

doi:10.3799/dqkx.2015.005

# 青海治多地区晚三叠世石英闪长岩 地球化学特征及成岩动力学背景

赵少卿<sup>1</sup>, 付乐兵<sup>1\*</sup>, 魏俊浩<sup>1</sup>, 谭俊<sup>1</sup>, 王旭春<sup>2</sup>, 赵志新<sup>1</sup>, 李翔<sup>1</sup>

1. 中国地质大学资源学院, 湖北武汉 430074

2. 青海有色地质矿产勘查院, 青海西宁 810007

**摘要:** 对羌塘地块东北缘甘孜—理塘缝合带南侧日啊日曲石英闪长岩进行了系统的锆石 U-Pb 年龄、主量—微量元素及 Sr-Nd 同位素分析, 以探讨其岩石成因及地球动力学意义。LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年结果表明, 石英闪长岩侵位年龄为  $218 \pm 1$  Ma, 为晚三叠世岩浆活动的产物。岩石  $\text{SiO}_2$  含量介于 53.02%~62.06% 之间, 富  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (15.84%~17.00%) 和  $\text{CaO}$  (6.71%~8.94%), 贫  $\text{TiO}_2$  (0.49%~1.01%) 和  $\text{P}_2\text{O}_5$  (0.04%~0.12%), 具有较高的  $\text{MgO}$  (3.31%~5.66%) 和  $\text{Mg}^\#$  (50~62), 属准铝质钙碱性系列; 岩体稀土元素总量较低 ( $38.05 \times 10^{-6}$ ~ $61.58 \times 10^{-6}$ ), 轻重稀土分馏不明显, LILE 富集, HFSE 亏损, 具有含量较高的  $\text{Cr}$  ( $33.45 \times 10^{-6}$ ~ $176.64 \times 10^{-6}$ ) 和  $\text{Ni}$  ( $13.34 \times 10^{-6}$ ~ $43.62 \times 10^{-6}$ )。全岩 ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ )<sub>i</sub> 比值较为一致 (0.706 8~0.707 9),  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  变化于 -5.5~-1.6。主微量元素及同位素结果表明日啊日曲石英闪长岩具有高镁闪长岩的特征, 与赞岐岩地球化学特征类似, 为俯冲沉积物来源的熔体交代岩石圈地幔形成的尖晶石相金云母二辉橄榄岩低度 (10%~15%) 部分熔融的产物, 岩浆演化过程中经历了辉石、角闪石等矿物的分离结晶。微量元素构造判别图解表明岩石为俯冲环境下的弧岩浆岩, 结合区内蛇绿岩、研究区南部陆缘弧火山岩和义敦岛弧埃达克岩的发现, 认为古特提斯洋在晚三叠世时期可能仍处于消减状态, 日啊日曲高镁石英闪长岩形成于甘孜—理塘洋南西向俯冲过程中。

**关键词:** 高镁闪长岩; 赞岐岩; 甘孜—理塘缝合带; 古特提斯洋; 羌塘地块; 青藏高原; 地球化学。

中图分类号: P597

文章编号: 1000-2383(2015)01-0061-16

收稿日期: 2014-05-01

## Petrogenesis and Geodynamic Setting of Late Triassic Quartz Diorites in Zhiduo Area, Qinghai Province

Zhao Shaoqing<sup>1</sup>, Fu Lebing<sup>1\*</sup>, Wei Junhao<sup>1</sup>, Tan Jun<sup>1</sup>, Wang Xuchun<sup>2</sup>, Zhao Zhixin<sup>1</sup>, Li Xiang<sup>1</sup>

1. Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. Qinghai Institute of Geology and Mineral Resources, Xining 810007

**Abstract:** Zircon U-Pb age, major and trace elements and Sr, Nd isotope compositions of the Riariqu quartz diorites from the south of the Ganzi-Litang suture zone, northeastern Qiangtang terrane are studied to decipher its petrogenesis and geodynamic significance. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating yields an emplacement age of  $218 \pm 1$  Ma for the intrusion. Bulk-rock analyses show that these rocks belong to the calc-alkaline series, with  $\text{SiO}_2$  contents ranging from 53.02% to 62.06%. They are enriched in  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (15.84%~17.00%) and  $\text{CaO}$  (6.71%~8.94%), depleted in  $\text{TiO}_2$  (0.49%~1.01%) and  $\text{P}_2\text{O}_5$  (0.04%~0.12%), defining their metaluminous characteristics. All samples have high concentrations of  $\text{MgO}$  (3.31%~5.66%),  $\text{Cr}$  ( $33.45 \times 10^{-6}$ ~ $176.64 \times 10^{-6}$ ) and  $\text{Ni}$  ( $13.34 \times 10^{-6}$ ~ $43.62 \times 10^{-6}$ ), and resultant high  $\text{Mg}^\#$  (50~62). These rocks are enriched in LREE and LILE, and depleted in HFSE with low REE contents ( $38.05 \times 10^{-6}$ ~ $61.58 \times 10^{-6}$ ). The ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ )<sub>i</sub> ratios range from 0.706 8

**基金项目:** 国家自然科学基金 (Nos. 41302065, 41102047); 中国地质大学 (武汉) 中央高校基本科研业务费专项资金 (Nos. CUG120702, CUG120842); 中国博士后科学基金 (No. 2012M521493)。

**作者简介:** 赵少卿 (1985-), 男, 博士研究生, 主要从事矿床地球化学、成矿规律与成矿预测研究。E-mail: zhaoshaoqing7@163.com

\* 通讯作者: 付乐兵, E-mail: fulebing1212@126.com

**引用格式:** 赵少卿, 付乐兵, 魏俊浩, 等, 2015. 青海治多地区晚三叠世石英闪长岩地球化学特征及成岩动力学背景. 地球科学——中国地质大学学报, 40(1): 61-76.

to 0.707 9, and  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  values vary from  $-5.5$  to  $-1.6$ . The geochemical and Sr-Nd isotopic compositions of the Riariqu quartz diorites are similar to those of high-Mg dioritoids/sanukitoids. We contend that the Riariqu quartz diorites were derived from low-degree partial melting (10%–15%) of a phlogopite-bearing spinel lherzolite mantle, which was metasomatized by sediment-derived melts. Fractional crystallization of pyroxene and amphibole might also occur during the magma evolution. The geochemical characteristics indicate that the Riariqu quartz diorites are arc-related magmatic rocks, and were generated in a subduction-related tectonic setting. Combined with the ophiolites and continental marginal arc lavas in the study area, and the regional adakites in the Yidun terrane, it is suggested that the Riariqu quartz diorites might be generated during the southwestward subduction of Ganzi-Litang Paleo-Tethys Ocean in the Late Triassic.

**Key words:** high-Mg diorite; Sanukitoid; Ganzi-Litang suture belt; Paleo-Tethys ocean; Qiangtang terrane; Qinghai-Tibet plateau; geochemistry.

青藏高原的古特提斯构造域具有“多洋盆、多地块、多岛弧、多俯冲、多碰撞”的特征(Pan *et al.*, 2012; 许志琴等, 2013), 内部的条带状地块及地块之间的缝合带(蛇绿混杂岩带)记录了大量古—新特提斯演化的关键地质信息。高原中部的金沙江缝合带和甘孜—理塘缝合带在羌塘地块东北缘的治多地区合并(图 1a), 是古特提斯之金沙江洋和甘孜—理塘洋存在的直接证据。近年来的研究工作表明, 在羌塘地块西部的双湖、沱沱河及义敦岛弧东缘的中甸—昌台地区存在大量晚三叠世岩浆活动(图 1a; Wang *et al.*, 2008, 2011a, 2013; Fu *et al.*, 2010; Chen *et al.*, 2013; Zhai *et al.*, 2013; Peng *et al.*, 2014)。这类岩石呈现富 Nb 玄武岩—高镁安山岩—埃达克岩所独有的地球化学特征, 可能为俯冲环境下受熔体/流体交代改造地幔楔的部分熔融产物(Wang *et al.*, 2008, 2011a, 2013; Zhai *et al.*, 2013)。但截止目前, 甘孜—理塘缝合带北西段和金沙江缝合带的结合部位(青海省治多地区)仍未见相关研究成果报道, 这在一定程度上限制了人们对甘孜—理塘洋北段演化历史的认识。

高镁安山岩/闪长岩类(HMA)不仅能反演俯冲环境下岩石圈地幔的演化过程(Kamei *et al.*, 2004; 邓晋福等, 2010), 其本身也与 Cu、Ni、Au 等金属矿产的形成密切相关(毛景文等, 2006; 王强等, 2006), 在近年来已成为地学界研究热点。HMA 泛指  $\text{MgO}(\text{Mg}^\#)$  含量较高的安山岩和闪长岩类, 以  $\text{SiO}_2 > 52\%$ 、高  $\text{Mg}(\text{MgO} > 5\%, \text{Mg}^\# \geq 55)$ 、Cr、Ni 和低  $\text{FeO}^\text{T}/\text{MgO} (< 1.5)$  为特征(Tatsumi and Ishizaka, 1981, 1982; Tatsumi, 2001; 赵振华等, 2007), 经历分异演化过程的 HMA 中  $\text{MgO}$  含量可低至  $2\% \sim 3\%$ , Cr、Ni 含量也相应降低, 但  $\text{Mg}^\#$  含量依然较高(通常大于 45)(Kelemen, 1995; Polat and Kerrich, 2001; 尹继元等, 2012)。由于该类岩石主要形成于俯冲带岛弧环境, 研究其成因机制对揭示洋壳消减过程提供了证据。

因此, 本文选择出露于甘孜—理塘缝合带北西段治多地区的日啊日曲高镁闪长岩开展锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年代学分析, 并进行系统的主微量元素和 Sr-Nd 同位素地球化学研究工作, 以探讨岩体侵位时代、成因及其形成的地球动力学背景, 为古特提斯洋在羌塘地块东北缘的动力学演化过程提供科学依据。

## 1 地质背景及岩石学特征

青藏高原由 4 个主要的“地块”拼贴而成, 从南到北依次为喜马拉雅、拉萨、羌塘和松潘—甘孜(图 1a), 这些地块分别被雅鲁藏布江、班公湖—怒江和金沙江等缝合带分割开来(Yin and Harrison, 2000; Chung *et al.*, 2005; Zhu *et al.*, 2013; Zhang *et al.*, 2014)。其中, 羌塘地块又被龙木错—双湖缝合带分割成南羌塘和北羌塘(Kapp *et al.*, 2003; Zhai *et al.*, 2011), 研究区位于北羌塘地块东北缘金沙江缝合带与甘孜—理塘缝合带的结合部位, 属甘孜—理塘缝合带北西段(图 1a)。该缝合带北起青海治多地区, 向南东经甘孜、理塘再延入云南省境内, 全长约 800 km, 总体呈 NNW 向展布。

研究区内出露的地层主要为石炭—早中二叠世多彩蛇绿混杂岩和三叠纪查涌蛇绿混杂岩、中三叠—晚三叠世巴颜喀拉山群砂岩组、晚三叠世巴塘群火山岩—碎屑岩—碳酸盐岩系列(中酸性火山碎屑岩、火山熔岩、长石岩屑砂岩、灰岩等)以及新近系—第四系松散沉积物。其中, 多彩和查涌蛇绿混杂岩分别是金沙江缝合带和甘孜—理塘缝合带的主要组成部分, 多彩蛇绿岩主要由异剥橄榄岩、辉石岩、辉长岩、玄武岩、辉绿岩和硅质岩组成; 查涌蛇绿岩主要由橄榄辉石岩、辉长岩、枕状玄武岩、辉绿岩墙和硅质岩组成。巴塘群火山岩组内的英安质凝灰岩则是杂龙格玛铜多金属矿床的直接围岩(图 1b)。区

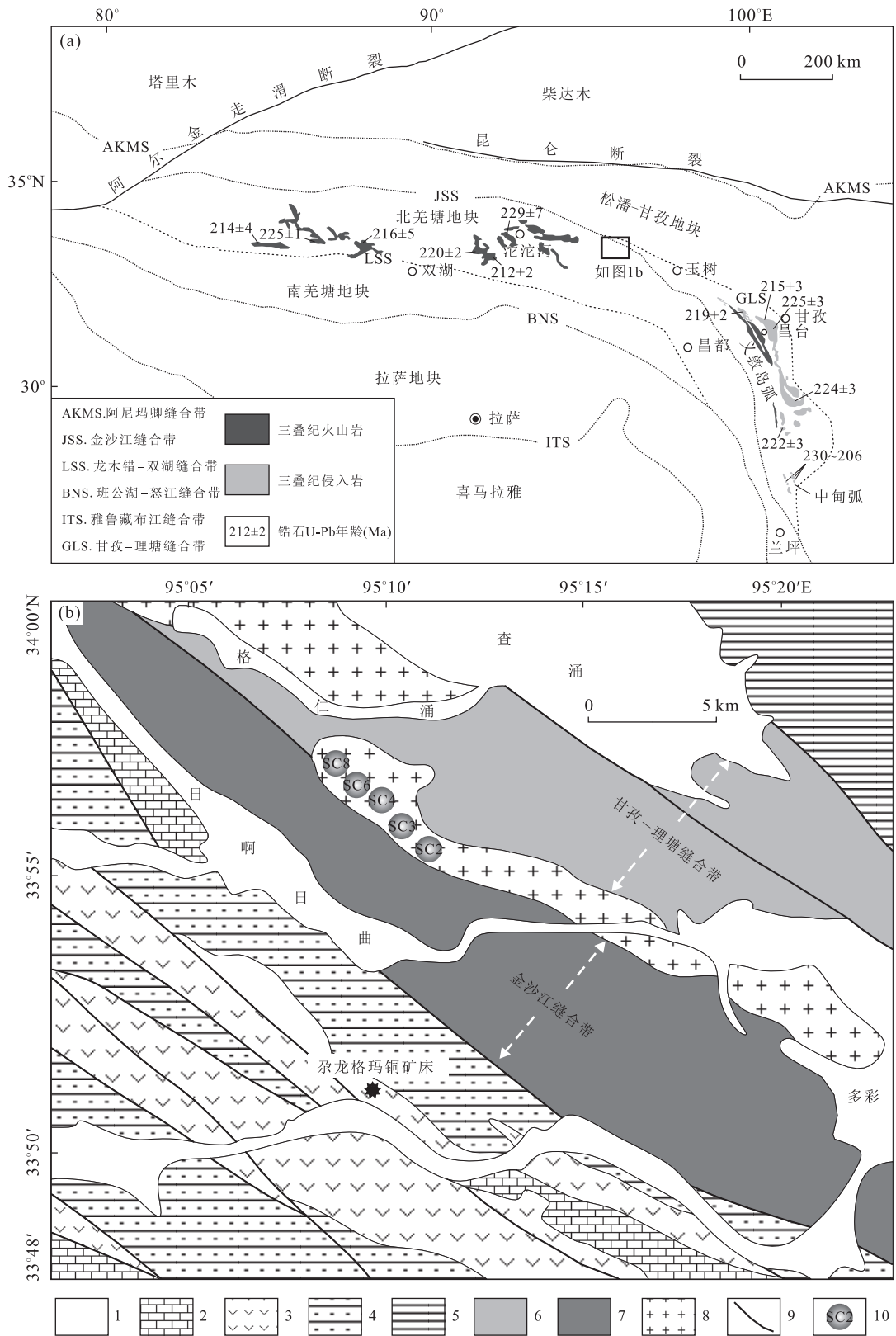


图 1 青藏高原构造轮廓及三叠纪岩浆岩时空分布(a)和羌塘地块东北缘治多地区地质简图(b)

Fig.1 Simplified tectonic map of the Tibetan plateau showing the temporal-spatial distribution of Triassic arc magmatic rocks (a) and regional geological map of the Zhiduo area (b)

1.新近纪-第四纪沉积物;2.晚三叠世巴塘群碳酸盐岩组;3.晚三叠世巴塘群火山岩组;4.晚三叠世巴塘群碎屑岩组;5.中三叠-晚三叠世巴颜喀拉山群砂岩组;6.三叠纪查涌蛇绿混杂岩带;7.石炭-早中二叠世多彩蛇绿混杂岩带;8.晚三叠世中酸性侵入岩体;9.断层;10.采样位置;a图据 Yin and Harrison, 2000; Chung *et al.*, 2005 修改

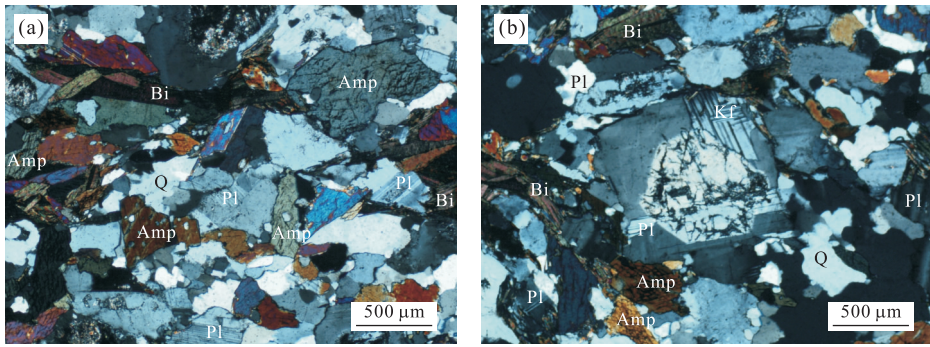


图 2 治多地区日啊日曲石英闪长岩显微照片(正交偏光)

Fig.2 Microphotographs of the Riariqu quartz diorite from Zhiduo area

Pl.斜长石;Amp.角闪石;Bi.黑云母;Q.石英

内 NW 向脆性逆冲断裂构造发育,岩浆活动强烈。

日啊日曲石英闪长岩侵入体位于青海省治多县尕龙格玛铜矿区北部,出露面积约 60 km<sup>2</sup>,受 NW-SE 向区域断裂控制,呈长条带状分布在查涌蛇绿混杂岩带南侧,紧邻多彩蛇绿混杂岩带展布(图 1b)。石英闪长岩发育透入性片麻理,遭受了微弱的脆韧性构造变形。5 件样品采自地表的新鲜露头,且在岩体中央相至边缘相均匀分布(图 1b)。岩石呈半自形粒状结构、块状构造,主要由斜长石、角闪石、黑云母及少量石英和钾长石构成。斜长石为自形一半自形板状,粒径 0.5~2.0 mm 不等,多为中长石,常见聚片双晶结构(图 2a,2b),偶见不规则环带结构,环带局部边缘被熔蚀,含量 35%~45%;角闪石呈半自形粒状(图 2a),具弱的绿泥石化蚀变,粒径 0.2~1.0 mm,含量 15%~30%;黑云母多为板片状(图 2b),解理纹细而平直,含量 5%~15%;石英自形程度较差,粒径 0.1~0.5 mm,含量约 5%;钾长石呈他形粒状,主要为正长石,并见微斜长石,含量约 5%;另有少量磷灰石、锆石、磁铁矿等副矿物。

## 2 测试方法

### 2.1 锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年

样品(GS2)的破碎和挑选由河北省廊坊市区域地质矿产调查研究所实验室完成,并利用重磁技术对锆石进行分选。锆石制靶后,磨蚀至锆石核部出露,进行阴极发光(CL)显微照像,结合反射光和透射光,观察锆石的内部结构。锆石原位微区测试在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室(GPMR)激光剥蚀等离子体质谱仪(LA-ICP-MS)上完成,激光束斑直径 32 μm,实验中采用 He

作为剥蚀物质的载气。锆石 U-Th-Pb 同位素组成分析以锆石 91500 作为外标进行同位素分馏校正;微量元素含量则利用 NIST610 作为外标,<sup>29</sup>Si 作为内标的方法进行定量计算,详细分析流程和仪器参数参见 Liu *et al.* (2008a, 2010)。数据处理采用 ICPMSDataCal 程序完成,并使用 ComPbCorr # 3\_151 进行普通 Pb 校正(Andersen, 2002)。U-Pb 年龄谱和图绘制和年龄权重平均值计算均采用 Isoplot/Ex\_ver3 (Ludwig, 2003)完成。

### 2.2 全岩地球化学测试

首先在室内对岩石样品进行详细的岩相学鉴定,挑选出新鲜无蚀变的样品,清除其表面的粉尘,粉碎至 200 目以下,然后进行主量、微量元素、Sr-Nd 同位素测试。

主量元素测试在澳实矿物实验室集团澳实分析检测(广州)有限公司完成,采用 ME-XPF06 方法分析完成,分析流程为:准确称取 0.9 g 样品,煅烧后加入 9.0 g 的 Li<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub>-LiBO<sub>2</sub> 助熔物(固体),充分混合后,放置在自动熔炼仪中,使之在 1 050~1 100 °C 熔融,熔融物倒出后形成扁平玻璃片,再用 XRF 荧光光谱仪分析,分析精度优于 5%。

微量元素和稀土元素在 GPMR 采用美国 Agilent 公司生产的 Agilent 7500a 等离子体质谱仪(ICP-MS)测定,分析流程为:准确称取粉末样品 50 mg 置于 Teflon 坩埚中,用 1.5 mL HNO<sub>3</sub> 和 1.5 mL HF 在 195 °C 条件下消解 48 h。将其蒸干后,加入 3 mL HNO<sub>3</sub> 置于烘箱中于 195 °C 加热 12 h。将溶液转入聚乙烯料瓶中,并用 2% HNO<sub>3</sub> 稀释至约 100 g 后,密闭保存以备 ICP-MS 测试。4 种国际标准样(AGV-2、BHVO-2、BCR-2 和 RGM-1)用于监控样品分析的精密度和准确度,除 Zr 为 14%外,其余元素分析精度优于 5%(罗文行等, 2013; 易立文等,

2014).详细的样品分析处理过程、分析精密度和准确度同文献 Liu *et al.*(2008b).

全岩 Sr、Nd 同位素测试在 GPMR 利用 Triton-TI 型热电离同位素质谱仪(TIMS)完成.分析流程如下:将粉末样品置于 Teflon 坩埚中,用 1.5 mL HNO<sub>3</sub> 和 1.5 mL HF 在 195 °C 条件下消解 48 h,将其蒸干后再加入约 1 mL HCl.最后用 AG50X8 阳离子交换树脂分离 Rb 和 Sr,再用 HDEHP 萃淋树脂分离 Sm 和 Nd.测得的 <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr 和 <sup>143</sup>Nd/<sup>144</sup>Nd 比值分别用 <sup>86</sup>Sr/<sup>88</sup>Sr=0.119 4 和 <sup>146</sup>Nd/<sup>144</sup>Nd=0.721 9 标准化.本次分析过程中,Sr 同位素标样 NBS987 的测试结果为 0.710 271±8(2σ),Nd 同位素标样 JN-di-1 的测试结果为 0.512 115±6(2σ).详细的测试流程和分析方法见文献 Gao *et al.*(2004).

## 3 分析结果

### 3.1 锆石 U-Pb 年代学

石英闪长岩(GS2)锆石 CL、U-Pb 同位素年龄及微量元素测试结果列于表 1、表 2 和图 3.锆石为无色—淡黄色透明状,呈自形一半自形长柱状,长度 80~250 μm,长宽比多介于 2:1~3:1,发育明显的振荡环带(图 3a).对该样品中 19 颗锆石的 19 个点进行了测定(表 1),所测锆石 U 和 Th 含量分别为 389×10<sup>-6</sup>~1 315×10<sup>-6</sup>和 271×10<sup>-6</sup>~1 673×10<sup>-6</sup>,Th/U 比值为 0.66~1.30,一致于岩浆成因锆石的 Th/U 比值(>0.1,Griffin *et al.*,2004).锆石稀土元素特征方面,轻、重稀土分馏明显,表现为重稀土元素富集、轻稀土元素亏损,具较强烈的正 Ce 异常及弱负 Eu 异常(图 3c),表明所分析的锆石为典型的岩浆成因锆石(Hoskin and Schaltegger,2003).所有数据点都位于谐和线上或附近(图 3a),<sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U 年龄变化于 215±2~220±2 Ma 之间,加权平均年龄为 218±1 Ma(MSWD=0.6),该年龄代表了石英闪长岩体的侵位年龄.剩余两颗锆石 GS2-11 和 GS2-14 的<sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U 年龄分别为 238±2 Ma 和 235±2 Ma,可能为捕获锆石.

### 3.2 元素地球化学

本文对治多地区 5 件石英闪长岩样品进行了元素地球化学分析,全岩主量和微量元素测试结果及特征值列于表 3.岩石 SiO<sub>2</sub> 含量介于 53.02%~62.06%之间,K<sub>2</sub>O+Na<sub>2</sub>O 为 3.28%~3.86%,K<sub>2</sub>O/Na<sub>2</sub>O 比值介于 0.31~0.50 之间,指示岩石属中钾钙碱性闪长岩(图 4a,4b).岩体富 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

(15.84%~17.00%)、CaO(6.71%~8.94%),贫 TiO<sub>2</sub>(0.49%~1.01%) 和 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>(0.04%~0.12%),A/CNK 比值为 0.78~0.88,属准铝质岩石(图 4c).Harker 图解显示,随 SiO<sub>2</sub> 含量的增加,MgO、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、TiO<sub>2</sub>、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub><sup>T</sup> 及 CaO 等氧化物含量呈线性降低(图略),表明有角闪石、辉石等矿物的分离结晶.石英闪长岩具有高 MgO(3.31%~5.66%)、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub><sup>T</sup>(6.30%~7.13%)的特征,Mg<sup>#</sup> 介于 50~62 之间,在划分高镁闪长岩与正常闪长岩的 MgO-SiO<sub>2</sub> 关系图解中(图 4d),样品大都落在高镁闪长岩范围内,具有与日本 Setouchi 火山岩带中的赞岐岩相似的主量元素地球化学特征.

岩体稀土元素含量较低,REE 总量为 38.05×10<sup>-6</sup>~61.58×10<sup>-6</sup>,标准化稀土元素球粒陨石配分形式呈略微的右倾形式(图 5a),但(La/Yb)<sub>N</sub> 较为一致(2.63~4.76),表明轻重稀土元素分馏不明显.Eu/Eu\* 介于 0.71~1.15,表现为弱的负 Eu 或正 Eu 异常.微量元素方面,石英闪长岩富集大离子亲石元素(LILE,如 Rb、Sr、La、K),亏损高场强元素(HFSE,如 Nb、Ta、Zr、Hf),相容元素 Cr(33.45×10<sup>-6</sup>~176.64×10<sup>-6</sup>) 和 Ni(13.34×10<sup>-6</sup>~43.62×10<sup>-6</sup>) 含量较高,在原始地幔标准化蛛网图上,表现出明显的 Rb、Sr 和 K 正异常,Ba、Nb、Ta、P 和 Ti 负异常(图 5b),与赞岐岩类的微量元素组成一致.

### 3.3 Sr-Nd 同位素

日啊日曲石英闪长岩全岩 Sr-Nd 同位素测试结果列于表 4.样品 <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr 比值介于 0.708 445~0.710 082, (<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr)<sub>i</sub> 比值变化于 0.706 8~0.707 9,<sup>143</sup>Nd/<sup>144</sup>Nd 比值为 0.512 290~0.512 469,ε<sub>Nd</sub>(t)变化于-5.5~-1.6,对应的两阶段 Nd 模式年龄 T<sub>DM2</sub> 为 1.1~1.4 Ga.

## 4 讨论

### 4.1 岩石成因

日啊日曲石英闪长岩主量元素显示其为中钾钙碱性准铝质岩石,具有高 MgO 含量和 Mg<sup>#</sup> 的特征(图 4).岩石富集 Rb、Sr、K 等大离子亲石元素,亏损 Nb、Ta、P、Ti 等高场强元素,具有浅的 Nb-Ta 槽(图 5b),显示出典型俯冲带岩浆岩的地球化学特征(Kelemen *et al.*,2003),表明其形成与板块俯冲作用密切相关.与典型岛弧环境下钙碱性安山岩/闪长岩类相比,日啊日曲石英闪长岩具有更高的 Mg<sup>#</sup> (50~62) 及 MgO(3.31%~5.66%)、Cr(33.45×

表 1 治多地区日啊日曲石英闪长岩 (GS2) 锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年分析结果  
Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Pb dating results of the Riariqu quartz diorite sample (GS2) from Zhiduo area

测试点号	Pb ( $10^{-6}$ )	Th ( $10^{-6}$ )	U ( $10^{-6}$ )	Th/U	U-Th-Pb 同位素比值													
					$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		
GS2-1	281	906	850	1.07	0.0501	0.0013	0.2351	0.0063	0.0340	0.0004	0.0108	0.0003	198	29	214	5	216	2
GS2-2	267	821	843	0.97	0.0514	0.0013	0.2425	0.0061	0.0341	0.0003	0.0107	0.0002	257	59	220	5	216	2
GS2-3	199	622	894	0.70	0.0524	0.0013	0.2465	0.0061	0.0339	0.0003	0.0103	0.0002	302	49	224	5	215	2
GS2-4	289	873	868	1.01	0.0509	0.0013	0.2420	0.0061	0.0344	0.0003	0.0109	0.0002	235	64	220	5	218	2
GS2-5	203	631	711	0.89	0.0506	0.0015	0.2406	0.0073	0.0345	0.0004	0.0107	0.0003	233	70	219	6	219	2
GS2-6	202	630	764	0.82	0.0503	0.0013	0.2396	0.0062	0.0344	0.0004	0.0105	0.0003	209	92	218	5	218	2
GS2-7	253	780	1096	0.71	0.0508	0.0013	0.2427	0.0064	0.0346	0.0004	0.0108	0.0004	232	64	221	5	219	2
GS2-8	442	1378	1315	1.05	0.0510	0.0011	0.2443	0.0047	0.0347	0.0003	0.0100	0.0004	243	48	222	4	220	2
GS2-9	147	419	638	0.66	0.0506	0.0013	0.2418	0.0064	0.0346	0.0004	0.0109	0.0007	233	61	220	5	219	2
GS2-10	99	295	442	0.67	0.0502	0.0016	0.2401	0.0078	0.0348	0.0004	0.0100	0.0007	211	76	218	6	220	3
GS2-11	255	721	1036	0.70	0.0490	0.0012	0.2559	0.0066	0.0377	0.0004	0.0112	0.0008	146	62	231	5	238	2
GS2-12	117	357	435	0.82	0.0508	0.0026	0.2348	0.0106	0.0339	0.0004	0.0098	0.0006	232	112	214	9	215	3
GS2-13	285	890	872	1.02	0.0513	0.0013	0.2472	0.0065	0.0348	0.0003	0.0100	0.0005	257	64	224	5	220	2
GS2-14	178	509	614	0.83	0.0504	0.0015	0.2533	0.0081	0.0342	0.0004	0.0124	0.0007	213	72	234	7	235	3
GS2-15	514	1673	1287	1.30	0.0495	0.0016	0.2337	0.0059	0.0343	0.0004	0.0102	0.0003	172	81	213	5	217	2
GS2-16	196	621	709	0.88	0.0497	0.0016	0.2371	0.0077	0.0344	0.0004	0.0104	0.0003	189	76	216	6	218	2
GS2-17	126	384	512	0.75	0.0503	0.0014	0.2399	0.0065	0.0346	0.0003	0.0106	0.0003	209	65	218	5	219	2
GS2-18	179	572	601	0.95	0.0509	0.0015	0.2437	0.0069	0.0346	0.0003	0.0104	0.0003	235	65	221	6	219	2
GS2-19	87	271	389	0.70	0.0506	0.0015	0.2442	0.0075	0.0348	0.0004	0.0105	0.0003	233	73	222	6	220	2

表 2 治多地区日啊日曲石英闪长岩 (GS2) 锆石微量元素分析结果 ( $10^{-6}$ )  
Table 2 Zircon trace element data of the Riariqu quartz diorite sample (GS2) from Zhiduo area

测试点号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Tm	Er	Ho	Dy	Yb	Tm	Er	Hf	Ta	Y	Ti	Nb
GS2-1	0.03	20.90	0.50	7.87	13.40	4.57	70.40	22.60	140.00	583	116.00	298	1.497	143.00	583	12.365	0.80	3.746	5.48	2.50
GS2-2	0.10	22.60	0.64	10.30	14.80	5.01	68.90	21.10	143.00	569	111.00	283	1.602	143.00	569	11.841	0.84	3.666	6.67	2.50
GS2-3	0.00	15.60	0.07	1.50	4.11	1.35	28.10	10.80	95.90	396	73.40	165	1.032	95.90	396	11.888	0.76	2.376	5.28	1.70
GS2-4	0.04	21.70	0.57	8.37	14.80	4.94	70.10	22.40	130.00	545	111.00	290	1.369	130.00	545	12.369	0.73	3.568	7.67	2.08
GS2-5	0.03	17.00	0.54	6.46	11.70	3.90	52.80	17.50	111.00	449	89.60	228	1.204	111.00	449	11.732	0.69	2.910	6.74	1.85
GS2-6	0.05	18.10	0.42	5.69	10.40	3.52	49.80	17.20	130.00	520	97.20	240	1.460	130.00	520	10.940	0.77	3.234	6.94	2.32
GS2-7	0.07	20.10	0.31	5.41	9.58	2.72	53.30	18.10	138.00	565	107.00	253	1.511	138.00	565	10.586	1.02	3.470	6.50	2.18
GS2-8	0.09	31.40	0.84	12.80	21.40	6.90	100.00	32.20	200.00	822	165.00	423	2.218	200.00	822	12.901	1.15	4.790	5.68	3.20
GS2-9	0.21	15.80	0.58	4.58	5.90	2.03	31.40	11.20	95.10	368	67.80	158	1.113	95.10	368	12.987	0.69	1.989	6.22	1.38
GS2-10	0.04	9.71	0.16	2.20	3.89	1.49	25.00	8.60	79.90	303	55.10	126	0.917	79.90	303	11.190	0.47	1.813	5.75	1.32
GS2-11	0.02	21.20	0.09	1.30	3.13	1.25	29.80	12.30	105.00	439	83.40	192	1.111	105.00	439	13.350	1.31	2.660	8.02	3.27
GS2-12	0.03	10.30	0.23	3.79	6.66	2.06	34.60	11.60	85.30	338	64.50	159	0.965	85.30	338	11.889	0.49	2.096	4.47	1.27
GS2-13	0.01	21.90	0.47	7.93	11.80	4.25	65.20	21.10	137.00	566	112.00	287	1.484	137.00	566	12.008	0.75	3.580	6.53	2.11
GS2-14	0.01	13.60	0.34	4.88	9.21	3.27	46.60	15.60	102.00	418	81.20	205	1.143	102.00	418	12.122	0.74	2.648	4.13	1.57
GS2-15	0.18	44.20	1.44	20.50	32.10	9.52	145.00	45.50	235.00	1015	216.00	578	2.411	235.00	1015	11.626	1.04	6.705	9.44	4.26
GS2-16	0.06	17.20	0.38	5.64	11.30	3.59	57.70	18.80	129.00	526	102.00	255	1.421	129.00	526	11.806	0.72	3.316	8.72	1.95
GS2-17	0.04	10.70	0.29	3.69	5.86	2.37	31.80	10.60	77.10	313	59.80	146	0.859	77.10	313	12.288	0.56	1.948	5.35	1.16
GS2-18	0.04	15.20	0.35	6.18	10.50	3.44	53.20	17.30	110.00	450	90.00	231	1.203	110.00	450	11.473	0.61	2.874	6.12	1.61
GS2-19	0.02	8.59	0.21	4.13	6.64	2.11	31.30	10.10	69.50	279	53.90	135	0.776	69.50	279	11.981	0.38	1.763	4.68	0.80

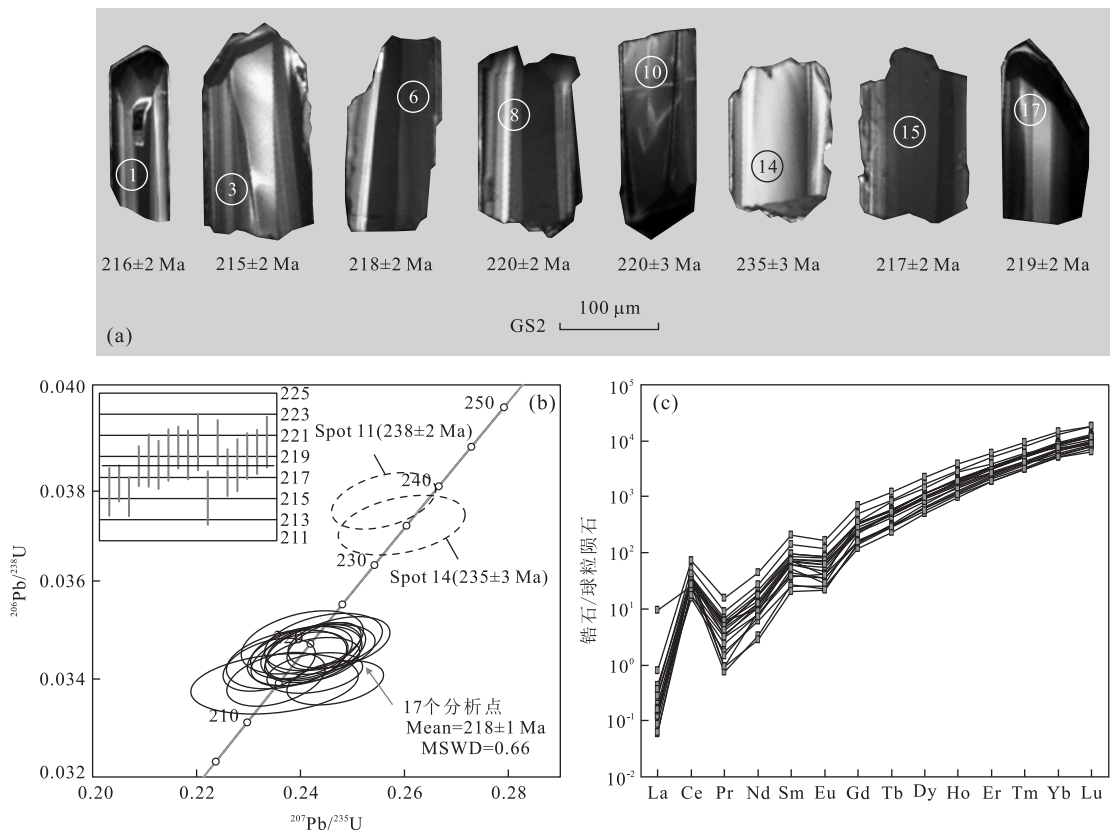


图 3 治多地区日啊日曲石英闪长岩(GS2)中锆石阴极发光(CL)图像(a)、U-Pb 年龄谐和图(b)和球粒陨石标准化稀土配分图(c)

Fig.3 Cathodoluminescence (CL) images (a), U-Pb concordia diagram (b) and Chondrite-normalized REE patterns (c) for zircons of Riariqu quartz diorite sample (GS2) from Zhiduo area

图 a 中圆圈代表 U-Pb 年龄测试激光剥蚀点位;圈中数字为分析点号,编号同表 1,圈外年龄为  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  表面年龄

$10^{-6} \sim 176.64 \times 10^{-6}$ ) 和 Ni ( $13.34 \times 10^{-6} \sim 43.62 \times 10^{-6}$ ) 含量,与 HMA 的特征类似(Tatsumi and Ishizaka, 1981, 1982; Kelemen, 1995; Shimoda *et al.*, 1998; 尹继元等, 2012),更接近于日本 Setouchi 火山岩带中的赞岐岩类(Shirey and Hanson, 1984; 张旗等, 2004, 2005).这类富镁闪长质岩浆有如下几种成因模式:(1) 拆沉下地壳熔融的熔体与地幔橄榄岩反应形成(Smithies and Champion, 1999, 2000; Gao *et al.*, 2004);(2) 俯冲洋壳部分熔融形成的熔体与地幔楔反应形成(Rapp *et al.*, 1999; Smithies *et al.*, 2007);(3) 俯冲洋壳(+沉积物)脱水释放的流体促使地幔部分熔融而形成原始岩浆(Crawford *et al.*, 1989; Tatsumi, 1995);(4) 俯冲沉积物部分熔融形成的富 Si 质熔体与地幔橄榄岩反应(Yogodzinski *et al.*, 1994; Shimoda *et al.*, 1998; Tatsumi, 2001; Tatsumi and Hanyu, 2003; Wang *et al.*, 2008, 2011b).

Gao *et al.* (2004) 认为由地壳拆沉作用导致下地壳熔融产生的熔体通常具有高 Sr 含量、低 Y 和

Yb 含量、高 Sr/Y 比值等特征,其源区贫水且石榴石为残留相;由俯冲洋壳熔体与地幔橄榄岩反应产生的岩浆同样具有高 Sr 含量、低 Y 和 Yb 含量、高 Sr/Y 比值等特征,石榴石可能为残留相,但其源区富水,且轻、重稀土强烈分馏,亏损 HREE,无 Eu 异常(Kelemen, 1995).而日啊日曲石英闪长岩为钙碱性岩石,具有较低的 Sr ( $157.0 \times 10^{-6} \sim 197.0 \times 10^{-6}$ )、Sr/Y (6.8~15.2) 和 La/Yb (3.7~6.6) 比值,轻、重稀土元素分馏不强烈, LREE 略富集, HREE 平坦分布的特征(图 5a),表明日啊日曲石英闪长岩不可能由拆沉下地壳熔融或俯冲洋壳来源的熔体与地幔橄榄岩反应形成.对于俯冲洋壳(+沉积物)发生脱水释放流体促使地幔熔融的模式而言,因为板片脱水是在没有达到石榴子石稳定的条件下进行的,形成的 HMA 应具有较高的 HREE 含量,且同时具有较高的 Ba 含量和 Ba/Th (> 170) 比值(Woodhead *et al.*, 2001; Elburg *et al.*, 2002).然而本区石英闪长岩具有亏损 HREE 的特征,除样品

表 3 治多地区日啊日曲石英闪长岩主量元素(%)、微量及稀土元素( $10^{-6}$ )分析结果

Table 3 Major (%) and trace element ( $10^{-6}$ ) compositions of the Riariqu quartz diorites from Zhiduo area

样号	SC-2	SC-3	SC-4	SC-6	SC-8
SiO <sub>2</sub>	62.06	57.96	53.02	57.43	57.50
TiO <sub>2</sub>	0.59	0.51	1.01	0.49	0.69
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15.93	15.84	16.94	17.00	16.75
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>T</sup>	6.56	6.81	9.36	6.30	7.13
MnO	0.13	0.14	0.18	0.14	0.14
MgO	3.31	5.66	5.06	5.06	4.55
CaO	6.71	8.54	8.94	7.91	8.07
Na <sub>2</sub> O	2.94	2.34	2.56	2.69	2.84
K <sub>2</sub> O	0.92	0.94	1.27	1.13	0.92
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.07	0.06	0.04	0.05	0.12
LOI	0.60	1.36	1.58	1.18	1.43
Total	99.82	100.16	99.96	99.38	100.14
A/CNK	0.88	0.78	0.78	0.85	0.82
K <sub>2</sub> O/Na <sub>2</sub> O	0.31	0.40	0.50	0.42	0.32
Na <sub>2</sub> O+K <sub>2</sub> O	3.86	3.28	3.83	3.82	3.76
Mg <sup>#</sup>	50.00	62.00	52.00	61.00	55.00
La	8.70	8.40	8.80	7.30	11.20
Ce	20.40	16.70	14.10	13.60	21.90
Pr	2.78	2.07	1.70	1.56	2.70
Nd	11.70	8.60	6.70	6.10	10.40
Sm	3.12	2.16	1.56	1.50	2.31
Eu	0.75	0.62	0.55	0.59	0.74
Gd	3.34	2.32	1.64	1.66	2.35
Tb	0.60	0.41	0.30	0.31	0.42
Dy	3.80	2.66	1.95	2.01	2.8
Ho	0.85	0.56	0.41	0.42	0.58
Er	2.44	1.65	1.21	1.29	1.70
Tm	0.36	0.24	0.19	0.18	0.25
Yb	2.38	1.63	1.33	1.28	1.79
Lu	0.35	0.26	0.22	0.20	0.27
REE	61.58	48.33	40.72	38.05	59.31
Eu/Eu*	0.71	0.85	1.04	1.15	0.96
Cr	33.45	176.64	36.96	33.91	72.97
Co	17.40	23.78	30.66	20.84	21.92
Ni	13.34	43.62	15.87	18.69	23.76
Rb	33.90	38.00	48.00	44.80	35.40
Sr	168.90	157.00	186.50	190.00	197.00
Y	24.60	16.60	12.30	12.60	17.20
Zr	81.00	56.00	31.00	32.00	59.00
Nb	4.36	3.40	3.18	2.19	3.70
Ba	249.00	191.00	202.00	202.00	182.00
Hf	2.26	1.63	1.05	1.28	1.76
Ta	0.28	0.25	0.22	0.43	0.26
Pb	5.86	4.67	5.48	8.16	8.17
Th	1.07	2.83	2.09	5.26	1.98
U	0.40	0.75	0.55	1.53	0.66

注: LOI, 烧失量; Mg<sup>#</sup> =  $100 \times \text{Mg}^{2+} / (\text{Mg}^{2+} + 0.9 \times \text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}})$ ; A/CNK =  $\text{Al}_2\text{O}_3 / (\text{CaO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$  摩尔百分比。

SC-2 外, Ba( $182 \times 10^{-6} \sim 202 \times 10^{-6}$ ) 含量和 Ba/Th (38~97) 比值均较低(表 3), 所以洋壳脱水促使地

幔熔融模式也不能很好的解释日啊日曲石英闪长岩的成因。

前文已论述, 日啊日曲石英闪长岩与日本 Setouchi 火山岩带中的赞岐岩类有着相似的地球化学特征(图 4~图 6), 这类赞岐质 HMA 通常与俯冲沉积物部分熔融产生的富 Si 质熔体与上覆地幔橄榄岩反应有关(Shimoda *et al.*, 1998; Tatsumi, 2001)。日啊日曲石英闪长岩具有较高的 Mg<sup>#</sup> (50~62) 和 Cr ( $33.45 \times 10^{-6} \sim 176.64 \times 10^{-6}$ )、Ni ( $13.34 \times 10^{-6} \sim 43.62 \times 10^{-6}$ ) 含量, 显示地幔源区特征。岩体富集 Rb、Sr、K 等 LILE, 亏损 Nb、Ta、P、Ti 等 HFSE, 且具有浅的 Nb-Ta 槽(图 5), 表明其岩浆源区可能主要为岛弧环境下的岩石圈地幔(Pearce and Peate, 1995; Hawkesworth *et al.*, 1997)。日啊日曲岩体相对较高的 Th ( $1.07 \times 10^{-6} \sim 5.26 \times 10^{-6}$ ) 含量、较高 Th/La (> 0.2) 和 Nb/Y 比值、较高 ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ )<sub>i</sub> 比值和较低的  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  值 (< 0), 表明源区可能有俯冲沉积物组分的加入(Hawkesworth *et al.*, 1997; Plank, 2005)。在  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ -( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ )<sub>i</sub> 图解中(图 6), 石英闪长岩样品都落入义敦岛弧昌台玄武岩和羌塘地块以北可可西里地区 HMA 之间, 与义敦岛弧晚三叠世埃达克质闪长岩类范围重合, 接近赞岐岩类的同位素变化范围, 这进一步指示这类岩石可能与俯冲环境下沉积物熔体和上覆地幔橄榄岩交代作用有关(Shimoda *et al.*, 1998; Wang *et al.*, 2011a, 2011b, 2013)。日啊日曲石英闪长岩与日本 Setouchi 火山岩带中的赞岐岩相比具有相对较高的 ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ )<sub>i</sub> 比值和较低的  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  值(图 6), 这表明源区可能有更大比例沉积物组分的加入(Hawkesworth *et al.*, 1997)。此外, Yogodzinski *et al.* (1995) 认为俯冲板片熔融成因的岩石通常具有较高的 La/Yb (> 30) 比值, 有流体加入会提高 Ba/Th 比值, 而日啊日曲石英闪长岩与区域上同时代的 HMA、埃达克质闪长岩类均具有较低的 La/Yb、Ba/Th 和较高的 Th/Nb 比值(图 7a 和 7b), 表明其源区可能存在沉积物来源熔体。日啊日曲岩体具有比 MORB 和地幔更高的 Th/Ce (> 0.05)、Th/Sm 和 Th/Yb (> 0.2) 比值。Th/Sm 和 Th/Yb 比值的正相关关系(图 7b) 以及 Th/Ce 和  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  比值的负相关关系(图略) 进一步表明沉积物熔体对源区的贡献(Hawkesworth *et al.*, 1997; Plank, 2005; Zheng *et al.*, 2014)。

上述讨论表明, 日啊日曲石英闪长岩的岩浆源区很可能为俯冲沉积物熔融的富 Si 质熔体交代的



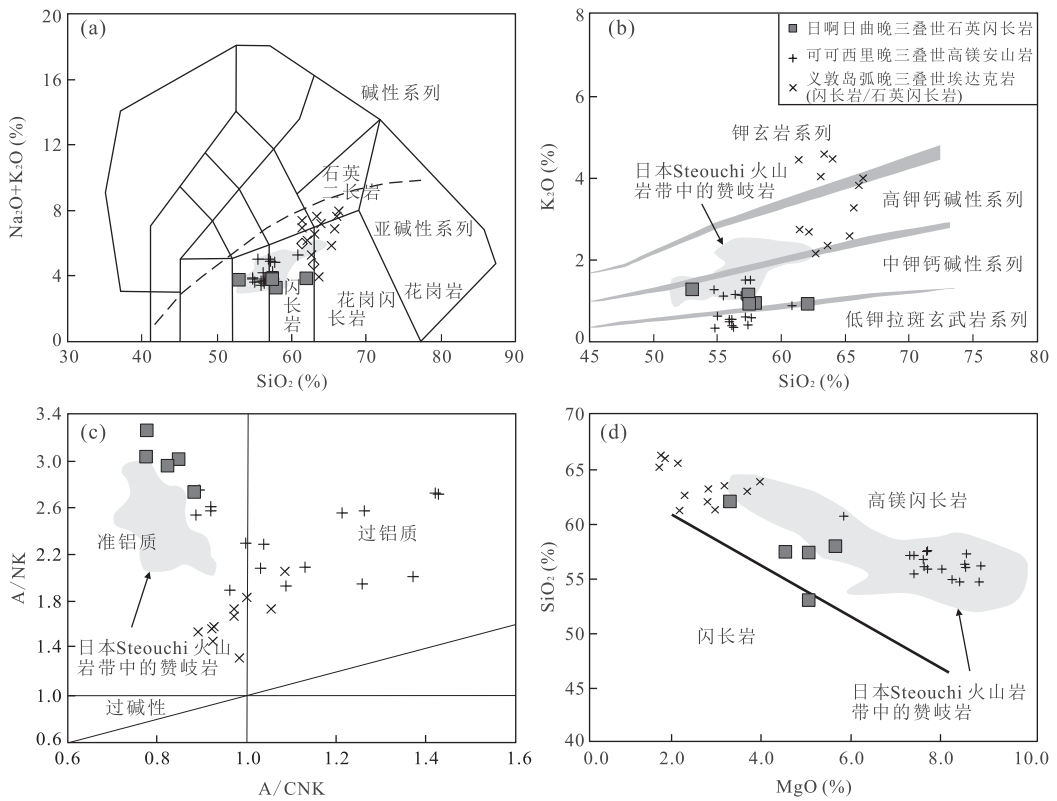


图 4 治多地区日啊日曲石英闪长岩(a)TAS 分类图、(b) $K_2O-SiO_2$  关系图、(c)  $A/NK-A/CNK$  关系图和(d)  $MgO-SiO_2$  关系图

Fig.4 Major-element plots for the Riariqu quartz diorite from Zhiduo area (a) Total alkalis vs. silica (TAS) diagram, (b)  $K_2O$  vs.  $SiO_2$  diagram, (c)  $A/NK$  vs.  $A/CNK$  diagram, (d)  $MgO$  vs.  $SiO_2$  diagram

数据来源:日本岛弧 Steouchi 火山岩带新生代赞岐岩(Tatsumi and Ishizaka, 1982; Shimoda *et al.*, 1998; Tatsumi *et al.*, 2003);可可西里晚三叠世高镁安山岩(Wang *et al.*, 2011b);义敦岛弧晚三叠世埃达克岩(Wang *et al.*, 2011a); a 图据 Wilson, 1989; b 图据 Rollinson, 1993; c 图据 Maniar and Piccoli, 1989; d 图据 McCarron and Smellie, 1998

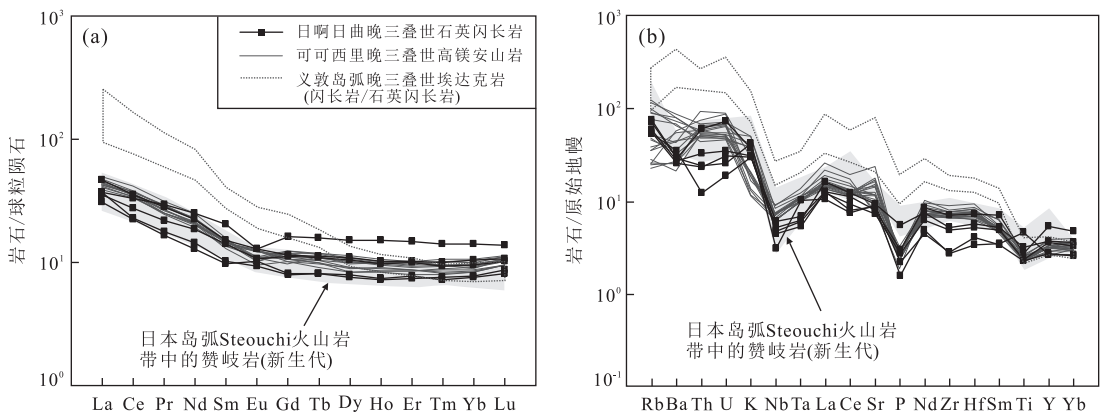


图 5 治多地区日啊日曲石英闪长岩球粒陨石标准化稀土配分曲线(a)和原始地幔标准化微量元素蛛网图(b)

Fig.5 Chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive mantle-normalized trace element patterns (b) for the Riariqu quartz diorite from Zhiduo area

图中岩浆岩数据来源同图 4;球粒陨石和原始地幔标准化数据引自 Sun and McDonough, 1989

地幔橄榄岩.金云母和角闪石是两类最普遍的交代作用产物,熔体在金云母稳定区表现为低 Ba 和 Ba/

Rb( $< 20$ ) 比值,在角闪石稳定区则具低 Rb/Sr ( $< 0.1$ ) 和高 Ba/Rb( $> 20$ ) 比值(Furman and Gra-

表 4 治多地区日啊日曲石英闪长岩全岩 Sr-Nd 同位素分析结果

Table 4 Sr-Nd isotopic compositions of the Riariqu quartz diorites from Zhiduo area

样号	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	$\pm 2\sigma$	$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	$\pm 2\sigma$	$\epsilon_{\text{Nd}}(t)$	$T_{\text{DM2}}(\text{Ma})$
SC-2	0.580 7	0.709 209	4	0.707 408	0.160 9	0.512 332	2	-5.0	1 398
SC-3	0.702 4	0.710 082	6	0.707 904	0.151 6	0.512 290	2	-5.5	1 444
SC-4	0.740 9	0.709 431	5	0.707 134	0.140 1	0.512 343	3	-4.2	1 334
SC-6	0.680 2	0.708 998	4	0.706 889	0.149 5	0.512 437	14	-2.6	1 206
SC-8	0.519 6	0.708 445	6	0.706 834	0.134 9	0.512 469	3	-1.6	1 122

注： $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  值计算采用  $(^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{CHUR}} = 0.196 7$ ;  $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{CHUR}} = 0.512 638$ ;  $t$  代表成岩年龄 (218 Ma); 同位素亏损地幔模式年龄 ( $T_{\text{DM2}}$ ) 计算采用  $(^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{DM}} = 0.213 7$ ;  $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{DM}} = 0.513 15$ .

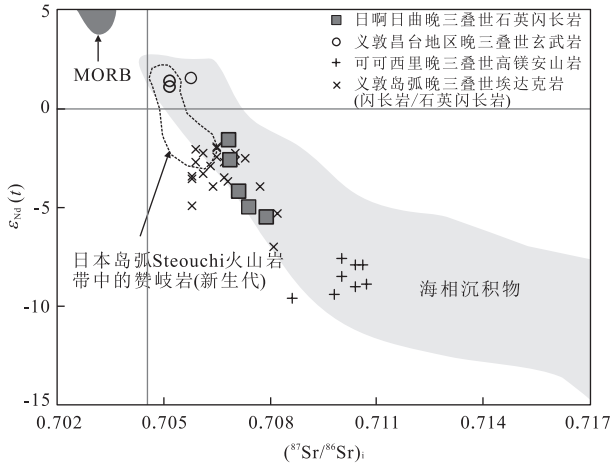


图 6 治多地区日啊日曲石英闪长岩  $\epsilon_{\text{Nd}}(t) - (^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$   
Fig.6 Initial  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  vs.  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  values for the Riariqu quartz diorite from Zhiduo area

数据来源: MORB 和海相沉积物 (Plank and Langmuir, 1998); 义敦岛弧晚三叠世玄武岩 (Wang *et al.*, 2013); 其他岩浆岩数据同图 4

ham, 1999). 日啊日曲石英闪长岩较低的 Ba/Rb (4~7) 和较高的 Rb/Sr (0.18~0.26) 比值, 表明岩浆

源区可能存在少量金云母 (图 8a). La/Yb 比值和 Yb 含量的相关关系则进一步指示岩浆可能为尖晶石相金云母二辉橄榄岩部分熔融的产物 (图 8b), 其熔融程度为 10%~15%. 值得注意的是, 5 件样品中最基性样品 SC-4 ( $\text{SiO}_2 = 53.02\%$ ) 却表现出相对较低的  $\text{Mg}^\#$  (52), 但该样品相对高  $\text{Fe}_2\text{O}_3^\text{T}$  (9.36%) 和 Ti (1.01%) 含量, 这可能与样品中 Fe-Ti 氧化物等副矿物的含量较高有关, 局部大量副矿物的出现使样品 SC-4 表现出 Fe-Ti 相对富集而  $\text{Mg}^\#$  较低的特征. 另一方面,  $\text{SiO}_2$  含量的变化范围较大 (53.02%~62.06%) 及与  $\text{MgO}$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{TiO}_2$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3^\text{T}$  及 CaO 等氧化物的负相关关系 (图略), 表明岩浆上升过程中可能经历了角闪石、辉石等矿物的分离结晶过程.

综上所述, 日啊日曲石英闪长岩的成因可以用两阶段模式来进行解释: 首先是俯冲洋壳携带的沉积物部分熔融产生富 Si 质熔体, 这类熔体与地幔橄榄岩相互作用形成尖晶石相金云母二辉橄榄岩, 然后其低度部分熔融的产物在上升过程中经历了辉石、角闪石等矿物的分离结晶作用.

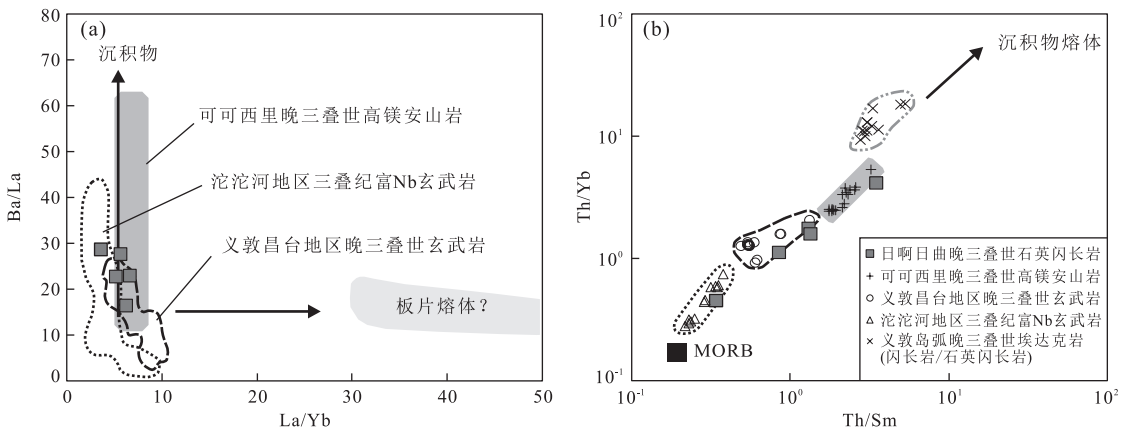


图 7 治多地区日啊日曲石英闪长岩 (a) Ba/La-La/Yb 和 (b) Th/Yb-Th/Sm

Fig.7 Trace-element plots for the Riariqu quartz diorite from Zhiduo area (a) Ba/La vs. La/Yb diagram and (b) Th/Yb vs. Th/Sm diagrams  
数据来源: MORB (N-MORB 据 Sun and McDonough, 1989); 沱沱河地区晚三叠世富 Nb 玄武岩 (Wang *et al.*, 2008); 其他岩浆岩数据同图 4 和 6; a 图据 Yagodinski *et al.*, 1995; b 图据 Zheng *et al.*, 2014

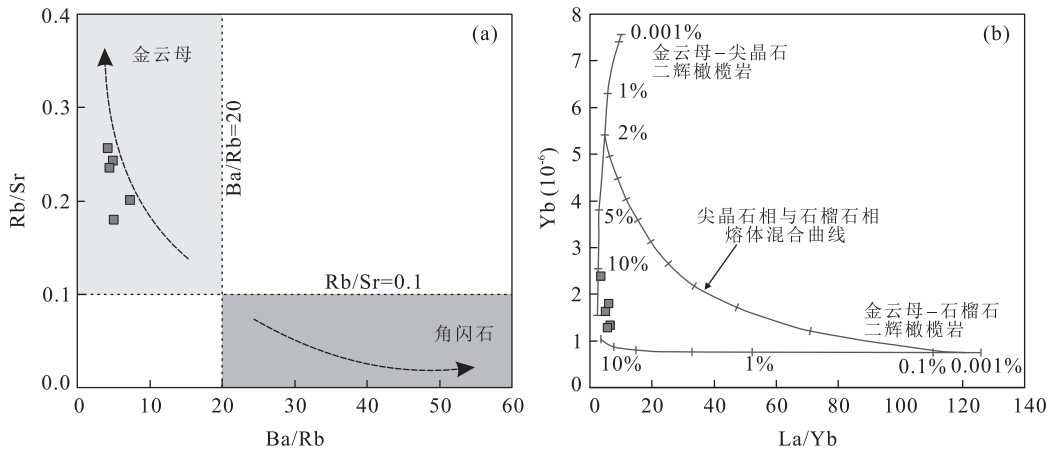


图 8 治多地区日啊日曲石英闪长岩 Rb/Sr-Ba/Rb(a)和 Yb-La/Yb(b)

Fig.8 Rb/Sr vs. Ba/Rb (a) and Yb vs. La/Yb (b) diagrams for the Riariqu quartz diorite from Zhiduo area

图 a 据 Furman and Graham(1999);图 b 中带短横线曲线为地幔岩浆熔融程度趋势线,两端元分别为含金云母尖晶石相二辉橄榄岩地幔源区和含金云母石榴石相二辉橄榄岩地幔源区.图中所有地幔成分参考数据 Miller *et al.*(1999)及其文献;富集地幔源区组分  $La=0.648 \times 10^{-6}$ ,  $Yb=0.347 \times 10^{-6}$ ,  $Dy=0.578 \times 10^{-6}$

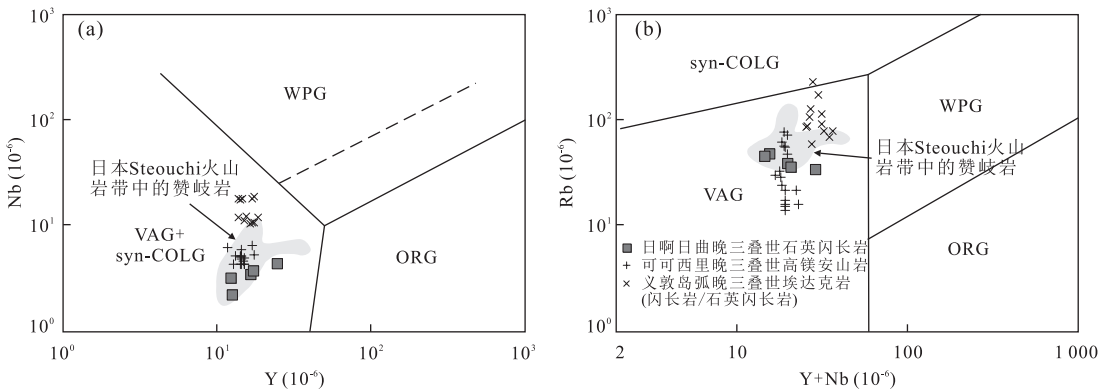


图 9 治多地区日啊日曲石英闪长岩 Nb-Y(a)和 Rb-Y+Nb 构造判别(b)

Fig.9 Nb vs. Y and Rb vs. Y + Nb discrimination diagrams for the quartz diorite from Zhiduo area

图中岩浆岩数据来源同图 4;syn-COLG.同碰撞花岗岩;WPG.板内花岗岩;VAG.火山弧花岗岩;ORG.洋中脊花岗岩;底图据 Pearce *et al.*,1984

### 4.2 地球动力学背景

羌塘地块东北缘及其邻区属东特提斯构造域,从泥盆纪至三叠纪末,该区经历了古特提斯多岛洋的扩张、俯冲及闭合过程(莫宣学等,2001;Kapp *et al.*,2003;Pan *et al.*,2012),但古特提斯洋在该区最终闭合过程则是长期争论的问题.金沙江缝合带和甘孜—理塘缝合带是古特提斯之金沙江洋和甘孜—理塘洋存在的直接证据,记录了特提斯演化过程的关键地质信息.南西侧的金沙江洋形成于石炭纪—早二叠世(Kapp *et al.*,2000;Pullen *et al.*,2008),Jian *et al.*(2009a,2009b)获得该带中蛇绿岩 SHRIMP U-Pb 年龄为 346~341 Ma,代表了洋盆形成时代.中二叠世南向俯冲消减,在羌塘地块内形成陆缘火山弧和弧后盆地,以研究区南部的中二叠

世孕笛考组弧火山岩和开心岭群弧后盆地火山岩、碎屑岩—碳酸盐岩为代表(马丽艳等,2007),早—中三叠世俯冲过程结束,义敦弧地体拼贴在羌塘地块东侧(Pullen *et al.*,2008;Zi *et al.*,2012).

北东侧的甘孜—理塘洋做为古特提斯洋的另一个分支,于晚二叠世从古特提斯洋分离出来并开始扩张(侯增谦等,2004;Pullen *et al.*,2008),闫全人等(2005)获得该带中 N-MORB 型蛇绿岩内辉长岩 SHRIMP U-Pb 年龄为 292 Ma.研究表明,甘孜—理塘缝合带东段的义敦岛弧从南部中甸弧至北部昌台地区发育一系列晚三叠世埃达克质侵入岩和基性火山岩,且均与甘孜—理塘洋西向俯冲有关.如 Wang *et al.*(2011a,2013)报道的义敦南部香格里拉地区埃达克质斑岩型侵入体(230~215 Ma)和中酸性火

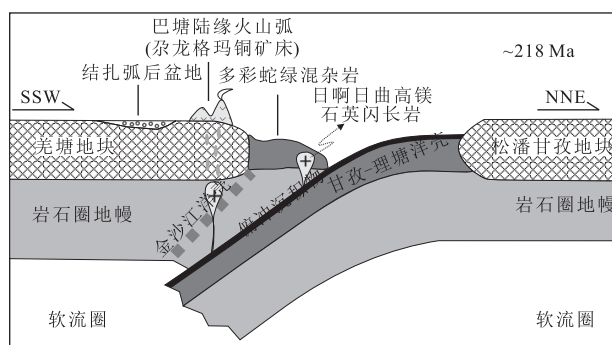


图 10 晚三叠世甘孜—理塘古特提斯洋俯冲构造演化模式  
Fig.10 A suggested model for the evolution of Ganzi-Litang Pale-Tethys Ocean during Late Triassic

山岩(220 Ma),是来自俯冲沉积物和板片的熔体与地幔楔相互反应的产物;义敦北部昌台地区埃达克质玄武岩(230 Ma)形成于甘孜—理塘西向俯冲环境下地幔楔的部分熔融;Chen *et al.*(2013)报道的义敦南部中甸地区弧花岗岩类和火山岩(221~211 Ma)也形成于甘孜—理塘洋西向俯冲过程中,为受俯冲沉积物交代的地幔楔部分熔融的产物.主量元素和微量元素分析结果表明,甘孜—理塘北西段晚三叠世(218±1 Ma)的日啊日曲石英闪长岩类似于 HMA/赞岐岩类,其产出的构造背景可能为俯冲环境(Pearce *et al.*, 1984;Kapp *et al.*, 2003;Condie, 2005).Nb-Y 构造判别图解上(图 9a),样品点全部落入火山弧花岗岩区域,Rb-Y+Nb 图解也指示岩石形成于火山—岩浆弧环境(图 9b).因此,义敦弧东侧的整个甘孜—理塘洋在晚三叠世时期应处于同一构造背景,均为俯冲环境,南北段差异不明显.

综上所述,晚三叠世时期,甘孜—理塘古特提斯洋仍在向南西发生俯冲消减,并由北向南依次发育查涌蛇绿岩、火山—岩浆弧、巴塘陆缘火山弧、结扎弧后前陆盆地等较完整的沟—弧—盆体系(图 10),日啊日曲石英闪长岩即产于甘孜—理塘洋的南西向俯冲过程中.义敦地区同碰撞 S 型花岗岩(206~138 Ma;侯增谦等, 2001)和巴颜喀拉周缘前陆盆地的形成则标志着甘孜—理塘洋盆在三叠纪末期闭合,进入侏罗纪碰撞造山阶段.随后代表金沙江洋壳成分的多彩蛇绿混杂岩隆升并遭受剥蚀,日啊日曲石英闪长岩体剥露至地表并紧邻金沙江缝合带分布(图 1b).

## 5 结论

(1) 治多地区日啊日曲石英闪长岩的锆石 LA-

ICP-MS U-Pb 年龄为 218±1 Ma,岩体侵位于晚三叠世.

(2) 日啊日曲石英闪长岩具有高 MgO、Mg<sup>#</sup>、Cr 和 Ni 等高镁闪长岩的特征,地球化学特征与赞岐岩类相似,形成于俯冲带之上的地幔楔环境,为俯冲沉积物富 Si 质熔体与地幔橄榄岩反应形成的尖晶石相金云母二辉橄榄岩低度(10%~15%)部分熔融的产物,且岩浆在上升过程中经历了辉石、角闪石等矿物的分离结晶作用.

(3) 日啊日曲高镁石英闪长岩具弧岩岩浆地球化学特征,指示甘孜—理塘古特提斯洋在晚三叠世时期仍在向南西发生俯冲消减作用.

致谢:感谢中国地质大学(武汉)李艳军老师在论文撰写过程中给予的指导性意见,同时对三位审稿人的审阅及建设性修改意见表示诚挚的谢意;成文过程中得到了石文杰、李欢、田宁和梁胜男博士的极大帮助;野外工作中青海有色地质矿产勘查院提供了便利的条件,在此一并表示感谢.

## References

- Andersen, T., 2002. Correction of Common Lead in U-Pb Analyses That do not Report <sup>204</sup>Pb. *Chemical Geology*, 192(1-2): 59-79. doi:10.1016/S0009-2541(02)00195-X
- Chen, J. L., Xu, J. F., Ren, J. B., et al., 2013. Geochronology and Geochemical Characteristics of Late Triassic Porphyritic Rocks from the Zhongdian Arc, Eastern Tibet, and Their Tectonic and Metallogenic Implications. *Gondwana Research*, 26(2): 492-504. doi: 10.1016/j.gr.2013.07.022
- Chung, S. L., Chu, M. F., Zhang, Y. Q., et al., 2005. Tibetan Tectonic Evolution Inferred from Spatial and Temporal Variations in Post-Collisional Magmatism. *Earth-Science Reviews*, 68(3-4): 173-196. doi: 10.1016/j.earscirev.2004.05.001
- Condie, K. C., 2005. High Field Strength Element Ratios in Archean Basalts: A Window to Evolving Sources of Mantle Plumes? *Lithos*, 79(3-4): 491-504. doi: 10.1016/j.lithos.2004.09.014
- Crawford, A. J., Falloon, T. J., Green, D. H., et al., 1989. Classification Petrogenesis and Tectonic Setting of Boninites. Academic Division of Unwin Hyman Ltd., London.
- Deng, J. F., Liu, C., Feng, Y. F., et al., 2010. High Magnesian Andesitic/Dioritic Rocks (HMA) and Magnesian Andesitic/Dioritic Rocks (MA): Two Igneous Rock Types Related to Oceanic Subduction. *Geology in China*, 37(4): 1112-1118 (in Chinese with English abstract).

- Elburg, M. A., van Bergen, M., Hoogewerff, J., et al., 2002. Geochemical Trends across an Arc-Continent Collision Zone; Magma Sources and Slab-Wedge Transfer Processes below the Pantar Strait Volcanoes, Indonesia. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 66 (15): 2771 — 2789. doi:10.1016/S0016-7037(02)00868-2
- Furman, T., Graham, D., 1999. Erosion of Lithospheric Mantle beneath the East African Rift System; Geochemical Evidence from the Kivu Volcanic Province. *Lithos*, 48(1-4): 237-262. doi:10.1016/S0419-0254(99)80014-7
- Fu, X.G., Wang, J., Tan, F.W., et al., 2010. The Late Triassic Rift-Related Volcanic Rocks from Eastern Qiangtang, Northern Tibet (China): Age and Tectonic Implications. *Gondwana Research*, 17 (1): 135 — 144. doi: 10.1016/j.gr.2009.04.010
- Gao, S., Rudnick, R. L., Yuan, H. L., et al., 2004. Recycling Lower Continental Crust in the North China Craton. *Nature*, 432: 892 — 897. doi:10.1038/nature03162
- Griffin, W. L., Belousova, E. A., Shee, S. R., et al., 2004. Archean Crustal Evolution in the Northern Yilgarn Craton: U-Pb and Hf-Isotope Evidence from Detrital Zircons. *Precambrian Research*, 131(3-4): 231 — 282. doi: 10.1016/j.precamres.2003.12.011
- Hawkesworth, C. J., Turner, S. P., McDermott, F., et al., 1997. U-Th Isotopes in Arc Magmas: Implications for Element Transfer from the Subducted Crust. *Science*, 276 (5312): 551 — 555. doi:10.1126/science.276.5312.551
- Hoskin, P. W. O., Schaltegger, U., 2003. The Composition of Zircon and Igneous and Metamorphic Petrogenesis. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 53(1): 27 — 62. doi:10.2113/0530027
- Hou, Z. Q., Qu, X. M., Zhou, J. R., et al., 2001. Collision-Orogenic Processes of the Yidun Arc in the Sanjiang Region; Record of Granites. *Acta Geologica Sinica*, 75 (4): 484 — 497 (in Chinese with English abstract).
- Hou, Z. Q., Yang, Y. Q., Qu, X. M., et al., 2004. Tectonic Evolution and Mineralization Systems of the Yidun Arc Orogen in Sanjiang Region, China. *Acta Geologica Sinica*, 78(1): 109 — 120 (in Chinese with English abstract).
- Jian, P., Liu, D. Y., Kröner, A., et al., 2009a. Devonian to Permian Plate Tectonic Cycle of the Paleo-Tethys Orogen in Southwest China (I): Geochemistry of Ophiolites, Arc/Back-Arc Assemblages and Within-Plate Igneous Rocks. *Lithos*, 113 (3 — 4): 748 — 766. doi: 10.1016/j.lithos.2009.04.004
- Jian, P., Liu, D. Y., Kröner, A., et al., 2009b. Devonian to Permian Plate Tectonic Cycle of the Paleo-Tethys Orogen in Southwest China (II): Insights from Zircon Ages of Ophiolites, Arc/Back-Arc Assemblages and Within-Plate Igneous Rocks and Generation of the Emeishan CFB Province. *Lithos*, 113 (3 — 4): 767 — 784. doi: 10.1016/j.lithos.2009.04.006
- Kamei, A., Owada, M., Nagao, T., et al., 2004. High-Mg Diorites Derived from Sanukitic HMA Magmas, Kyushu Island, Southwest Japan Arc: Evidence from Clinopyroxene and Whole Rock Compositions. *Lithos*, 75 (3 — 4): 359 — 371. doi:10.1016/j.lithos.2004.03.006
- Kapp, P., Yin, A., Manning, C. E., et al., 2000. Blueschist-Bearing Metamorphic Core Complexes in the Qiangtang Block Reveal Deep Crustal Structure of Northern Tibet. *Geology*, 28: 19 — 22. doi:10.1130/0091-7613(2000)28<19:BMCCIT>2.0.CO;2
- Kapp, P., Yin, A., Manning, C. E., et al., 2003. Tectonic Evolution of the Early Mesozoic Blueschist-Bearing Qiangtang Metamorphic Belt, Central Tibet. *Tectonics*, 22(4): 1043. doi:10.1029/2002TC001361
- Kelemen, P. B., 1995. Genesis of High Mg<sup>#</sup> Andesites and the Continental Crust. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 120(1): 1 — 19. doi: 10.1007/BF00311004
- Kelemen, P. B., Hanghøj, K., Greene, A. R., 2003. One View of the Geochemistry of Subduction-Related Magmatic Arcs, with an Emphasis on Primitive Andesite and Lower Crust. *Treatise on Geochemistry*, 3: 593 — 659. doi:10.1016/B0-08-043751-6/03035-8
- Liu, Y. S., Gao, S., Hu, Z. C., et al., 2010. Continental and Oceanic Crust Recycling-Induced Melt-Peridotite Interactions in the Trans-North China Orogen; U-Pb Dating, Hf Isotopes and Trace Elements in Zircons of Mantle Xenoliths. *Journal of Petrology*, 51(1-2): 537 — 571. doi:10.1093/petrology/egp082
- Liu, Y. S., Hu, Z. C., Gao, S., et al., 2008a. In Situ Analysis of Major and Trace Elements of Anhydrous Minerals by LA-ICP-MS without Applying an Internal Standard. *Chemical Geology*, 257(1-2): 34 — 43. doi: 10.1016/j.chemgeo.2008.08.004
- Liu, Y. S., Zong, K. Q., Kelemen, P. B., et al., 2008b. Geochemistry and Magmatic History of Eclogites and Ultramafic Rocks from the Chinese Continental Scientific Drill Hole; Subduction and Ultrahigh-Pressure Metamorphism of Lower Crustal Cumulates. *Chemical Geology*, 247(1-2): 133 — 153. doi:10.1016/j.chemgeo.2008.08.004
- Ludwig, K. R., 2003. User's Manual for Isoplot 3.0—A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. Berkeley Geochronology Center Special Publication, Berkeley.
- Luo, W. X., Qian, L. L., Li, D. W., et al., 2013. Petrogenesis of the Zhongzaohuo Ultramafic Pyroxenite Pluton, East

- Kunlun; Constraints from Petrology, Geochemistry and Genetic Mineralogy. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 38(6): 1214—1228 (in Chinese with English abstract).
- Ma, L. Y., Niu, Z. J., Bai, Y. S., et al., 2007. Sr, Nd and Pb Isotopic Geochemistry of Permian Volcanic Rocks from Southern Qinghai and Their Geological Significance. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 32(1): 22—28 (in Chinese with English abstract).
- Maniar, P. D., Piccoli, P. M., 1989. Tectonic Discrimination of Granitoids. *Geological Society of America Bulletin*, 101(5): 635—643. doi: 10.1130/0016—7606(1989)101<0635;TDOG>2.3.CO;2
- Mao, J. W., Pirajno, F., Zhang, Z. H., et al., 2006. Late Variscan Post-Collisional Cu-Ni Sulfide Deposits in East Tianshan and Altay in China: Principal Characteristics and Possible Relationship with Mantle Plume. *Acta Geologica Sinica*, 80(7): 925—942 (in Chinese with English abstract).
- McCarron, J. J., Smellie, J. L., 1998. Tectonic Implications of Fore-Arc Magmatism and Generation of High-Magnesian Andesites; Alexander Island, Antarctica. *Journal of the Geological Society*, 155(2): 269—280. doi: 10.1144/gsjgs.155.2.0269
- Miller, C., Schuster, R., Klotzli, U., et al., 1999. Post-Collisional Potassic and Ultrapotassic Magmatism in SW Tibet; Geochemical and Sr-Nd-Pb-O Isotopic Constraints for Mantle Source Characteristics and Petrogenesis. *Journal of Petrology*, 40(9): 1399—1424. doi: 10.1093/petrology/40.9.1399
- Mo, X. X., Deng, J. F., Dong, F. L., et al., 2001. Volcanic Petro-tectonic Assemblages in Sanjiang Orogenic Belt, SW China and Implications for Tectonics. *Geological Journal of China Universities*, 7(2): 121—138 (in Chinese with English abstract).
- Pan, G. T., Wang, L. Q., Li, R. S., et al., 2012. Tectonic Evolution of the Qinghai-Tibet Plateau. *Journal of Asian Earth Sciences*, 53: 3—14. doi: 10.1016/j.jseae.2011.12.018
- Pearce, J. A., Harris, N. B. W., Tindle, A. G., 1984. Trace Element Discrimination Diagrams for the Tectonic Interpretation of Granitic Rocks. *Journal of Petrology*, 25(4): 956—983. doi: 10.1093/petrology/25.4.956
- Pearce, J. A., Peate, D. W., 1995. Tectonic Implications of the Composition of Volcanic Arc Magmas. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 23: 251—286. doi: 10.1146/annurev.ea.23.050195.001343
- Peng, T. P., Zhao, G. C., Fan, W. M., et al., 2014. Zircon Geochronology and Hf Isotopes of Mesozoic Intrusive Rocks from the Yidun Terrane, Eastern Tibetan Plateau; Petrogenesis and Their Bearings with Cu Mineralization. *Journal of Asian Earth Sciences*, 80: 18—33. doi: 10.1016/j.jseae.2013.10.028
- Plank, T., 2005. Constraints from Thorium/Lanthanum on Sediment Recycling at Subduction Zones and the Evolution of the Continents. *Journal of Petrology*, 46(5): 921—944. doi: 10.1093/petrology/egi005
- Plank, T., Langmuir, C. H., 1998. The Chemical Composition of Subducting Sediment and Its Consequences for the Crust and Mantle. *Chemical Geology*, 145(3—4): 325—394. doi: 10.1016/S0009—2541(97)00150—2
- Polat, A., Kerrich, R., 2001. Magnesian Andesites, Nb-Enriched Basalt-Andesites, and Adakites from Late-Archean 2.7 Ga Wawa Greenstone Belts, Superior Province, Canada: Implications for Late Archean Subduction Zone Petrogenetic Processes. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 141(1): 36—52. doi: 10.1007/s004100000223
- Pullen, A., Kapp, P., Gehrels, G. E., et al., 2008. Triassic Continental Subduction in Central Tibet and Mediterranean-Style Closure of the Paleo-Tethys Ocean. *Geology*, 36(5): 351—354. doi: 10.1130/G24435A.1
- Rapp, R. P., Shimizu, N., Norman, M. D., et al., 1999. Reaction between Slab-Derived Melts and Peridotite in the Mantle Wedge; Experimental Constraints at 3.8 GPa. *Chemical Geology*, 160(4): 335—356. doi: 10.1016/S0009—2541(99)00106—0
- Rollinson, H. R., 1993. Using Geochemical Data; Evaluation, Presentation, Interpretation. Longman Group UK Ltd., New York.
- Shimoda, G., Tatsumi, Y., Nohda, S., et al., 1998. Setouchi High-Mg Andesites Revisited: Geochemical Evidence for Melting of Subducting Sediments. *Earth and Planetary Science Letters*, 160(3—4): 479—492. doi: 10.1016/S0012—821X(98)00105—8
- Shirey, S. B., Hanson, G. N., 1984. Mantle-Derived Archean Monozodiorites and Trachyandesites. *Nature*, 310: 222—224. doi: 10.1038/310222a0
- Smithies, R. H., Champion, D. C., 1999. Late Archean Felsic Alkaline Igneous Rocks in the Eastern Goldfields, Yilgarn Craton, Western Australia: A Result of Lower Crustal Delamination? *Journal of the Geological Society*, 156(3): 561—576. doi: 10.1144/gsjgs.156.3.0561
- Smithies, R. H., Champion, D. C., 2000. The Archean High-Mg Diorite Suite: Links to Tonalite-Trondhjemite-Granodiorite Magmatism and Implications for Early Archean Crustal Growth. *Journal of Petrology*, 41(12):

- 1653—1671. doi:10.1093/petrology/41.12.1653
- Smithies, R. H., van Kranendonk, M. J., Champion, D. C., 2007. The Mesoproterozoic Emergence of Modern-Style Subduction. *Gondwana Research*, 11 (1—2): 50—68. doi:10.1016/j.gr.2006.02.001
- Sun, S. S., McDonough, W. F., 1989. Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalt: Implications for Mantle Composition and Processes. In: Saunders, A. D., Norry, M. J., eds., *Magmatism in the Ocean Basins*. *Geological Society Special Publications*, London, 42: 313—345.
- Tatsumi, Y., 1995. *Subduction Zone Magmatism*. Blackwell Publishing House, Boston.
- Tatsumi, Y., 2001. Geochemical Modeling of Partial Melting of Subducting Sediments and Subsequent Melt-Mantle Interaction: Generation of High-Mg Andesites in the Setouchi Volcanic Belt, Southwest Japan. *Geology*, 29 (4): 323—326. doi:10.1130/0091—7613(2001)029<0323:GMOPMO>2.0.CO;2
- Tatsumi, Y., Hanyu, T., 2003. Geochemical Modeling of Dehydration and Partial Melting of Subducting Lithosphere: Toward a Comprehensive Understanding of High-Mg Andesite Formation in the Setouchi Volcanic Belt, SW Japan. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 4(9): 1081. doi:10.1029/2003GC000530
- Tatsumi, Y., Ishizaka, K., 1981. Existence of Andesitic Primary Magma: An Example from Southwest Japan. *Earth and Planetary Science Letters*, 53(1): 124—130. doi:10.1016/0012—821X(81)90033—9
- Tatsumi, Y., Ishizaka, K., 1982. Origin of High-Magnesian Andesites in the Setouchi Volcanic Belt, Southwest Japan, I. Petrographical and Chemical Characteristics. *Earth and Planetary Science Letters*, 60(2): 293—304. doi:10.1016/0012—821X(82)90008—5
- Tatsumi, Y., Shukuno, H., Sato, K., et al., 2003. The Petrology and Geochemistry of High-Magnesian Andesites at the Western Tip of the Setouchi Volcanic Belt, SW Japan. *Journal of Petrology*, 44 (9): 1561—1578. doi:10.1093/petrology/egg049
- Wang, B. Q., Zhou, M. F., Chen, W. T., et al., 2013. Petrogenesis and Tectonic Implications of the Triassic Volcanic Rocks in the Northern Yidun Terrane, Eastern Tibet. *Lithos*, 175—176: 285—301. doi:10.1016/j.lithos.2013.05.013
- Wang, B. Q., Zhou, M. F., Li, J. W., et al., 2011a. Late Triassic Porphyritic Intrusions and Associated Volcanic Rocks from the Shangri-La Region, Yidun Terrane, Eastern Tibetan Plateau: Adakitic Magmatism and Porphyry Copper Mineralization. *Lithos*, 127 (1—2): 24—38. doi:10.1016/j.lithos.2011.07.028
- Wang, Q., Li, Z. X., Chung, S. L., et al., 2011b. Late Triassic High-Mg Andesite/Dacite Suites from Northern Hohxil, North Tibet: Geochronology, Geochemical Characteristics, Petrogenetic Processes and Tectonic Implications. *Lithos*, 126(1—2): 54—67. doi:10.1016/j.lithos.2011.06.002
- Wang, Q., Wyman, D. A., Xu, J. F., et al., 2008. Triassic Nb-Enriched Basalts, Magnesian Andesites, and Adakites of the Qiangtang Terrane (Central Tibet): Evidence for Metasomatism by Slab-Derived Melts in the Mantle Wedge. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 155(4): 473—490. doi:10.1007/s00410—007—0253—1
- Wang, Q., Zhao, Z. H., Xu, J. F., et al., 2006. Carboniferous Adakite-High-Mg Andesite-Nb-Enriched Basaltic Rocks Suites in the Northern Tianshan Area: Implications for Phanerozoic Crustal Growth in the Central Asia Orogenic Belt and Cu-Au Mineralization. *Acta Petrologica Sinica*, 22 (1): 11—30 (in Chinese with English abstract).
- Wilson, M., 1989. *Igneous Petrogenesis*. Unwin Hyman, London.
- Woodhead, J. D., Hergt, J. M., Davidson, J. P., et al., 2001. Hafnium Isotope Evidence for ‘Conservative’ Element Mobility during Subduction Zone Processes. *Earth and Planetary Science Letters*, 192 (3): 331—346. doi:10.1016/S0012—821X(01)00453—8
- Xu, Z. Q., Yang, J. S., Li, W. C., et al., 2013. Paleo-Tethys System and Accretionary Orogen in the Tibet Plateau. *Acta Petrologica Sinica*, 29 (6): 1847—1860 (in Chinese with English abstract).
- Yan, Q. R., Wang, Z. Q., Liu, S. W., et al., 2005. The Tethys Expansion and the Gondwana Cleavage in West-Northern Sanjiang: The SHRIMP Chronological Evidence from Ganzi Ophiolite Gabbro. *Chinese Science Bulletin*, 50(2): 158—166 (in Chinese).
- Yi, L. W., Ma, C. Q., Wang, L. X., et al., 2014. Discovery of Late Ordovician Subvolcanic Rocks in South China: Existence of Subduction-Related Dacite from Early Paleozoic? *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 39(6): 637—653 (in Chinese with English abstract).
- Yin, A., Harrison, T. M., 2000. Geologic Evolution of the Himalayan-Tibetan Orogen. *Annual Review Earth and Planetary Science Letters*, 28: 211—280. doi:10.1146/annurev.earth.28.1.211
- Yin, J. Y., Yuan, C., Sun, M., et al., 2012. Age, Geochemical Features and Possible Petrogenesis Mechanism of Early Permian Diorite in Hatu, Xinjiang. *Acta Petrologica Sinica*, 28(7): 2171—2182 (in Chinese with English abstract).
- Yogodzinski, G. M., Key, R. W., Volynets, O. N., et al., 1995.

Magnesian Andesite in the Western Aleutian Komandorsky Region; Implications for Slab Melting and Processes in the Mantle Wedge. *Geological Society of America Bulletin*, 107(5): 505–519. doi:10.1130/0016-7606(1995)107<0505:MAITWA>2.3.CO;2

Yogodzinski, G. M., Volynets, O. N., Koloskov, A. V., et al., 1994. Magnesian Andesites and the Subduction Component in a Strongly Calcalkaline Series at Piip Volcano, Far Western Aleutians. *Journal of Petrology*, 35(1): 163–204. doi:10.1093/petrology/35.1.163

Zhai, Q. G., Jahn, B. M., Su, L., et al., 2013. Triassic Arc Magmatism in the Qiangtang Area, Northern Tibet: Zircon U-Pb Ages, Geochemical and Sr-Nd-Hf Isotopic Characteristics, and Tectonic Implications. *Journal of Asian Earth Sciences*, 63(1): 162–178. doi:10.1016/j.jseaeas.2012.08.025

Zhai, Q. G., Jahn, B. M., Zhang, R. Y., et al., 2011. Triassic Subduction of the Paleo-Tethys in Northern Tibet, China: Evidence from the Geochemical and Isotopic Characteristics of Eclogites and Blueschists of the Qiangtang Block. *Journal of Asian Earth Sciences*, 42(6): 1356–1370. doi:10.1016/j.jseaeas.2011.07.023

Zhang, Q., Qian, Q., Zhai, M. G., et al., 2005. Geochemistry, Petrogenesis and Geodynamic Implications of Sanukite. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 24(2): 117–125 (in Chinese with English abstract).

Zhang, Q., Wang, Y., Qian, Q., et al., 2004. Sanukite of Late Archaean and Early Earth Evolution. *Acta Petrologica Sinica*, 20(6): 1355–1362 (in Chinese with English abstract).

Zhang, Z. M., Dong, X., Santosh, M., et al., 2014. Metamorphism and Tectonic Evolution of the Lhasa Terrane, Central Tibet. *Gondwana Research*, 25(1): 170–189. doi:10.1016/j.gr.2012.08.024

Zhao, Z. H., Wang, Q., Xiong, X. L., et al., 2007. Magnesian Igneous Rocks in Northern Xinjiang. *Acta Petrologica Sinica*, 23(7): 1696–1707 (in Chinese with English abstract).

Zheng, Y. C., Hou, Z. Q., Gong, Y. L., et al., 2014. Petrogenesis of Cretaceous Adakite-Like Intrusions of the Gangdese Plutonic Belt, Southern Tibet: Implications for Mid-Ocean Ridge Subduction and Crustal Growth. *Lithos*, 190–191: 240–263. doi:10.1016/j.lithos.2013.12.013

Zhu, D. C., Zhao, Z. D., Niu, Y. L., et al., 2013. The Origin and Pre-Cenozoic Evolution of the Tibetan Plateau. *Gondwana Research*, 23(4): 1429–1454. doi:10.1016/j.gr.2012.02.002

Zi, J. W., Cawood, P. A., Fan, W. M., et al., 2012. Contrasting

Rift and Subduction-Related Plagiogranites in the Jinshajiang Ophiolitic Melange, Southwest China, and Implications for the Paleo-Tethys. *Tectonics*, 31: 1–18. doi:10.1029/2011TC002937

## 附中文参考文献

邓晋福, 刘翠, 冯艳芳, 等, 2010. 高镁安山岩/闪长岩类(HMA)和镁安山岩/闪长岩类(MA): 与洋俯冲作用相关的两类典型的火成岩类. *中国地质*, 37(4): 1112–1118.

侯增谦, 曲晓明, 周继荣, 等, 2001. 三江地区义敦岛弧碰撞造山过程: 花岗岩记录. *地质学报*, 75(4): 484–497.

侯增谦, 杨岳清, 曲晓明, 等, 2004. 三江地区义敦岛弧造山带演化和成矿系统. *地质学报*, 78(1): 109–120.

罗文行, 钱莉莉, 李德威, 等, 2013. 东昆仑中灶火地区超镁铁质辉石岩的成因. *地球科学——中国地质大学学报*, 38(6): 1214–1228.

马丽艳, 牛志军, 白云山, 等, 2007. 青海南部二叠纪火山岩 Sr、Nd、Pb 同位素特征及地质意义. *地球科学——中国地质大学学报*, 32(1): 22–28.

毛景文, Pirajno, F., 张作衡, 等, 2006. 天山—阿尔泰东部地区海西晚期后碰撞铜镍硫化物矿床: 主要特点及可能与地幔柱的关系. *地质学报*, 80(7): 925–942.

莫宣学, 邓晋福, 董方浏, 等, 2001. 西南三江造山带火山岩—构造组合及其意义. *高校地质学报*, 7(2): 121–138.

王强, 赵振华, 许继峰, 等, 2006. 天山北部石炭纪埃达克岩—高镁安山岩—富 Nb 岛弧玄武质岩: 对中亚造山带显生宙地壳增生与铜金成矿的意义. *岩石学报*, 22(1): 11–30.

许志琴, 杨经绥, 李文昌, 等, 2013. 青藏高原中的古特提斯体制与增生造山作用. *岩石学报*, 29(6): 1847–1860.

闫全人, 王宗起, 刘树文, 等, 2005. 西南三江特提斯洋扩张与晚古生代东冈瓦纳裂解: 来自甘孜蛇绿岩辉长岩的 SHRIMP 年代学证据. *科学通报*, 50(2): 158–166.

易立文, 马昌前, 王连训, 等, 2014. 华南晚奥陶世次火山岩的发现: 早古生代与俯冲有关的英安岩? *地球科学——中国地质大学学报*, 39(6): 637–653.

尹继元, 袁超, 孙敏, 等, 2012. 新疆哈图早二叠世富镁闪长岩的时代、地球化学特征和可能的成因机制. *岩石学报*, 28(7): 2171–2182.

张旗, 钱青, 翟明国, 等, 2005. Sanukite(赞岐岩)的地球化学特征、成因及其地球动力学意义. *岩石矿物学杂志*, 24(2): 117–125.

张旗, 王焰, 钱青, 等, 2004. 晚太古代 Sanukite(赞岐岩)与地球早期演化. *岩石学报*, 20(6): 1355–1362.

赵振华, 王强, 熊小林, 等, 2007. 新疆北部的富镁火成岩. *岩石学报*, 23(7): 1696–1707.