

https://doi.org/10.3799/dqkx.2018.589



南拉萨地块中部早侏罗世仁钦则花岗闪长岩成因及其地质意义

邹洁琼^{1,2}, 余红霞³, 王保弟⁴, 黄 丰^{5*}, 曾云川⁵,
黄文龙^{1,2}, 文雅倩³, 张 钊⁵, 范子尘⁵, 谈荣钰^{1,2}

1. 中国科学院广州地球化学研究所同位素地球化学国家重点实验室, 广东广州 510640
2. 中国科学院大学, 北京 100049
3. 桂林理工大学地球科学学院, 广西桂林 541004
4. 中国地质调查局成都地质调查中心, 四川成都 610081
5. 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083

摘要:青藏高原拉萨地块南部新特提斯洋的打开和俯冲时间, 目前还未得到统一的认识。南拉萨地块上广泛发育早中生代花岗岩质岩石, 为探讨亚洲—印度大陆碰撞前的新特提斯洋俯冲过程提供了天然样品。对仁钦则地区一套花岗闪长岩进行了详细的年代学、元素和同位素地球化学分析。锆石 U-Pb 定年结果显示, 这套花岗闪长岩主要形成于 180 Ma 左右, 为早侏罗世岩浆活动产物。仁钦则花岗闪长岩具有相对较高的 SiO₂ 含量 (62.77%~64.18%)、较低的 K₂O/Na₂O (0.29~0.60) 和 A/CNK 值 (0.90~0.98), 表明其属于 I 型钙碱性岩石系列。岩石明显富集 Ba、U 等大离子亲石元素而亏损 Nb、Ta 等高场强元素, 具有弧岩浆岩的地球化学特征。花岗闪长岩具有较高的 CaO 含量、较低的全碱和 Al₂O₃ 含量, 与含水的变基性岩部分熔融形成的熔体成分一致。锆石 Ti 和全岩 Zr 饱和温度计结果显示花岗闪长岩可能形成于下地壳源区。仁钦则花岗闪长岩具有较低的 (⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_i (0.703 671~0.703 794)、较高的 ε_{Nd}(t) (5.41~5.66) 和锆石 ε_{Hf}(t) 值 (12.6~14.8), 进一步表明其很可能为新生基性下地壳的部分熔融产物。综合分析认为, 仁钦则花岗闪长岩主要形成于新特提斯洋北向俯冲背景之下, 新特提斯洋的打开时间至少在晚三叠世之前。

关键词:仁钦则; 花岗闪长岩; Sr-Nd-Hf 同位素; 南拉萨地块; 新特提斯洋; 俯冲; 地球化学; 地质年代学。

中图分类号: P597

文章编号: 1000-2383(2018)08-2795-16

收稿日期: 2018-04-09

Petrogenesis and Geological Implications of Early Jurassic Granodiorites in Renqinze Area, Central Part of Southern Lhasa Subterrane

Zou Jieqiong^{1,2}, Yu Hongxia³, Wang Baodi⁴, Huang Feng^{5*}, Zeng Yunchuan⁵,
Huang Wenlong^{1,2}, Wen Yaqian³, Zhang Zhao⁵, Fan Zichen⁵, Tan Rongyu^{1,2}

1. State Key Laboratory of Isotope Geochemistry of Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China
3. School of Earth Science, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China
4. Chengdu Center of China Geological Survey, Chengdu 610081, China
5. School of Earth Science and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

基金项目:中国地质调查局项目 (No. DD20160016); 国家自然科学基金项目 (Nos. 41603033, 41773026); 博士后创新人才支持计划 (No. BX201700213); 中国博士后科学基金项目 (No. 2017M620847); 中央高校基本科研业务费专项资金 (No. 2-9-2017-213)。

作者简介:邹洁琼 (1990—), 女, 博士研究生, 主要从事地球化学方面的研究。ORCID: 0000-0001-9328-9437. E-mail: zoujieqiong@gig.ac.cn

* **通讯作者:**黄丰, ORCID: 0000-0001-6215-8223. E-mail: fenghuang@cugb.edu.cn

引用格式:邹洁琼, 余红霞, 王保弟, 等, 2018. 南拉萨地块中部早侏罗世仁钦则花岗闪长岩成因及其地质意义. 地球科学, 43(8): 2795—2810.

Abstract: The opening and subduction time of the Neo-Tethys ocean in the southern part of the Lhasa block on the Qinghai-Tibet Plateau remains controversial. The widely developed Mesozoic granitoids in the southern Lhasa subterrane of Tibetan Plateau, are essential samples to explore the prolonged evolution of subduction process of the Neo-Tethys before collision between the Asia and India continents. Here, we present detailed zircon U-Pb dating, trace element and Hf isotope, whole-rock major and trace elements, and Sr-Nd isotope data for the granodiorites from the Renqinze area, central part of southern Lhasa subterrane. The granodiorites were crystallized at ca. 180 Ma, which belongs to Early Jurassic. They are characterized by relatively high SiO_2 (62.77%–64.18%) contents and low $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ (0.29–0.60) and A/CNK values (0.90–0.98). These geochemical characteristics are similar to I-type calc-alkaline rocks. Renqinze granodiorites are enriched in LILEs (e.g. Ba and U) and depleted in HFSEs (e.g. Nb and Ta), showing the geochemical affinity of arc-related magmatism. The granodiorites fall into the range of partial melts of meta-basaltic rocks due to their high CaO, low total alkaline and Al_2O_3 contents. The accordant results of Ti-in-zircon and whole-rock zircon saturation temperature suggest that the Renqinze granitoid rocks were derived from the lower continental crust. Moreover, the granodiorites show low $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ (0.703 671–0.703 794), high $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ (5.41–5.66) and zircon $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ (12.6–14.8) values, indicating they were likely generated from partial melting of a juvenile mafic lower crust. The Renqinze granodiorites represent the products of subduction of the Neo-Tethys ocean. The timing for the opening of the Neo-Tethys is at least before Late Triassic.

Key words: Renqinze; granodiorites; Sr-Nd-Hf isotopes; southern Lhasa subterrane; Neo-Tethys ocean; subduction; geochemistry; geochronology.

0 引言

古生代以来冈瓦纳大陆裂解后大陆的向北漂移和拼合,形成了现今亚洲大陆西南缘的构造格局 (Zhu *et al.*, 2013). 尤其是新生代早期亚洲和印度大陆的碰撞,形成了号称“世界屋脊”的青藏高原. 拉萨地块位于青藏高原的最南缘,与印度大陆毗邻,保存了大量大陆碰撞前后的岩浆活动记录 (Huang

et al., 2015, 2016, 2017; Zeng *et al.*, 2016; Ma *et al.*, 2017) (图 1). 目前关于拉萨地块新生代火山岩已有大量研究成果, Huang *et al.* (2016, 2017) 厘定出其新特提斯洋俯冲消亡和大陆碰撞时间为 65~40 Ma. 然而对于新生代之前,特别是中生代的岩浆-构造动力学过程还存在争议. 最基础的问题是拉萨地块南部新特提斯洋的打开和俯冲时间,目前还未得到统一的认识,部分学者认为新特提斯洋的

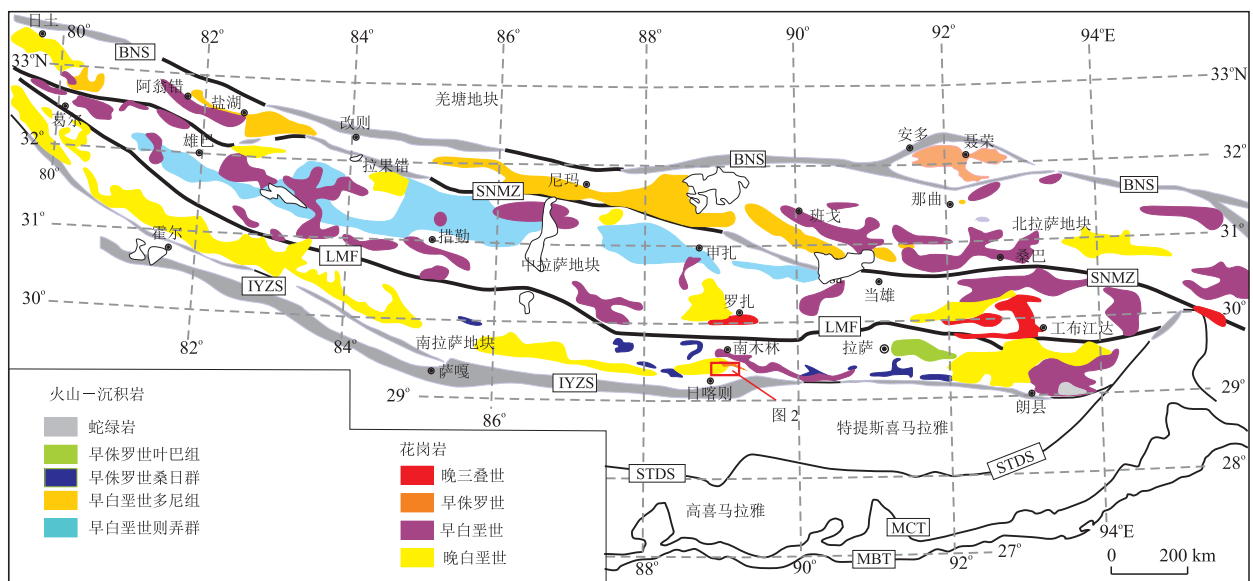


图 1 拉萨地块中生代岩浆岩分布

Fig.1 Distribution of the Mesozoic magmatic rocks in the Lhasa terrane

修改自 Zhu *et al.* (2013). BNS.班公湖-怒江缝合带; IYZS.雅鲁藏布江缝合带; SNMZ.狮泉河-纳木错蛇绿混杂岩带; LMF.洛巴堆-米拉山断裂带; STDS.藏南拆离断层系; MBT.主边界逆冲断层; MCT.主中央逆冲断层

打开受到班公湖—怒江洋的俯冲影响,因此其俯冲时间可能较晚(Zhu *et al.*, 2011, 2013);另一部分学者认为,新特提斯洋北向俯冲形成了拉萨地块上广泛的中生代岩浆活动,拉萨地块南部较早的岩浆事件记录了新特提斯洋早期俯冲历史(Wang *et al.*, 2016b; Ma *et al.*, 2017)。

不同于大洋岩石圈周期性的俯冲消亡,大陆岩石圈因其较低的岩石圈密度与稳定性可以长期保存。花岗质岩石为大陆岩石圈的重要组成部分,记录了自大陆形成以来深部物质活动和组成转变的信息,可以用来反演地壳形成和生长、大洋俯冲过程和大陆碰撞记录(Zhu *et al.*, 2011)。拉萨地块南部广泛发育的冈底斯岩基,保存了自拉萨地块形成以来的岩石学信息,可以用来反演拉萨地块演化过程。本文对南拉萨地块内仁钦则地区中生代早期花岗质岩石进行了矿物岩相学、元素地球化学、同位素年代学和 Sr-Nd-Hf 同位素分析,探讨其成因及构造意义,为完善新特提斯洋形成和俯冲过程提供重要的岩石学和地球化学依据。

1 区域地质背景与样品特征

拉萨地块位于我国西南边陲,其北部通过班公湖—怒江缝合带(BNS)与羌塘地块相邻(Wang *et al.*, 2016a),南部通过雅鲁藏布江缝合带(IYZS)与特提斯喜马拉雅地块相接(图1)。根据沉积盖层和岩石基底性质差异,Zhu *et al.* (2011)将拉萨地块划分为北、中、南3部分,分界线分别是狮泉河—纳木错蛇绿混杂岩带(SNMZ)和洛巴堆—米拉山断裂带(LMF)。北拉萨地块目前暂未发现古老基底物质,沉积物时代主要为中—晚三叠世,主要包括板岩、砂岩及放射虫燧石。中—晚侏罗世沉积物不整合覆盖在三叠纪沉积物之上,主要为接奴群和拉贡塘组,岩性包括石英砂岩、粉砂岩、泥岩及生物碎屑灰岩,局部夹层中见火成岩。广泛分布的早白垩世多尼组含有大量被晚白垩世竟柱山组磨拉石角度不整合覆盖的中钾钙碱性岛弧火山岩,与中拉萨地块早白垩世则弄群火山岩时代一致(康志强等, 2008; Zhu *et al.*, 2013; 张志等, 2017)(图1)。

中拉萨地块的基底物质主要为前寒武统青唐古拉群(Dong *et al.*, 2011),主要包括角闪岩相(局部有麻粒岩相)变质岩石(如正片麻岩、角闪岩和大理岩)。该地块内沉积岩主要为石炭纪—二叠纪海相沉积,同时中拉萨地块内发现了东西向延伸的榴辉岩

带,其微量元素显示 MORB 型玄武岩的地球化学特征。因此,该时期中拉萨地块内很可能存在松多特提斯洋(Yang *et al.*, 2009)。中拉萨地块内晚三叠世—早侏罗世火山岩活动主要集中在罗扎—当雄—工布江达一带,主要包括花岗闪长岩、二长花岗岩、正长花岗岩及二云母花岗岩(Zhu *et al.*, 2011)。较新的岩浆活动主要包括白垩纪侵入体和则弄群火山岩(图1),新生代林子宗群和钾质—超钾质火山岩(康志强等, 2008; Wang *et al.*, 2014; Huang *et al.*, 2015; Li *et al.*, 2016)。南拉萨地块内岩浆活动主要以三叠纪—中新世的冈底斯岩基、早侏罗世叶巴组与桑日群、晚侏罗世—早白垩世麻木下组火山—沉积岩组合及新生代林子宗群火山岩为代表(董彦辉等, 2006; Kang *et al.*, 2014; 黄丰等, 2015; 熊秋伟等, 2015)(图1)。沉积岩形成时代主要为晚三叠世—晚白垩世(Zhu *et al.*, 2013)。

本文所研究的花岗质岩石位于日喀则市谢通门县仁钦则乡南约 10 km 处,坐标为 29°22′42″N、88°34′55″E,构造位置上属于南拉萨地块(图1)。区域上沉积物较少,主要为晚侏罗世—早白垩世麻木下组灰岩质砾岩及细晶灰岩(图2)。仁钦则地区发育大量侏罗纪花岗质岩石,白垩纪闪长岩大面积侵入,研究区北侧出现少量新生代花岗质岩石(图2)。文中采集的花岗质岩石在野外呈较大的岩体出露,未见与其他岩石的明显接触关系,岩性主要为花岗闪长岩,标本上显示出明显的花岗结构。样品中矿物颗粒以中—粗粒为主,主要矿物组成为角闪石(40%~60%)、斜长石(20%~30%)和石英(10%~20%)(图3b, 3c)。石英呈他形粒状,零星分布于长石和角

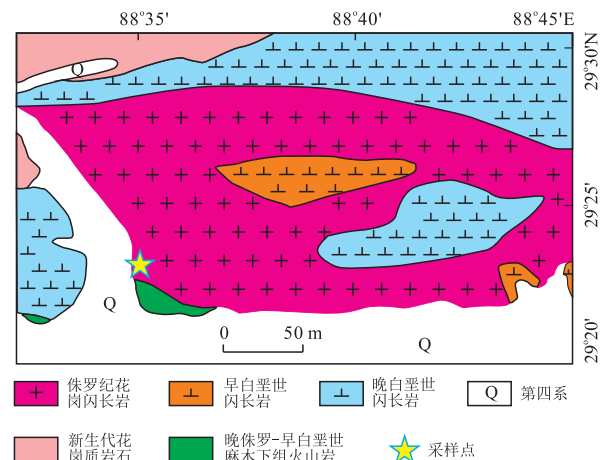


图2 研究区地质简图

Fig.2 Simplified geological map of the study area

修改自 Guo *et al.* (2013)



图 3 仁钦则花岗闪长岩体的野外特征(a)、手标本照片(b)和显微照片(c)

Fig.3 Images of field (a), hand specimen (b) and cross-polarized light in a slice (c) for the Renqinze granodiorites

Am.角闪石;Pl.斜长石;Q.石英

闪石空隙间,部分颗粒可见波状消光.斜长石呈自形一半自形板条状产出,偶尔可见聚片双晶现象.其他副矿物含量较少,主要为铁钛氧化物、凝灰石和锆石等.

2 分析方法

笔者对仁钦则花岗闪长岩(16RQZ-11)进行锆石挑选及其微量元素、U-Pb 定年与 Hf 同位素测定,锆石分选采用常规的重选和磁选法,然后在双目镜下逐个挑选出锆石颗粒使用环氧树脂制靶,抛光后进行阴极发光(CL)照相.锆石分选、制靶和照相分别在廊坊诚信地质服务公司和重庆宇劲科技有限公司完成.单颗粒锆石激光剥蚀电感耦合等离子体质谱(LA-ICP-MS) U-Pb 年代学和微量元素分析在桂林理工大学广西隐伏金属矿产勘查重点实验室完成,采用的激光设备为配有 193nm ArF 准分子激光器的 GeoLas HD 激光剥蚀系统,联用的 ICP-MS 型号为 Agilent 7500.激光束斑直径为 32 μm ,分别利用 NIST 610 玻璃和 Temora 锆石(417 Ma)作为元素和年龄外标,每隔 5 个未知样品锆石间插入 2 个 Temora,每隔 10 个样品插入 2 个 NIST610.每个测试点总的的数据获取时间为 90 s,其中前 20 s 为背景,20 s 后开始矿物剥蚀,剥蚀时间约为 50 s,后 20 s 为剥蚀后的冲洗时间.以 ^{29}Si 为内标,使用单内标多外标法校正锆石中的微量元素含量,详细的分析流程和具体参数设置见 Liu *et al.* (2010).利用 ICPMSDataCal 软件对剥蚀信号数据进行处理(Liu *et al.*, 2010),得到样品的微量元素含量及 U-Pb 同位素比值,U-Pb 年龄谐和图的绘制和加权平均年龄计算利用 Isoplot 完成.

锆石原位 Hf 同位素测定在桂林理工大学广西

隐伏金属矿产勘查重点实验室完成.采用的激光设备为配有 193nm ArF 准分子激光器的 GeoLas HD 激光剥蚀系统,联用的 MC-ICP-MS 型号为 Thermo Fisher 公司的 Neptune Plus 型.单颗粒锆石 Lu-Hf 同位素分析孔径为 45 μm ,激光剥蚀能量为 10 mJ/cm^2 ,剥蚀频率为 8 Hz,获得的 ^{180}Hf 信号通常 >3 V.利用单个样品中所有锆石分析点的平均 β_{yb} 值对每个分析点进行校正,以校正 ^{176}Yb 对 ^{176}Hf 的影响.分析过程中,每 5 个未知锆石样品中插入 2 个 GJ-1 锆石标样,以获取仪器漂移校正.重复分析 GJ-1 锆石标样获得平均 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf} = 0.282\ 010 \pm 0.000\ 005 (2\sigma, n=20)$,表明本文中的干扰校正是合理的,详细的分析步骤和仪器设置参数参考 Huang *et al.* (2016).所有进行 Lu-Hf 同位素分析的锆石点均已进行过 U-Pb 定年分析,U-Pb 年龄谐和度在 90% 以上,锆石 Hf 同位素分析点全部靠近或完全落在 U-Pb 定年分析点上.

本文所有岩石样品的主、微量元素均在中国科学院广州地球化学研究所同位素地球化学国家重点实验室完成,在进行主量元素分析前,通过称量高温加热前后的样品粉末质量差获取样品烧失量(LOD).主量元素通过四硼酸锂和样品粉末混合均匀后的玻璃饼,再利用 Rigaku RIX2000 型 X 射线荧光光谱仪(XRF)进行测试,分析精度优于 5%.微量元素采用 $\text{HF} + \text{HClO}_4$ 消解并利用高压釜使样品全部溶解,将完全溶解后的样品稀释后利用 Thermo Fisher 公司的 iCAP Q 型电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)测定,分析精度优于 10%.主、微量元素详细分析流程见 Huang *et al.* (2016).

全岩 Sr-Nd 同位素测定在桂林理工大学广西隐伏金属矿产勘查重点实验室完成,采用 HF 和 HNO_3 将样品粉末溶解,Sr 和稀土元素利用阳离子

树脂分离获得,在分离出的稀土元素中再次利用 HDEHP 树脂分离获得纯化的 Nd.获得的 Sr、Nd 溶液采用 Thermo Fisher 公司的 Neptune Plus 型 MC-ICP-MS 测试.所有测试获得的 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 和 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值分别用 $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.7219$ 和 $^{86}\text{Sr}/^{88}\text{Sr} = 0.1194$ 校正.测定的国际 Sr 同位素标准 NBS987 的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值为 $0.710282 \pm 10(2\sigma)$,Nd 同位素标准样品 JNdi-1 的 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 比值为 $0.512116 \pm 11(2\sigma)$.为保证分析数据质量,本文对样品 16RQZ-16 进行了重复样分析,获得了较为一致的 Sr-Nd 同位素测试结果.

3 分析结果

3.1 锆石 U-Pb 年代学和微量元素

仁钦则花岗闪长岩样品(16RQZ-11)中的锆石长轴为 $100 \sim 200 \mu\text{m}$,长宽比为 $1.5 : 1 \sim 3 : 1$ (图 4).CL 图像上锆石具有较窄的含有韵律生长环带的边缘.笔者对 19 颗锆石进行 U-Pb 定年分析,获得其加权平均年龄为 $180.5 \pm 1.2 \text{ Ma}$ (MSWD=0.1;图 4).所有锆石均为自形,CL 图像显示明显的震荡环带,具有较高的 Th/U 值(>0.4 ;表 1),表明这些锆石均为岩浆锆石,其 U-Pb 年龄可以代表岩浆形成年龄.

相比于其他中酸性侵入岩中的锆石,仁钦则花岗闪长岩中的锆石具有类似的 Ce 正异常,但具有相对较低的 Eu 负异常(图 5).本文中的锆石均具有相对较高的 U 含量($126 \times 10^{-6} \sim 502 \times 10^{-6}$)和较低的 Ti 含量($3.29 \times 10^{-6} \sim 8.03 \times 10^{-6}$),对应的锆石 Ti 温度计温度为 $652 \sim 722 \text{ }^\circ\text{C}$,平均为 $680 \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$ (表 2).

3.2 锆石 Hf 同位素

仁钦则花岗闪长岩中锆石的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值变化范围较窄,14 颗锆石的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值为 $0.283020 \sim 0.283085$,对应的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 $12.6 \sim 14.8$ (平均值为 13.6 ;图 6,表 3).计算获得的锆石 Hf 同位素单阶段模式年龄(t_{DM1})为 $244 \sim 333 \text{ Ma}$,二阶段模式年龄(t_{DM2})为 $277 \sim 420 \text{ Ma}$.

3.3 主微量元素地球化学

仁钦则花岗闪长岩样品具有较均一的 SiO_2 ($62.77\% \sim 64.18\%$)和 MgO ($1.93\% \sim 2.19\%$)含量.大多数样品落在花岗闪长岩范围内,少数为闪长岩(图 7a).样品具有较高的 Na_2O ($3.47\% \sim 4.14\%$)和较低的 K_2O ($1.16\% \sim 2.09\%$)含量,显示钙碱性岩浆特征(图 7b).同时,样品具有较集中的 Al_2O_3 含量($16.22\% \sim 16.57\%$),在 A/CNK-A/NK 图解上显示了偏铝质花岗质岩石特征(图 7c).所有样品具有较低且变化范围极小的 LOI($1.01\% \sim 1.64\%$),表明后期风化作用对岩石化学组成影响不大.

表 1 仁钦则花岗闪长岩(16RQZ-11)锆石 LA-ICP-MS U-Pb 同位素定年结果

Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Pb dating results for the Renqinze granodiorite (16RQZ-11)

点号	元素含量(10^{-6})			Th/U	同位素比值				年龄(Ma)			
	Pb	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	
					1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ		
01	6.8	88	188	0.47	0.2113	0.0189	0.0282	0.0004	195	16	179	3
02	6.4	84	170	0.49	0.2156	0.0104	0.0283	0.0004	198	9	180	3
03	20.8	432	502	0.86	0.1962	0.0133	0.0285	0.0004	182	11	181	3
04	7.8	134	204	0.66	0.1977	0.0094	0.0283	0.0004	183	8	180	2
05	11.8	228	293	0.78	0.1957	0.0089	0.0285	0.0004	182	8	181	2
06	8.0	113	209	0.54	0.2091	0.0102	0.0284	0.0004	193	9	181	2
07	8.6	131	224	0.59	0.1974	0.0091	0.0282	0.0003	183	8	179	2
08	4.7	63	126	0.50	0.2137	0.0124	0.0285	0.0004	197	10	181	3
09	8.9	181	227	0.80	0.2031	0.0099	0.0285	0.0004	188	8	181	3
10	9.9	177	262	0.68	0.2006	0.0096	0.0286	0.0004	186	8	182	2
11	9.2	144	248	0.58	0.2036	0.0094	0.0283	0.0003	188	8	180	2
12	8.0	133	218	0.61	0.2060	0.0101	0.0286	0.0004	190	9	182	3
13	6.0	77	164	0.47	0.2135	0.0258	0.0286	0.0008	196	22	182	5
14	7.9	134	218	0.61	0.2135	0.0130	0.0283	0.0004	197	11	180	2
15	4.9	60	141	0.42	0.2176	0.0141	0.0285	0.0005	200	12	181	3
16	8.0	139	218	0.64	0.1956	0.0114	0.0283	0.0004	181	10	180	3
17	5.9	101	165	0.61	0.1888	0.0123	0.0283	0.0004	176	11	180	3
18	9.0	182	250	0.73	0.2117	0.0222	0.0285	0.0005	195	19	181	3
19	6.8	91	192	0.47	0.1965	0.0110	0.0284	0.0004	182	9	180	3

表 2 仁钦则花岗岩长岩(16RQZ-11)锆石 LA-ICP-MS U-Pb 微量元素含量(10^{-6})Table 2 LA-ICP-MS zircon trace elements data (10^{-6}) for the Renqinze granodiorite (16RQZ-11)

点号	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
Ti	5.00	3.29	5.12	7.34	4.44	3.78	3.89	7.58	4.30	5.02	5.29	5.01	3.72	8.03	4.25	4.28	3.77	3.37	6.44
Sr	0.17	0.87	0.29	1.70	0.48	0.29	0.19	1.41	0.15	0.24	0.18	0.29	0.27	0.92	0.14	0.22	0.25	0.66	0.30
Y	739.4	496.6	1257.7	516.3	995.0	559.1	477.1	741.8	580.3	770.2	749.7	1057.6	754.0	744.9	534.6	639.6	429.6	572.8	886.9
Nb	1.92	1.23	5.22	1.41	3.43	1.49	1.21	1.38	1.89	2.22	2.06	2.00	2.18	1.98	1.16	1.77	1.15	1.73	2.20
La	0.00	1.07	0.00	1.70	0.36	0.01	0.02	0.83	0.01	0.01	0.02	0.02	0.03	0.04	0.01	0.00	0.15	0.78	0.01
Ce	9.65	9.62	29.55	12.47	21.34	9.99	9.54	11.31	12.82	13.48	12.43	12.87	9.91	10.96	8.30	9.84	8.99	12.22	11.89
Pr	0.01	0.29	0.03	0.40	0.08	0.02	0.01	0.22	0.03	0.03	0.04	0.06	0.03	0.04	0.02	0.01	0.05	0.16	0.03
Nd	0.32	1.24	0.19	2.04	0.90	0.27	0.40	1.18	0.54	0.48	0.71	1.32	0.47	0.60	0.29	0.52	0.47	0.90	0.54
Sm	1.08	0.78	2.00	1.27	1.75	0.73	0.84	1.45	1.03	1.29	1.31	2.24	0.71	1.10	0.64	1.01	0.88	0.83	1.32
Eu	0.77	0.43	1.21	0.54	0.64	0.50	0.41	0.76	0.62	0.75	0.64	1.17	0.58	0.70	0.51	0.58	0.35	0.48	0.66
Gd	8.32	6.22	16.01	6.48	13.07	6.38	5.96	9.69	8.15	9.50	8.58	13.91	7.82	9.58	5.87	6.96	5.54	7.77	9.74
Tb	3.50	2.37	7.08	2.64	5.08	2.65	2.31	3.54	2.87	3.68	3.27	5.34	3.81	3.63	2.32	3.25	2.11	2.89	4.04
Dy	47.17	33.41	90.38	36.15	67.87	37.61	32.45	48.47	41.05	51.51	48.73	73.72	46.91	48.69	32.44	42.75	28.70	38.47	56.35
Ho	23.89	15.11	39.39	16.14	31.51	17.41	15.04	22.16	17.72	23.61	23.05	32.71	22.81	22.82	15.95	19.89	13.06	17.24	26.63
Er	124.0	83.1	203.1	84.7	165.0	92.6	78.7	123.2	92.7	128.4	123.8	171.1	128.2	121.8	87.6	104.5	70.0	92.9	145.2
Tm	32.14	21.15	49.28	20.94	40.86	23.39	19.93	31.44	23.56	32.24	31.28	43.03	32.31	31.32	23.61	26.55	17.90	22.42	37.20
Yb	365.3	244.9	522.9	235.6	447.0	262.2	221.7	351.3	258.6	362.0	351.3	472.0	365.6	354.3	268.6	296.9	195.8	248.0	415.8
Lu	91.9	61.5	121.6	57.0	106.7	64.2	54.7	87.5	63.1	86.9	85.8	117.1	90.2	85.7	67.3	73.4	48.7	63.1	103.7
Hf	9 206	9 852	10 091	9 423	9 557	10 060	9 684	8 952	10 214	9 357	9 716	9 094	8 687	9 530	10 288	8 723	9 952	9 604	9 802
Ta	0.89	0.59	1.59	0.56	1.04	0.62	0.54	0.56	0.71	0.93	0.78	0.69	0.73	0.80	0.63	0.56	0.45	0.87	0.78
Ti*	684	652	685	715	674	662	664	717	672	684	688	684	661	722	671	671	662	654	704

注: Ti* 表示根据锆石 Ti 温度计测得的温度, 计算方法见 Watson and Harrison(2005).

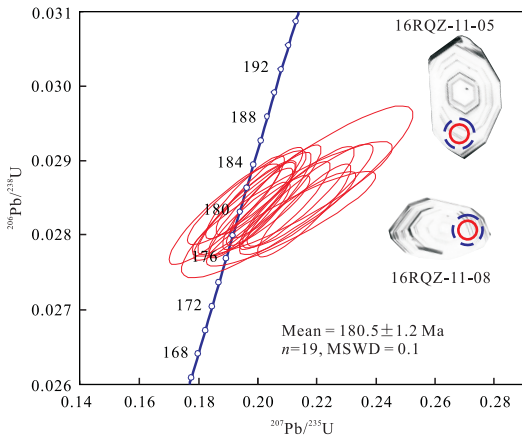


图 4 仁钦则花岗闪长岩(16RQZ-11)锆石年龄及代表性锆石的阴极发光图像

Fig. 4 LA-ICP-MS U-Pb zircon concordia diagram with representative cathodoluminescence images for the Renqinze granodiorite (16RQZ-11) 红色实线圈和蓝色虚线圈分别代表锆石 U-Pb 和 Hf 同位素分析测试点

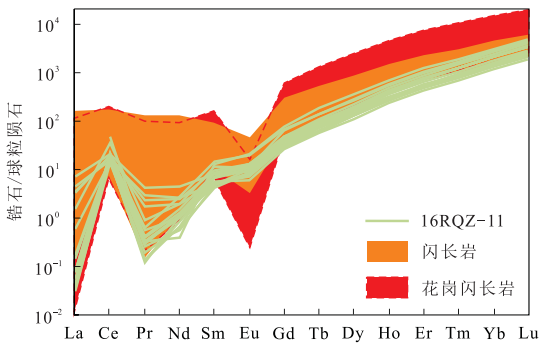


图 5 仁钦则花岗闪长岩(16RQZ-11)锆石球粒陨石标准化稀土元素分配模式

Fig. 5 Chondrite-normalized REE pattern for zircons from the Renqinze granodiorite (16RQZ-11) 闪长岩和花岗闪长岩数据引自 Huang *et al.* (2017)

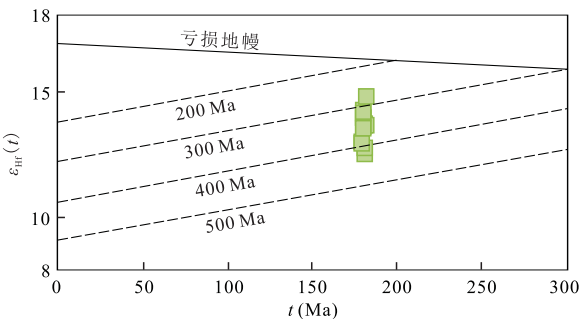


图 6 仁钦则花岗闪长岩体锆石 $\epsilon_{Hf}(t) - t$ 图解

Fig. 6 $\epsilon_{Hf}(t) - t$ diagram for zircons of the Renqinze granodiorites

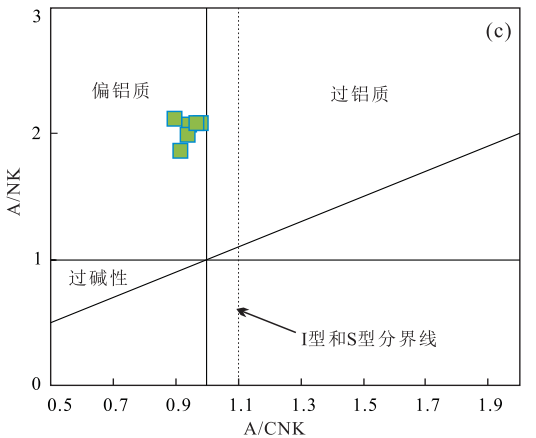
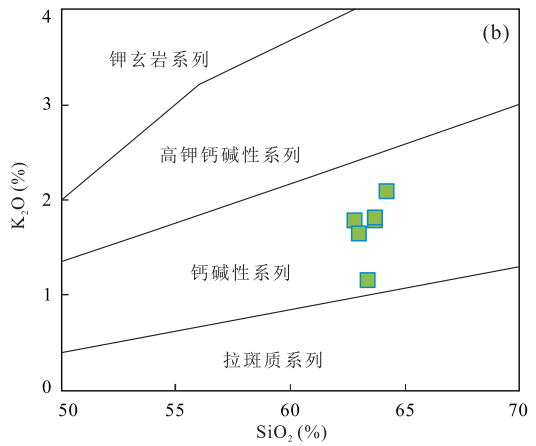
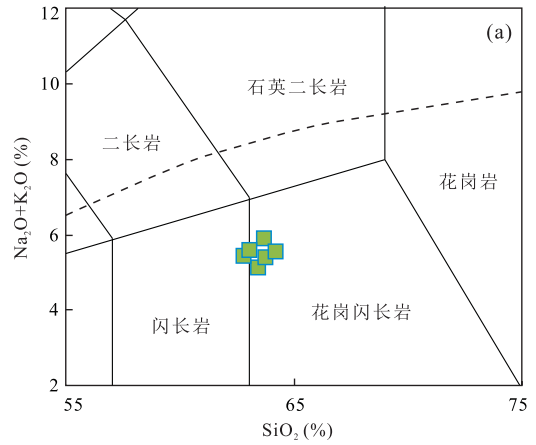


图 7 仁钦则花岗闪长岩体的 TAS 图解(a)、K₂O - SiO₂ 图解(b)和 A/NK - A/CNK 图解(c)

Fig. 7 Diagrams of TAS (a), K₂O - SiO₂ (b) and A/NK - A/CNK (c) for the Renqinze granodiorites

仁钦则侵入岩具有微弱的 Eu 异常 ($\delta Eu = 0.95 \sim 1.04$), 表现出明显的轻重稀土分异特征 ($(La/Yb)_N = 5.49 \sim 6.87$), 中重稀土分异并不明显 ($(Dy/Yb)_N = 1.03 \sim 1.07$; 图 8a). 仁钦则花岗质岩石明显富集大离子亲石元素(LILEs, 如 Ba、U 等), 亏损高场强元素(HFSEs, 如 Nb、Ta、Ti 等; 图 8b), 类似岛弧岩浆特征. 全岩样品锆饱和温度为 692~

表 3 仁钦则花岗闪长岩(16RQZ-11)锆石 Hf 同位素分析结果
Table 3 Hf isotopic results of the Renqinze granodiorite (16RQZ-11)

点号	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	2σ	t	$\epsilon_{\text{Hf}}(t)$	$t_{\text{DM1}}(\text{Ma})$	$t_{\text{DM2}}(\text{Ma})$	$f_{\text{Lu/Hf}}$
02	0.026 529	0.001 347	0.283 060	0.000 013	180	14.0	274	328	-0.96
04	0.036 221	0.001 763	0.283 069	0.000 018	180	14.3	264	310	-0.95
05	0.029 755	0.001 468	0.283 020	0.000 018	181	12.6	333	420	-0.96
06	0.035 706	0.001 739	0.283 061	0.000 016	181	14.0	276	329	-0.95
07	0.024 040	0.001 211	0.283 034	0.000 015	179	13.1	310	387	-0.96
08	0.035 033	0.001 729	0.283 054	0.000 016	181	13.7	286	345	-0.95
09	0.032 135	0.001 568	0.283 052	0.000 016	181	13.7	287	347	-0.95
10	0.029 546	0.001 465	0.283 051	0.000 016	182	13.7	287	347	-0.96
11	0.042 485	0.001 970	0.283 067	0.000 013	180	14.1	269	318	-0.94
12	0.047 662	0.002 288	0.283 085	0.000 016	182	14.8	244	277	-0.93
15	0.034 362	0.001 665	0.283 027	0.000 015	181	12.8	324	405	-0.95
16	0.037 713	0.001 769	0.283 051	0.000 016	180	13.6	291	353	-0.95
17	0.031 667	0.001 580	0.283 033	0.000 016	180	13.0	315	392	-0.95
19	0.029 945	0.001 494	0.283 048	0.000 019	180	13.5	293	357	-0.96

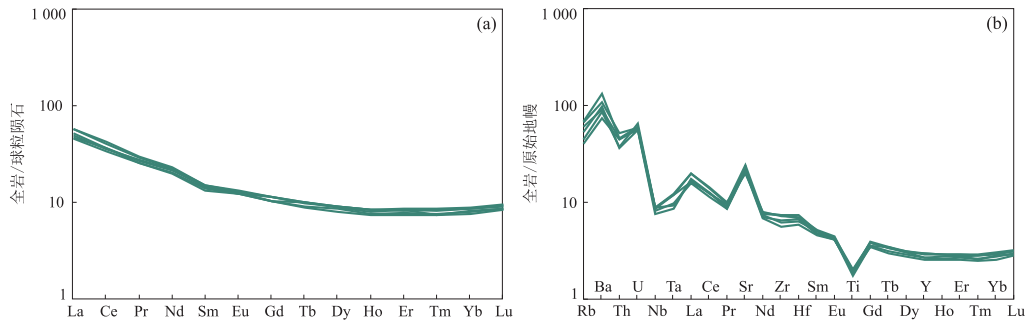


图 8 仁钦则花岗闪长岩球粒陨石标准化稀土元素配分模式(a)和原始地幔标准化多元素蛛网图(b)

Fig.8 Chondrite-normalized REE pattern (a) and PM-normalized multi-element spider diagram (b) for the Renqinze granodiorites

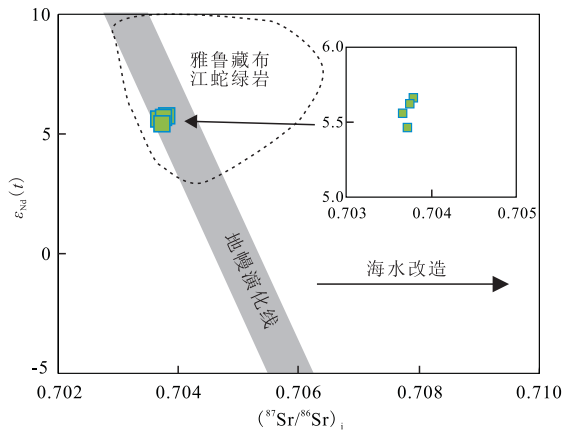


图 9 仁钦则花岗闪长岩 Sr-Nd 同位素组成

Fig.9 Sr-Nd isotopic compositions for the Renqinze granodiorites

雅鲁藏布江蛇绿岩数据引自 Xu and Castillo(2004)

706 °C, 平均为 701 ± 5 °C (表 4).

3.4 Sr-Nd 同位素

仁钦则花岗闪长岩样品的初始同位素比值利用其锆石加权平均年龄进行校正, 样品均具有较低的 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i (0.703 671~0.703 794) 和正的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值(5.41~5.66), 落在雅鲁藏布江蛇绿岩范围内(图 9; 表 5). 所有样品的 Nd 同位素亏损地幔模式年龄 (t_{DM}) 为 552~581 Ma, Nd 同位素二阶段模式年龄 (t_{DM2}) 为 478~497 Ma.

4 讨论

4.1 拉萨地块南部晚三叠世一早侏罗世岩浆时空分布

冈底斯岩基记录了拉萨地块南部中-新生代绝

表 4 仁钦则花岗闪长岩主量元素(%)和微量元素(10^{-6})含量Table 4 Major elements (%) and trace elements (10^{-6}) data of the Renqinze granodiorites

样品号	16RQZ-11	16RQZ-12	16RQZ-13	16RQZ-14	16RQZ-15	16RQZ-16
SiO ₂	63.39	62.77	63.65	63.70	63.00	64.18
TiO ₂	0.42	0.40	0.39	0.39	0.39	0.39
Al ₂ O ₃	16.52	16.56	16.22	16.36	16.43	16.57
Fe ₂ O _{3t}	4.79	5.14	4.96	5.14	5.41	4.87
MnO	0.13	0.15	0.17	0.16	0.17	0.15
MgO	1.96	2.19	1.93	1.97	2.15	1.98
CaO	5.83	4.94	4.94	5.23	5.09	5.05
Na ₂ O	3.98	3.65	4.14	3.61	3.94	3.47
K ₂ O	1.16	1.79	1.78	1.82	1.65	2.09
P ₂ O ₅	0.12	0.12	0.11	0.12	0.11	0.11
LOI	1.56	1.64	1.48	1.32	1.08	1.01
Total	99.87	99.35	99.77	99.8	99.43	99.87
K ₂ O/Na ₂ O	0.29	0.49	0.43	0.50	0.42	0.60
Cr	10.45	34.85	48.4	37.12	50.65	11.84
Co	10.91	14.1	14.58	11.52	11.94	11.77
Ni	5.116	5.869	5.183	5.669	6.066	5.435
Sc	10.95	11.67	10.65	9.658	10.96	9.986
V	82.22	89.97	75.81	84.66	87.25	82.58
Cu	9.051	14.5	12.48	10.34	15.9	13.28
Zn	56.2	70.34	62.1	58.64	59.47	60.98
Ge	1.721	1.426	1.449	1.48	1.481	1.353
Ga	15.69	16.3	15.98	15.5	15.53	15.77
Rb	26.21	42.92	29.146	34	39.14	43.95
Sr	514.4	468.4	475.4	462.7	426.4	445.4
Ba	531	766.3	619.2	695.7	638.8	954.4
Th	3.856	4.53	3.189	3.125	3.934	3.943
U	1.24	1.258	1.386	1.183	1.291	1.201
Pb	8.203	10.08	6.555	6.056	7.654	6.973
Nb	6.418	6.26	6.32	5.883	6.415	5.516
Ta	0.505	0.498	0.386	0.409	0.495	0.362
Zr	84.29	70.13	84.34	74.67	82.38	63.45
Hf	2.302	1.983	2.121	2.088	2.196	1.857
Y	13.65	13.5	12.39	12.46	13.77	11.86
La	13.80	11.26	11.79	11.06	13.73	12.33
Ce	25.02	22.44	21.96	20.57	25.94	22.47
Pr	2.77	2.56	2.65	2.43	2.82	2.43
Nd	10.60	10.15	10.37	9.62	10.90	9.41
Sm	2.29	2.26	2.18	2.12	2.34	2.05
Eu	0.74	0.71	0.73	0.71	0.76	0.71
Gd	2.33	2.32	2.13	2.13	2.35	2.10
Tb	0.37	0.37	0.38	0.34	0.38	0.33
Dy	2.28	2.33	2.25	2.17	2.32	2.05
Ho	0.48	0.48	0.46	0.44	0.48	0.42
Er	1.35	1.39	1.38	1.30	1.42	1.23
Tm	0.21	0.21	0.19	0.20	0.22	0.19
Yb	1.46	1.47	1.40	1.36	1.50	1.29
Lu	0.24	0.23	0.22	0.22	0.24	0.21
δEu	0.98	0.95	1.03	1.02	1.00	1.04
(La/Yb) _N	6.80	5.49	6.03	5.82	6.56	6.87
(Dy/Yb) _N	1.05	1.06	1.07	1.07	1.03	1.06
T _{Zr} *	704	699	706	701	706	692

注: T_{Zr} * 表示全岩 Zr 饱和温度, 计算方法据 Watson and Harrison(1983).

大多数岩浆-构造事件, 尽管目前已有大量学者对这些侵入岩体进行了年代学分析, 但研究主要集中在南拉萨地块的东部地区(张宏飞等, 2007; Ma *et al.*, 2017). 对于中西部地区的早中生代花岗质岩石研究显得相对薄弱, 仅有在南拉萨地块西部打加错地区发现的辉石角闪二长闪长岩显示其形成时代为 207.3 ± 3.6 Ma(宋绍玮等, 2014). 目前最老的中酸性岩浆记录为位于拉萨市南部昌果乡的晚三叠世早期安山岩, 其形成时代为 237.1 ± 1.1 Ma(Wang *et al.*, 2016b), 该区域内同时发育晚三叠世的玄武

岩和安山岩. 早侏罗世火山岩在拉萨市东部较为发育, 以达孜县和桑日县的叶巴组和桑日群火山岩为代表, 已有研究表明这些岩石均形成于 $195 \sim 174$ Ma(董彦辉等, 2006; Kang *et al.*, 2014; 黄丰等, 2015; Ma *et al.*, 2017). 自桑日县往东, 门巴、加查、米林、波密等区域均有晚三叠世-早侏罗世侵入体出露(Zhu *et al.*, 2011; 董昕和张泽明, 2013).

南拉萨地块中部拉萨与日喀则一线晚三叠世-早侏罗世岩浆岩以长英质侵入体为主, 主要分布在曲水、尼木、南木林等地区(张宏飞等, 2007), 侵入体

表 5 仁钦则花岗闪长岩 Sr-Nd 同位素分析结果

Table 5 Sr-Nd isotopic data of the Renqinze granodiorites

样品号	16RQZ-11	16RQZ-12	16RQZ-14	16RQZ-16	16RQZ-16-R
Rb(10^{-6})	26.21	42.92	34.00	43.95	43.95
Sr(10^{-6})	514.4	468.4	462.7	445.4	445.4
$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	0.15	0.27	0.21	0.29	0.29
$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	0.704 171	0.704 350	0.704 296	0.704 454	0.704 438
1σ	0.000 009	0.000 008	0.000 006	0.000 009	0.000 007
$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$	0.703 794	0.703 671	0.703 752	0.703 724	0.703 707
Sm(10^{-6})	2.29	2.26	2.12	2.05	2.05
Nd(10^{-6})	10.60	10.15	9.62	9.41	9.41
$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13
$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	0.512 850	0.512 850	0.512 851	0.512 841	0.512 839
1σ	0.000 005	0.000 004	0.000 006	0.000 005	0.000 005
$(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_i$	0.512 696	0.512 691	0.512 694	0.512 686	0.512 683
$\epsilon_{\text{Nd}}(t)$	5.66	5.56	5.62	5.46	5.41
$t_{\text{DM}}(\text{Ma})$	552	580	567	576	581
$t_{\text{DM2}}(\text{Ma})$	479	480	478	493	497

注:16RQZ-16-R 为重复样。

岩性主要为花岗岩、石英闪长岩、花岗闪长岩和闪长岩。在曲水和东嘎地区出露少量基性的辉长岩, Wang *et al.* (2017) 认为其为地壳生长和壳幔物质相互作用的产物。同时,日喀则西部谢通门地区局部也有早侏罗世长英质侵入体出现 (Guo *et al.*, 2013; Xu *et al.*, 2017), 本文的仁钦则花岗闪长岩也位于谢通门区域内。

综上所述,南拉萨地块中西部地区和东部地区均发生晚三叠世—早侏罗世岩浆活动,但中西部地区未发现火山岩,仅出现大量侵入体。晚三叠世岩浆活动主体集中于中东部地区,日喀则以西地区早中生代岩浆活动较少,形成时代以早侏罗世为主。

4.2 拉萨地块仁钦则花岗闪长岩成因和源区特征

仁钦则花岗闪长岩显示较高的 SiO_2 含量 (62.77%~64.18%; 表4), 而且具有明显的偏铝质岩石特征 ($A/\text{CNK} < 1$; 图 7c), 表明其不可能是 S 型花岗岩 (Clemens, 2003)。样品中并未出现强富铝矿物, 如白云母、电气石等, 其亏损的 Sr-Nd 同位素 (图 9) 表明花岗闪长岩属于 I 型花岗岩系列。已有研究表明中酸性岩石可能是基性岩浆结晶分异或下地壳基性源岩部分熔融的结果 (Patiño Douce, 1999; Altherr *et al.*, 2000)。仁钦则花岗闪长岩样品显示了变化范围较窄的主量元素组成 (表 4), 且区域内并未有大范围基性岩石出露, 暗示其不可能由基性岩浆结晶分异形成。在 La-La/Yb 图解上样品也显示出部分熔融趋势 (图 10), 进一步证实了仁钦则花岗闪长岩源自源区岩石的部分熔融。

仁钦则花岗闪长岩具有较低的全碱 ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$) 含量、 $\text{Al}_2\text{O}_3 / (\text{FeOt} + \text{MgO} + \text{TiO}_2)$ 比值和

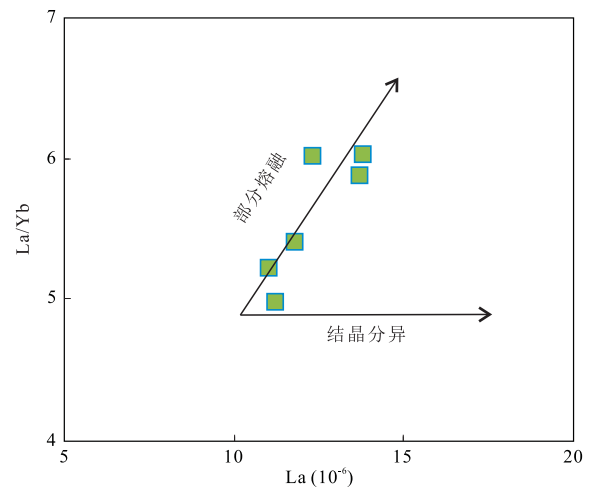


图 10 仁钦则花岗闪长岩 La-La/Yb 图解

Fig.10 La-La/Yb diagram for the Renqinze granodiorites

相对较高的 ($\text{CaO} + \text{FeOt} + \text{MgO} + \text{TiO}_2$) 含量, 在 Patiño Douce (1999) 总结的各类中酸性岩石的源区分类图解中全部落在角闪岩熔体范围, 表明其岩浆源区可能为富水的基性岩石。花岗闪长岩具有低的 $\text{Al}_2\text{O}_3 / (\text{FeOt} + \text{MgO})$ 和高的 $\text{CaO} / (\text{FeOt} + \text{MgO})$ 比值, 其很可能属于变基性岩部分熔融的产物 (图 11)。值得注意的是, 样品中的锆石具有非常一致的晶体形态、年代学结果和锆石 Hf 同位素组成, 并未出现捕获晶体, 表明仁钦则地区侵入岩形成过程中并未受到古老地壳物质的混染, 源自单一的富水基性岩石源区。

研究表明岩浆锆石具有富集 Hf、Y、HREE 而相对亏损 LREE 的特征, 并且具有 Ce 正异常和 Eu 负异常 (Hoskin, 2003)。仁钦则花岗闪长岩中的锆石

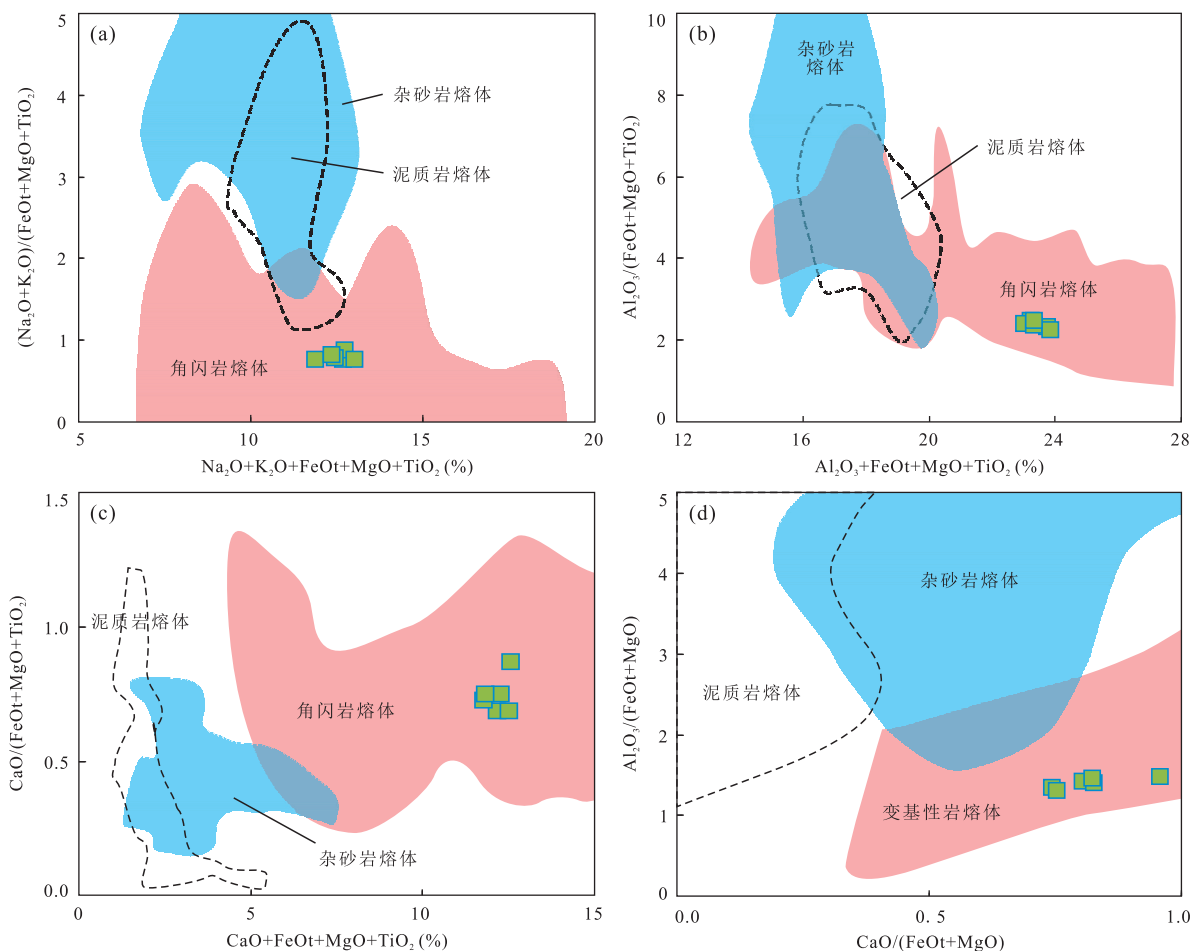


图 11 仁钦则花岗闪长岩的源区判定图解

Fig.11 The discrimination diagrams showing the source composition for the Renqinze granodiorites

修改自 Patiño Douce(1999); Altherr *et al.* (2000)

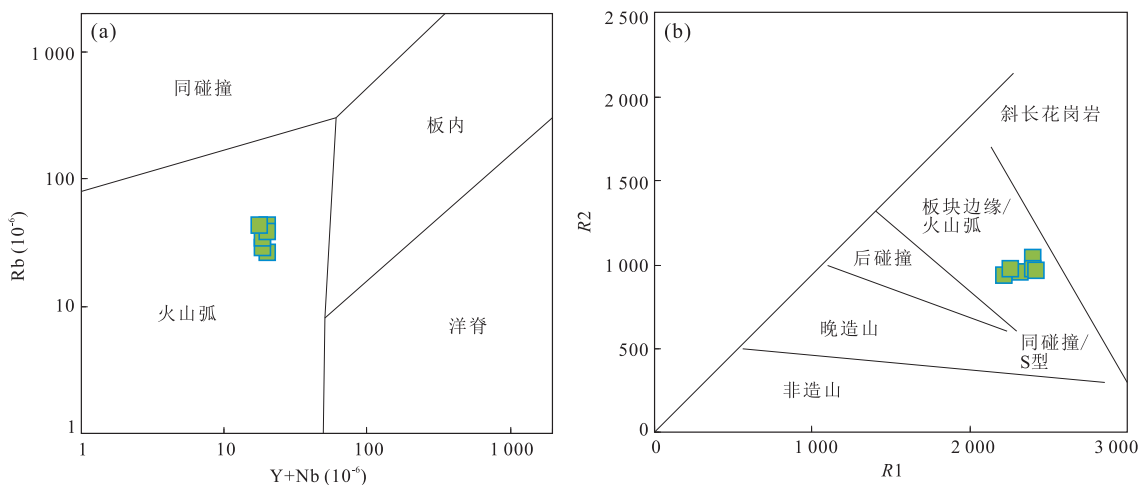


图 12 仁钦则花岗闪长岩构造背景判别图解

Fig.12 Tectonic discrimination diagrams for the Renqinze granodiorites

据 Pearce *et al.* (1984); Batchelor and Bowden (1985)

显示出类似的微量元素特征,其 Ce 正异常与 Huang *et al.* (2017)所报道的一致(图 5),表明其源

区可能为较氧化的环境.在氧化条件下,Ce⁴⁺与 Zr⁴⁺具有相同电荷量和相似的离子半径,容易进入

锆石晶格中形成 Ce 正异常 (Claiborne *et al.*, 2010), 同时这些锆石显示出相对较弱的 Eu 负异常。在还原条件下, Eu 被还原成 Eu^{2+} 而无法进入锆石晶格中形成负异常, 此时全岩 REE 并不会表现出明显的 Eu 异常, 似乎与本文中花岗闪长岩未出现 Eu 异常一致。但是, 锆石显示的 Ce 正异常表明其不可能源自还原环境, 因此, Eu 负异常主要源自与斜长石相关的岩浆形成环境 (Hinton and Upton, 1991), 仁钦则花岗质岩石很可能来自斜长石较少的源区。

仁钦则花岗闪长岩中的锆石 Ti 温度计与全岩样品的 Zr 饱和温度显示出较好的一致性, 均为 700 °C 左右, 在正常地热梯度环境下其对应的岩浆深度为 30 km 左右, 表明仁钦则侵入岩样品均形成于下地壳环境。尽管全岩微量元素显示部分轻重稀土分异, 但重稀土元素如 Y、Yb 较为富集, 较低的 $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 比值 (5.49~6.87) 反映了花岗闪长岩不可能来自含有石榴石的地壳源区。因此, 本文中的花岗闪长岩主要来自下地壳源区, 未达到石榴石相环境, 可能含有少量斜长石, 与锆石微量元素组成所反映的岩浆形成环境一致。

岩浆锆石具有较稳定的物理化学性质, 在形成后基本不会受到后期风化作用及低程度变质作用的影响。锆石中 Hf 同位素的扩散速率极低、且极富集 Hf 元素而缺乏 Lu 元素, 因此, 锆石 Hf 同位素组成可以代表岩浆形成时的同位素组成特征。仁钦则花岗闪长岩样品中的锆石显示出极高的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值 (12.6~14.8), 表明其很可能来自新生地壳物质的部分熔融。全岩 Sr-Nd 同位素显示出类似 Hf 同位素的组成特征, 并且样品完全落在地幔演化线范围内, 样品中的锆石 Hf 和全岩 Nd 同位素二阶段模式年龄均小于 500 Ma, 均显示出新生地壳物质熔融的地球化学特征。综上所述, 仁钦则花岗闪长岩主要源自新生下地壳的部分熔融, 其源区可能遭受了早期的俯冲交代作用而富水, 从而在正常地温条件下发生部分熔融。

4.3 对新特提斯洋俯冲过程的指示

尽管晚三叠世—早侏罗世岩浆活动在南拉萨地块广泛发育, 然而对其形成的地球动力学背景目前还存在较大争议。Zhu *et al.* (2011) 提出班公湖—怒江洋南向俯冲促使了新特提斯弧后盆地在晚三叠世形成。中—南拉萨地块的晚三叠世—早侏罗世岩浆活动可能形成于班公湖—怒江洋南向俯冲时在新特提斯洋北侧形成的被动大陆边缘背景。然而拉萨地块古地理重建结果表明, 其南北向延伸宽度可达

500 km 以上 (Murphy *et al.*, 1997), 不太可能受到班公湖—怒江洋的影响。其次, 若新特提斯洋形成于班公湖—怒江洋南向俯冲拉开的弧后盆地, 北—中拉萨地块内应该能够发现晚三叠世—早侏罗世岩浆活动, 目前仅在安多地区发现少量类似侵入体, 这与南向俯冲模式不符。再次, Zeng *et al.* (2018) 对拉萨地块中部永珠蛇绿岩研究认为, 弧后盆地初期可能形成类似 E-MORB 的基性岩石。Ma *et al.* (2015) 对拉萨附近达孜地区晚白垩世基性岩浆活动研究认为, 在弧后盆地形成时期同样出现类似 E-MORB 岩石, 同时具有较高的地幔熔融和潜能温度。目前位于拉萨地块南部的早侏罗世岩浆岩主要为叶巴组、桑日群火山岩及位于日喀则与拉萨之间的部分辉长岩, 这些岩石均显示出类似岛弧玄武岩特征, 为大洋俯冲背景下洋壳脱水交代地幔楔的产物 (董彦辉等, 2006; Kang *et al.*, 2014; Xu *et al.*, 2017), 并非形成于弧后盆地构造背景。仁钦则花岗闪长岩的锆石微量元素和全岩的 Zr 饱和温度也反映了一个正常的热梯度, 并没有出现热异常事件, 可能代表的是洋壳俯冲脱水后促使上部岩石圈熔融形成的岩浆事件。

位于拉萨地块中南部的松多榴辉岩可能代表了松多洋消亡后大陆超高压变质的产物 (杨经绥等, 2006); 董昕和张泽明 (2013) 在加查和桑日地区厘定出一套与变质事件相关的早侏罗世岩浆岩组合, 认为其可能是松多洋壳回转或断离后软流圈上涌导致地幔楔发生部分熔融的产物。然而 Yang *et al.* (2009) 的研究表明, 松多洋盆的消失可能发生在 260 Ma; 数值模拟结果显示, 板片断离往往发生在大陆碰撞后 20 Ma 以内 (van Hunen and Allen, 2011)。因此在早侏罗世时期, 松多洋已完全消失, 该时期内形成的岩浆岩与松多洋盆的俯冲或断离过程无关。松多榴辉岩仅在拉萨地块南部出现, 松多洋的演化过程同样无法解释南拉萨地块西部同时代的岩浆岩成因。

仁钦则花岗闪长岩具有明显的 Sr 正异常, 富集 LILEs 并亏损 HFSEs, 具有明显的岛弧岩浆特征。图 12a 进一步证实了仁钦则花岗闪长岩源自岛弧环境, 图 12b 表明其主要形成于汇聚板块边缘, 属于活动大陆边缘弧背景。通过对叶巴组和桑日群火山—沉积岩的研究也表明它们均形成于新特提斯洋北向俯冲背景 (董彦辉等, 2006; Kang *et al.*, 2014; 黄丰等, 2015; 熊秋伟等, 2015)。因此, 笔者认为仁钦则花岗闪长岩属于新特提斯洋北向俯冲的产物 (图 13)。南拉萨地块内部出现的大量晚三叠世—早侏罗世花

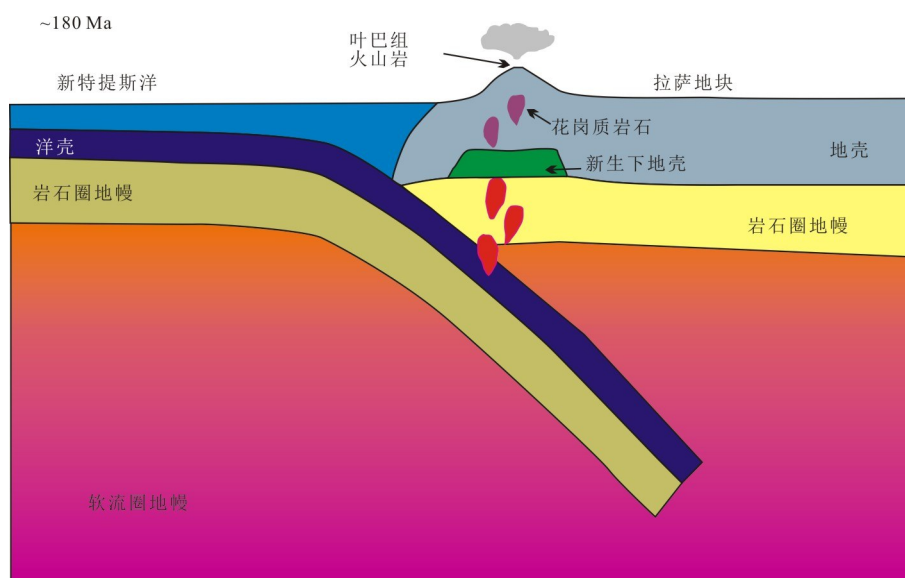


图 13 早侏罗世新特提斯洋北向俯冲过程及岩浆活动简图

Fig.13 A conceptual diagram illustrating the formation of the magmatic rocks in the Lhasa terrane during the Early Jurassic

岗质岩石均显示出类似的岛弧地球化学特征,暗示其形成于相似的动力学背景之下。雅鲁藏布江缝合带内中—晚三叠世放射虫及双壳类化石(Yin and Grant-Mackie, 2005)的发现,可能代表新特提斯洋在该时期内已经打开。晚三叠世—早侏罗世岩浆岩的发现,表明新特提斯洋在该时期内已经开始向北俯冲,俯冲洋壳脱水促进了上覆地幔楔的部分熔融,形成了叶巴组大陆边缘弧型火山岩及大量新生地壳重熔的花岗质岩体。

5 结论

(1) 仁钦则地区花岗闪长岩形成时代约为 180 Ma,南拉萨地块东部存在大量早侏罗世岩浆活动,西部同时代的岩浆活动较少。

(2) 仁钦则侵入岩具有较均一的主、微量元素和亏损的 Sr-Nd-Hf 同位素组成,主要源于新生镁铁质下地壳的部分熔融。

(3) 仁钦则花岗闪长岩显示出类似岛弧岩浆的地球化学特征,形成于新特提斯洋北向俯冲背景之下。晚三叠世—早侏罗世南拉萨地块内部弧岩浆活动频繁,新特提斯洋打开时间可能在此之前。

致谢:衷心感谢编委和 2 位匿名审稿人对本文提出的宝贵修改意见。感谢中国科学院广州地球化学研究所王鑫玉和孙胜玲老师在岩石主量、微量元素分析方面的帮助。感谢桂林理工大学袁永海老师在 Sr-Nd 同位素分析过程中提供的帮助。

References

- Altherr, R., Holl, A., Hegner, E., et al., 2000. High-Potassium, Calc-Alkaline I-Type Plutonism in the European Variscides: Northern Vosges (France) and Northern Schwarzwald (Germany). *Lithos*, 50 (1–3): 51–73. [https://doi.org/10.1016/S0024-4937\(99\)00052-3](https://doi.org/10.1016/S0024-4937(99)00052-3)
- Batchelor, R. A., Bowden, P., 1985. Petrogenetic Interpretation of Granitoid Rock Series Using Multicationic Parameters. *Chemical Geology*, 48 (1–4): 43–55. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(85\)90034-8](https://doi.org/10.1016/0009-2541(85)90034-8)
- Claiborne, L. L., Miller, C. F., Wooden, J. L., 2010. Trace Element Composition of Igneous Zircon: A Thermal and Compositional Record of the Accumulation and Evolution of a Large Silicic Batholith, Spirit Mountain, Nevada. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 160 (4): 511–531. <https://doi.org/10.1007/s00410-010-0491-5>
- Clemens, J., 2003. S-Type Granitic Magmas-Petrogenetic Issues, Models and Evidence. *Earth-Science Reviews*, 61 (1–2): 1–18. [https://doi.org/10.1016/S0012-8252\(02\)00107-1](https://doi.org/10.1016/S0012-8252(02)00107-1)
- Dong, X., Zhang, Z. M., Liu, F., et al., 2011. Zircon U-Pb Geochronology of the Nyainqentanglha Group from the Lhasa Terrane: New Constraints on the Triassic Orogeny of the South Tibet. *Journal of Asian Earth Sciences*, 42 (4): 732–739. <https://doi.org/10.1016/j.jseae.2011.01.014>
- Dong, X., Zhang, Z. M., 2013. Genesis and Tectonic Significance of the Early Jurassic Magmatic Rocks from the Southern Lhasa Terrane. *Acta Petrologica Sinica*, 29 (6): 1933–1948 (in Chinese with English abstract).

- Dong, Y. H., Xu, J. F., Zeng, Q. G., et al., 2006. Is there a Neo-Tethys' Subduction Record Earlier than Arc Volcanic Rocks in the Sangri Group? *Acta Petrologica Sinica*, 22(3): 661–668 (in Chinese with English abstract).
- Guo, L. S., Liu, Y. L., Liu, S. W., et al., 2013. Petrogenesis of Early to Middle Jurassic Granitoid Rocks from the Gangdese Belt, Southern Tibet: Implications for Early History of the Neo-Tethys. *Lithos*, 179: 320–333. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2013.06.011>
- Hinton, R. W., Upton, B. G. J., 1991. The Chemistry of Zircon: Variations within and between Large Crystals from Syenite and Alkali Basalt Xenoliths. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 55(11): 3287–3302. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(91\)90489-r](https://doi.org/10.1016/0016-7037(91)90489-r)
- Hoskin, P. W. O., 2003. The Composition of Zircon and Igneous and Metamorphic Petrogenesis. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 53(1): 27–62. <https://doi.org/10.2113/0530027>
- Huang, F., Chen, J. L., Xu, J. F., et al., 2015. Os-Nd-Sr Isotopes in Miocene Ultrapotassic Rocks of Southern Tibet: Partial Melting of a Pyroxenite-Bearing Lithospheric Mantle? *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 163: 279–298. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2015.04.053>
- Huang, F., Xu, J. F., Chen, J. L., et al., 2015. Early Jurassic Volcanic Rocks from the Yeba Formation and Sangri Group: Products of Continental Marginal Arc and Intra-Oceanic Arc during the Subduction of Neo-Tethys Ocean? *Acta Petrologica Sinica*, 31(7): 2089–2100 (in Chinese with English abstract).
- Huang, F., Xu, J. F., Chen, J. L., et al., 2016. Two Cenozoic Tectonic Events of N-S and E-W Extension in the Lhasa Terrane: Evidence from Geology and Geochronology. *Lithos*, 245: 118–132. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2015.08.014>
- Huang, F., Xu, J. F., Zeng, Y. C., et al., 2017. Slab Breakoff of the Neo-Tethys Ocean in the Lhasa Terrane Inferred from Contemporaneous Melting of the Mantle and Crust. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 18(11): 4074–4095. <https://doi.org/10.1002/2017gc007039>
- Kang, Z. Q., Xu, J. F., Dong, Y. H., et al., 2008. Cretaceous Volcanic Rocks of Zenong Group in North-Middle Lhasa Block: Products of Southward Subducting of the Slainajap Ocean? *Acta Petrologica Sinica*, 24(2): 303–314 (in Chinese with English abstract).
- Kang, Z. Q., Xu, J. F., Wilde, S. A., et al., 2014. Geochronology and Geochemistry of the Sangri Group Volcanic Rocks, Southern Lhasa Terrane: Implications for the Early Subduction History of the Neo-Tethys and Gangdese Magmatic Arc. *Lithos*, 200–201: 157–168. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2014.04.019>
- Li, X. W., Mo, X. X., Scheltens, M., et al., 2016. Mineral Chemistry and Crystallization Conditions of the Late Cretaceous Mamba Pluton from the Eastern Gangdese, Southern Tibetan Plateau. *Journal of Earth Science*, 27(4): 545–570. <https://doi.org/10.1007/s12583-016-0713-5>
- 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 from Mantle Xenoliths. *Journal of Petrology*, 51(1–2): 537–571. <https://doi.org/10.1093/ptrology/egp082>
- Ma, L., Wang, Q., Wyman, D. A., et al., 2015. Late Cretaceous Back-Arc Extension and Arc System Evolution in the Gangdese Area, Southern Tibet: Geochronological, Petrological, and Sr-Nd-Hf-O Isotopic Evidence from Dagze Diabases. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 120(9): 6159–6181. <https://doi.org/10.1002/2015jb011966>
- Ma, X. X., Xu, Z. Q., Chen, X. J., et al., 2017. The Origin and Tectonic Significance of the Volcanic Rocks of the Yeba Formation in the Gangdese Magmatic Belt, South Tibet. *Journal of Earth Science*, 28(2): 265–282. <https://doi.org/10.1007/s12583-016-0925-8>
- Murphy, M. A., Yin, A., Harrison, T. M., et al., 1997. Did the Indo-Asian Collision Alone Create the Tibetan Plateau? *Geology*, 25(8): 719. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1997\)025<0719:dtiaca>2.3.co;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1997)025<0719:dtiaca>2.3.co;2)
- Patino Douce, A. E., 1999. What do Experiments Tell us about the Relative Contributions of Crust and Mantle to the Origin of Granitic Magmas? *Geological Society, London, Special Publications*, 168(1): 55–75. <https://doi.org/10.1144/gsl.sp.1999.168.01.05>
- 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. <https://doi.org/10.1093/ptrology/25.4.956>
- Song, S. W., Liu, Z., Zhu, D. C., et al., 2014. Zircon U-Pb Chronology and Hf Isotope of the Late Triassic Andesitic Magmatism in Dajiacuo, Tibet. *Acta Petrologica Sinica*, 30(10): 3100–3112 (in Chinese with English abstract).
- van Hunen, J. V., Allen, M. B., 2011. Continental Collision and Slab Break-Off: A Comparison of 3-D Numerical Models with Observations. *Earth and Planetary Science Letters*, 302(1–2): 27–37. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2010.11.035>
- Wang, B. D., Chen, J. L., Xu, J. F., et al., 2014. Geochemical

- and Sr-Nd-Pb-Os Isotopic Compositions of Miocene Ultrapotassic Rocks in Southern Tibet: Petrogenesis and Implications for the Regional Tectonic History. *Lithos*, 208–209: 237–250. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2014.09.008>
- Wang, B. D., Wang, L. Q., Chung, S. L., et al., 2016a. Evolution of the Bangong-Nujiang Tethyan Ocean: Insights from the Geochronology and Geochemistry of Mafic Rocks within Ophiolites. *Lithos*, 245: 18–33. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2015.07.016>
- Wang, C., Ding, L., Zhang, L. Y., et al., 2016b. Petrogenesis of Middle-Late Triassic Volcanic Rocks from the Gangdese Belt, Southern Lhasa Terrane: Implications for Early Subduction of Neo-Tethyan Oceanic Lithosphere. *Lithos*, 262: 320–333. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2016.07.021>
- Wang, R. Q., Qiu, J. S., Yu, S. B., et al., 2017. Crust-mantle Interaction during Early Jurassic Subduction of Neo-Tethyan Oceanic Slab: Evidence from the Dongga Gabbro-granite Complex in the Southern Lhasa Subterranean, Tibet. *Lithos*, 292–293: 262–277. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2017.09.018>
- Watson, E. B., 2005. Zircon Thermometer Reveals Minimum Melting Conditions on Earliest Earth. *Science*, 308(5723): 841–844. <https://doi.org/10.1126/science.1110873>
- Watson, E. B., Harrison, T. M., 1983. Zircon Saturation Revisited: Temperature and Composition Effects in a Variety of Crustal Magma Types. *Earth and Planetary Science Letters*, 64(2): 295–304. [https://doi.org/10.1016/0012-821x\(83\)90211-x](https://doi.org/10.1016/0012-821x(83)90211-x)
- Xiong, Q. W., Chen, J. L., Xu, J. F., et al., 2015. LA-ICP-MS Zircon U-Pb Geochronology, Geochemical Characteristics and Genetic Study of Yeba Formation Lavas in Demingding Area, Southern Tibet. *Geological Bulletin of China*, 34(9): 1645–1655 (in Chinese with English abstract).
- Xu, B., Hou, Z. Q., Zheng, Y. C., et al., 2017. In Situ Elemental and Isotopic Study of Diorite Intrusions: Implication for Jurassic Arc Magmatism and Porphyry Cu-Au Mineralisation in Southern Tibet. *Ore Geology Reviews*, 90: 1063–1077. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2017.04.036>
- Xu, J. F., Castillo, P. R., 2004. Geochemical and Nd-Pb Isotopic Characteristics of the Tethyan Asthenosphere: Implications for the Origin of the Indian Ocean Mantle Domain. *Tectonophysics*, 393(1–4): 9–27. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2004.07.028>
- Yang, J. S., Xu, Z. Q., Geng, Q. R., et al., 2006. A Possible New HP/UHP(?) Metamorphic Belt in China: Discovery of Eclogite in the Lhasa Terrane, Tibet. *Acta Geologica Sinica*, 80(12): 1783–1792 (in Chinese with English abstract).
- Yang, J. S., Xu, Z. Q., Li, Z. L., et al., 2009. Discovery of an Eclogite Belt in the Lhasa Block, Tibet: A New Border for Paleo-Tethys? *Journal of Asian Earth Sciences*, 34(1): 76–89. <https://doi.org/10.1016/j.jseas.2008.04.001>
- Yin, J. R., Grant-Mackie, J. A., 2005. Late Triassic-Jurassic Bivalves from Volcanic Sediments of the Lhasa Block, Tibet. *New Zealand Journal of Geology and Geophysics*, 48(3): 555–577. <https://doi.org/10.1080/00288306.2005.9515133>
- Zeng, Y. C., Chen, J. L., Xu, J. F., et al., 2016. Sediment Melting during Subduction Initiation: Geochronological and Geochemical Evidence from the Darutso High-Mg Andesites within Ophiolite Melange, Central Tibet. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 17(12): 4859–4877. <https://doi.org/10.1002/2016gc006456>
- Zeng, Y. C., Xu, J. F., Chen, J. L., et al., 2018. Geochronological and Geochemical Constraints on the Origin of the Yunzhug Ophiolite in the Shiquanhe-Yunzhug-Namu Tso Ophiolite Belt, Lhasa Terrane, Tibetan Plateau. *Lithos*, 300–301: 250–260. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2017.11.025>
- Zhang, H. F., Xu, W. C., Guo, J. Q., 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. *Acta Petrologica Sinica*, 23(6): 1347–1353 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Z., Song, J. L., Tang, J. X., et al., 2017. Petrogenesis, Diagenesis and Mineralization Ages of Galale Cu-Au Deposit, Tibet: Zircon U-Pb Age, Hf Isotopic Composition and Molybdenite Re-Os Dating. *Earth Science*, 42(6): 862–880 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2017.523>
- Zhu, D. C., Zhao, Z. D., Niu, Y. L., et al., 2011. The Lhasa Terrane: Record of a Microcontinent and Its Histories of Drift and Growth. *Earth and Planetary Science Letters*, 301(1–2): 241–255. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2010.11.005>
- Zhu, D. C., Zhao, Z. D., Niu, Y., et al., 2013. The Origin and Pre-Cenozoic Evolution of the Tibetan Plateau. *Gondwana Research*, 23(4): 1429–1454. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2012.02.002>

附中文参考文献

- 董昕, 张泽明, 2013. 拉萨地体南部早侏罗世岩浆岩的成因和构造意义. *岩石学报*, 29(6): 1933–1948.

- 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? 岩石学报,22(3):661—668.
- 黄丰,许继峰,陈建林,等,2015.早侏罗世叶巴组与桑日群火山岩:特提斯洋俯冲过程中的陆缘弧与洋内弧? 岩石学报,31(7):2089—2100.
- 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:Slainajap 洋南向俯冲的产物? 岩石学报,24(2):303—314.
- 宋绍玮,刘泽,朱弟成,等,2014.西藏打加错晚三叠世安山质岩浆作用的锆石 U-Pb 年代学和 Hf 同位素.岩石学报,30(10):3100—3112.
- 熊秋伟,陈建林,许继峰,等,2015.拉萨地块南部得明顶地区叶巴组火山岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及其成因.地质通报,34(9):1645—1655.
- 杨经绥,许志琴,耿全如,等,2006.中国境内可能存在一条新的高压/超高压(?)变质带——青藏高原拉萨地体中发现榴辉岩带.地质学报,80(12):1783—1792.
- 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.岩石学报,23(6):1347—1353.
- 张志,宋俊龙,唐菊兴,等,2017.西藏嘎拉勒铜金矿床的成岩成矿时代与岩石成因:锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素组成及辉钼矿 Re-Os 定年.地球科学,42(6):862—880.
<https://doi.org/10.3799/dqkx.2017.523>