趋势指示了新特提斯洋板块的俯冲历史:早期,新特提斯洋岩石圈由南向北低角度俯冲,然后再高角度反向旋转,直至最后发生拆沉。

致谢 火山岩岩石地球化学分析、Ar-Ar年代学测试分别得到了中国科学院地质与地球物理研究所相关实验室的协助,二位审稿人的认真评审对本文提出了非常宝贵的建设性意见,在此一并表示诚挚谢意。

References

- Allègre C J, Courtillot V, Tapponnier P, *et al.* 1984. Structure and evolution of the Himalaya-Tibet orogenic belt[J]. *Nature*, 307: 17~22.
- Boynton W V. 1984. Cosmochemistry of the rare earth elements: meteorite studies[A]. Henderson P. Rare Earth Element Geochemistry[C]. Amsterdam: Elsevier: 63~114.
- Burg J P, Proust F, Tapponnier P, *et al.* 1983. Deformation phases and tectonic evolution of the Lhasa Block(southern Tibet, China)[J]. *Ecloga. Geol. Helv.*, 76: 643~665.
- Burg J P and Chen G M. 1984. Tectonics and structural zonation of southern Tibet, China[J]. *Nature*, 311: 219~223.
- Chen Wei, Ma Changqian, Bian Qiujuan, *et al.* 2009. Evidence from geochemistry and zircon U-Pb geochronology of volcanic rocks of Ye-ba Formation in Demingding area, the east of Middle Gangdise, Tibet[J]. *Geological Science and Technology Information*, 28(3): 31~40 (in Chinese with English abstract).
- Chu M F, Chung S L, Song B, *et al.* 2006. Zircon U-Pb and Hf isotope constraints on the Mesozoic tectonics and crustal evolution of southern Tibet[J]. *Geology*, 34: 745~748.
- Coulon C, Maluski H, Bollinger C, *et al.* 1986. Mesozoic and Cenozoic volcanic rocks from central and southern Tibet: $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ dating, petrological characteristics and geodynamical significance[J]. *Earth Planet Sci. Lett.*, 79: 281~302.
- Dewey J F, Shackleton R M, Chang C F, *et al.* 1988. The tectonic evolution of the Tibetan Plateau[J]. *Philos. Trans. R. Soc. Lon-*

- don, Ser A, 327: 379~413.
- Ding Lin, Cai Fulong, Zhang Qinghai, *et al.* 2009. Provenance and tectonic evolution of the foreland basin systems in the Gangdese-Himalayan collisional orogen belt [J]. *Chinese Journal of Geology*, 44(4): 1~23 (in Chinese with English abstract).
- Ding L, Kapp P and Wan X. 2005. Paleocene-Eocene record of ophiolite obduction and initial India~Asia collision, south central Tibet [J]. *Tectonics*, 24: 1~18.
- Ding L, Kapp P, Zhong D, *et al.* 2003. Cenozoic volcanism in Tibet: evidence for a transition from oceanic to continental subduction [J]. *J. Petrol.*, 44: 1833~1865.
- Ding Lin and Lai Qingzhou. 2003. New geological evidence of crust thickening in the Gangdese block prior to the Indo-Asian collision [J]. *Chinese Science Bulletin*, 48(8): 836~842 (in Chinese).
- Dong Yanhui, Xu Jifeng, Zang Qinggao, *et al.* 2006. Is there a Neotethys' subduction record earlier than arc volcanic rocks in the Sangri Group? [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(3): 661~668 (in Chinese with English abstract).
- Geng Quanru, Pan Guitang, Wang Liquan, *et al.* 2006. Isotopic geochronology of the volcanic rocks from the Yeba Formation in the Gangdise zone, Xizang [J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 26(1): 1~7 (in Chinese with English abstract).
- Green D H. 1976. Experimental testing of equilibrium partial melting of peridotite under water-saturated, high pressure conditions [J]. *Can. Mineral.*, 14: 255.
- Guyann J H, Kapp P, Pullen A, *et al.* 2006. Tibetan basement rocks near Amdo reveal "missing" Mesozoic tectonism along the Bangong suture, central Tibet [J]. *Geology*, 34: 505~508.
- Han Yinwen and Ma Zhendong. 2003. *Geochemistry* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 202~268 (in Chinese).
- Hu Daogong, Wu Zhenhan, Jiang Wan, *et al.* 2005. SHRIMP zircon U-Pb age and Nd isotopic study on the Nyainqentanglha Group in Tibet [J]. *Science in China (Earth Sciences)*, 35(1): 29~37 (in Chinese).
- Kang Zhiqiang, Xu Jifeng, Chen Jianlin, *et al.* 2009a. Geochemistry and origin of Cretaceous adakites in Mamuxia Formation, Sangri Group, South Tibet [J]. *Geochimica*, 38(4): 334~344 (in Chinese with English abstract).
- Kang Zhiqiang, Xu Jifeng, Dong Yanhui, *et al.* 2008. Cretaceous volcanic rocks of Zenong Group in north-middle Lhasa Block: products of southward subducting of the Slainajap ocean? [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 24(2): 303~314 (in Chinese with English abstract).
- Kang Zhiqiang, Xu Jifeng, Wang Baodi, *et al.* 2009b. Geochemistry of Cretaceous volcanic rocks of Duoni Formation in northern Lhasa Block: discussion of tectonic setting [J]. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 34(1): 89~104 (in Chinese with English abstract).
- Kapp P, DeCelles P G, Gehrels G E, *et al.* 2007. Geological records of the Lhasa-Qiangtang and Indo-Asian collisions in the Nima area of central Tibet [J]. *GSA Bulletin*, 119(7~8): 917~933.
- Kapp P, DeCelles P and Leier A. 2004. The Gangdese retroarc fold-thrust belt revealed [J]. *Geol. Soc. Am. Abstr. Programs*, 36: 18.
- Kapp P, Murphy M A, Yin A, *et al.* 2003. Mesozoic and Cenozoic tectonic evolution of the Shiquanhe area of western Tibet [J]. *Tectonics*, 22(4): 1~24.
- Kapp P, Yin A, Harrison T M, *et al.* 2005. Cretaceous-Tertiary shortening, basin development, and volcanism in central Tibet [J]. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 117: 865~878.
- Le Bas M J, R W Le Maitre, A Streckeisen, *et al.* 1986. A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram [J]. *J. Petrol.*, 27: 745~750.
- Leeder M R, Smith A B and Jixiang Y. 1988. Sedimentology and palaeoenvironmental evolution of the 1985 Lhasa to Golmud geotraverse [J]. *Philos. Trans. R. Soc. London Ser. A*, 327: 107~143.
- Leier A L, DeCelles P G, Kapp P, *et al.* 2007a. The Takena Formation of the Lhasa Block, southern Tibet: The record of a Late Cretaceous retroarc foreland basin [J]. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 119: 31~48.
- Leier A L, DeCelles P G, Kapp P, *et al.* 2007b. Detrital zircon geochronology of Carboniferous-Cretaceous strata in the Lhasa Block, southern Tibet [J]. *Basin Research*, 19(3): 361~378.
- Leier A L, Kapp P, Gehrels G E, *et al.* 2007c. Lower Cretaceous strata in the Lhasa Block, Tibet, with implications for understanding the early tectonic history of the Tibetan Plateau [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 77(9~10): 809~825.
- Li Haiping and Zhang Manshe. 1995. Lithochemical features of Sangri Group vulcanite in Sangri Area, Tibet [J]. *Tibet Geology*, 1: 84~92 (in Chinese).
- Liu Wei, Li Fenqi, Yuan Sihua, *et al.* 2010. Volcanic rock provenance of Zenong Group in Coqen area of Tibet: geochemistry and Sr-Nd isotopic constrain [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 29(4): 367~376 (in Chinese with English abstract).
- Murphy M A, Yin A, Harrison T M, *et al.* 1997. Did the Indo-Asian alone create the Tibetan Plateau? [J]. *Geology*, 25: 719~722.
- 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).
- Pan Y. 1993. Unroofing history and structural evolution of the southern Lhasa Block, Tibetan Plateau: Implications for the continental collision between India and Asia [PhD thesis] [D]. Albany: State University of New York, 287.
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and process [A]. Saunders A D & Norry M J. *Magmatism in the Ocean Basin* [C]. Geological Society, London, Special Publications, 42: 313~345.
- Wood D A. 1980. The application of a Th-Hf-Ta diagram to problems of tectonomagmatic classification and to establishing the nature of crustal contamination of basaltic lavas of the British Tertiary volcanic province [J]. *Earth Planet. Sci. Lett.* 50: 11~30.
- Yang Deming, Hu Bo, Dong Qingshui, *et al.* 2009. Lithostratigraphy and sedimentary environment in Lower Cretaceous Duoni Formation in Baga area of Jiali, Tibet [J]. *Global Geology*, 28(3): 280~283 (in Chinese with English abstract).
- Yao Peng, Wang Jingao, Wang Quanhai, *et al.* 2006. Discovery and geological significance of the adakite in Gangdise island arc belt, Xizang (Tibet) [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(3): 612~620 (in Chinese with English abstract).
- Yin A and Harrison T M. 2000. Geologic Evolution of the Himalayan-Tibetan Orogen [J]. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, 28: 211~280.
- Yin A, Harrison T M, Ryerson F J, *et al.* 1994. Tertiary structural evolution of the Gangdese thrust system, southern Tibet [J]. *J. Geophys. Res.*, 99: 18175~18201.
- Zeng Zhongcheng, Liu Demin, Zeren Zhaxi, *et al.* 2009. Geochemistry and tectonic setting of lavas in the Yeba Formation in the eastern part of the Gangdise belt [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science)*

- Edition), 39(3): 435~445 in Chinese with English abstract).
- Zhang Hongfei, Xu Wangchun, Guo Jianqiu, et al. 2007. Zircon U-Pb and Hf isotopic composition of deformed granite in the southern margin of the Gangdise belt, Tibet: evidence for early Jurassic subduction of Neo-Tethyan oceanic slab [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(6): 1347~1355 in Chinese with English abstract).
- Zhang K J. 2004. Secular geochemical variations of the Lower Cretaceous siliciclastic rocks from central Tibet (China) indicate a tectonic transition from continental collision to back-arc rifting [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 229(1~2): 73~89.
- Zhang K J, Xia B D, Wang G M, et al. 2004. Early Cretaceous stratigraphy, depositional environments, sandstone provenance and tectonic setting of central Tibet, western China [J]. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 116: 1202~1222.
- Zhang K J, Zhang Y X, Li B, et al. 2007. Nd isotopes of siliciclastic rocks from Tibet, western China: constraints on provenance and pre-Cenozoic tectonic evolution [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 256(3~4): 604~616.
- Zheng Chunzi, Qu Yonggui, Zhang Shuqi, et al. 2003. On the lithostratigraphy and sedimentary environment of the Lower Cretaceous Duoni Formation in the Xungmai and Qusongbo areas, northern Xizang [J]. *Geological Review*, 49(6): 638~645 in Chinese with English abstract).
- Zhu Dicheng, Pan Guitang, Mo Xuanxue, et al. 2006b. Late Jurassic-Early Cretaceous geodynamic setting in middle-northern Gangdise: New insights from volcanic rocks [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(3): 534~546 in Chinese with English abstract).
- Zhu Dicheng, Pan Guitang, Wang Liquan, et al. 2008a. Tempo-spatial variations of Mesozoic magmatic rocks in the Gangdise 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 Dicheng, Mo Xuanxue, Zhao Zhidan, et al. 2008b. Zircon U-Pb geochronology of Zenong Group volcanic rocks in Coqen area of the Gangdise, Tibet and tectonic significance [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 24(3): 401~412 in Chinese with English abstract).
- Zhu Dicheng, Pan Guitang, Chung Sunlin, et al. 2008c. SHRIMP zircon age and geochemical constraints on the origin of Lower Jurassic volcanic rocks from the Yeba Formation, southern Gangdise, south Tibet [J]. *International Geology Review*, 50(5): 441~471.
- Zhu Dicheng, Mo Xuanxue, Niu Yaoling, et al. 2009a. Geochemical investigation of Early Cretaceous igneous rocks along an east-west traverse throughout the central Lhasa Terrane, Tibet [J]. *Chemical Geology*, 268: 298~312.
- Zhu Dicheng, Zhao Zhidan, Tang Pangui, et al. 2009b. Early Cretaceous subduction-related adakite-like rocks of the Gangdise Belt, southern Tibet: Products of slab melting and subsequent melt-peridotite interaction? [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 34(3): 298~309.
- Zindler A and Hart S. 1986. Chemical geodynamics [J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 14: 493~571.
- 丁林, 蔡福龙, 张清海, 等. 2009. 冈底斯—喜马拉雅碰撞造山带前陆盆地系统及构造演化 [J]. *地质科学*, 44(4): 1~23.
- 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(8): 836~842.
- 董彦辉, 许继峰, 曾庆高, 等. 2006. 存在比桑日群弧火山岩更早的新特提斯洋俯冲记录么? [J]. *岩石学报*, 22(3): 661~668.
- 耿全如, 潘桂棠, 王立全, 等. 2006. 西藏冈底斯带叶巴组同位素地质年代 [J]. *沉积与特提斯地质*, 26(1): 1~7.
- 韩吟文, 马振东. 2003. *地球化学 (第一版)* [M]. 北京: 地质出版社. 202~268.
- 胡道功, 吴珍汉, 江万, 等. 2005. 西藏念青唐古拉群 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄和 Nd 同位素研究 [J]. *中国科学 D 辑*, 35(1): 29~37.
- 康志强, 许继峰, 董彦辉, 等. 2008. 拉萨地块中北部白垩纪则弄群火山岩 Sainajap 洋南向俯冲的产物? [J]. *岩石学报*, 24(2): 303~314.
- 康志强, 许继峰, 陈建林, 等. 2009a. 藏南白垩纪桑日群麻木下组埃达克岩的地球化学特征及其成因 [J]. *地球化学*, 38(4): 334~344.
- 康志强, 许继峰, 王保弟, 等. 2009b. 拉萨地块北部白垩纪多尼组火山岩的地球化学形成的构造环境 [J]. *地球科学*, 34(1): 89~104.
- 李海平, 张满社. 1995. 西藏桑日地区桑日群火山岩岩石地球化学特征 [J]. *西藏地质*, 13(1): 84~92.
- 刘伟, 李奋其, 袁四化, 等. 2010. 西藏措勤地区则弄群火山岩源区——地球化学及 Sr-Nd 同位素制约 [J]. *岩石矿物学杂志*, 29(4): 367~376.
- 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): 521~534.
- 杨德明, 胡波, 董清水, 等. 2009. 西藏嘉黎巴嘎地区早白垩世多尼组地层特征与沉积环境 [J]. *世界地质*, 28(3): 280~283.
- 姚鹏, 李金高, 王全海, 等. 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(3): 612~620.
- 曾忠诚, 刘德民, 泽仁扎西, 等. 2009. 西藏冈底斯东段叶巴组火山岩地球化学特征及其地质构造意义 [J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 39(3): 435~445.
- 张宏飞, 徐旺春, 郭建秋, 等. 2007. 冈底斯南缘变形花岗岩锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素组成: 新特提斯洋早侏罗世俯冲作用的证据 [J]. *岩石学报*, 23(6): 1347~1353.
- 郑春子, 曲永贵, 张树岐, 等. 2003. 西藏北部雄梅—曲松波地区早白垩世多尼组及沉积环境探讨 [J]. *地质论评*, 49(6): 638~645.
- 朱弟成, 潘桂棠, 王立全, 等. 2004. 冈底斯南缘桑日群火山岩的地球化学特征及地质意义 [A]. 2004 年全国岩石学与地球动力学研讨会论文摘要 [C].
- 朱弟成, 潘桂棠, 钟孙霖, 等. 2006a. 西藏冈底斯南缘早侏罗世叶巴组火山岩的起源: 锆石 SHRIMP 年龄和地球化学约束 [A]. 2006 年全国岩石学与地球动力学研讨会论文摘要 [C].
- 朱弟成, 潘桂棠, 莫宣学, 等. 2006b. 冈底斯中北部晚侏罗世—早白垩世地球动力学环境: 火山岩约束 [J]. *岩石学报*, 22(3): 534~546.
- 朱弟成, 潘桂棠, 王立全, 等. 2008a. 西藏冈底斯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.
- 朱弟成, 莫宣学, 赵志丹, 等. 2008b. 西藏冈底斯带措勤地区则弄群火山岩锆石 U-Pb 年代学格架及构造意义 [J]. *岩石学报*, 24(3): 401~412.

附中文参考文献

陈炜, 马昌前, 边秋娟, 等. 2009. 西藏得明顶地区叶巴组火山岩地球化学特征和同位素 U-Pb 年龄证据 [J]. *地质科技情报*, 28