https://doi.org/10.3799/dqkx.2022.167



西藏中拉萨地块门巴花岗闪长岩成因及深部动力学过程

王旭辉1,郎兴海1*,梁海辉2,杜良艺1,邓煜霖1,何青1,董咪1

1. 成都理工大学地球科学学院,四川成都 610059
2. 华东冶金地质勘查物探队,安徽芜湖 241000

摘 要:为了探讨拉萨地块晚白垩世岩浆作用的深部动力学机制,对中拉萨地块南缘门巴花岗闪长岩开展了岩相学、年代学、 岩石地球化学及矿物化学研究.LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年表明门巴花岗闪长岩侵位于晚白垩世(83.2 Ma±0.9 Ma).岩石地 球化学特征显示门巴花岗闪长岩为埃达克质岩石,电子探针数据揭示斜长石属于中一奥长石(An:16.2~34.7).综合分析本文 认为门巴花岗闪长岩的母岩浆为幔源镁铁质岩浆底侵诱发加厚下地壳熔融并与之发生混合作用的结果.结合晚白垩世岩浆 岩成岩环境及时空分布特征,认为拉萨地块南部晚白垩世岩浆作用主要受新特提斯洋脊俯冲控制,软流圈地幔沿洋中脊裂隙 板片窗上涌诱引了南拉萨地块南缘晚白垩世大规模岩浆作用,而软流圈物质沿切割洋中脊的转换断层撕裂板片窗上涌诱发了 近似垂直前者分布的小规模板内岩浆作用.

关键词:拉萨地块;晚白垩世;埃达克质岩石;岩浆混合;洋脊俯冲;板片窗;岩石学.

中图分类号: P581 **文章编号:** 1000-2383(2024)02-577-17 **收稿日期:** 2022-12-27

Petrogenesis and Geodynamic Processes of the Mamba Granodiorite, Central Lhasa Block, Xizang

Wang Xuhui¹, Lang Xinghai^{1*}, Liang Haihui², Du Liangyi¹, Deng Yulin¹, He Qing¹, Dong Mi¹

College of Earth Science, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China
East China Metallurgical Geological Prospecting Bureau of Geophysical Prospecting Team, Wuhu 241000, China

Abstract: In order to discuss thedynamic mechanism of Late Cretaceous magmatism in the Lhasa block, this paper carried out petrographic, chronological, geochemical and mineral chemistry studies on the Menba granodiorites in the southern margin of the central Lhasa block. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating indicates that the Menba granodiorites emplaced in the Late Cretaceous (83.2 Ma \pm 0.9 Ma). The geochemical characteristics show that the Menba granodiorites are adakitic rocks. Electron microprobe data reveal that plagioclase belongs to andesine and oligoclase (An=16.2 - 34.7). This paper believes that the parent magmas of the Menba granodiorites may be a result of magma mixing between mantle- and crust-derived magmas and the mantle-derived magma underplating may have led to partial melting of the thickened lower crust and then reactions between them. Combined with the

*通讯作者:郎兴海, ORCID:0000-0002-3309-3667. E-mail:langxinghai@126. com

Citation: Wang Xuhui, Lang Xinghai, Liang Haihui, Du Liangyi, Deng Yulin, He Qing, Dong Mi, 2024. Petrogenesis and Geodynamic Processes of the Mamba Granodiorite, Central Lhasa Block, Xizang. *Earth Science*, 49(2):577-593.

基金项目:四川省科技计划项目(No.2020JDJQ0042);国家自然科学基金项目(No.41972084);成都理工大学珠峰科学研究计划 (2020ZF11407);西北大学大陆动力学国家重点实验室开放基金(No.18LCD04);自然资源部深地资源成矿作用与矿产预测重点实 验室开放基金(No.ZS1911);中国地质调查局项目(Nos.DD20190167,DD20160346).

作者简介:王旭辉(1993-),男,博士,矿物学、岩石学、矿床学专业,主要从事青藏高原岩浆-成矿作用研究.ORCID:0000-0002-3216-3299. E-mail: wangxuhui618@126.com

引用格式:王旭辉,郎兴海,梁海辉,杜良艺,邓煜霖,何青,董咪,2024.西藏中拉萨地块门巴花岗闪长岩成因及深部动力学过程.地球科学,49 (2):577-593.

diagenetic environment and spatial distribution characteristics of the Late Cretaceous magmatic rocks. This paper concludes that the Late Cretaceous magmatism in the southern Lhasa block was mainly controlled by the ridge subduction of the Neo-Tethys. The upwelling of asthenosphere mantle along the slab window of the mid-ocean ridge induced the Late Cretaceous large-scale magmatism in the southern margin of the south Lhasa block, while the upwelling of asthenosphere material along the tear slab window of transition fault that cuts the mid-ocean ridge induced the small-scale intraplate magmatic belt, which approximately perpendicular to the large-scale magmatism in the southern margin of the south Lhasa block.

Key words: Lhasa block; Late Cretaceous; adakitic rock; magma mixing; ridge subduction; slab window; petrology.

0 引言

拉萨地块南部(南拉萨地块及中拉萨地块南 缘)发育的巨型岩浆岩带保存了晚古生代到新生代 岩浆岩,这些岩浆岩记录了西藏南部新特提斯洋开 启、扩张、俯冲消减及闭合消亡等一系列重要地质 事件,是重现新特提斯洋演化过程的重要载体(Zhu et al., 2013, 2019; Lang et al., 2019, 2020; Wang et al., 2019, 2020, 2021, 2022a, 2022b). 大量年代学研 究表明晚白垩世(100~80 Ma)岩浆活动是拉萨地 块南部冈底斯岩浆带最主要的岩浆爆发期之一 (Ma et al., 2013a; Zhu et al., 2019),该时期形成的 岩浆岩分布广泛、类型复杂,主要包括辉长岩、闪长 岩、英云闪长岩、花岗闪长岩、花岗岩以及安山质一 英安质火山岩等各种岩石类型,构成了一个长达 500 km, 宽约 100 km 的岩浆带(图 1b、表 1). 近年来 对拉萨地块南部晚白垩世岩浆作用开展了大量研 究,普遍认为这期岩浆事件与新特提斯洋壳北向俯 冲消减作用有关(Zhang et al., 2010; Ma et al., 2013a; Zhu et al., 2019), 但是对其深部动力学过程 目前仍然存在颇多争议,主要存在以下观点和模 型,如新特提斯洋壳正常角度的稳定俯冲(Chu et al., 2006; Ji et al., 2009)、新特提斯洋板片回转(Ma et al., 2013a, 2015)、新特提斯洋脊俯冲(Zhang et al.,2010;Zhu et al.,2019)等.

作为拉萨地块南部晚白垩世岩浆作用研究的 一部分(图1b),本文在对中拉萨地块南缘门巴花岗 闪长岩开展野外调查的基础上,进一步系统地开展 岩相学、年代学、岩石地球化学及矿物地球化学研 究,旨在查明这套岩石的成因,同时综合前人的研 究成果,对拉萨地块南部晚白垩世岩浆作用的深部 动力学过程提供新的见解及约束.

1 地质背景及样品特征

拉萨地块位于青藏高原南部,南北分别以雅鲁

藏布江缝合带(IYS)和班公湖-怒江缝合带(BNS) 为界,是一条近东西向的巨型构造一岩浆带,东西 长约2500 km,南北宽约150~300 km(图1a; Zhu et al.,2013). 根据其内部蛇绿岩分布及区域性深大断 裂,拉萨地块又可以分为3个次级单元,从北向南依 次为北拉萨地块、中拉萨地块和南拉萨地块(Zhu et al., 2013). 北拉萨地块缺乏古老岩石,主要由三叠 系一白垩系地层构成;另外,早白垩世火山岩也广 泛出露在北拉萨地块西段(Zhu et al., 2013). 中拉萨 地块作为一个古老的微陆块,保留了前寒武纪至新 生代的地质记录,前寒武纪岩石以念青唐古拉岩群 中出露的角闪岩相和麻粒岩相变质岩为代表.晚古 生代变沉积岩在中拉萨地块广泛分布,局部被中一 新生代岩体侵入或火山岩覆盖.南拉萨地块与北拉 萨地块总体相似,主体由新生地壳组成,在东段可 能局部保留了前寒武的结晶基底(Dong et al., 2010). 南拉萨地块发育强烈的岩浆活动,这些岩浆 岩构成了冈底斯岩浆带的主体.南拉萨地块岩浆活 动主要分布在5个时期(Wang et al., 2021):晚泥盆 世一早石炭世、晚三叠世一中侏罗世、晚白垩世、古 新世一始新世、渐新世一中新世.第一期岩浆作用 可能记录了拉萨地块从冈瓦纳大陆裂解事件 (Wang et al., 2020), 第二、三期岩浆事件记录了新 特提斯洋壳北向俯冲消减(Zhu et al., 2019; Wang et al., 2021, 2022b), 第四期岩浆事件可能与印度-欧亚大陆碰撞初期新特提斯洋板片回转或断离有 关(Zhu et al., 2019;董咪等, 2022), 第五期岩浆事件 可能与后碰撞岩石圈拆沉有关(Zhao et al., 2009;张 士贞等,2020).

本次研究样品采自西藏墨竹工卡县门巴乡东 南侧花岗闪长岩体(图1c).在大地构造位置上,该 岩体位于中拉萨地块南缘(图1b).门巴花岗闪长岩 侵位于一套晚古生代变沉积岩中(图1c),其主要由 变石英砂岩、云母石英片岩构成.门巴花岗闪长岩 出露面积约100 km²,野外观察显示门巴花岗闪长岩



图1 (a)青藏高原构造单元划分示意图;(b)拉萨地块南部冈底斯岩浆带展布图,文献年龄数据来源见表1;(c)门巴研究区地质图 Fig.1 (a) Tectonic framework of Xizang an Plateau; (b) distribution of Gangdese magmatic belt in the southern Lhasa block,

and the age data from literature are shown in the Table 1;(c) geological map of Menba area BNS. 班公湖-怒江缝合带; SNM. 狮泉河一纳木错蛇绿岩带; LMF. 洛巴堆-米拉山断裂带; IYS. 雅鲁藏布江缝合带



图 2 门巴花岗闪长岩野外及显微照片

Fig. 2 Field observations and microscope photos of the Menba granodiorites

a. 花岗闪长岩包含巨晶斜长石; b. 花岗闪长岩包含巨晶钾长石; c. 花岗闪长岩包含镁铁质暗色包体; d和 e. 花岗闪长岩显微照片; f. 镁铁质暗 色包体显微照片; Kfs. 钾长石; Pl. 斜长石; Hbl. 角闪石; Qtz. 石英; Bi. 黑云母; Ap. 磷灰石

整体呈灰白色,组构清晰,为块状构造及巨斑结构, 巨型斑晶主要由斜长石和钾长石组成(图2a、2b); 此外还可在花岗闪长岩中观察到大小不等镁铁质 暗色包体(图2c).野外及显微观察表明门巴花岗闪 长岩主要由石英(20%~25%)、斜长石(40%~ 45%)、钾长石(15%~20%)组成,同时还包含少量 的角闪石(5%~10%)和黑云母(5%~10%)(图2d、 2e). 镁铁质暗色包体具有细晶结构,主要由斜长 石、角闪石、黑云母及少量辉石构成,其矿物成分与 闪长岩相当,故定名为闪长玢岩;此外在暗色包体 中可以观察到大量细针状磷灰石(图2f).

表1 拉萨地块南部晚白垩世岩浆岩年龄统计表

Table 1 Age compilation of Late Cretaceous magmatic rocks in southern Lhasa block

样品编号	岩性	位置	定年方法	年龄 (Ma)	误差	参考文献
7-1	紫苏花岗岩	里龙	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	89.5	/	Zhang <i>et al.</i> (2010)
8-1	紫苏花岗岩	里龙	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	86.6	/	Zhang <i>et al.</i> (2010)
8-2	紫苏花岗岩	里龙	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	87.8	/	Zhang <i>et al.</i> (2010)
8-4	紫苏花岗岩	里龙	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	86.0	/	Zhang et al. (2010)
43-1	紫苏花岗岩	里龙	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	87.1	/	Zhang et al. (2010)
43-8	紫苏花岗岩	里龙	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	88.3	/	Zhang et al. (2010)
T024	花岗闪长岩	里龙-朗县	锆石 SHRIMP U-Pb	80.4	1.1	Wen <i>et al</i> . (2008)
T027	花岗闪长岩	里龙-朗县	锆石 SHRIMP U-Pb	82.7	1.6	Wen <i>et al</i> . (2008)
T368	花岗闪长岩	尼木	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	87.7	1.4	Xu et al. (2015)
T372	闪长岩	尼木	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	88.4	1.1	Xu et al. (2015)
T321	辉长闪长岩	尼木	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	90.8	1.0	Xu et al. (2015)
T433	辉长岩	日喀则	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	94.0	0.5	Xu et al. (2015)
09TB21-2	紫苏花岗岩	米林	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	91.6	1.0	Ma <i>et al.</i> (2013a)
09TB42-1	紫苏花岗岩	米林	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	93.6	1.2	Ma <i>et al</i> . (2013a)
09TB47-1	紫苏花岗岩	米林	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	88.7	1.5	Ma <i>et al.</i> (2013a)
09TB46-2	紫苏花岗岩	米林	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	92.0	1.1	Ma <i>et al</i> . (2013a)
09TB51-2	紫苏花岗岩	米林	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	91.2	1.4	Ma <i>et al.</i> (2013a)
09TB36	紫苏花岗岩	米林	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	99.5	1.1	Ma <i>et al</i> . (2013a)
09TB45-1	紫苏花岗岩	米林	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	94.7	1.0	Ma <i>et al.</i> (2013a)
07TB33a-1	石英二长岩	克鲁	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	91.3	1.6	Jiang <i>et al.</i> (2012)
07TB33b-2	石英二长岩	克鲁	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	93.3	2.0	Jiang <i>et al.</i> (2012)
07TB33d	闪长岩	克鲁	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	90.3	2.1	Jiang <i>et al.</i> (2012)
BB - 45	镁铁质包体	朗县	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	106.4	2.6	Zheng <i>et al.</i> (2014)
BB - 112	花岗闪长岩	朗县	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	103.1	1.8	Zheng <i>et al.</i> (2014)
BB - 112	煌斑岩	朗县	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	96.8	0.7	Zheng <i>et al.</i> (2014)
BB - 55	二云母花岗岩	努日	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	78.1	0.9	Zheng <i>et al.</i> (2014)
BB - 113	二云母花岗岩	努日	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	76.3	1.9	Zheng <i>et al.</i> (2014)
BB - 114	二云母花岗岩	努日	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	79.7	1.8	Zheng <i>et al.</i> (2014)
BB - 116	二云母花岗岩	努日	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	76.1	2.1	Zheng <i>et al.</i> (2014)
NR - 14	石英闪长岩	努日	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	95.9	0.9	Zheng <i>et al.</i> (2014)
T10-95-4	变辉长岩	里龙	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	93.2	0.8	Zhang <i>et al.</i> (2014)
T10-95-1	变辉长岩	里龙	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	90.9	0.9	Zhang <i>et al.</i> (2014)
T10-94-4	变辉长岩	里龙	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	82.2	0.8	Zhang <i>et al.</i> (2014)
T10-94-10	变辉长岩	里龙	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	77.3	2.5	Zhang <i>et al.</i> (2014)
T10-94-2	变辉长岩	里龙	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	74.5	4.7	Zhang <i>et al.</i> (2014)
09TB21-1	苏长岩	米林	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	92.8	1.1	Ma <i>et al</i> . (2013b)
09TB30-1	苏长岩	米林	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	91.8	2.1	Ma <i>et al</i> . (2013b)
09TB44-5	苏长岩	米林	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	93.6	1.2	Ma <i>et al</i> . (2013b)
SY04	英安岩	桑日	锆石 SIMS U-Pb	95.0	1.0	Zhang <i>et al.</i> (2019)
SR02	英安岩	桑日	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	95.0	1.0	Zhang <i>et al</i> . (2019)
SK1303	花岗岩	措杰林	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	95.0	0.5	Wang <i>et al</i> . (2021)
SK1308	花岗岩	措杰林	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	96.2	0.6	Wang <i>et al</i> . (2021)
SK1310	花岗岩	措杰林	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	98.7	1.0	Wang <i>et al</i> . (2021)
SK1314	石英正长岩	措杰林	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	92.1	1.1	Wang <i>et al</i> . (2021)
09TB160-1	辉绿岩	达孜	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	92.3	2.4	Ma et al. (2015)
S16T89	花岗闪长岩	门巴	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	87.9	0.5	Liu et al. (2019)

(志主 1

失夜 I								
样品编号	岩性	位署	完在方法	年龄	涅羊	法孝文献		
1 T III - 1	石正		2 7 7 12	(Ma)	以左	多行人而		
S16T90	花岗闪长岩	门巴	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	88.5	0.5	Liu et al. (2019)		
MB14-4	花岗闪长岩	门巴	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	83.7	0.5	Meng et al. (2014)		
MB14-2	闪长质包体	门巴	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	85.2	0.4	Meng et al. (2014)		
SD05	花岗闪长岩	门巴	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	83.2	0.9	本文研究		

2 分析方法

2.1 锆石 U-Pb 定年

锆石分选、制靶、照相在北京锆年领航科技有 限公司完成,首先对样品进行破碎、淘洗、电磁与重 液分选,之后在双目镜下挑选出粒度大、晶型好锆 石制成靶样,然而参照锆石阴极发光及透反射光图 像,选择锆石颗粒表面无裂隙、内部环带清晰的位 置开展测试. 锆石 U-Pb 定年在中国地质科学院矿 产资源研究所自然资源部成矿作用与资源评价重 点实验室完成. 锆石 U-Pb 定年采用 LA-ICP-MS 法,同位素分析测试仪器为Finnigan Neptune型MC -ICP-MS, 激光剥蚀系统为 NewwaveUP 213, 激光 剥蚀所用斑束直径为25 µm,频率为10 Hz,剥蚀深 度为 30~50 µm, 能量密度约为 2.5 J/cm², 以 He 作 为剥蚀物质载气.实验过程中,以锆石GJ-1作为外 标校正锆石年龄,外标结果为(600.5±8.2) Ma(n= 8;MSWD=0.19);以锆石 Plesovice 作为监控标样, 测试结果为(342.4±5.3) Ma(n=4; MSWD= 0.59),详细的实验测试流程见侯可军等(2009).采 用 ICPMSDataCal 9.0 软件完成数据离线处理(Liu et al., 2008), 运用 Isoplot 3.0 程序完成谐和图绘制 及加权平均年龄计算(Ludwig,2003).

2.2 全岩主微量测试

由于花岗闪长岩包含巨型斜长石和钾长石斑 晶,因此在选择主微量测试样品时,首先挑选斑晶 分布均匀的样品;其次用于粉粹的手标本应尽可能 的大(直径大于20 cm),尽量消除因为斑晶分布不 均而带来的误差.本次全岩主量、微量元素分析在 南京聚谱检测科技有限公司完成.主量元素测试采 用X射线荧光光谱法(XRF),在荷兰帕纳科 Axios X荧光仪完成,分析误差小于3%.微量元素测试采 用电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS),在Finnigan Element ICP-MS仪器上完成,将样品研磨并用酸溶 法制成溶液,然后在等离子质谱仪上进行测定,并 用标准溶液进行校正,含量大于10×10⁻⁶的元素分 析误差小于5%,而含量小于10×10⁻⁶的元素分析 误差小于10%.

2.3 斜长石电子探针分析

电子探针分析在武汉上谱分析科技有限公司 完成,使用仪器为日本电子(JEOL)JXA-8230型电 子探针仪.测试条件采用加速电压15 kV,束流2× 10⁻⁸A,束斑直径1~2 μm.本实验中采用ZAF修正 法作为校正公式,各元素采用SPI公司的标准矿物 进行标定,根据元素丰度不同,分析精度一般优于 1%~5%.

3 结果

3.1 锆石 U-Pb 年龄

门巴花岗闪长岩定年样品(SD05)中的锆石颗粒 结晶良好,多为自形或半自形,呈短柱状;锆石粒径介 于100~200 µm之间,长宽比介于1:1~2:1之间.在 阴极发光图像上,绝大多数锆石颗粒显示出均一的结 构,且具有明显的结晶环带;部分锆石颗粒显示出核一 边结构,边部同样显示出清晰的结晶环带(图3).本次 测试点均选自锆石具有清晰结晶环带的区域,所测数 据中,锆石中的U、Th含量分别为1873×10⁻⁶~4176× 10⁻⁶和1162×10⁻⁶~1904×10⁻⁶, Th/U比值介于 1.39~2.30之间(表2),表明它们均属于典型的岩浆锆 石(Hoskin and Black, 2000). 本次共获得 21 个有效数 据,其²⁰⁶Pb/²³⁸U年龄分布较集中,在80.3~86.6 Ma之 间变化(表2). 在锆石U-Pb谐和图中均落在谐和线上, ²⁰⁶Pb/²³⁸U加权平均年龄为(83.2±0.9) Ma(MSWD= 0.9)(图3),该年龄值代表了花岗闪长岩的结晶年龄. 3.2 岩石地球化学特征

本次获得门巴花岗闪长岩的主微量数据见表 3.花岗闪长岩样品具有中等含量的SiO₂,介于 61.71%~67.02%之间;中等的Al₂O₃含量,介于 14.90%~15.77%;较低含量的MgO,介于1.24%~ 2.87%之间;Na₂O+K₂O含量介于7.31%~8.69%. Mg^{*}值为43~48,A/CNK值为0.89~0.99,属于准铝 质岩石.在(Na₂O+K₂O)-SiO₂岩石类型判别图解中 (图4a),大部分样品位于花岗闪长岩区域,与野外

表2 门巴花岗闪长岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 同位素分析结果

Table 2 LA-ICP-MS zircon U-Pb analysis data for the Menba granodiorites

		含量(10-6)		(T) / L			同位素	年龄(Ma)						
测试点 -	Pb	Th	U	Th/U	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	$\pm 1\sigma$	²⁰⁷ Pb/ ²⁵⁵ U	$\pm 1\sigma$	²¹⁶ Pb/ ²³⁸ U	$\pm 1\sigma$	²¹⁷ Pb/ ²⁵ U	$\pm 1\sigma$	²⁰⁶ Pb/ ²⁸ U	$\pm 1\sigma$
样品:S	SD05(有	吃岗闪长	岩)											
SD05-1	597	2 804	1 518	1.85	0.049 7	0.001 9	0.085 3	0.002 6	0.012 5	0.000 3	83.1	2.4	80.3	1.7
SD05-2	881	3 965	1 801	2.20	0.049 5	0.001 6	0.089 4	0.002 7	0.013 3	0.000 4	87.0	2.5	84.9	2.4
SD05-3	410	1 891	$1\ 162$	1.63	0.047 9	0.001 2	0.085 1	0.002 6	0.012 8	0.000 3	83.0	2.4	82.3	1.6
SD05-4	715	3 302	$1\ 582$	2.09	0.049 4	0.001 2	0.088 7	0.002 4	0.013 0	0.000 3	86.3	2.3	83.6	1.8
SD05-5	486	2 208	$1\ 420$	1.56	0.047 6	0.002 2	0.087 9	0.002 8	0.013 4	0.000 3	85.5	2.6	86.1	1.9
SD05-7	721	3 420	$1\ 680$	2.04	0.049 2	$0.001\ 4$	0.086 9	0.003 0	0.012 8	0.000 4	84.6	2.8	81.8	2.2
SD05-8	559	2 629	$1\ 695$	1.55	0.048 8	0.001 0	0.090 6	0.003 2	0.013 4	0.000 4	88.1	2.9	85.8	2.3
SD05-9	746	3 517	$1\ 527$	2.30	$0.047\ 4$	0.001 6	0.087 0	0.002 8	0.013 2	0.000 3	84.7	2.6	84.8	2.0
SD05-10	487	$2\ 178$	$1\ 563$	1.39	0.048 2	0.001 0	0.088 2	0.002 4	0.013 2	0.000 3	85.8	2.3	84.7	1.9
SD05-12	538	$2\ 524$	1 389	1.82	0.048 6	0.001 0	0.088 1	0.002 4	0.013 1	0.000 3	85.8	2.2	84.1	1.9
SD05-13	531	2 377	1 388	1.71	0.048 5	0.001 0	0.087 0	0.002 7	0.013 0	0.000 4	84.7	2.5	83.2	2.3
SD05-15	584	$2\ 777$	$1\ 448$	1.92	0.048 6	0.001 1	0.084 1	0.002 6	0.012 5	0.000 3	82.0	2.4	80.3	1.9
SD05-16	622	$2\ 714$	$1\ 425$	1.90	0.048 9	0.003 3	0.088 7	0.005 8	0.013 1	0.000 4	86.2	5.4	84.1	2.7
SD05-17	700	3 146	$1\ 581$	1.99	0.049 3	0.001 9	0.086 5	0.002 8	0.012 7	0.000 3	84.3	2.6	81.2	2.0
SD05-18	902	$4\ 176$	$1\ 904$	2.19	0.049 4	0.001 1	0.086 0	0.003 0	0.012 6	0.000 3	83.8	2.8	80.7	2.1
SD05-19	696	3 206	$1\ 564$	2.05	0.048 8	0.002 4	0.089 5	0.004 1	0.013 2	0.000 4	87.0	3.8	84.7	2.3
SD05-20	522	2 341	1 387	1.69	0.0497	0.001 4	0.092 5	0.003 1	0.013 5	0.000 3	89.9	2.9	86.6	2.0
SD05-21	402	1873	$1\ 236$	1.52	0.046 7	0.001 3	0.083 4	0.002 6	0.013 1	0.000 4	81.3	2.4	83.9	2.4
SD05-22	636	2 897	1 541	1.88	0.049 3	0.002 3	0.087 1	0.003 2	0.013 0	0.000 3	84.8	3.0	83.0	2.2
SD05-23	506	2 248	$1\ 265$	1.78	0.048 2	0.001 9	0.083 9	0.003 0	0.012 6	0.000 3	81.8	2.8	80.9	2.1
SD05-24	673	3 044	1 529	1.99	0.048 5	0.001 9	0.086 8	0.003 0	0.012 9	0.000 3	84.5	2.8	82.8	2.0



图 3 门巴花岗闪长岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄谐和图 及加权平均年龄图解

Fig.3 LA-ICP-MS zircon U-Pb concordia and weighted average age diagrams for the Menba granodiorites

观察和镜下鉴定结果相符合,在(Na₂O+K₂O-CaO)

-SiO₂图解中,样品主要位于钙碱性区域(图4b).

门巴花岗闪长岩的稀土元素总量较高(表3), 稀土总量为(\sum REE)为141×10⁻⁶~286×10⁻⁶,平均 值195×10⁻⁶.其中轻稀土含量(\sum LREE)为134× 10⁻⁶~271×10⁻⁶,平均值186×10⁻⁶;重稀土含量(\sum HREE)为7.06×10⁻⁶~14.55×10⁻⁶,平均值9.38× 10⁻⁶;(La/Yb)_N比值较高,介于28~40之间,平均值 32.稀土元素球粒陨石标准化配分图显示(图5a), 轻重稀土分馏明显,呈右倾趋势. δ Eu为0.82~ 0.99,平均值0.90,Eu呈微弱负异常(图5a).

门巴花岗闪长岩微量元素分析结果见表 3. 微量元素原始地幔标准化蛛网图显示出其分配模式 整体向右倾斜,相对富集大离子亲石元素(LILEs: 如 Rb、Th)和相对亏损高场强元素(HFSEs:如 Nb、 Ta和 Ti)(图 5b). 另外花岗闪长岩样品具有较高的 Sr 含量(716×10⁻⁶~850×10⁻⁶)、较低的 Y(8.82× 10^{-6} ~18.47×10⁻⁶)和 Yb(0.81×10⁻⁶~1.68×10⁻⁶) 含量,同时具有较高 Sr/Y 比值,介于 42~96之间, 显示出埃达克岩的地球化学属性,在 Sr/Y-Y 图解

表3 门巴花岗闪长岩主量元素(%)和微量元素(×10⁻⁶)分析结果

Table 3 Major (%) and trace ($\times 10^{-6}$) element concentrations of the Menba granodiorites

样品号	SD05-1	SD05-2	SD05-3	SD05-4	SD05-5	SD05-6	SD05-7	SD05-8
SiO_2	65.83	61.71	65.86	66.46	66.04	67.02	65.76	66.03
TiO_2	0.58	0.96	0.63	0.51	0.49	0.40	0.57	0.54
$\mathrm{Al}_2\mathrm{O}_3$	15.46	15.05	14.90	15.00	15.69	15.77	15.34	15.30
$\mathrm{TFe_2O_3}$	4.52	6.14	4.21	4.12	3.49	3.24	4.32	4.25
MnO	0.08	0.11	0.08	0.07	0.06	0.06	0.08	0.07
MgO	1.68	2.87	1.88	1.53	1.51	1.24	1.75	1.65
CaO	3.33	3.88	3.12	2.97	3.12	2.83	3.49	2.72
Na_2O	3.76	3.18	3.56	3.66	3.87	3.57	3.76	3.89
K_2O	3.64	4.29	4.07	4.10	4.00	5.13	3.54	3.81
P_2O_5	0.25	0.37	0.29	0.23	0.22	0.19	0.26	0.26
LOI	0.50	1.04	0.88	0.84	0.94	0.35	0.52	0.98
Total	99.62	99.60	99.48	99.49	99.43	99.79	99.41	99.50
$\mathrm{Mg}^{\#}$	43	48	47	43	46	43	45	44
A/CNK	0.95	0.89	0.93	0.94	0.96	0.95	0.94	0.99
Ве	2.14	2.04	2.03	1.90	2.15	1.90	2.30	2.17
Sc	6.76	10.77	7.68	5.98	5.52	5.00	7.08	6.48
V	65.03	106.12	71.13	59.92	54.97	47.02	64.82	60.61
Cr	34.99	47.94	31.34	29.90	23.35	20.87	33.13	28.28
Со	8.71	14.27	9.43	8.03	7.15	6.61	8.99	8.74
Ni	13.03	19.92	13.41	10.85	9.78	9.17	12.56	12.41
Cu	6.26	4.15	4.60	5.94	3.78	4.66	4.72	4.48
Zn	50.51	82.46	58.72	52.88	44.29	41.93	52.28	52.08
Ga	21.31	24.46	20.76	19.63	20.03	18.84	20.98	20.61
Rb	128.11	161.73	154.58	129.64	129.42	160.39	125.57	147.65
Sr	789.14	766.95	819.83	734.77	798.26	849.91	788.66	715.89
Y	12.32	18.47	13.01	10.10	9.98	8.82	11.08	10.63
Zr	171.98	264.87	174.80	153.77	139.44	130.51	159.32	148.94
Nb	13.30	21.33	14.18	11.26	11.13	9.68	12.35	11.93
Cs	2.42	2.38	2.92	2.27	2.54	3.30	2.41	2.49
Ва	827.23	965.60	922.65	969.42	999.14	1520.99	585.44	638.95
La	63.05	66.74	50.21	39.62	40.41	34.66	44.29	49.12
Ce	105.17	129.47	93.71	73.80	74.26	63.93	81.24	83.92
Pr	10.66	14.22	10.21	7.89	7.93	6.86	8.66	8.60
Nd	36.66	51.06	36.39	28.19	28.21	23.94	30.60	30.30
Sm	5.46	7.79	5.57	4.33	4.36	3.83	4.71	4.54
Eu	1.29	1.75	1.31	1.09	1.10	1.03	1.16	1.13
Gd	3.74	5.50	3.90	3.00	2.96	2.65	3.32	3.18
Tb	0.51	0.73	0.52	0.40	0.40	0.35	0.44	0.43
Dy	2.49	3.64	2.56	1.99	2.02	1.77	2.19	2.09
Но	0.45	0.66	0.46	0.36	0.36	0.32	0.40	0.38
Er	1.25	1.84	1.31	1.02	1.02	0.91	1.12	1.07
Tm	0.17	0.25	0.18	0.14	0.14	0.12	0.15	0.14
Yb	1.14	1.68	1.19	0.96	0.93	0.81	1.04	0.99
Lu	0.16	0.24	0.17	0.14	0.13	0.12	0.15	0.14
Hf	4.44	6.61	4.46	3.93	3.58	3.34	4.05	3.87
Та	0.97	1.46	1.00	0.80	0.79	0.69	0.85	0.84
Pb	20.61	21.11	22.31	35.42	22.69	27.14	20.68	37.13

样品号	SD05-1	SD05-2	SD05-3	SD05-4	SD05-5	SD05-6	SD05-7	SD05-8		
Th	31.27	33.23	26.84	27.47	23.86	16.76	17.54	24.55		
U	3.68	4.69	2.91	4.10	4.13	2.69	2.84	3.56		
Sr/Y	64.06	41.53	63.02	72.77	80.02	96.37	71.16	67.35		

中,绝大部分样品位于埃达克岩区域(图4c).

3.3 斜长石地球化学特征

本次对花岗闪长岩中3颗(SD05a、SD05b、 SD05c)结晶环带清晰的斜长石开展了电子探针分 析,共获得42个数据点(表4). 斜长石颗粒 SD05a 的 SiO₂ 含 量 为 58.65%~62.82%, Na₂O 含 量 为 7.49%~9.38%, K₂O 含量为 0.28%~0.65%, CaO 含量为4.28%~6.88%;斜长石成分An值介于 19.9~32.8之间(图 6a). 斜长石颗粒 SD05b 的 SiO。 质量百分数为57.71%~64.70%, Na₂O质量分数为 7.21%~9.56%, K₂O质量分数为0.29%~0.60%, CaO质量分数为3.42%~7.24%;斜长石成分An值 为16.2~34.7(图 6b). 斜长石颗粒 SD05c 的 SiO₂、 Na₂O、K₂O 和 CaO 的 质 量 百 分 数 分 别 介 于 $58.46\% \sim 64.37\%$, $7.62\% \sim 9.47\%$, $0.32\% \sim 0.64\%$, 3.71%~6.46%之间,An值介于17.4~31.2之间(图 6c).3颗斜长石成分大致相当,在长石分类图解中 主要位于奥长石和中长石的范围内(图7).

4 讨论

4.1 晚白垩岩浆作用

晚白垩世(100~80 Ma)岩浆岩在拉萨地块南 部广泛分布(图1b),但其又主要出露在南拉萨地块 南缘,平行于雅鲁藏布缝合带展布,且集中分布在 米林至南木林一带(图1b),它们代表一个晚白垩世 "岩浆大爆发(magmatic flare-up)"事件. 南拉萨地 块南缘晚白垩世岩浆岩类型复杂,包含基性一中 性-酸性侵入岩(表1; Zhang et al., 2010; Ma et al., 2013a, 2013b) 和安山质及英安质火山岩(表1; Zhang et al., 2019), 它们共同构成一个长达 500km 的岩浆弧(图1b).此外, Ma et al. (2015)在南拉萨地 块北缘也报道了晚白垩世辉绿岩脉(图1b).近年 来,在中部拉萨地块南部也报道了少量的晚白垩世 岩浆岩,主要分布东段门巴一带,主要为花岗闪长 岩及镁铁质暗色包体(图 1b; Meng et al., 2014; Liu et al., 2019). 以往锆石 U-Pb 年代学研究表明,上述 岩体及火山岩的形成时间主要集中于100~80 Ma





Fig.4 (Na₂O+K₂O)-SiO₂ (a), (K₂O+Na₂O-CaO)-SiO₂(b), and Sr/Y-Y (c) diagrams for the Menba granodiorites 文献数据来源 Meng *et al.*(2014)和Liu *et al.*(2019)

续丰3



图5 门巴花岗闪长岩稀土元素球粒陨石标准化配分图(a)和微量元素原始地幔标准化蛛网图(b)

Fig.5 Chondrite-normalized REE distribution patterns (a) and primitive mantle-normalized trace element spidergrams (b) for the Menba granodiorites

球粒陨石标准化值和原始地幔标准化值据 Sun and McDonough(1989); 文献数据来源 Meng et al.(2014)和 Liu et al.(2019)









(表1).本文对门巴花岗闪长岩开展了LA-ICP-MS 锆石U-Pb测年,获得其成岩年龄为83.2 Ma,表明 其侵位时代为晚白垩世,与拉萨地块南部以往报道 的晚白垩世岩浆作用时间一致,表明它们属于同一 时期岩浆作用的产物.

4.2 岩石成因

门巴花岗闪长岩样品具有中等 SiO₂(61.71%~ 67.02%)、高 Sr (716×10⁻⁶~850×10⁻⁶)、低 Y (8.82×10⁻⁶~18.47×10⁻⁶)和 Yb (0.81×10⁻⁶~ 1.6×10⁻⁶)含量及高 Sr/Y(49~96)比值,同时在 Sr/ Y-Y图解中,样品位于埃达克岩区域(图 4c),因此, 地球化学特征表明门巴花岗闪长岩为埃达克质岩 石.埃达克(质)岩石最先被报道在阿留申 Adad 岛,

表 4	门巴花岗闪长岩斜长石电子探针数据(%))
-----	---------------------	---

Table 4 Electron microprobe data (%) of plagioclases from the Menba granodiorites

					*		•	0			0				
测试点	K_2O	CaO	TiO_2	Na ₂ O	MgO	$\mathrm{Al}_2\mathrm{O}_3$	SiO_2	Cr_2O_3	MnO	FeO	P_2O_5	Total	An	Ab	Or
SD05a-1	0.28	4.29	0.00	9.38	0.00	23.54	62.82	0.00	0.00	0.11	0.00	100.43	19.9	78.6	1.6
SD05a-2	0.36	6.32	0.00	7.97	0.00	25.47	59.13	0.00	0.00	0.17	0.04	99.46	29.9	68.1	2.0
SD05a-3	0.50	5.83	0.02	8.23	0.00	24.82	60.18	0.01	0.00	0.21	0.00	99.80	27.4	69.9	2.8
SD05a-4	0.47	6.88	0.02	7.49	0.00	25.81	58.65	0.02	0.00	0.22	0.00	99.56	32.8	64.6	2.7
SD05a-5	0.57	5.79	0.00	8.19	0.03	25.00	60.02	0.02	0.02	0.19	0.00	99.82	27.2	69.6	3.2
SD05a-6	0.59	5.97	0.00	7.93	0.00	25.05	60.24	0.00	0.00	0.21	0.00	100.01	28.4	68.3	3.4
SD05a-7	0.65	5.64	0.02	8.17	0.01	24.82	60.39	0.00	0.00	0.21	0.00	99.91	26.6	69.8	3.6
SD05a-8	0.65	6.21	0.02	7.84	0.01	25.07	59.56	0.00	0.01	0.19	0.00	99.58	29.3	67.0	3.7
SD05a-9	0.56	6.17	0.00	7.88	0.01	25.29	59.20	0.00	0.00	0.21	0.00	99.33	29.3	67.6	3.2
SD05a-10	0.49	6.18	0.00	7.87	0.00	25.46	59.56	0.00	0.00	0.23	0.01	99.79	29.4	67.8	2.8
SD05a-11	0.55	5.88	0.03	8.15	0.00	24.83	60.03	0.01	0.01	0.20	0.00	99.68	27.6	69.3	3.1
SD05a-12	0.61	5.80	0.02	8.18	0.00	24.81	59.96	0.00	0.03	0.22	0.01	99.63	27.2	69.4	3.4
SD05b-1	0.38	3.42	0.00	9.56	0.00	23.07	64.70	0.00	0.00	0.15	0.01	101.28	16.2	81.7	2.1
SD05b-2	0.33	3.61	0.05	9.56	0.00	23.43	64.21	0.00	0.00	0.09	0.00	101.29	17.0	81.2	1.8
SD05b-3	0.48	7.24	0.03	7.21	0.02	26.15	57.71	0.01	0.01	0.16	0.01	99.03	34.7	62.6	2.8
SD05b-4	0.60	6.45	0.02	7.62	0.01	25.39	59.32	0.01	0.01	0.23	0.00	99.67	30.8	65.8	3.4
SD05b-5	0.51	5.87	0.03	8.00	0.02	25.13	60.51	0.01	0.00	0.18	0.00	100.26	28.0	69.1	2.9
SD05b-6	0.39	5.89	0.00	8.06	0.00	25.07	60.91	0.00	0.00	0.16	0.00	100.48	28.1	69.7	2.2
SD05b-7	0.34	6.40	0.00	7.94	0.01	25.49	60.08	0.02	0.01	0.17	0.01	100.46	30.2	67.9	1.9
SD05b-8	0.46	6.17	0.00	7.98	0.00	25.17	60.23	0.00	0.00	0.20	0.00	100.22	29.1	68.3	2.6
SD05b-9	0.46	5.79	0.00	8.22	0.00	25.33	61.22	0.01	0.00	0.20	0.00	101.25	27.3	70.1	2.6
SD05b-10	0.40	6.18	0.01	7.93	0.01	25.22	59.57	0.00	0.00	0.21	0.00	99.51	29.4	68.3	2.2
SD05b-11	0.34	6.16	0.00	8.13	0.00	25.24	60.15	0.00	0.01	0.20	0.00	100.23	29.0	69.1	1.9
SD05b-12	0.29	6.01	0.05	8.08	0.00	25.57	61.10	0.01	0.01	0.24	0.00	101.37	28.7	69.7	1.7
SD05b-13	0.33	6.08	0.01	8.00	0.01	25.41	59.85	0.00	0.00	0.16	0.00	99.84	29.0	69.1	1.9
SD05b-14	0.38	5.87	0.00	8.26	0.00	24.94	60.00	0.01	0.00	0.22	0.01	99.69	27.6	70.3	2.1
SD05b-15	0.35	5.06	0.00	8.91	0.01	24.21	61.99	0.00	0.01	0.18	0.00	100.71	23.4	74.6	1.9
SD05c-1	0.41	3.71	0.00	9.47	0.00	23.55	64.37	0.00	0.00	0.16	0.00	101.66	17.4	80.4	2.3
SD05c-2	0.42	5.85	0.01	8.09	0.00	25.01	60.31	0.02	0.00	0.20	0.00	99.91	27.9	69.8	2.4
SD05c-3	0.32	6.43	0.01	7.62	0.01	25.43	58.46	0.00	0.01	0.17	0.02	98.48	31.2	66.9	1.8
SD05c-4	0.61	5.55	0.03	8.07	0.01	24.65	60.22	0.00	0.00	0.22	0.00	99.35	26.6	70.0	3.5
SD05e-5	0.62	5.84	0.01	7.96	0.00	24.83	59.99	0.00	0.01	0.21	0.00	99.47	27.9	68.6	3.5
SD05c-6	0.64	5.99	0.00	7.91	0.01	25.04	59.54	0.00	0.00	0.21	0.01	99.34	28.4	68.0	3.6
SD05e-7	0.63	6.07	0.00	7.94	0.01	25.00	60.42	0.00	0.00	0.19	0.02	100.27	28.7	67.8	3.5
SD05c-8	0.37	6.01	0.00	7.94	0.02	24.96	59.92	0.00	0.00	0.22	0.01	99.45	28.9	69.0	2.1
SD05c-9	0.32	6.46	0.02	7.86	0.01	25.39	58.86	0.00	0.00	0.26	0.01	99.18	30.7	67.5	1.8
SD05c-10	0.44	5.88	0.00	8.11	0.00	24.75	59.80	0.00	0.00	0.23	0.00	99.21	27.9	69.6	2.5
SD05c-11	0.35	5.57	0.03	8.26	0.00	24.72	60.53	0.00	0.00	0.19	0.01	99.66	26.6	71.4	2.0
SD05c-12	0.32	5.73	0.04	8.42	0.02	24.78	61.38	0.00	0.01	0.17	0.00	100.86	26.8	71.4	1.8
SD05c-13	0.35	5.28	0.00	8.16	0.00	25.03	61.84	0.00	0.00	0.11	0.00	100.78	25.8	72.2	2.0
SD05c-14	0.56	5.47	0.00	8.46	0.00	24.61	60.70	0.01	0.02	0.19	0.01	100.00	25.5	71.4	3.1
SD05c-15	0.38	5.24	0.00	8.29	0.02	24.51	61.55	0.01	0.00	0.20	0.00	100.20	25.3	72.5	2.2

早期被认为起源于年轻的(<25 Ma)、热的洋壳部 分熔融,为大洋俯冲消减环境的产物(Defant and Drummond,1990).然而,随着研究深入,发现埃达 克质岩石并非大洋俯冲消减环境中的特定产物,其还可以形成于陆内环境(Xu et al., 2002).此外,其母岩浆源区及成岩作用方式也存在多样化,除俯冲

洋壳部分熔融之外(Defant and Drummond, 1990), 还包括加厚/拆沉铁镁质下地壳部分熔融(Atherton and Petford, 1993; Xu *et al.*, 2002)、俯冲的大陆地壳 部分熔融(Wang *et al.*, 2008)、玄武质岩浆的分异结 晶作用(Castillo *et al.*, 1999; Macpherson *et al.*, 2006)、长英质岩浆和玄武质岩浆的混合作用 (Streck *et al.*, 2007).下面将讨论门巴花岗闪长岩 样品最可能的成岩作用方式.

门巴花岗闪长岩样品具有相对富集的锆石Hf $[\varepsilon_{Hf}(t) = -7.5 \sim -0.3]$ 及全岩 Sr-Nd $[(^{87}Sr/^{86}Sr)] =$ $0.7066 \sim 0.7067$, $\epsilon_{Nd}(t) = -5.7 \sim -4.1$ 同位素特征 (Meng et al., 2014),其显著不同于南拉萨地块南缘 起源于洋壳部分熔融的埃达克岩[(⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)]= $0.704 \ 2 \sim 0.704 \ 3 \ \varepsilon_{Nd}(t) = +2.4 \sim +4.0 \ \varepsilon_{Hf}(t) =$ +10.1~+15.8, Ma et al., 2013a], 表明形成门巴花 岗闪长岩母岩浆不可能直接起源于洋壳部分熔融. 实验岩石学研究表明起源于加厚下地壳部分熔融 的岩浆通常具有较低的 MgO 含量和 Mg[#]值(<40; Rapp and Watson, 1995), 然而门巴花岗闪长岩的 Mg[#]值(43~48)高于起源单一下地壳部分熔融的岩 浆,同时门巴花岗闪长岩样品的Sr-Nd-Hf同位素成 $\Re \left[\left({}^{87}\mathrm{Sr}/{}^{86}\mathrm{Sr} \right)_{\mathrm{i}} = 0.706 \ 6 \sim 0.706 \ 7 \ \varepsilon_{\mathrm{Nd}}(t) = -5.7 \sim 0.706 \ 0.7$ -4.1、 $\epsilon_{Hf}(t) = -7.5 \sim -0.3$; Meng et al., 2014] 相对 于中拉萨地块内起源于下地壳部分熔融的岩浆的 同位素组成具有更加亏损[(⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)₁=0.7174~ $0.720 \ 9 \ \epsilon_{\rm Nd}(t) = -9.5 \sim -9.1 \ \epsilon_{\rm Hf}(t) = -20.1 \sim$ -4.3; Wang et al., 2022a], 因此也排除了形成门巴 花岗闪长岩的母岩浆直接起源于单一加厚下地壳 部分熔融的可能.考虑到印度大陆俯冲发生在印 度-欧亚大陆碰撞之后(~55 Ma; Zhu et al., 2019), 因此也排除了门巴花岗闪长岩起源于俯冲大陆地 壳部分熔融的可能.亲湿岩浆元素(H)与亲岩岩浆 元素(M)浓度比值对亲湿岩浆元素浓度作图,可以 有效的鉴别成岩过程中的部分熔融、分异结晶和岩 浆混合(Schiano et al., 2010),在Th/Nd-Th图解中 (图 8a), 门巴花岗闪长岩展现出岩浆混合的趋势而 非分异结晶;同时在1/V-Rb/V图解中也未显示出 分异结晶的趋势(图8b).另外,通过幔源玄武质岩 浆经高压分异结晶作用形成的埃达克质岩石通常 涉及石榴石相的结晶分异,由于Yb对石榴石是强 相容元素,因此石榴石的结晶分异势必导致残余岩 浆的Yb含量降低、Dy/Yb比值升高.在Dy/Yb-SiO₂图解中(图 8c), Dy/Yb比值相对恒定, 未见随 SiO₂含量增加而升高的现象,因此排除门巴花岗闪 长岩通过幔源玄武质岩浆经高压结晶分异而形成. 在低压环境中涉及角闪石结晶分异通常会导致残 余熔体中稀土亏损(如Sm),从而导致演化熔体形 成的岩浆岩Zr/Sm比值随SiO₂增加而升高,但是门 巴花岗闪长岩并未显示出这种特征(图8d),因此也 排除门巴花岗闪长岩在低压环境通过角闪石的分 异结晶作用而形成.因此,本文认为门巴花岗闪长 岩母岩浆最可能通过长英质岩浆和镁铁质岩浆的 混合作用形成,证据如下.

(1)岩石学及矿物学证据:野外调查发现门巴 花岗岩闪长岩中具有大量大小不一的镁铁质暗色 包体(图2a),暗色包体的出现是岩浆发生混合作用 的重要证据(董国臣等,2006).另外,岩相学观察发 现暗色包体中的磷灰石晶形呈细针状(图2f),细针 状磷灰石被认为是形成于岩浆快速降温的淬冷过 程,因此暗色包体中细针状磷灰石的出现也指示了 岩浆岩源区发生过高温镁铁质岩浆和低温长英质 岩浆的混合过程.

(2)岩石地球化学证据:镁铁质暗色包体与寄 主花岗闪长岩在主量元素成分上呈现连续过渡的 变化特征(图4a,4b),同时在稀土元素配分模式图 上,二者表现出一致的配分模式(图5a),也反映了 岩浆混合作用(董国臣等,2006).高的Mg^{*}值(43~ 48)也指示了存在幔源镁铁质岩浆底侵随之发生岩 浆混合.另外,微量元素模拟也支持岩浆混合作用 的观点(图8a,8b).最重要的是门巴花岗闪长岩具 有中等富集的Sr-Nd-Hf同位素组分(Meng *et al.*, 2014),支持了岩浆源区发生了壳一幔岩浆相互混 合作用.

(3)矿物化学证据:高An斜长石通常结晶于偏 基性岩浆环境,相反,低An斜长石通常结晶于偏酸 性岩浆环境.本次研究获得花岗闪长岩中3颗斜长 石An值从核部到边部总体显示出相似的变化趋 势.斜长石核部均具有较低的An值,然后An值陡 然升高,随后An值在较小的范围内波动变化,最后 斜长石边缘An值逐渐降低(图6).斜长石结晶的早 期An值陡然变化,可能记录了岩浆源区成分发生 显著变化,揭示斜长石结晶的早期岩浆房经历了铁 镁质岩浆的注入,导致岩浆成分向基性端元变化; 在斜长石结晶晚期的岩浆房,由于缺乏铁镁质岩浆 的注入,伴随岩浆演化以及温度、压力降低,晚期结 晶的斜长石边缘的An逐渐降低.



图 8 门巴花岗闪长岩 Th/Nd-Th(a)、1/V-Rb/V(b)、Dy/Yb-SiO₂(c)、Zr/Sm-SiO₂(d)图解 Fig.8 Th/Nd-Th(a), 1/V-Rb/V(b), Dy/Yb-SiO₂(c), and Zr/Sm-SiO₂(d) diagrams for the Menba granodiorites 文献数据来源 Meng *et al.*(2014)和Liu *et al.*(2019)

结合岩石学、矿物学、岩石地球化学及矿物化 学等多方面的证据,本文认为门巴埃达克岩质花岗 闪长岩母岩浆起源于幔源镁铁质岩浆与壳源长英 质岩浆混合源区.对于壳一幔岩浆混合成因的埃达 克质岩石,其埃达克岩质地球化学属性(即高Sr、低 Y 含量、高 Sr/Y 比值)通常继承于壳源岩浆端元 (Streck et al., 2007), 而非幔源岩浆端元. 门巴花岗 闪长岩中的暗色包体具有较低的 Sr/Y 比值也排除 了门巴花岗闪长岩的埃达克质属性继承于幔源岩 浆的可能性(图4c).因此榴辉岩化的下地壳拆沉进 入地幔发生部分熔融(Xu et al., 2002)和地幔岩浆 底侵诱发加厚下地壳熔融并随之混合(Hou et al., 2004)均可以用于解释门巴埃达克质花岗闪长岩母 岩浆的成因.下地壳拆沉进入地幔很难引起地幔岩 浆温度显著降低,从而在镁铁质暗色包体中难以形 成细针状磷灰石:而当幔源岩浆底侵注入下地壳岩 浆房时,温度快速降低发生淬冷作用,从而在暗色 包体中形成细针状磷灰石.另外,前人对塔克那组 沉积相分析表明晚白垩世时期(95~70 Ma)中拉萨 南缘发育褶皱逆冲带,构造缩短导致地壳显著增厚 (Leier et al., 2007). 综上所述,本文倾向认为地幔 玄武质岩浆底侵诱发加厚下地壳部分熔融并随之 与其混合,形成了门花岗闪长岩的母岩浆.

4.3 成岩模式

晚白垩世岩浆岩(100~80 Ma)广泛分布在拉 萨地块南部的南木林至米林一带,构成了一个长达 500 km、宽约100 km的岩浆带(图1b),然而诱发拉 萨地块南部晚白垩世大规模岩浆作用的深部动力 学机制一直以来备受争议.在以往的研究中,普遍 认为拉萨地块南缘晚白垩世岩浆作用受控于新特 提斯洋的俯冲作用,但是多种大洋板块俯冲样式被 提议用于解释该时期的岩浆事件:主要包括大洋板 片正常角度俯冲(Chu et al., 2006; Ji et al., 2009)、 板片回转(Ma et al., 2013a, 2015)及洋脊俯冲 (Zhang et al., 2010; Zhu et al., 2019)等.

大洋板片正常角度俯冲模式最早由 Chu et al. (2006)提出用于解释南拉萨地块南缘晚白垩世岩 浆作用,但是在随后的研究中,发现南拉萨地块南 缘在晚白垩世期间(100~80 Ma)爆发了大规模岩 浆作用,然而在随后的白垩纪末期(80~70 Ma)是 岩浆作用的静宁期(Zhu et al.,2019).大洋板片正常 俯冲模型应该产生连续的岩浆作用,然而这与在南

拉萨地块南缘所观察的岩浆作用事件不符,因此大 洋板片正常俯冲模式逐渐被淘汰用于解释南拉萨 地块南缘晚白垩世岩浆作用.随着南拉萨地块南缘 晚白垩世大规模岩浆事件被发现,大洋板片回转模 型被提议解释该时期的岩浆作用(Ma et al., 2013a),板片回转发生的前提条件是板片先前俯冲 角度为低角度,然而在日喀则蛇绿岩中识别的早白 垩世(130~120 Ma)岩浆作用表明晚白垩世之前的 大洋板片为陡俯冲而非平板(低角度)俯冲(Dai et al.,2013),因此晚白垩世时期不具备发生大洋板片 回转的前提条件.另一方面板片回转作用通常会诱 引岩浆作用向海沟方向迁移,然而事实上,拉萨地 块南部100~80 Ma时期的岩浆作用逐渐往北迁移 (图 1b; Zhu et al., 2019),因此拉萨地块南缘的岩浆 作用不太可能受板片回转模型控制.洋脊俯冲模型 允许软流圈地幔沿洋脊裂隙板片窗上涌,携带的大 量热导致上覆地幔及洋壳部分熔融产生大规模的 岩浆作用,因此,该模型能够很好解释南拉萨地块 南缘的大规模的岩浆作用(图 1b; Zhu et al., 2019). 里龙和米林一带出露的紫苏花岗岩及其围岩遭受 高温麻粒岩相变质作用暗示其形成于一种贫水、高 温或超高温环境(Zhang et al., 2010),是高温岩浆通 过板片窗上涌的重要证据;同时南拉萨地块南缘发 育大量埃达克岩的可能诱因为热的软流圈物质通 过洋脊裂隙板片窗上涌诱引上覆洋壳发生部分熔 融(Zhang et al., 2010, 2019).因此南拉萨地块南缘 晚白垩世岩浆作用的可能诱发机制为新特提斯洋 脊俯冲.然而中拉萨地块门巴花岗闪长岩位于南拉 萨地块南缘晚白垩世岩浆岩带北侧约100 km处,是 否仍受新特提斯洋脊俯冲控制呢?

南拉萨地块北缘以及中拉萨地块晚白垩世岩 浆岩的成岩模式在以往的研究中也被涉及,主要存 在两种观点:洋脊俯冲(Liu et al.,2019)和板片回转 诱引的弧后伸展(Meng et al.,2014; Ma et al., 2015). Liu et al.(2019)认为形成门巴花岗闪长岩的 母岩浆起源于新特提斯洋壳部分熔融,因此认为其 成岩模式与南拉萨地块南缘晚白垩世岩浆作用的 动力学模式一致,为洋脊俯冲的产物.然而综合野 外观察、岩相学、地球化学及同位素证据,本文及 Meng et al.(2014)一致认为门巴埃达克岩质花岗闪 长岩的母岩浆起源于壳一幔混合岩浆源区.另外考 虑到中拉萨地块晚白垩世岩浆作用分布较为局限, 并未像南拉萨地块那样呈东西向带状展布,因此很

难用洋脊俯冲模型解释. 另外, Meng et al. (2014)发 现门巴花岗闪长岩中的镁铁质暗色包体为钾玄质 岩石,类似于碱性岩的地球化学特征(图4b),结合 其具有高Zr含量和Zr/Y比值,暗示其形成于一个 局部伸展地质环境, Meng et al. (2014) 归因这样的 一个环境为弧后伸展环境.此外,Ma et al.(2015)在 南拉萨地块北缘拉萨东侧达孜一带识别 92 Ma 辉 绿岩脉(图1b),Sr-Nd-Hf-O同位素揭示其起源于岩 石圈地幔和软流圈地幔混合源区,因此,达孜辉绿 岩脉也被认为形成于新特提斯洋板片回转诱引的 弧后伸展环境.通常板片回转诱引软流圈物质上涌 导致上覆地幔和岩石圈部分熔融产生强烈的岩浆 作用,且这些岩浆岩应该平行海沟(或岩浆弧)展布 (Liu et al., 2016). 如果门巴花岗闪长岩和达孜辉绿 岩脉形成于板片回转诱引的弧后伸展环境,那么同 时期的岩浆岩应该在中拉萨地块及南拉萨地块北 缘广泛分布,且呈东西向展布;然而事实相反,该时 期中拉萨地块及南拉萨地块北缘的岩浆作用不仅 微弱,而且近乎垂直海沟或南拉萨地块南缘岩浆弧 分布(图1b),这样的分布很难采用弧后伸展模型来 解释.

以往大量研究普遍支持南拉萨地块南缘晚白 垩世大规模岩浆作用是洋脊俯冲的产物(图 9; Zhang et al., 2010, 2019; Zhu et al., 2019), 当洋脊与 海沟近于平行,洋脊可能会被近似直交的转换断层 错断,伴随俯冲的持续,转换断层作为板块的薄弱 带同样可以发生撕裂形成板片窗,从而在上覆板块 形成近似垂直洋脊延伸方向的局部伸展带并伴随 相应的板内岩浆作用的发生(图9;Ma et al., 2012; 马本俊等,2015; McLeod et al., 2022). 南拉萨地块 北缘达孜一带辉绿岩脉和中拉萨地块门巴花岗闪 长岩规模较弱,均被认为形成板内伸展环境(Meng et al., 2014; Ma et al., 2015);此外, Wanget al. (2021)在南拉萨地块南缘晚白垩世岩浆弧中的措 杰林区域识别出A型花岗岩,同样被认为形成于伸 展环境(图1b). 措杰林A型花岗岩、达孜辉绿岩脉 及门巴花岗闪长岩共同构成了一个近似垂直海沟 方向的板内伸展岩浆岩带(图1b). 小规模板内岩浆 活动出现在俯冲带通常归因于特定的构造环境,如 弧后伸展、板片断离或板片撕裂(Gorring and Kay, 2001; Rosenbaum et al., 2008; Gianni et al., 2019; McLeod et al., 2022). 考虑拉萨地块南部小规模板 内伸展岩浆岩带近似垂直海沟的时空分布特征,本



图 9 拉萨地块南部晚白垩世岩浆作用的深部动力学机制示意图 Fig.9 Schematic diagram of deep dynamic mechanism of Late Cretaceous magmatism in the southern Lhasa block

文提议措杰林A型花岗岩、达孜辉绿岩脉和门巴花 岗闪长岩的形成与伴随洋脊俯冲的转换断层撕裂 造成的板片窗有关(图9).

综上所述,拉萨地块南部晚白垩世岩浆作用受 控于新特提斯洋脊俯冲作用,热的软流圈地幔物质 沿洋脊裂隙板片窗上涌诱发了南拉萨地块南缘大 规模岩浆事件,而软流圈物质沿切割洋中脊的转换 断层撕裂板片窗上涌诱发了近似垂直前者分布的 小规模板内伸展岩浆作用(图9).

5 结论

(1)中拉萨地块门巴花岗闪长岩LA-ICP-MS 锆石U-Pb年龄为(83.2±0.9) Ma,表明其侵位于晚 白垩世.

(2)地球化学特征显示门巴花岗闪长岩为埃达 克质岩石,其母岩浆起源于幔源镁铁质岩浆与加厚 下地壳熔体混合源区.

(3)拉萨地块南缘晚白垩世岩浆作用主要受新特提斯洋脊俯冲控制,其中中拉萨地块门巴花岗闪 长岩的形成与伴随洋脊俯冲的转换断层撕裂形成 的板片窗有关.

致谢:感谢审稿专家提出的建设性审稿意见.

References

Atherton, M. P., Petford, N., 1993. Generation of Sodium-Rich Magmas from Newly Underplated Basaltic Crust. *Nature*, 362(6416): 144-146. https://doi.org/10.1038/ 362144a0

- Castillo, P. R., Janney, P. E., Solidum, R. U., 1999. Petrology and Geochemistry of Camiguin Island, Southern Philippines: Insights to the Source of Adakites and other Lavas in a Complex Arc Setting. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 134(1): 33-51. https://doi.org/ 10.1007/s004100050467
- 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 Xizang. *Geology*, 34(9): 745. https://doi.org/10.1130/g22725.1
- Dai, J. G., Wang, C. S., Polat, A., et al., 2013. Rapid Forearc Spreading between 130 and 120 Ma: Evidence from Geochronology and Geochemistry of the Xigaze Ophiolite, Southern Xizang. *Lithos*, 172-173: 1-16. https://doi.org/10.1016/j.lithos.2013.03.011
- Defant, M. J., Drummond, M. S., 1990. Derivation of some Modern Arc Magmas by Melting of Young Subducted Lithosphere. *Nature*, 347(6294): 662-665. https://doi. org/10.1038/347662a0
- Dong, G.C., Mo, X.X., Zhao, Z.D., et al., 2006. Magma Mixing in Middle Part of Gangdise Magma Belt: Evidences from Granitoid Complex. Acta Petrologica Sinica, 22 (4):835-844 (in Chinese with English abstract)
- Dong, M., Lang, X.H., Deng, Y.L., et al., 2021.Geochronology and Geochemistry Implications for the Early Eocene Rongma Gabbros in the Southern Margin of the Lhasa Terrane, Xizang. *Earth Science*, 47:1349-1370 (in Chinese with English abstract).

Dong, X., Zhang, Z. M., Santosh, M., 2010. Zircon U-Pb

Chronology of the Nyingtri Group, Southern Lhasa Terrane, Xizangan Plateau: Implications for Grenvillian and Pan-African Provenance and Mesozoic-Cenozoic Metamorphism. *The Journal of Geology*, 118(6): 677-690. https://doi.org/10.1086/656355

- Gianni, G.M., Navarrete, C., Spagnotto, S., 2019. Surface and Mantle Records Reveal an Ancient Slab Tear Beneath Gondwana. *Scientific Reports*, 9(1): 1–10. https://doi. org/10.1038/s41598-019-56335-9
- Gorring, M. L., Kay, S. M., 2001. Mantle Processes and Sources of Neogene Slab Window Magmas from Southern Patagonia, Argentina. *Journal of Petrology*, 42(6): 1067– 1094. https://doi.org/10.1093/petrology/42.6.1067
- Hoskin, P. W. O., Black, L. P., 2000. Metamorphic Zircon Formation by Solid - State Recrystallization of Protolith Igneous Zircon. *Journal of Metamorphic Geology*, 18 (4): 423-439. https://doi.org/10.1046/j. 1525 - 1314. 2000.00266.x
- Hou, K. J., Li, Y. H., Tian, Y. R., 2009. In Situ U-Pb Zircon Dating Using Laser Ablation-Multi Ion Counting-ICP-MS. *Mineral Deposit*, 28(4):481-492 (in Chinese with English abstract)
- Hou, Z. Q., Gao, Y. F., Qu, X. M., et al., 2004. Origin of Adakitic Intrusives Generated during Mid-Miocene East-West Extension in Southern Xizang. *Earth and Planetary Science Letters*, 220(1/2): 139-155. https://doi. org/10.1016/s0012-821x(04)00007-x
- Ji, W. Q., Wu, F. Y., Chung, S. L., et al., 2009. Zircon U-Pb Geochronology and Hf Isotopic Constraints on Petrogenesis of the Gangdese Batholith, Southern Xizang. *Chemical Geology*, 262(3/4): 229-245. https://doi. org/10.1016/j.chemgeo.2009.01.020
- Jiang, Z. Q., Wang, Q., Li, Z. X., et al., 2012. Late Cretaceous (ca. 90Ma) Adakitic Intrusive Rocks in the Kelu Area, Gangdese Belt (southern Xizang): Slab Melting and Implications for Cu-Au Mineralization. *Journal of Asian Earth Sciences*, 53(3-4): 67-81. https://doi. org/10.1016/j.jseaes.2012.02.010
- Lang, X. H., Deng, Y. L., Wang, X. H., et al., 2020. Geochronology and Geochemistry of Volcanic Rocks of the Bima Formation, Southern Lhasa Subterrane, Xizang: Implications for Early Neo-Tethyan Subduction. Gondwana Research, 80(B5): 335-349. https://doi.org/ 10.1016/j.gr.2019.11.005
- Lang, X. H., Wang, X. H., Deng, Y. L., et al., 2019. Early Jurassic Volcanic Rocks in the Xiongcun District, Southern Lhasa Subterrane, Xizang: Implications for the Tectono-Magmatic Events Associated with the Early Evolution of

the Neo-Tethys Ocean. *Lithos*, 340-341(1): 166-180. https://doi.org/10.1016/j.lithos.2019.05.014

- Leier, A. L., DeCelles, P. G., Kapp, P., et al., 2007. The Takena Formation of the Lhasa Terrane, Southern Xizang: The Record of a Late Cretaceous Retroarc Foreland Basin. *Geological Society of America Bulletin*, 119 (1/2): 31-48. https://doi.org/10.1130/b25974.1
- Liu, J. H., Xie, C. M., Li, C., et al., 2019. Origins and Tectonic Implications of Late Cretaceous Adakite and Primitive High-Mg Andesite in the Songdo Area, Southern Lhasa Subterrane, Xizang. *Gondwana Research*, 76(10): 185-203. https://doi.org/10.1016/j.gr.2019.06.014
- Liu, Y. S., Hu, Z. C., Gao, S., et al., 2008. 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. https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2008.08.004
- Liu, L., Xu, X. S., Xia, Y., 2016. Asynchronizing Paleo-Pacific Slab Rollback beneath SE China: Insights from the Episodic Late Mesozoic Volcanism. *Gondwana Research*, 37(1): 397-407. https://doi. org/10.1016/j. gr.2015.09.009
- Ludwig, K. R., 2003. Users Manualf or Isoplot 3.0: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. Berkeley Geochronology Center, Special Publication, 4:1-71.
- Ma, B. J., Wu, S. G., Fan, J. K., 2015. An Overview of Slab Window. *Marine Geology Frontiers*, 31(12): 1-10 (in Chinese with English abstract)
- Ma, C., Xiao, W. J., Windley, B. F., et al., 2012. Tracing a Subducted Ridge-Transform System in a Late Carboniferous Accretionary Prism of the Southern Altaids: Orthogonal Sanukitoid Dyke Swarms in Western Junggar, NW China. *Lithos*, 140-141: 152-165. https://doi. org/10.1016/j.lithos.2012.02.005
- Ma, L., Wang, Q., Wyman, D. A., et al., 2013a. Late Cretaceous (100-89 Ma) Magnesian Charnockites with Adakitic Affinities in the Milin Area, Eastern Gangdese: Partial Melting of Subducted Oceanic Crust and Implications for Crustal Growth in Southern Xizang. *Lithos*, 175-176(5): 315-332. https://doi.org/10.1016/j.lithos.2013.04.006
- Ma, L., Wang, Q., Li, Z. X., et al., 2013b. Early Late Cretaceous (ca. 93 Ma) Norites and Hornblendites in the Milin Area, Eastern Gangdese: Lithosphere-Asthenosphere Interaction during Slab Roll-Back and an Insight into Early Late Cretaceous (ca. 100-80 Ma) Magmatic "Flare-Up" in Southern Lhasa (Xizang). *Lithos*, 172-173(8): 17-30. https://doi.org/10.1016/j.lithos.2013.03.007

- Ma, L., Wang, Q., Wyman, D.A., et al., 2015. Late Cretaceous Back-Arc Extension and Arc System Evolution in the Gangdese Area, Southern Xizang: 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
- Macpherson, C.G., Dreher, S.T., Thirlwall, M.F., 2006. Adakites without Slab Melting: High Pressure Differentiation of Island Arc Magma, Mindanao, the Philippines. *Earth* and Planetary Science Letters, 243 (3-4): 581-593. https://doi.org/10.1016/j.epsl.2005.12.034
- McLeod, O. E., Brenna, M., Briggs, R. M., et al., 2022. Slab Tear as a Cause of Coeval Arc-Intraplate Volcanism in the Alexandra Volcanic Group, New Zealand. *Lithos*, 408-409(1-4): 106564. https://doi. org/ 10.1016/j.lithos.2021.106564
- Meng, F. Y., Zhao, Z. D., Zhu, D. C., et al., 2014. Late Cretaceous Magmatism in Mamba Area, Central Lhasa Subterrane: Products of Back - Arc Extension of Neo-Tethyan Ocean? Gondwana Research, 26(2): 505– 520. https://doi.org/10.1016/j.gr.2013.07.017
- Rapp, R. P., Watson, E. B., 1995. Dehydration Melting of Metabasalt at 8-32 Kbar: Implications for Continental Growth and Crust-Mantle Recycling. *Journal of Petrolo*gy, 36(4): 891-931. https://doi.org/10.1093/petrology/36.4.891
- Rosenbaum, G., Gasparon, M., Lucente, F. P., et al., 2008. Kinematics of Slab Tear Faults during Subduction Segmentation and Implications for Italian Magmatism. *Tectonics*, 27(2): 119-134. https://doi. org/10.1029/ 2007TC002143
- Schiano, P., Monzier, M., Eissen, J. P., et al., 2010. Simple Mixing as the Major Control of the Evolution of Volcanic Suites in the Ecuadorian Andes. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, 160: 297-312. https://doi.org/ 10.1007/s00410-009-0478-2
- Streck, M. J., Leeman, W. P., Chesley, J., 2007. High-Magnesian Andesite from Mount Shasta: A Product of Magma Mixing and Contamination, not a Primitive Mantle Melt. *Geology*, 35(4): 351. https://doi.org/ 10.1130/g23286a.1
- Sun, S. S., McDonough, W. F., 1989. Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts: Implications for Mantle Composition and Processes. *Geological Society*, *London*, *Special Publications*, 42(1): 313-345. https: //doi.org/10.1144/gsl.sp.1989.042.01.19
- Wang, Q., Wyman, D. A., Xu, J. F., et al., 2008. Eocene

Melting of Subducting Continental Crust and Early Uplifting of Central Xizang: Evidence from Central-Western Qiangtang High-K Calc-Alkaline Andesites, Dacites and Rhyolites. *Earth and Planetary Science Letters*, 272(1/2): 158–171. https://doi.org/10.1016/j.epsl.2008.04.034

- Wang, X. H., Lang, X. H., Deng, Y. L., et al., 2022a. Early Mesozoic Magmatism Records the Tectonic Evolution from Syn - To Post - Collisional Setting in the Central Lhasa Subterrane, Xizang. *Lithos*, 416-417(6): 106642. https://doi.org/10.1016/j.lithos.2022.106642
- Wang, X. H., Lang, X. H., Klemd, R., et al., 2022b. Subduction Initiation of the Neo - Tethys Oceanic Lithosphere by Collision - Induced Subduction Transference. *Gondwana Research*, 104(1): 54-69. https://doi.org/ 10.1016/j.gr.2021.08.012
- Wang, X.H., Lang, X.H., Tang, J.X., et al., 2019. Early-Middle Jurassic (182—170 Ma) Ruocuo Adakitic Porphyries, Southern Margin of the Lhasa Terrane, Xizang: Implications for Geodynamic Setting and Porphyry Cu-Au Mineralization. *Journal of Asian Earth Sciences*, 173: 336— 351.https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2019.01.042
- Wang, X. H., Lang, X. H., Tang, J.X., et al., 2020. Early Carboniferous Back-Arc Rifting-Related Magmatism in Southern Xizang: Implications for the History of the Lhasa Terrane Separation from Gondwana. *Tectonics*, 39(10): e2020TC006237. https://doi.org/10.1029/2020tc006237
- Wang, Z. Z., Zhao, Z. D., Li, X. P., et al., 2021. Late Cretaceous Adakitic and A - Type Granitoids in Chanang, Southern Xizang: Implications for Neo - Tethyan Slab Rollback. *Gondwana Research*, 96: 89–104. https:// doi.org/10.1016/j.gr.2021.04.007
- Wen, D. R., Chung, S. L., Song, B., et al., 2008. Late Cretaceous Gangdese Intrusions of Adakitic Geochemical Characteristics, SE Xizang: Petrogenesis and Tectonic Implications. *Lithos*, 105(1/2): 1-11. https://doi. org/10.1016/j.lithos.2008.02.005
- Xu, J. F., Shinjo, R., Defant, M. J., et al., 2002. Origin of Mesozoic Adakitic Intrusive Rocks in the Ningzhen Area of East China: Partial Melting of Delaminated Lower Continental Crust?. *Geology*, 30(12): 1111. https://doi.org/ 10.1130/0091-7613(2002)030<1111:oomair>2.0.co;2
- Xu, W. C., Zhang, H. F., Luo, B. J., et al., 2015. Adakite-Like Geochemical Signature Produced by Amphibole – Dominated Fractionation of Arc Magmas: An Example from the Late Cretaceous Magmatism in Gangdese Belt, South Xizang. *Lithos*, 232: 197–210. https://doi.org/ 10.1016/j.lithos.2015.07.001

Zhang, L. L., Zhu, D. C., Wang, Q., et al., 2019. Late

Cretaceous Volcanic Rocks in the Sangri Area, Southern Lhasa Terrane, Xizang: Evidence for Oceanic Ridge Subduction. *Lithos*, 326-327(271): 144-157. https:// doi.org/10.1016/j.lithos.2018.12.023

- Zhang, Z. M., Zhao, G. C., Santosh, M., et al., 2010. Late Cretaceous Charnockite with Adakitic Affinities from the Gangdese Batholith, Southeastern Xizang: Evidence for Neo-Tethyan Mid-Ocean Ridge Subduction? *Gondwana Research*, 17(4): 615-631. https://doi.org/10.1016/j. gr.2009.10.007
- Zhang, Z. M., Dong, X., Xiang, H., et al., 2014. Metagabbros of the Gangdese Arc Root, South Xizang: Implications for the Growth of Continental Crust. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 143(B11): 268–284. https://doi. org/10.1016/j.gca.2014.01.045
- Zhang, S., Li, Y., Li, F., et al., 2020. Zircon U-Pb Geochronology, Geochemistry and Petrogenesis of Miocene Syenite in Chazi Area, Xizang. *Earth Science*, 45(8): 2882-2893. https://doi.org/10.3799/dqkx.2020.163
- Zhao, Z. D., Mo, X. X., Dilek, Y., et al., 2009. Geochemical and Sr-Nd-Pb-O Isotopic Compositions of the Post-Collisional Ultrapotassic Magmatism in SW Xizang: Petrogenesis and Implications for India Intra - Continental Subduction beneath Southern Xizang. *Lithos*, 113(1/2): 190-212. https://doi.org/10.1016/j.lithos.2009.02.004
- Zheng, Y. C., Hou, Z. Q., Gong, Y. L., et al., 2014. Petrogenesis of Cretaceous Adakite - Like Intrusions of the

Gangdese Plutonic Belt, Southern Xizang: Implications for Mid-Ocean Ridge Subduction and Crustal Growth. *Lithos*, 190-191(3-4): 240-263. https://doi.org/ 10.1016/j.lithos.2013.12.013

- Zhu, D.C., Wang, Q., Chung, S.L., et al., 2019. Gangdese Magmatism in Southern Xizang and India-Asia Convergence since 120 Ma. *Geological Society Special Publication*, 483(1):583-604. https://doi.org/10.1144/SP483.14
- Zhu, D.C., Zhao, Z.D., Niu, Y.L., et al., 2013. The Origin and Pre-Cenozoic Evolution of the Xizangan Plateau. Gondwana Research, 23(4): 1429-1454. https://doi. org/10.1016/j.gr.2012.02.002

附中文参考文献

- 董国臣,莫宣学,赵志丹,等,2006. 冈底斯岩浆带中段岩浆混 合作用:来自花岗杂岩的证据. 岩石学报,2006(04): 835-844.
- 董咪,郎兴海,邓煜霖,等,2022.拉萨地体南缘早始新世荣玛 辉长岩年代学、岩石地球化学特征及其地质意义.地球 科学,47:1349-1370.
- 侯可军,李延河,田有荣,2009. LA-MC-ICP-MS 锆石微区原 位 U-Pb 定年技术. 矿床地质,28(4):481-492.
- 马本俊,吴时国,范建柯,2015.板片窗构造研究综述.海洋地 质前沿,31(12):1-10.
- 张士贞,李勇,李奋其,等,2020. 西藏查孜地区中新世正长岩的锆石U-Pb年代学、地球化学及岩石成因.地球科学, 45(8):2882-2893.