

吕娜,郎兴海,王旭辉,等. 西藏茶巴拉地区晚白垩世角闪辉长岩与石英闪长岩年代学、岩石地球化学与成因[J]. 地球科学与环境学报, 2022, 44(1): 42-64.

LYU Na, LANG Xing-hai, WANG Xu-hui, et al. Geochronology, Geochemistry and Petrogenesis of Late Cretaceous Hornblende Gabbros and Quartz Diorites in Chabala Area of Tibet, China[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2022, 44(1): 42-64.

DOI: 10.19814/j.jese.2021.10046

# 西藏茶巴拉地区晚白垩世角闪辉长岩与石英闪长岩年代学、岩石地球化学与成因

吕娜,郎兴海\*,王旭辉,何青,邓煜霖,杨同山,董咪

(成都理工大学地球科学学院,四川成都 610059)

**摘要:**青藏高原南部拉萨地体晚白垩世岩浆岩的岩石成因及地球动力学机制仍存在争议。以拉萨地体南缘曲水县茶巴拉地区西部的角闪辉长岩和石英闪长岩为研究对象,在野外地质调查基础上,开展了岩相学、地球化学和 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学研究,查明了角闪辉长岩和石英闪长岩的形成时代及岩石成因,进一步约束了南部拉萨地体晚白垩世的构造演化。结果表明:角闪辉长岩侵位年龄为 91~87 Ma,石英闪长岩侵位年龄为 81 Ma。角闪辉长岩具有低 SiO<sub>2</sub> 含量(质量分数,下同)(48.16%~51.05%),高 MgO 含量(4.54%~11.13%)、Co 含量((31.2~46.8)×10<sup>-6</sup>)、Ni 含量((1.79~82.70)×10<sup>-6</sup>)、(<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr)<sub>i</sub> 值为 0.703 925~0.704 380,ε<sub>Nd</sub>(t) 值为 2.50~3.96,表明角闪辉长岩来源于受俯冲板片流体交代的亏损地幔楔的部分熔融;石英闪长岩普遍具有高 SiO<sub>2</sub> 含量(62.45%~62.90%)、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量(15.94%~16.22%)、K<sub>2</sub>O+Na<sub>2</sub>O 值(6.36%~6.46%)、Mg<sup>#</sup> 值(43.77~44.65)的特征,属于准铝质 I 型花岗岩,其来源于下地壳的部分熔融,并有少量幔源岩浆的加入。两类岩石均显示岛弧岩浆的特征,富集轻稀土元素及大离子亲石元素(Rb、Th、U、Sr 等),亏损重稀土元素及高场强元素(Nb、Ta、Ti 等)。结合区域资料,晚白垩世早期(100~80 Ma)发生在南部拉萨地体的岩浆爆发事件可能是新特提斯洋脊北向俯冲的结果。洋脊俯冲使软流圈物质通过板片窗上涌,并发生减压熔融形成基性岩浆,这些基性岩浆提供的热量促使地幔楔和下地壳岩石发生部分熔融,从而导致南部拉萨地体晚白垩世早期岩浆爆发。

**关键词:**角闪辉长岩;石英闪长岩;地球化学;岩石成因;晚白垩世;洋脊俯冲;拉萨地体

**中图分类号:**P581;P597 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-6561(2022)01-0042-23

## Geochronology, Geochemistry and Petrogenesis of Late Cretaceous Hornblende Gabbros and Quartz Diorites in Chabala Area of Tibet, China

LYU Na, LANG Xing-hai\*, WANG Xu-hui, HE Qing, DENG Yu-lin,

YANG Tong-shan, DONG Mi

(College of Earth Science, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China)

收稿日期:2021-10-28;修回日期:2021-12-13 投稿网址: <http://jese.chd.edu.cn/>

基金项目:成都理工大学珠峰科学研究计划项目(2020ZF11407);四川省科技计划项目(2020JDJQ0042);

国家自然科学基金项目(41502079,41972084);国家重点研发计划项目(2018YFC0604105);

西北大学大陆动力学国家重点实验室开放基金项目(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项目(ZS1911);

中国地质调查局地质调查项目(DD20190167,DD20160346)

作者简介:吕娜(1994-),女,河北张家口人,理学硕士研究生,E-mail:844688306@qq.com。

\* 通讯作者:郎兴海(1982-),男,云南景东人,教授,理学博士,E-mail:langxinghai@126.com。

**Abstract:** The petrogenesis and geodynamic mechanism of Late Cretaceous magmatic rocks in southern Lhasa terrane, Tibet, are still controversial. The hornblende gabbros and quartz diorites in the west of Chabala area, Qushui county of southern Lhasa terrane were selected as the research object, and based on field geological surveys, the petrography, geochemistry and LA-ICP-MS zircon U-Pb geochronology were analyzed to identify the formation ages and petrogenesis of hornblende gabbros and quartz diorites, and further constrain the tectonic evolution of southern Lhasa terrane during Late Cretaceous. The results show that the hornblende gabbros emplace at 91–87 Ma, and the quartz diorites emplace at 81 Ma. The hornblende gabbros have low contents of  $\text{SiO}_2$  (48.16%–51.05%), high contents of  $\text{MgO}$  (4.54%–11.13%), Co ((31.2–46.8)  $\times 10^{-6}$ ) and Ni ((1.79–82.70)  $\times 10^{-6}$ ), and ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ )<sub>i</sub> value is 0.703 925–0.704 380,  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  value is 2.50–3.96, indicating that the hornblende gabbros are generated by partial melting of a depleted mantle wedge that have been metasomatized by slab-derived fluid, and suffer from no obvious crustal contamination. The quartz diorites are generally high  $\text{SiO}_2$  (62.45%–62.90%),  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (15.94%–16.22%),  $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$  (6.36%–6.46%) and  $\text{Mg}^\#$  value (43.77–44.65), thus can be grouped into quasi-aluminous I-type granite. The quartz diorites are generated by partial melting of the lower crust and mix with a little mantle-derived magma. Both rocks show the characteristics of arc magma with enrichment of LREEs and LILEs (such as Rb, Th, U and Sr), and depletion of HREEs and HFSEs (such as Nb, Ta and Ti). Integrating regional data, the “flare-up” event in southern Lhasa terrane during the early Late Cretaceous (100–80 Ma) is likely the result of the northwards subduction of an oceanic ridge of Neo-Tethys. The ridge subduction would have resulted asthenosphere material upwelling through a slab window and decompression melting to form a basic magma, which provides heat to cause partial melting of the mantle wedge and lower crustal rocks, resulting in the magma eruption during the early Late Cretaceous of southern Lhasa terrane.

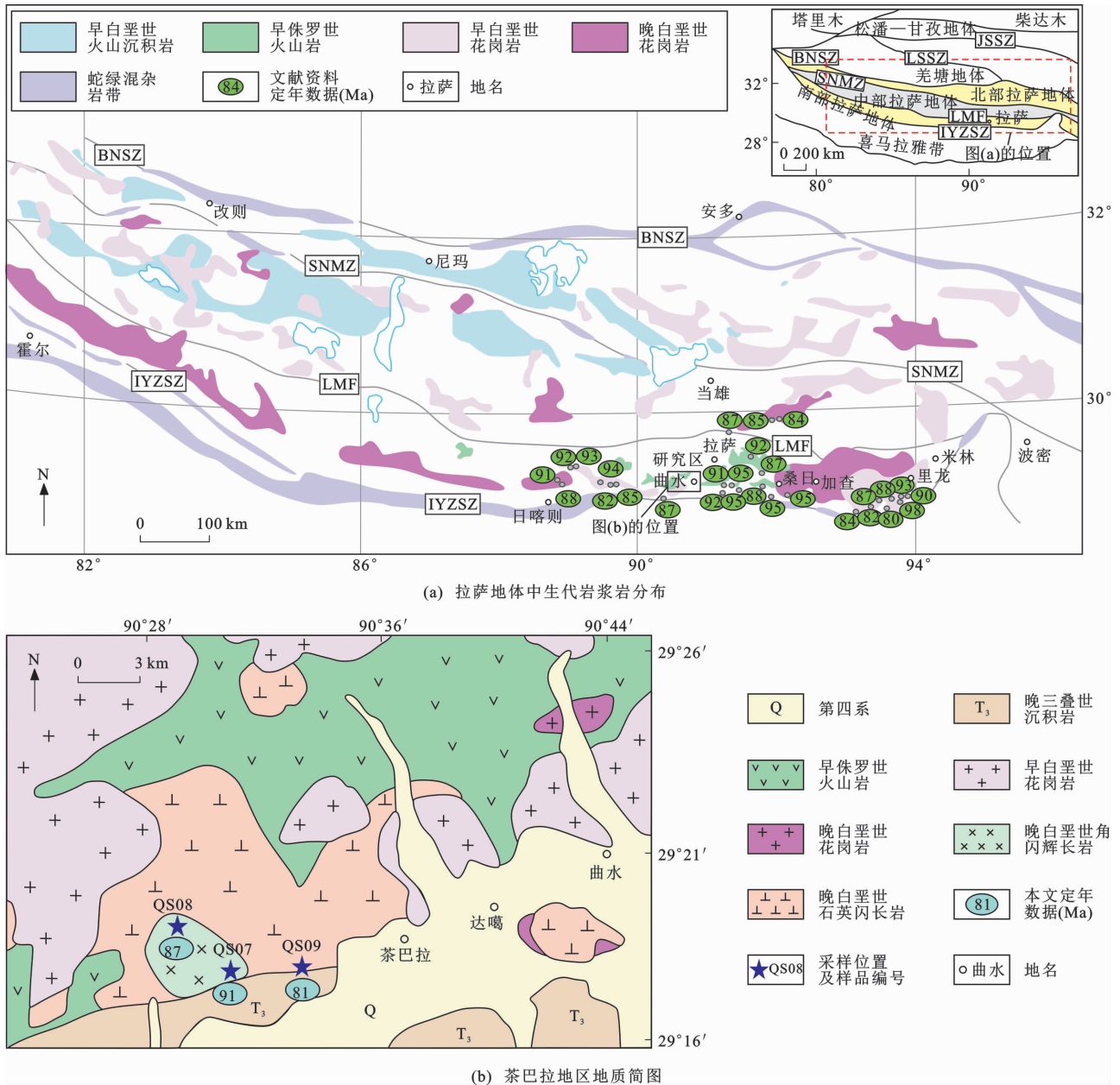
**Key words:** hornblende gabbro; quartz diorite; geochemistry; petrogenesis; Late Cretaceous; ridge subduction; Lhasa terrane

## 0 引言

青藏高原自古生代以来,经历了多洋盆、多俯冲、多碰撞和多造山等一系列地质作用,是研究造山带地球动力学的天然实验室<sup>[1]</sup>。青藏高原主要包括 4 个大的构造单元,由南到北分别为喜马拉雅带、拉萨地体、羌塘地体和松潘—甘孜地体<sup>[2-4]</sup>,分别以印度河—雅鲁藏布江缝合带(IYZSZ)、班公湖—怒江缝合带(BNSZ)和金沙江缝合带(JSSZ)为界<sup>[1,3]</sup>[图 1(a)]。拉萨地体是青藏高原的重要组成部分,该地体内广泛分布中—新生代岩浆岩<sup>[5-6]</sup>,记录了新特提斯洋演化和印度—亚欧大陆碰撞的长期复杂构造演化过程<sup>[2,4,7]</sup>。因此,这些岩浆岩对于约束拉萨地体构造演化具有重要意义。

众多学者对新特提斯洋俯冲和印度—亚欧大陆碰撞时限开展了讨论。研究表明,新特提斯洋板片在约 260 Ma 开始北向俯冲到拉萨地体之下<sup>[8]</sup>,

100~70 Ma 新特提斯洋板片处于俯冲阶段末期<sup>[9-10]</sup>,65~55 Ma 印度—亚欧大陆发生碰撞<sup>[11]</sup>,约 40 Ma 进入后碰撞阶段<sup>[6]</sup>。Zhu 等总结了南部拉萨地体 120 Ma 以来的岩浆活动,并将新特提斯洋北向俯冲的演化分为 5 个阶段,即 120~95 Ma 新特提斯洋板片北向正常俯冲阶段、95~85 Ma 洋脊俯冲阶段、85~70 Ma 平板俯冲阶段、70~53 Ma 板片回转阶段(其中印度和亚欧大陆在 55 Ma 发生碰撞)、约 53 Ma 新特提斯洋板片断离阶段<sup>[12]</sup>。在此过程中,青藏高原发生了十分强烈的岩浆活动,从而形成了种类繁多且遍布高原的岩浆岩,尤其以南部拉萨地体岩浆岩分布最为集中<sup>[6]</sup>。南部拉萨地体岩浆岩主要集中在晚三叠世—早侏罗世、晚白垩世和古新世—始新世,目前对晚三叠世—早侏罗世、古新世—始新世岩浆岩研究程度较高,晚三叠世—早侏罗世岩浆岩是新特提斯洋北向俯冲的产物<sup>[1,13-21]</sup>,古新世—始新世岩浆岩是印度—亚欧大陆碰撞的结



IYZSZ为印度河—雅鲁藏布江缝合带；BNSZ为班公湖—怒江缝合带；SNMZ为狮泉河—纳木错蛇绿混杂岩带；LMF为洛巴堆—米拉山断裂带；JSSZ为金沙江缝合带；LSSZ为龙木错—双湖缝合带；图(a)引自文献[2]和[22]，有所修改；图(b)引自文献[23]，有所修改

图1 青藏高原构造格架、拉萨地体中生代岩浆岩分布以及茶巴拉地区地质简图

Fig. 1 Tectonic Outline of Tibetan Plateau, Distribution of Mesozoic Magmatic Rocks in Lhasa Terrane and Geological Sketch Map of Chabala Area

果<sup>[3,7,12,24]</sup>，但对于晚白垩世早期(100~80 Ma)岩石成因与动力学机制尚存在争议。Wen等在南部拉萨地体里龙—朗县地区发现了晚白垩世埃达克质含绿帘石花岗闪长岩，其形成被解释为新特提斯洋北向平板俯冲<sup>[25]</sup>；Ma等将米林地区晚白垩世埃达克质岩石归因于新特提斯洋板片回转引发的软流圈上涌<sup>[9]</sup>；Zhang等在里龙—米林地区发现了晚白垩世埃达克质紫苏花岗岩，将其解释为新特提斯洋洋脊俯冲<sup>[26]</sup>。这些争议反映了南部拉萨地体晚白垩世

早期的动力学研究较为薄弱，导致了对南部拉萨地体晚白垩世岩浆作用的地球动力学机制认识仍不清楚。

茶巴拉地区位于拉萨地体南缘的曲水县西侧，该区出露角闪辉长岩、石英闪长岩和花岗岩等，为研究新特提斯洋俯冲以来的构造演化和地球动力学机制提供了一个绝好的窗口。本文以南部拉萨地体茶巴拉地区角闪辉长岩和石英闪长岩为研究对象，通过对其开展岩石地球化学、LA-ICP-MS 锆石 U-Pb

定年和 Sr-Nd 同位素研究,并结合前人研究成果,分析其岩浆源区性质和岩石成因,为深入研究南部拉萨地体晚白垩世岩浆作用和地球动力学过程提供新证据。

## 1 地质背景及岩石学特征

拉萨地体位于班公湖—怒江缝合带和印度河—雅鲁藏布江缝合带之间,呈 EW 向分布,长约 2 500 km<sup>[6,27]</sup>[图 1(a)],由南到北依次为南部拉萨地体、中部拉萨地体和北部拉萨地体,分别以洛巴堆—米拉山断裂带和狮泉河—纳木错蛇绿混杂岩带为界<sup>[2,28]</sup>[图 1(a)]。南部拉萨地体记录了新特提斯洋北向俯冲以及印度—亚欧大陆碰撞造山事件,总体以新生地壳为特征<sup>[17-21]</sup>,广泛分布中—新生代侵入岩和火山岩[图 1(a)]。侵入岩主要由晚三叠世—中新世(205~13 Ma)花岗岩、花岗闪长岩、闪长岩以及少量辉长岩和辉绿岩组成<sup>[23,29]</sup>;火山岩由早侏罗世雄村组<sup>[20]</sup>、早—中侏罗世叶巴组<sup>[3]</sup>、中生代桑日群<sup>[8,30]</sup>及古—始新世林子宗群火山岩<sup>[11,31]</sup>组成。中部拉萨地体是一个具前寒武纪结晶基底的微陆块<sup>[32-34]</sup>,其上被古生代和中生代火山—沉积岩覆盖,中生代侵入体断续分布<sup>[6]</sup>。北部拉萨地体以新生地壳为特征<sup>[35-36]</sup>,其上主要分布侏罗纪—白垩纪火山—沉积岩<sup>[6]</sup>。

研究区位于南部拉萨地体南缘的曲水县茶巴拉乡西侧[图 1(b)]。区内岩浆活动强烈,主要侵入岩为角闪辉长岩、石英闪长岩和花岗岩等,形成时代介于早白垩世至晚白垩世之间;晚三叠世沉积岩主要为灰白色厚砂页岩夹薄层状粉砂岩,岩石普遍受中—低级变质作用的影响<sup>[37]</sup>;早侏罗世火山岩主要类型为玄武岩、玄武安山岩、安山岩和英安岩,与浅海或大陆环境中的砂岩、板岩等沉积岩互层<sup>[30]</sup>。本文以角闪辉长岩和石英闪长岩为研究对象,样品 QS07、QS08、QS09 的采样位置分别为(29°18′15.8″N,90°31′0.1″E)、(29°19′51.5″N,90°30′22.5″E)、(29°18′53.0″N,90°33′29.0″E)。野外共采集了 9 件样品,其中角闪辉长岩 6 件、石英闪长岩 3 件。

角闪辉长岩(样品 QS07、QS08)岩体出露较好,呈灰黑色,具块状构造、半自形中粒粒状结构[图 2(a)、(b)]。显微镜下鉴定结果表明,其主要矿物组成为斜长石(体积分数为 45%~55%)、角闪石(30%~40%)、黑云母(约 5%)和辉石(<5%),副矿物为磁铁矿、榍石、锆石等,其中磁铁矿分布在角闪石周围。斜长石呈半自形板状,环带较少,粒度为

1~3 mm,聚片双晶发育。角闪石多呈半自形短柱状,多色性明显,以黄绿色、黄褐色为主。黑云母呈细片状,具微细粒结构,多色性明显。辉石多呈半自形或他形晶[图 2(e)]。

石英闪长岩(样品 QS09)新鲜面呈灰褐色,具有典型的块状构造、中细粒粒状结构,局部可见铜矿化(孔雀石)[图 2(c)]。显微镜下鉴定结果表明,主要矿物组成为斜长石(体积分数为 30%~40%)、角闪石(20%~30%)、碱性长石(约 10%)、石英(5%~10%)、黑云母(<5%),副矿物为磁铁矿、锆石、磷灰石等。斜长石呈半自形柱状结构,聚片双晶发育。角闪石节理发育,多见半自形结构,具有多色性,以黄绿色、黄褐色为主。碱性长石主要为钾长石,格子双晶发育。石英多呈不规则粒状充填在其他矿物之间,镜下干涉色为一级灰白。黑云母呈自形片状,多色性明显[图 2(f)]。

## 2 分析方法

锆石挑选、制靶、阴极发光(CL)显微照相及测试在北京锆年领航科技有限公司完成。野外采集样品 10 kg 左右,首先将岩石进行粉碎,然后采用重液法与磁选法进行锆石分选并在双目镜下挑纯,安装在环氧树脂中进行抛光,直到颗粒内部暴露出来。分析前,使用 3% HNO<sub>3</sub> 溶液清洗表面,以去除铅污染物。激光剥蚀系统和 ICP-MS 仪器的运行条件及后续数据处理与文献[38]所描述的相同。ICP-MS 仪器采用 Agilent 7500a 四极杆电感耦合等离子体质谱仪,采用 GeoLas Plus 准分子 ArF 激光剥蚀系统同时测定锆石 U-Pb 年龄。激光束斑直径为 32 μm,频率为 8 Hz。另外,采用氦气作为载气,氩气作为补偿气。采用 NIST610 对仪器进行优化,并作为测定微量元素的外标,91500 标准锆石<sup>[39]</sup>作为内标,锆石 GJ1<sup>[40]</sup>作为监测样品。每个分析点的分析时间跨度为 100 s,包括大约 20 s 的背景采集时间和 50 s 的样本数据采集时间;每 5 次分析后,再对 91500 标准锆石进行两次分析。测试完成后,使用 ICPMSDataCal 软件对分析数据进行处理<sup>[41]</sup>。分析结果见表 1。

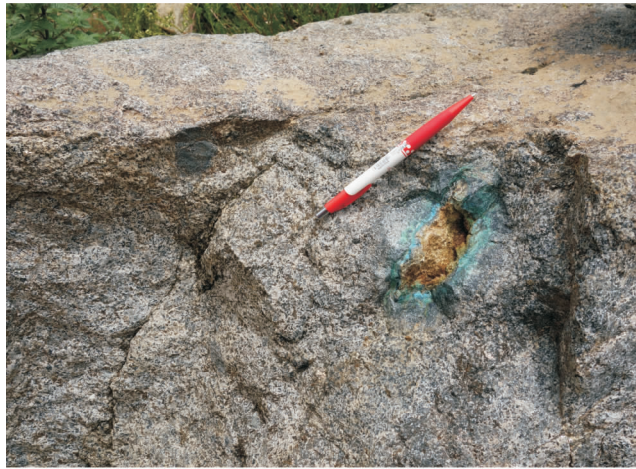
本次全岩主量、微量元素测试在南京聚谱检测科技有限公司完成。主量元素采用 X 射线荧光光谱(XRF)法测定,使用 Axios X 荧光光谱仪(荷兰帕纳科公司)对其进行分析,分析的精确度优于 3%。微量元素采用电感耦合等离子体质谱(NexION 300x ICP-MS)法测定,分析的精确度优于 5%。分



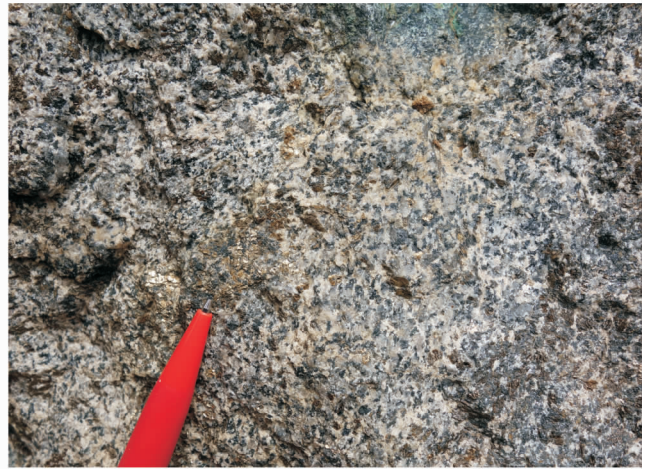
(a) 角闪辉长岩野外照片 I



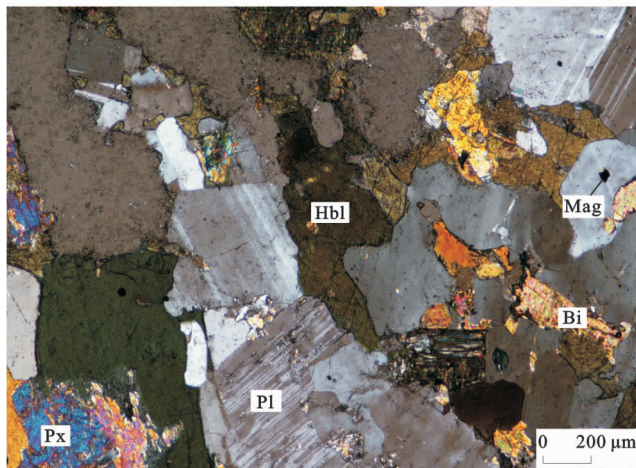
(b) 角闪辉长岩野外照片 II



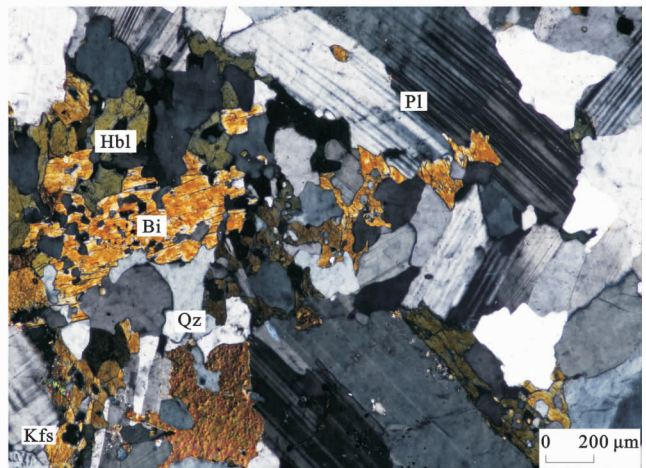
(c) 石英闪长岩野外照片 I



(d) 石英闪长岩野外照片 II



(e) 角闪辉长岩显微镜下照片(正交偏光)



(f) 石英闪长岩显微镜下照片(正交偏光)

Pl 为斜长石; Hbl 为角闪石; Kfs 为钾长石; Qz 为石英; Bi 为黑云母; Px 为辉石; Mag 为磁铁矿

图 2 茶巴拉地区角闪辉长岩和石英闪长岩野外照片及显微镜下照片

Fig. 2 Field Photos and Microphotographs of Hornblende Gabbros and Quartz Diorites in Chabala Area

析样品前选取新鲜样品,在超声波清洗仪中用蒸馏水清洗以避免污染,然后用不锈钢钵研磨成 200 目。将所有样品粉碎并称重,所得粉末用于主量和微量元素分析。详细的分析方法见文献[42]。

全岩 Sr-Nd 同位素在南京聚谱检测科技有限公司采用热电离质谱(TIMS)仪进行分析。选定的 Sr、Nd 同位素分析样品溶解在 HF、HNO<sub>3</sub> 和 HClO<sub>4</sub> 的酸性混合物中,并按照文献[43]的方法采

表 1 角闪辉长岩和石英闪长岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素分析结果

Table 1 Analysis Results of LA-ICP-MS Zircon U-Pb Isotope of Hornblende Gabbros and Quartz Diorites

分析点	$w(\text{Th})/10^{-6}$	$w(\text{U})/10^{-6}$	Th/U 值	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 值	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 值	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 值	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄/Ma	谐和度
QS07-1	2 526	2 313	1.09	0.048 69±0.002 44	0.098 01±0.003 60	0.014 39±0.000 34	92.1±2.2	97%
QS07-2	543	513	1.06	0.052 53±0.010 05	0.094 53±0.009 07	0.014 09±0.000 47	90.2±3.0	98%
QS07-3	8 628	5 056	1.71	0.046 84±0.011 40	0.096 09±0.009 74	0.014 38±0.000 29	92.0±1.9	98%
QS07-4	1 108	941	1.18	0.047 71±0.002 62	0.093 55±0.003 72	0.014 24±0.000 32	91.2±2.0	99%
QS07-5	707	565	1.25	0.047 77±0.004 63	0.094 80±0.007 53	0.014 39±0.000 36	92.1±2.3	99%
QS07-6	968	844	1.15	0.049 28±0.002 64	0.096 87±0.003 92	0.014 38±0.000 38	92.1±2.4	98%
QS07-7	745	545	1.37	0.050 10±0.002 78	0.099 76±0.005 86	0.014 37±0.000 39	92.0±2.5	95%
QS07-8	718	485	1.48	0.048 50±0.004 94	0.092 87±0.006 70	0.014 04±0.000 46	89.9±2.9	99%
QS07-9	497	334	1.49	0.049 92±0.003 01	0.095 24±0.004 92	0.013 86±0.000 33	88.8±2.1	96%
QS07-10	441	299	1.47	0.048 63±0.004 25	0.093 46±0.007 41	0.013 80±0.000 37	88.4±2.3	97%
QS07-11	546	372	1.47	0.050 20±0.004 86	0.090 97±0.006 54	0.014 00±0.000 46	89.7±2.9	98%
QS07-12	1 363	794	1.72	0.048 75±0.004 83	0.098 08±0.010 26	0.014 18±0.000 40	90.7±2.5	95%
QS07-13	583	406	1.44	0.048 23±0.004 40	0.092 25±0.006 99	0.014 03±0.000 46	89.8±2.9	99%
QS08-1	468	325	1.44	0.059 36±0.027 38	0.087 31±0.011 86	0.013 32±0.000 67	85.3±4.3	99%
QS08-2	707	449	1.57	0.046 63±0.013 38	0.091 51±0.015 23	0.013 96±0.000 45	89.4±2.8	99%
QS08-3	917	375	2.45	0.047 00±0.008 54	0.089 11±0.013 07	0.013 70±0.000 43	87.7±2.7	98%
QS08-4	456	299	1.52	0.046 40±0.008 84	0.087 87±0.008 23	0.013 61±0.000 38	87.1±2.4	98%
QS08-5	854	525	1.63	0.047 03±0.011 94	0.089 00±0.007 67	0.013 72±0.000 48	87.9±3.1	98%
QS08-6	783	492	1.59	0.047 83±0.004 79	0.090 14±0.006 94	0.013 64±0.000 47	87.3±3.0	99%
QS08-7	855	468	1.83	0.047 92±0.003 24	0.087 92±0.004 96	0.013 46±0.000 38	86.2±2.4	99%
QS08-8	1 948	701	2.78	0.050 34±0.005 90	0.090 57±0.006 72	0.013 69±0.000 44	87.7±2.8	99%
QS08-9	92	96	0.97	0.050 88±0.009 55	0.093 73±0.009 03	0.013 84±0.000 44	88.6±2.8	97%
QS08-10	183	237	0.78	0.054 51±0.011 75	0.090 34±0.013 41	0.013 68±0.000 72	87.6±4.6	99%
QS08-11	7 364	1 243	5.93	0.049 08±0.005 72	0.091 64±0.011 15	0.013 37±0.000 54	85.6±3.5	96%
QS08-12	485	275	1.76	0.050 32±0.003 85	0.091 45±0.005 36	0.013 34±0.000 42	85.4±2.6	96%
QS09-1	211	154	1.37	0.047 09±0.003 44	0.083 52±0.005 89	0.012 73±0.000 34	81.6±2.2	99%
QS09-2	505	313	1.61	0.047 23±0.002 97	0.081 60±0.003 44	0.012 67±0.000 31	81.2±2.0	98%
QS09-3	284	231	1.23	0.048 59±0.003 59	0.086 20±0.005 18	0.012 93±0.000 31	82.8±2.0	98%
QS09-4	375	217	1.73	0.050 42±0.003 63	0.086 60±0.004 71	0.012 65±0.000 33	81.0±2.1	96%
QS09-5	616	482	1.28	0.048 84±0.002 21	0.085 07±0.003 49	0.012 62±0.000 28	80.8±1.8	97%
QS09-6	176	139	1.26	0.048 39±0.004 38	0.083 47±0.005 63	0.012 69±0.000 29	81.3±1.8	99%
QS09-7	492	429	1.15	0.048 92±0.002 07	0.087 43±0.003 77	0.012 94±0.000 30	82.9±1.9	97%
QS09-8	547	469	1.17	0.049 02±0.003 04	0.087 19±0.004 17	0.012 94±0.000 31	82.9±2.0	97%
QS09-9	185	154	1.21	0.048 92±0.003 00	0.084 89±0.005 36	0.012 55±0.000 32	80.4±2.0	97%
QS09-10	1 099	724	1.52	0.048 65±0.001 91	0.085 74±0.003 10	0.012 77±0.000 29	81.8±1.8	97%
QS09-11	327	242	1.35	0.048 92±0.002 32	0.085 18±0.004 33	0.012 61±0.000 30	80.8±1.9	97%
QS09-12	259	185	1.40	0.047 84±0.002 87	0.082 39±0.003 50	0.012 67±0.000 26	81.2±1.7	99%
QS09-13	311	254	1.22	0.048 34±0.002 70	0.083 32±0.004 00	0.012 58±0.000 25	80.6±1.6	99%
QS09-14	255	208	1.22	0.047 93±0.002 91	0.081 44±0.004 26	0.012 50±0.000 30	80.1±1.9	99%
QS09-15	293	181	1.61	0.047 36±0.002 23	0.081 44±0.003 82	0.012 65±0.000 27	81.0±1.7	98%
QS09-16	624	424	1.47	0.048 40±0.001 79	0.08451±0.003 36	0.012 74±0.000 29	81.6±1.8	99%
QS09-17	522	431	1.21	0.047 31±0.001 67	0.08222±0.003 14	0.012 70±0.000 29	81.4±1.9	98%

注: $w(\cdot)$ 为元素或化合物的含量。

用萃取和色谱分析技术分离,详细的分析流程见文献[44]。所测得 NBS 987 标样的  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  值为 0.704 070 ~ 0.704 526, Shin-Etsu JNdi-1 标样的  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  值为 0.512 742 ~ 0.512 813。实验所得样品的  $(^{86}\text{Sr}/^{88}\text{Sr})_i$  值和  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  值通过锆石 U-Pb 定年得到的年龄进行校正。

### 3 结果分析

#### 3.1 锆石 U-Pb 年龄

茶巴拉地区角闪辉长岩和石英闪长岩中典型锆石阴极发光图像如图 3 所示。角闪辉长岩中锆石具有自形一半自形晶形,晶体多呈短柱状或长柱状,粒径为 90 ~ 130  $\mu\text{m}$ ,长宽比为 1 : 1 ~ 2 : 1,阴极发光图像显示锆石呈灰色,部分呈深灰色,内部结构均匀,大部分锆石的条带状环带清晰。从样品 QS07、QS08 中分别挑取 13 颗和 12 颗锆石用于定年测试。样品 QS07 锆石 Th/U 值为 1.06 ~ 1.72(表 1),表明它们为典型的岩浆锆石[图 3(a)]。分析点的  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄相对集中,为 92.1 ~ 88.4 Ma,均投影在谐和曲线上或附近,所获得样品 QS07 加权平均年龄为  $(90.8 \pm 1.3)$  Ma(平均标准权重偏差(MSWD)为 0.34,分析点为 13 个)[图 3(b)]。样品 QS08 锆石 Th/U 值为 0.78 ~ 5.93(表 1),显示出岩浆锆石的 Th/U 特征。锆石在谐和曲线附近构成一个年龄集中区,其  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄为 89.4 ~ 85.3 Ma(表 1),加权平均年龄为  $(87.2 \pm 1.7)$  Ma(MSWD 值为 0.18,分析点为 12 个)[图 3(d)]。综上所述,角闪辉长岩岩体侵位时代为晚白垩世早期。

石英闪长岩锆石内部结构均匀,粒径主要为 150 ~ 250  $\mu\text{m}$ ,长宽比为 1 : 1 ~ 3 : 1,阴极发光图像显示大多数的锆石发育震荡环带,Th/U 值为 1.15 ~ 1.73(表 1),具有明显的岩浆锆石特征(Th/U 值大于 0.1)。石英闪长岩共获得 17 个分析点数据,在谐和曲线上的投影分布较集中[图 3(e)],其加权平均年龄为  $(81.3 \pm 0.9)$  Ma(MSWD 值为 0.19,分析点为 17 个),可代表石英闪长岩的形成年龄,即晚白垩世早期。

#### 3.2 地球化学特征

##### 3.2.1 主量元素

角闪辉长岩和石英闪长岩的全岩地球化学分析结果见表 2。

角闪辉长岩主量元素含量(质量分数,下同)具有以下特征:  $\text{SiO}_2$  含量为 48.16% ~ 51.05%,平均值为 50.22%;  $\text{MgO}$  为 4.54% ~ 11.13%,平均值为

8.01%;  $\text{TiO}_2$  为 0.64% ~ 1.33%,平均值为 0.94%;  $\text{Al}_2\text{O}_3$  为 13.05% ~ 18.65%,平均值为 15.66%;  $\text{CaO}$  为 10.08% ~ 11.39%,平均值为 10.74%。 $\text{Mg}^\#$  值为 43.40 ~ 68.61,平均值为 57.53。在 TAS 图解中,样品均落在辉长岩区域[图 4(a)],与岩相学观察结果一致;在  $\text{SiO}_2$ - $\text{K}_2\text{O}$  图解中落在钙碱性系列区域内[图 4(b)]。

石英闪长岩的  $\text{SiO}_2$  含量为 62.45% ~ 62.90%,平均值为 62.62%;  $\text{Al}_2\text{O}_3$  为 15.94% ~ 16.22%,平均值为 16.06%;  $\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}}$  为 6.33% ~ 6.50%,平均值为 6.39%;  $\text{MgO}$  为 2.56% ~ 2.58%,平均值为 2.57%;  $\text{TiO}_2$  含量(0.72% ~ 0.77%) 和  $\text{MnO}$  含量(0.10%) 较低;铝饱和指数 A/CNK 值为 0.89 ~ 0.90( $<1$ ),属于准铝质岩石。 $\text{Mg}^\#$  值为 43.77 ~ 44.65,平均值为 44.31。在 TAS 图解中,样品均落在闪长岩区域[图 4(a)];在  $\text{SiO}_2$ - $\text{K}_2\text{O}$  图解中落在高钾钙碱性系列区域内[图 4(b)]。

##### 3.2.2 稀土及微量元素

角闪辉长岩和石英闪长岩样品均显示右倾的球粒陨石标准化稀土元素配分模式,具有轻稀土元素(LREE)相对富集、重稀土元素(HREE)相对亏损的特征[图 5(a)]。角闪辉长岩稀土元素总含量为  $(44.72 \sim 97.56) \times 10^{-6}$ ,石英闪长岩稀土元素总含量为  $(106.23 \sim 111.94) \times 10^{-6}$ ,轻、重稀土元素比值(LREE/HREE)分别为 3.89 ~ 5.10、6.89 ~ 7.13(表 2)。角闪辉长岩及石英闪长岩具有弱的 Eu 异常[图 5(a)],分别为 0.74 ~ 1.01 与 0.69 ~ 0.72。角闪辉长岩的原始地幔标准化微量元素蛛网图与石英闪长岩相似,均表现为富集大离子亲石元素(如 Sr、Th、U 等),亏损高场强元素(如 Nb、Ta、Ti 等)[图 5(b)]。

##### 3.2.3 Sr-Nd 同位素

本文选取了 4 件角闪辉长岩样品(编号为 QS07-1、QS07-2、QS08-1、QS08-3)进行全岩 Sr-Nd 同位素测试,分析结果如表 3 所示。样品初始 Sr 同位素比值( $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ ) 为 0.703 925 ~ 0.704 380,初始 Nd 同位素比值( $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_i$ ) 为 0.512 654 ~ 0.512 724,  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  值为 2.50 ~ 3.96,样品的单阶段模式年龄( $T_{\text{DM1}}$ ) 为 1 048 ~ 812 Ma。

## 4 讨论

#### 4.1 南部拉萨地体晚白垩世岩浆作用

晚白垩世岩浆作用在南部拉萨地体东段分布较广,主要集中在南木林—米林一带,岩石类型包括辉

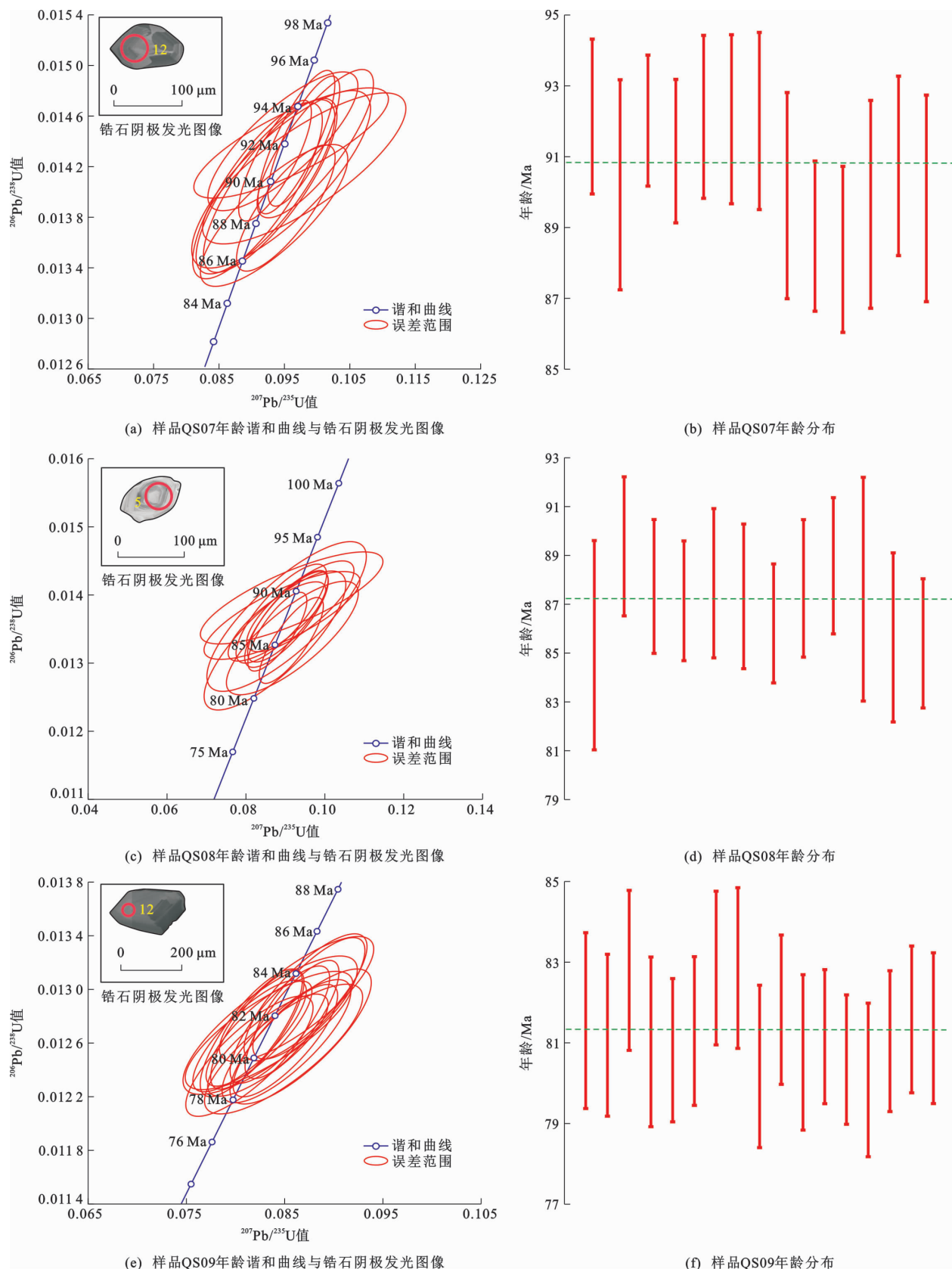
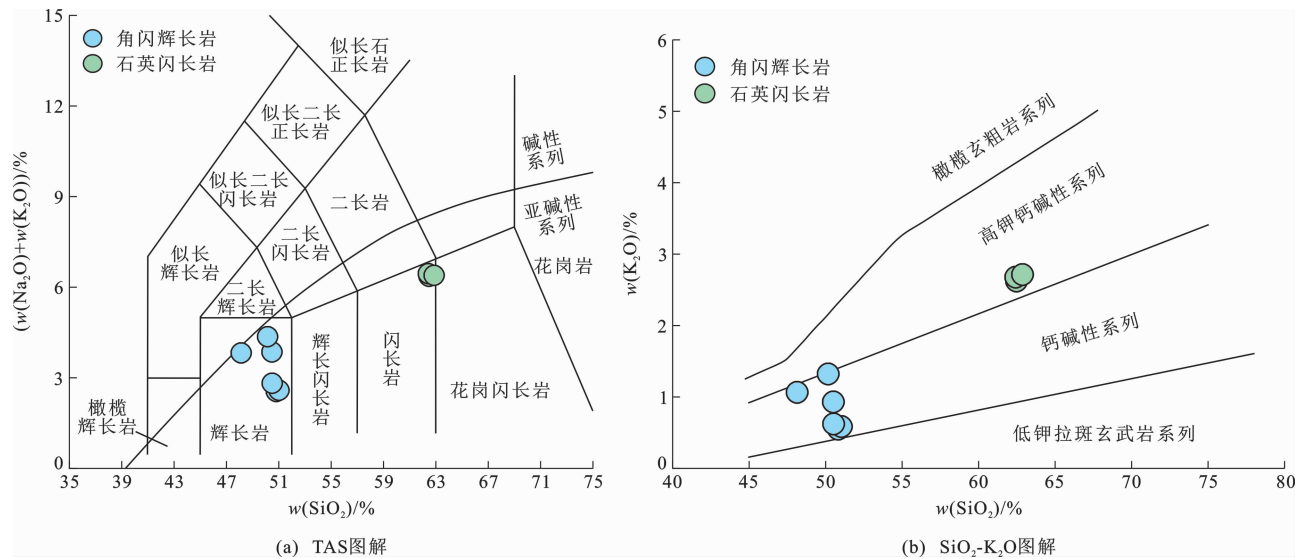


图 3 角闪辉长岩和石英闪长岩的锆石 U-Pb 年龄谱和曲线及年龄分布和锆石阴极发光图像

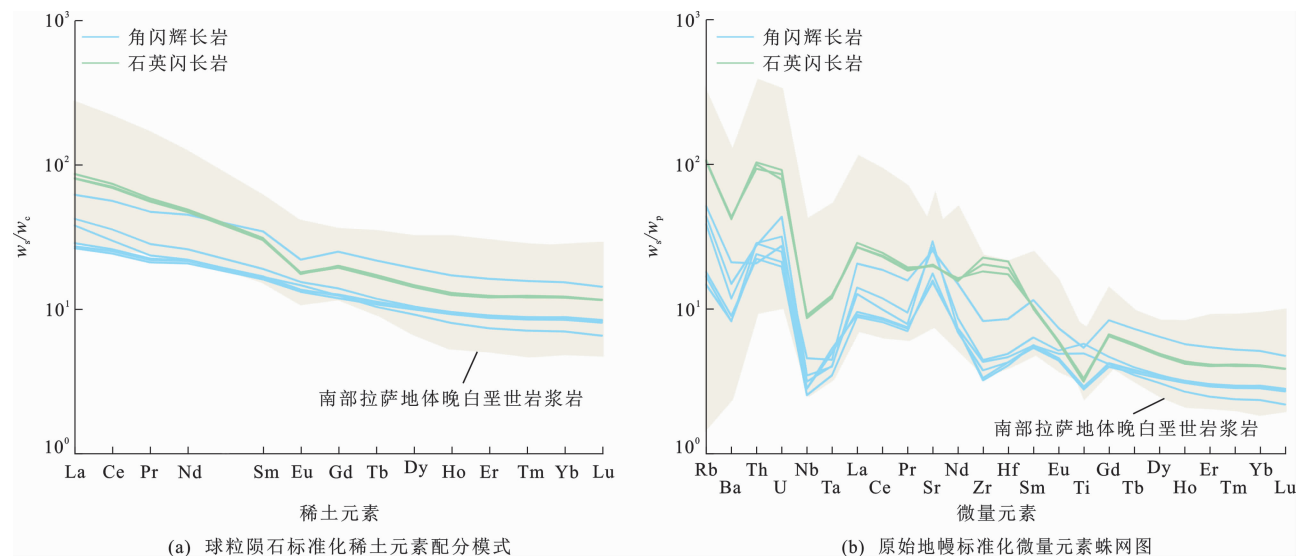
Fig. 3 Concordia Diagrams and Distributions of Zircon U-Pb Ages and CL Images of Zircons for Hornblende Gabbros and Quartz Diorites



图(a)引自文献[45];图(b)引自文献[46]

图4 角闪辉长岩和石英闪长岩 TAS 图解和  $\text{SiO}_2\text{-K}_2\text{O}$  图解

Fig. 4 Diagrams of TAS and  $\text{SiO}_2\text{-K}_2\text{O}$  of Hornblende Gabbros and Quartz Diorites



$w_s$  为样品含量;  $w_c$  为球粒陨石含量;  $w_p$  为原始地幔含量; 同一图中相同线条对应不同样品; 图中数据引自文献[47]~[50]

图5 角闪辉长岩和石英闪长岩的球粒陨石标准化稀土元素配分模式和原始地幔标准化微量元素蛛网图

Fig. 5 Chondrite-normalized REE Pattern and Primitive Mantle-normalized Trace Element Spider Diagram of Hornblende Gabbros and Quartz Diorites

长岩、辉绿岩、闪长岩和花岗岩类, 年龄为100~80 Ma<sup>[3,51-53]</sup>。在朗县—米林一带, 分布有米林苏长岩和含紫苏辉石普通角闪岩(年龄为93 Ma)<sup>[54]</sup>、里龙—米林埃达克质紫苏花岗岩(90~86 Ma)<sup>[26]</sup>、朗县—米林角闪辉长岩(98~88 Ma)<sup>[55]</sup>和花岗岩(花岗闪长岩、粗粒花岗岩和英云闪长岩, 84~78 Ma)<sup>[56]</sup>。在桑日—扎囊一带, 分布有桑日火山岩(玄武岩、安山岩和英安岩, 年龄为95 Ma)<sup>[57]</sup>、努日石英闪长玢岩(96 Ma)<sup>[58]</sup>、扎囊县札佐二长花岗岩(80 Ma)<sup>[59]</sup>。在曲水—尼木—日喀则一带, 以晚白

垩世早期(100~80 Ma)岩浆岩为主, 如茶巴拉地区角闪辉长岩(年龄为91~87 Ma)和石英闪长岩(81 Ma), 尼木辉长岩(86 Ma)<sup>[49]</sup>、花岗闪长岩(87 Ma)和辉长闪长岩(90 Ma)<sup>[47]</sup>, 南木林辉长岩及正长花岗岩(94~92 Ma)<sup>[60]</sup>、辉长岩及花岗岩脉(92~91 Ma)<sup>[61]</sup>。虽然在晚白垩世早期南部拉萨地体西段报道的岩浆岩较少, 但已有研究表明南部拉萨地体在晚白垩世发生了大致平行于雅鲁藏布江缝合带走向的带状岩浆作用<sup>[2,54,56,62]</sup>。综合这些晚白垩世岩浆作用的研究数据可知: 85 Ma之前, 南部拉萨地体

表 2 角闪辉长岩和石英闪长岩主量、微量及稀土元素分析结果

Table 2 Analysis Results of Major, Trace and Rare Earth Elements of Hornblende Gabbros and Quartz Diorites

样品编号	QS07-1	QS07-2	QS07-3	QS08-1	QS08-2	QS08-3	QS09-1	QS09-2	QS09-3
岩性	角闪辉长岩						石英闪长岩		
$w(\text{Al}_2\text{O}_3)/\%$	17.39	18.65	17.62	13.05	13.18	14.06	16.02	16.22	15.94
$w(\text{CaO})/\%$	10.08	10.09	10.21	11.39	11.28	11.35	4.99	4.94	4.84
$w(\text{Fe}_2\text{O}_3)/\%$	13.61	10.91	10.43	10.09	9.99	9.87	6.50	6.33	6.34
$w(\text{K}_2\text{O})/\%$	1.06	0.93	1.32	0.55	0.59	0.62	2.62	2.68	2.71
$w(\text{MgO})/\%$	5.27	4.54	5.64	11.13	10.99	10.47	2.56	2.56	2.58
$w(\text{MnO})/\%$	0.16	0.14	0.13	0.18	0.18	0.18	0.10	0.10	0.10
$w(\text{Na}_2\text{O})/\%$	2.76	2.93	3.04	1.99	2.00	2.19	3.74	3.78	3.68
$w(\text{P}_2\text{O}_5)/\%$	0.17	0.17	0.20	0.08	0.06	0.07	0.20	0.19	0.19
$w(\text{TiO}_2)/\%$	1.33	1.12	1.23	0.68	0.67	0.64	0.77	0.76	0.72
$w(\text{SiO}_2)/\%$	48.16	50.53	50.19	50.85	51.05	50.54	62.51	62.45	62.90
烧失量/ $\%$	0.26	0.55	0.64	0.76	0.83	0.93	0.50	0.55	0.52
$w_{\text{total}}/\%$	100.25	100.56	100.65	100.75	100.82	100.92	100.51	100.56	100.52
$w(\text{Li})/10^{-6}$	36.90	40.60	37.90	8.40	9.38	9.84	17.70	17.40	17.10
$w(\text{Be})/10^{-6}$	0.73	0.70	0.94	0.48	0.47	0.52	1.27	1.26	1.23
$w(\text{Sc})/10^{-6}$	20.1	19.0	31.1	46.9	46.0	45.1	12.5	12.4	12.4
$w(\text{V})/10^{-6}$	410	369	390	238	234	231	145	143	137
$w(\text{Cr})/10^{-6}$	0.75	2.17	1.17	459.00	453.00	418.00	20.90	21.60	21.00
$w(\text{Co})/10^{-6}$	37.3	32.3	31.2	46.4	46.8	44.1	16.7	16.6	16.6
$w(\text{Ni})/10^{-6}$	1.79	1.97	2.22	82.70	82.60	72.50	14.40	14.60	14.40
$w(\text{Cu})/10^{-6}$	61.3	88.8	45.1	50.1	35.1	33.3	38.2	38.5	37.6
$w(\text{Zn})/10^{-6}$	111.0	82.8	83.3	81.1	84.8	83.2	72.7	69.5	72.2
$w(\text{Ga})/10^{-6}$	20.7	20.1	20.8	13.3	13.4	13.8	17.5	17.3	17.2
$w(\text{As})/10^{-6}$	2.44	4.32	2.27	3.87	4.53	5.78	4.01	3.71	3.75
$w(\text{Se})/10^{-6}$	0.47	0.39	0.78	0.44	0.35	0.46	0.51	0.68	0.64
$w(\text{Rb})/10^{-6}$	28.4	25.1	33.4	9.5	10.9	11.7	67.8	68.8	69.6
$w(\text{Sr})/10^{-6}$	572	633	546	330	338	380	429	436	426
$w(\text{Y})/10^{-6}$	14.8	12.6	27.1	14.8	14.8	14.4	21.1	20.7	20.9
$w(\text{Zr})/10^{-6}$	50.7	49.2	94.3	36.7	38.1	43.0	232.0	259.0	208.0
$w(\text{Nb})/10^{-6}$	2.51	2.28	3.32	2.04	2.04	1.84	6.57	6.33	6.28
$w(\text{Mo})/10^{-6}$	1.37	0.49	0.86	0.96	0.18	0.18	0.57	0.50	0.58
$w(\text{Sn})/10^{-6}$	2.53	1.30	3.17	0.88	0.73	0.71	1.67	1.55	1.63
$w(\text{Cs})/10^{-6}$	2.23	2.01	1.91	1.16	1.48	1.79	3.67	3.66	3.67
$w(\text{Ba})/10^{-6}$	106	84	150	59	59	64	298	309	301
$w(\text{La})/10^{-6}$	9.87	8.87	14.43	6.71	6.38	6.19	18.80	18.80	20.10
$w(\text{Ce})/10^{-6}$	21.4	18.0	33.8	15.7	15.3	14.7	42.3	41.7	44.4
$w(\text{Pr})/10^{-6}$	2.65	2.21	4.43	2.10	2.06	1.98	5.28	5.19	5.46
$w(\text{Nd})/10^{-6}$	12.00	10.20	20.70	10.00	9.94	9.56	21.90	21.60	22.50
$w(\text{Sm})/10^{-6}$	2.87	2.52	5.21	2.55	2.50	2.43	4.66	4.54	4.70
$w(\text{Eu})/10^{-6}$	0.88	0.84	1.26	0.78	0.77	0.76	1.03	1.01	1.01
$w(\text{Gd})/10^{-6}$	2.83	2.53	5.08	2.53	2.57	2.43	4.02	3.94	4.06
$w(\text{Tb})/10^{-6}$	0.44	0.38	0.80	0.41	0.42	0.40	0.62	0.62	0.64
$w(\text{Dy})/10^{-6}$	2.63	2.31	4.83	2.61	2.58	2.51	3.64	3.58	3.68
$w(\text{Ho})/10^{-6}$	0.53	0.45	0.96	0.53	0.53	0.52	0.72	0.70	0.73
$w(\text{Er})/10^{-6}$	1.45	1.21	2.66	1.48	1.48	1.43	2.03	1.97	2.01

续表 2

样品编号	QS07-1	QS07-2	QS07-3	QS08-1	QS08-2	QS08-3	QS09-1	QS09-2	QS09-3
$w(\text{Tm})/10^{-6}$	0.22	0.18	0.40	0.22	0.22	0.21	0.30	0.31	0.31
$w(\text{Yb})/10^{-6}$	1.45	1.18	2.58	1.48	1.48	1.42	2.03	2.02	2.05
$w(\text{Lu})/10^{-6}$	0.21	0.17	0.36	0.21	0.21	0.20	0.29	0.29	0.29
$w(\text{Hf})/10^{-6}$	1.54	1.47	2.69	1.28	1.35	1.35	6.06	6.71	5.48
$w(\text{Ta})/10^{-6}$	0.17	0.17	0.19	0.21	0.22	0.15	0.52	0.50	0.50
$w(\text{Pb})/10^{-6}$	8.81	9.22	9.57	4.52	4.37	5.32	12.40	12.65	13.50
$w(\text{Th})/10^{-6}$	2.38	2.47	1.79	2.08	2.47	1.93	8.66	8.12	8.97
$w(\text{U})/10^{-6}$	0.93	0.68	0.58	0.45	0.53	0.42	1.68	1.83	1.96
$w_{\text{REE}}/10^{-6}$	59.44	50.98	97.56	47.31	46.41	44.72	107.66	106.23	111.94
$w_{\text{LREE}}/10^{-6}$	49.70	42.56	79.89	37.83	36.92	35.60	94.01	92.79	98.16
$w_{\text{HREE}}/10^{-6}$	9.74	8.42	17.67	9.48	9.49	9.12	13.65	13.43	13.77
LREE/HREE 值	5.10	5.06	4.52	3.99	3.89	3.90	6.89	6.91	7.13
(La/Yb) <sub>N</sub> 值	4.89	5.38	4.01	3.24	3.10	3.12	6.65	6.65	7.02
Eu 异常	0.94	1.01	0.74	0.93	0.92	0.94	0.71	0.72	0.69
Ce 异常	1.01	0.97	1.03	1.02	1.03	1.02	1.03	1.02	1.02

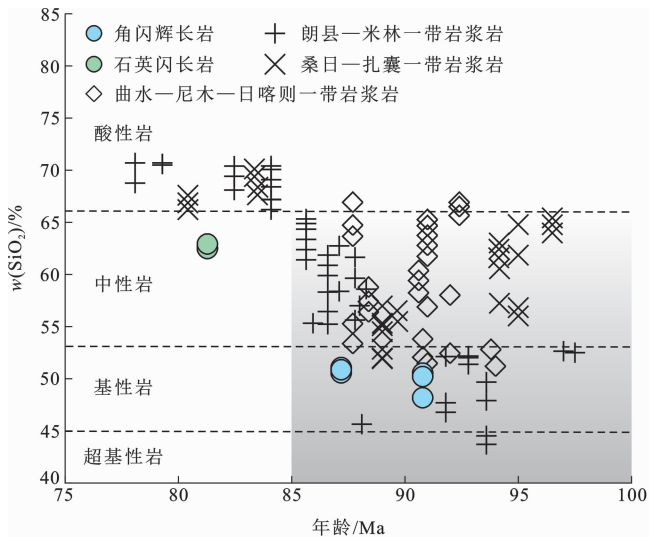
注： $w_{\text{total}}$ 为主量元素总含量； $w_{\text{REE}}$ 为稀土元素总含量； $w_{\text{LREE}}$ 为轻稀土元素总含量； $w_{\text{HREE}}$ 为重稀土元素总含量。

岩浆作用主要以中基性岩浆为主；而85 Ma之后，主要以中酸性岩浆为主[图 6(a)]。南部拉萨地体在晚白垩世早期(100~80 Ma)发生了岩浆爆发事件，其岩浆活动年龄峰值为 95~85 Ma[图 6(b)]。综上所述，南部拉萨地体晚白垩世(100~80 Ma)岩浆活动强烈<sup>[12,56,60,63]</sup>。

## 4.2 岩石成因

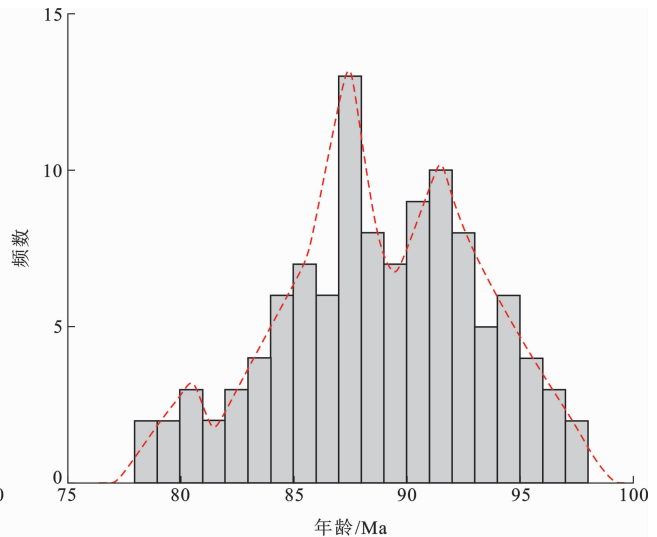
### 4.2.1 角闪辉长岩

Sr-Nd 同位素比值与  $\text{SiO}_2$  含量、 $\text{Mg}^\#$  值之间的



(a) 锆石年龄- $\text{SiO}_2$ 图解

相关关系是判别地壳混染的有效证据<sup>[64]</sup>。一般来说， $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$  值与  $\text{SiO}_2$  含量成正相关关系，表明存在地壳混染<sup>[65]</sup>，但是茶巴拉地区角闪辉长岩  $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$  值为 0.703 925~0.704 380(表 3)，与  $\text{SiO}_2$  含量之间无明显相关关系[图 7(a)]，说明岩浆受地壳混染的可能性较小。在  $1000/\text{Sr}-(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$  图解[图 7(b)]中， $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$  值不随  $1000/\text{Sr}$  值减少而降低，同样说明岩浆未受到地壳的明显混染。 $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_i$  值与  $\text{SiO}_2$  含量的负相关关系



(b) 结晶年龄直方图

朗县-一米林一带岩浆岩数据引自文献[26]、[54]~[56]；桑日-扎囊一带岩浆岩数据引自文献[57]~[59]；

曲水-尼木-日喀则一带岩浆岩数据引自文献[47]、[60]和[61]

图 6 南部拉萨地体晚白垩世(100~80 Ma)岩浆岩的锆石年龄- $\text{SiO}_2$ 图解和结晶年龄直方图

Fig. 6 Diagram of Zircon Age- $\text{SiO}_2$  and Histogram of Crystallization Age of Late Cretaceous Magmatic Rocks (100-80 Ma) in Southern Lhasa Terrane

表 3 角闪辉长岩 Sr-Nd 同位素分析结果

Table 3 Analysis Results of Sr-Nd Isotope of Hornblende Gabbros

样品编号	QS07-1	QS07-2	QS08-1	QS08-3
$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 值	0.143 336	0.114 631	0.083 437	0.089 221
$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值	0.704 562	0.704 070	0.704 425	0.704 372
$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 值	0.704 380	0.703 925	0.704 324	0.704 263
$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ 值	0.144 692	0.150 160	0.154 154	0.153 751
$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 值	0.512 773	0.512 813	0.512 742	0.512 803
$(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_i$ 值	0.512 687	0.512 724	0.512 654	0.512 715
$\epsilon_{\text{Nd}}(t)$	3.23	3.96	2.50	3.69
$T_{\text{DM1}}/\text{Ma}$	838	812	1048	888

注:  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  为年龄  $t$  对应的  $\epsilon_{\text{Nd}}$  值。

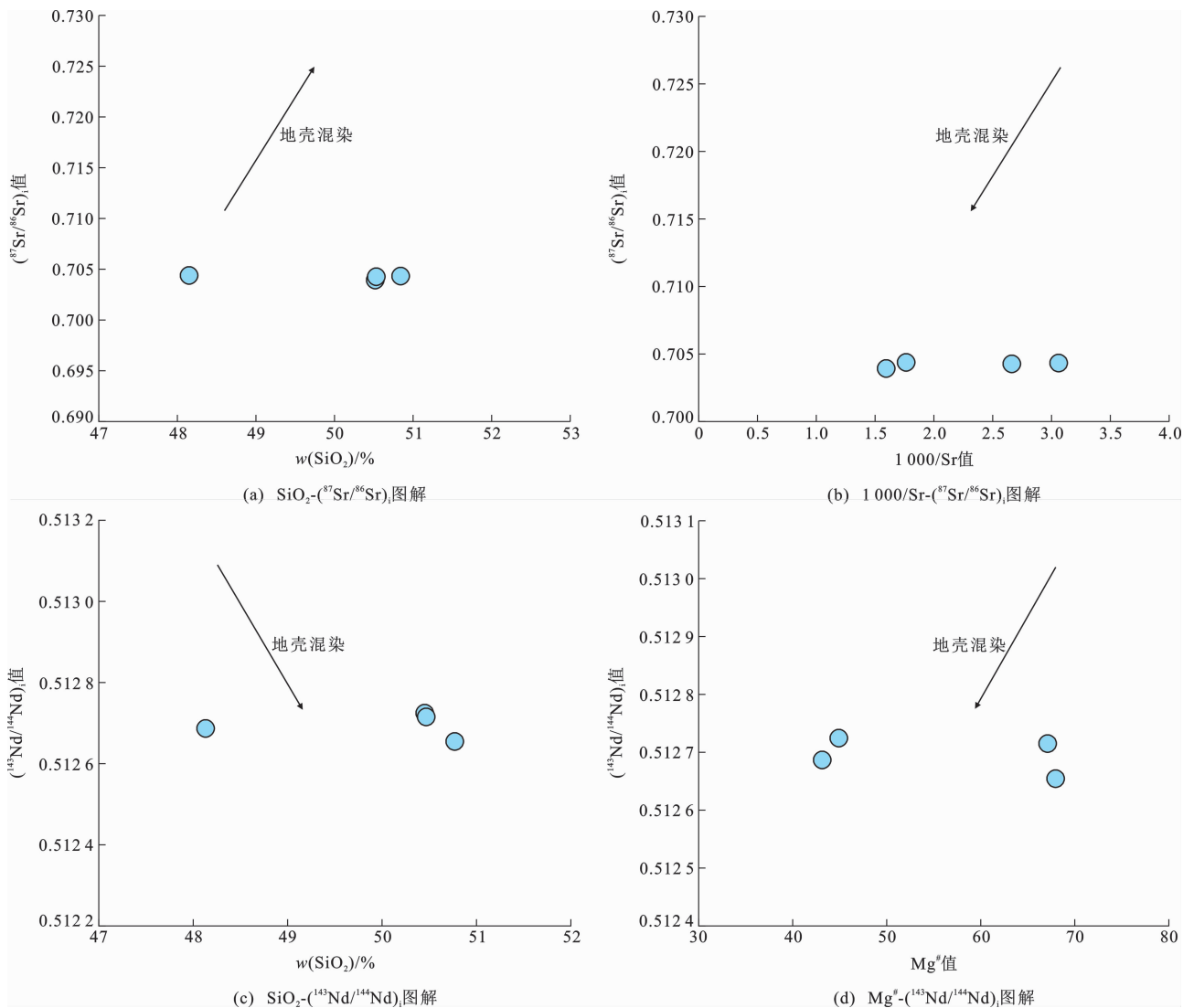


图 7 角闪辉长岩地壳混染判别图解

Fig. 7 Discrimination Diagrams of Crustal Contamination of Hornblende Gabbros

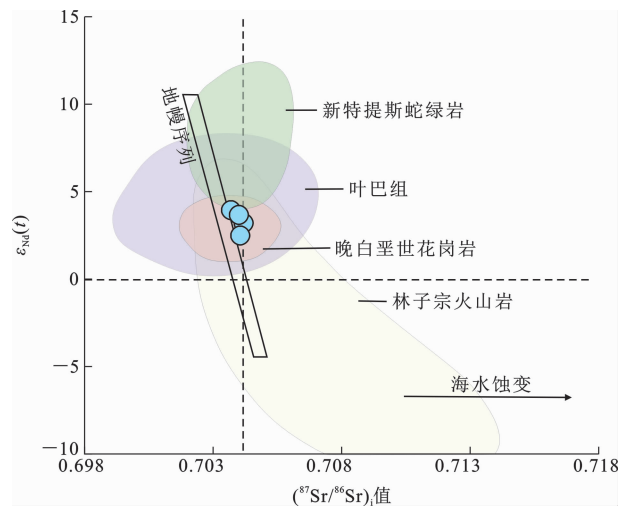
通常指示地壳混染<sup>[65]</sup>,但是茶巴拉地区角闪辉长岩的  $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_i$  值变化较小 (0.512 654~0.512 724),与  $\text{SiO}_2$  含量没有明显的相关性[图 7 (c)],表明没有明显的地壳混染。 $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_i$  值

与  $\text{Mg}^\#$  值之间没有相关性[图 7(d)]也支持了这一观点。角闪辉长岩样品 Th 含量为  $(1.79\sim 2.47)\times 10^{-6}$  (平均值为  $2.19\times 10^{-6}$ ),明显低于中地壳(Th 平均含量为  $6.5\times 10^{-6}$ )和上地壳( $10.5\times 10^{-6}$ )<sup>[66]</sup>,

进一步指示茶巴拉地区角闪辉长岩没有受到明显的地壳混染。

角闪辉长岩  $\text{SiO}_2$  含量为 48.16%~51.05%， $\text{MgO}$  含量为 4.54%~11.13%， $\text{Mg}^\#$  值为 43.40~68.61，表明其来自地幔源区。岩石具有正  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  值 (2.50~3.96) 和低  $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$  值 (0.703 925~0.704 380)。在  $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ - $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  图解(图 8)中，样品接近亏损地幔，表明其来源为亏损地幔。在活动大陆边缘弧型环境下形成的基性岩一般来源于俯冲板片释放的流体交代或熔体交代地幔楔<sup>[67-69]</sup>。在原始地幔标准化微量元素蛛网图[图 5(b)]中，样品表现出 Nb、Ta 负异常，Ta/La 值(0.01~0.04，平均值为 0.02)略低于原始地幔的 Ta/La 值(0.06<sup>[70]</sup>)，表明角闪辉长岩源区受到了俯冲板片释放的流体交代作用<sup>[71]</sup>。在 Th/Nb-U/Th 图解和 Th/Zr-Nb/Zr 图解[图 9(a)、(b)]中，样品与流体交代趋势一致，暗示其岩浆源区经历了俯冲板片流体交代作用。此外，在  $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ -Ba/Th 图解[图 9(c)]中，样品落在印度洋洋中脊玄武岩与大洋板片流体的过渡区域，进一步支持了俯冲带释放的流体对源区岩浆具有显著贡献的观点。Sr/Nd-Th/Yb 图解[图 9(d)]也显示出相同的结论，即板片流体对源区岩浆具有显著贡献。这一结论与角闪辉长岩中没有明显的 Ce 正异常(0.97~1.03，平均值为 1.01)[表 2、图 5(a)]相一致，因为板片流体对地幔源的贡献将导致 Ce 的显著富集<sup>[72-73]</sup>。

综上所述，茶巴拉地区角闪辉长岩可能是受板



图件引自文献[74]

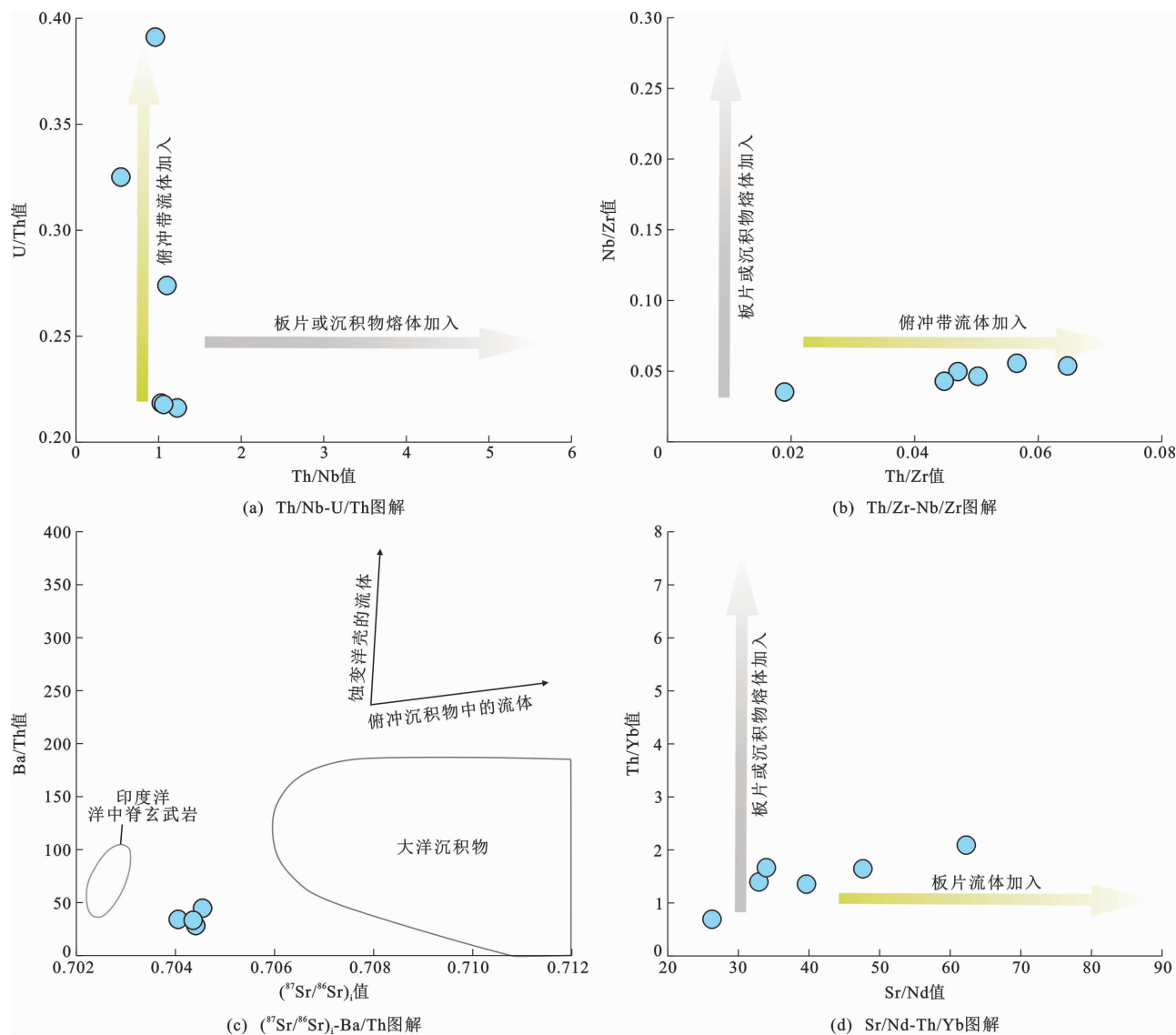
图 8 角闪辉长岩  $(^{87}\text{Sr}-^{86}\text{Sr})_i$ - $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  图解  
Fig. 8 Diagram of  $(^{87}\text{Sr}-^{86}\text{Sr})_i$ - $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  of Hornblende Gabbros

片流体交代的亏损地幔楔部分熔融的产物，并且受地壳混染不显著。

#### 4.2.2 石英闪长岩

根据岩石矿物组成和地球化学特征，可将花岗岩分为 I 型、S 型、A 型和 M 型花岗岩<sup>[75]</sup>。实验研究表明：S 型花岗岩具有强烈的过铝质亲缘性，其来源与堇青石、白云母等富铝矿物密切相关<sup>[75]</sup>；A 型花岗岩是在高温与水不饱和的条件下形成的，一般含无水相(如辉石和铁晶石)<sup>[76-77]</sup>；I 型花岗岩通常含角闪石，缺乏过铝质矿物和 A/CNK 值小于 1.1。茶巴拉地区石英闪长岩缺乏典型的富铝矿物(如堇青石、红柱石和石榴石)或碱性镁铁质矿物(如霓石、钠铁闪石)，但具有斜长石、角闪石和钾长石[图 2(f)]，且 A/CNK 值较低(0.89~0.90，均小于 1.1)， $\text{K}_2\text{O}$  和 Zr 含量低， $\text{Al}_2\text{O}_3$  和 Sr 含量高(表 2)，与典型 I 型花岗岩的地球化学特征<sup>[78]</sup>一致。在  $\text{K}_2\text{O}$ - $\text{Na}_2\text{O}$  图解[图 10(a)]中，石英闪长岩落入 I 型花岗岩区域。因此，茶巴拉地区石英闪长岩属于 I 型花岗岩。

I 型花岗岩可能是地壳内含水、钙碱性—高钾钙碱性、镁铁质或中性变质岩部分熔融形成的<sup>[79]</sup>，也可能是在大陆弧背景下，由幔源岩浆的分离结晶或幔源和地壳岩浆混合作用产生的<sup>[80]</sup>。茶巴拉地区石英闪长岩的  $\text{Mg}^\#$  值、Cr 含量、Ni 含量、Dy/Yb 值与  $\text{SiO}_2$  含量均无明显相关性，表明橄榄石、辉石和角闪石在侵位过程中没有明显的分离结晶现象。由于玄武质母岩浆分离结晶产生的岩浆岩具有从玄武质岩石到残留岩浆衍生的长英质岩石  $\text{SiO}_2$  含量变化较大的特征<sup>[81]</sup>，而茶巴拉地区石英闪长岩的  $\text{SiO}_2$  含量变化范围较小，为 62.45%~62.90%，所以岩浆演化过程中分离结晶的可能性较小。此外，在 La-La/Sm 图解和 La-La/Yb 图解[图 10(b)、(c)]中，样品均显示部分熔融的特点，而非分离结晶的特征。在 molar  $\text{CaO}/(\text{MgO} + \text{FeO}^\text{T})$ -molar  $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{MgO} + \text{FeO}^\text{T})$  图解中，石英闪长岩都落在变质玄武岩或变质英云闪长岩的部分熔融区域[图 10(d)]，表明其母岩浆主要起源于下地壳的部分熔融。石英闪长岩 Nb/Ta 值为 12.57~12.63(平均值为 12.60)高于下地壳的平均值(8.3<sup>[70]</sup>)，排除了来自下地壳的单一来源，可能有地幔物质的加入<sup>[82]</sup>，较高的  $\text{Mg}^\#$  值(43.77~44.65)进一步支持了石英闪长岩有少量地幔物质的贡献。此外，石英闪长岩均具有较为平坦的重稀土元素配分模式[图 5(a)]，Y/Yb 值(10.18~10.39)接近于 10，表明其



图(a)引自文献[83];图(b)引自文献[84];图(c)引自文献[30];图(d)引自文献[85]

图 9 角闪辉长岩 Th/Nb-U/Th 图解、Th/Zr-Nb/Zr 图解、 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_t$ -Ba/Th 图解和 Sr/Nd-Th/Yb 图解

Fig. 9 Diagrams of Th/Nb-U/Th, Th/Zr-Nb/Zr,  $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_t$ -Ba/Th and Sr/Nd-Th/Yb of Hornblende Gabbros

源区残留相主要为角闪石<sup>[86]</sup>。在  $\text{SiO}_2$ -MgO 图解 [图 10(e)] 中,所有样品均落在下地壳玄武岩或角闪岩部分熔融区域,在  $F_1$ - $F_2$  图解 [图 10(f)] 中,样品同样证明茶巴拉地区石英闪长岩主要来源于下地壳角闪岩或变质玄武岩部分熔融。

以上讨论表明,茶巴拉地区石英闪长岩可能是由幔源熔体提供热量,使下地壳在角闪岩相条件下发生部分熔融形成的,并有少量幔源物质的加入。

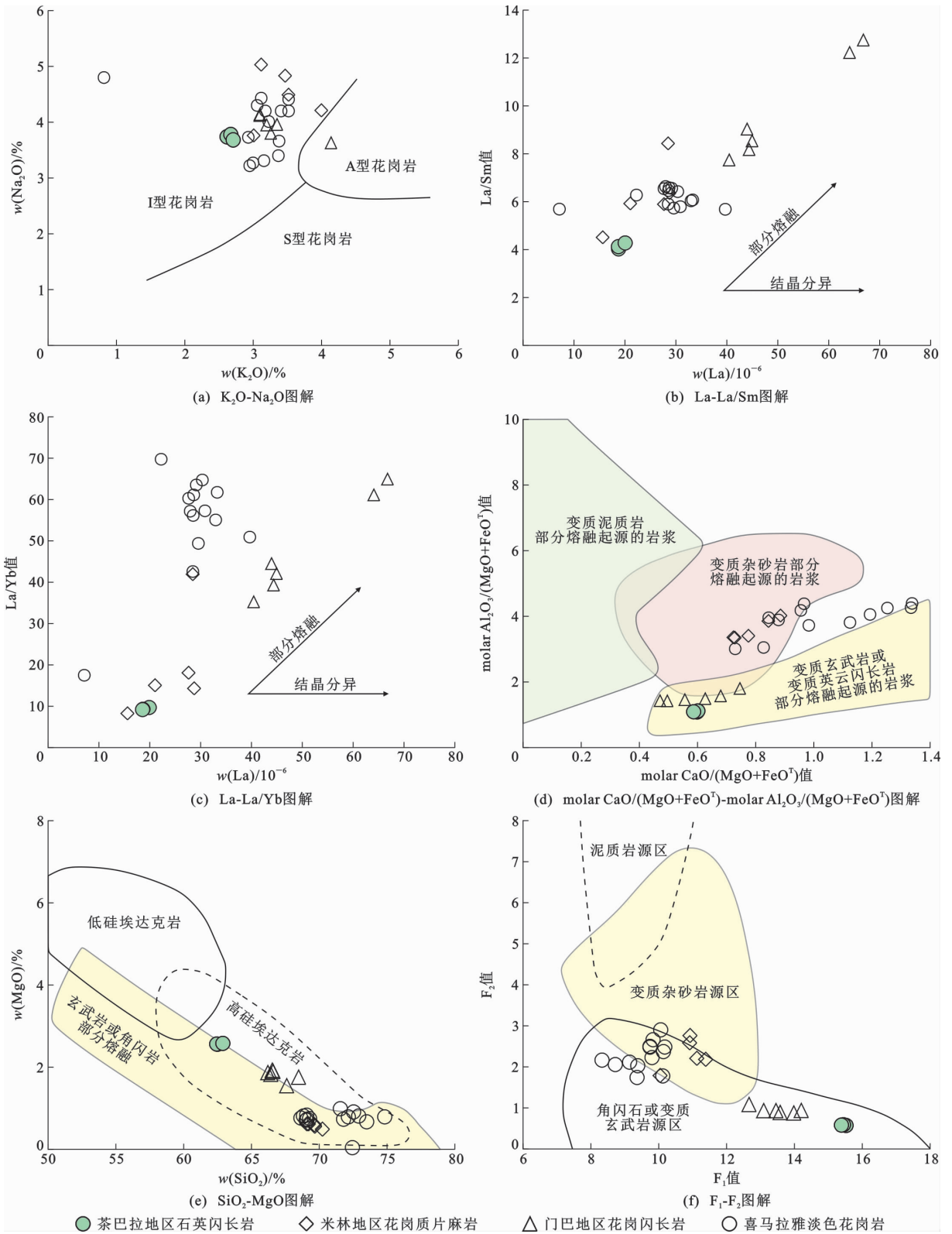
#### 4.3 地球动力学意义

茶巴拉地区角闪辉长岩和石英闪长岩形成于晚白垩世早期(91~81 Ma),二者稀土元素配分模式呈中等轻稀土元素富集的特征,岩石明显富集大离子亲石元素(Rb、Th、U、Sr),亏损高场强元素(Nb、Ta、Zr、Ti、HREE),与典型的岛弧型火山岩地球化

学特征<sup>[87]</sup>一致。在构造环境判别图解中,角闪辉长岩均表现出火山弧玄武岩特征 [图 11(a)],进一步划分可知其属于钙碱性玄武岩 [图 11(b)]。上述结果表明,角闪辉长岩有可能是新特提斯洋板片北向俯冲构造环境下的岛弧岩浆岩。同样,茶巴拉地区石英闪长岩在 Yb-Ta 图解和 Y-Nb 图解 [图 11(c)、(d)] 中落入火山弧构造环境,说明其形成环境也与板块俯冲有关。

关于南部拉萨地体晚白垩世岩浆作用的地球动力学机制,前人进行了大量研究,其主要的认识有:①新特提斯洋平板俯冲/北向低角度俯冲<sup>[25]</sup>;②新特提斯洋板片回转<sup>[9,54,88-91]</sup>;③新特提斯洋洋脊俯冲<sup>[12,26,56,92-93]</sup>。

Wen 等认为南部拉萨地体晚白垩世岩浆岩的

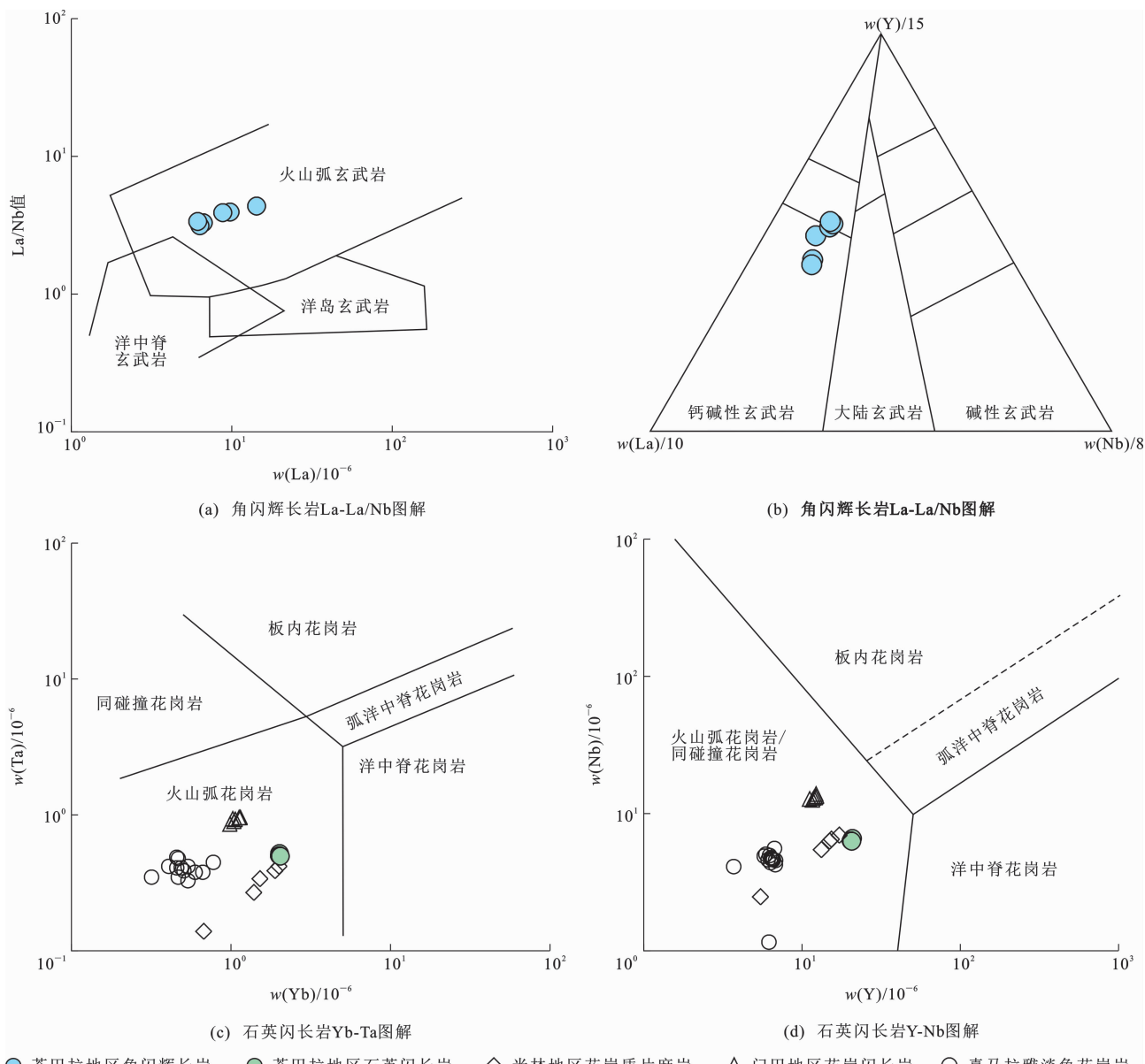


图(a)引自文献[94];图(b)、(c)引自文献[95];图(d)引自文献[96];图(e)引自文献[97];图(f)引自文献[98];

米林地区花岗质片麻岩数据引自文献[99];门巴地区花岗闪长岩数据引自文献[100];喜马拉雅淡色花岗岩数据引自文献[101]

图 10 石英闪长岩  $K_2O-Na_2O$  图解、La-La/Sm 图解、La-La/Yb 图解、molar  $CaO/(MgO+FeO^T)$ -molar  $Al_2O_3/(MgO+FeO^T)$  图解、 $SiO_2-MgO$  图解和  $F_1-F_2$  图解

Fig. 10 Diagrams of  $K_2O-Na_2O$ , La-La/Sm, La-La/Yb, molar  $CaO/(MgO+FeO^T)$ -molar  $Al_2O_3/(MgO+FeO^T)$ ,  $SiO_2-MgO$  and  $F_1-F_2$  of Quartz Diorites



图(a)引自文献[17];图(b)引自文献[102];图(c)、(d)引自文献[87]

图 11 角闪辉长岩和石英闪长岩构造环境判别图解

Fig. 11 Discrimination Diagrams of Tectonic Setting of Hornblende Gabbros and Quartz Diorites

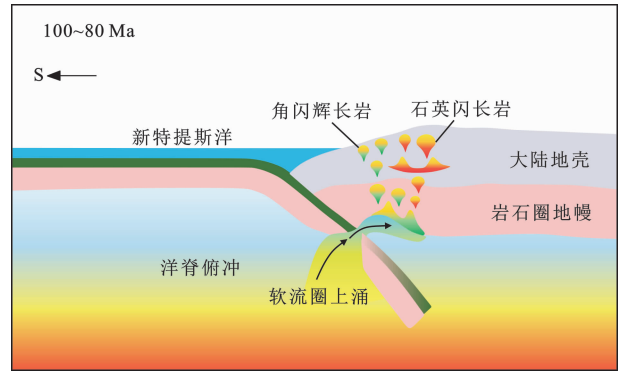
形成原因是平板俯冲引起的构造紧缩导致加厚镁铁质下地壳物质的部分熔融<sup>[25]</sup>。平板俯冲会将地幔楔挤出,或俯冲带上存在少量地幔楔物质,导致幔源基性岩浆很难产生,而在米林—朗县之间(88 Ma)<sup>[55]</sup>和茶巴拉地区都发现了同期基性岩浆活动。此外,晚白垩世早期,南部拉萨地体发生了岩浆爆发活动,产出了多种成分、不同源区的岩浆岩,平板俯冲/北向低角度俯冲无法解释此规模巨大的岩浆爆发事件。因此,不能将南部拉萨地体晚白垩世大规模岩浆作用归因于平板俯冲/北向低角度俯冲。Ma等将米林地区晚白垩世埃达克质岩浆作用归因于俯冲的新特提斯洋板片回转引发的软流圈上涌<sup>[9]</sup>。如

果新特提斯洋板片在晚白垩世早期发生回转,洋壳是以正常角度或者小角度俯冲的,而后板片向俯冲的反方向回转,这一过程将会导致拉萨地体的岩浆活动从北向南迁移,岩浆岩年龄逐渐变新,然而拉萨地体在120~75 Ma向北迁移<sup>[12]</sup>,其岩浆岩年龄也没有显示这种趋势<sup>[10]</sup>。因此,板片回转模式与南部拉萨地体晚白垩世岩浆活动的空间记录不一致,且Zhu等认为板片回转发生在约70 Ma,而不是100~80 Ma<sup>[11]</sup>,因而板片回转模型无法解释南部拉萨地体晚白垩世的岩浆爆发<sup>[10,57]</sup>。综上所述,本文认为新特提斯洋洋脊俯冲可能是解释南部拉萨地体晚白垩世大规模带状岩浆作用的理想模式。

洋脊俯冲模式在世界范围内被广泛报道,例如在中国西藏、阿尔泰、西准噶尔,美国阿拉斯加南部以及加利福尼亚西部,它指的是洋中脊扩张俯冲到消减带之下<sup>[92,103]</sup>,从而形成了独特的地球动力学和地球化学环境。当洋中脊板块继续俯冲到大陆边缘之下或板块断裂时,离散的洋中脊板块边缘一般会形成板片窗<sup>[104]</sup>,然后引发大量软流圈地幔上涌<sup>[105]</sup>。软流圈物质通过板片窗上涌,提供足够的热量,导致上覆板块、岩石圈地幔楔和地壳岩石部分熔融。在这种情况下,活动大陆边缘产生了一系列特殊的火山岩(如富铈玄武岩、洋中脊玄武岩、高镁安山岩、埃达克岩和A型花岗岩)、矿床(如大型斑岩型铜金矿)和变质岩<sup>[29,103]</sup>。

基于前人的研究成果和本文的新资料,可以提出南部拉萨地体晚白垩世茶巴拉地区角闪辉长岩和石英闪长岩是在新特提斯洋洋脊俯冲的背景下形成的。其证据包括:①紫苏花岗岩和高温变质作用是洋脊俯冲的关键标志<sup>[103]</sup>。里龙一米林之间发现的具有埃达克质岩特征的90~86 Ma紫苏花岗岩是在贫水和高温一超高温条件下形成的<sup>[26,54]</sup>,结合81 Ma发生的高温麻粒岩相变质作用,可以用新特提斯洋洋脊俯冲模式来解释。②Zheng等认为新特提斯板块可能在俯冲中间点(105±10)Ma开始发生洋脊俯冲<sup>[10]</sup>,茶巴拉地区角闪辉长岩形成于91~87 Ma,石英闪长岩形成于81 Ma,接近于Zhang等提出的洋脊俯冲时间<sup>[10,26]</sup>。③晚白垩世茶巴拉地区角闪辉长岩和石英闪长岩分别是地幔楔和下地壳部分熔融的产物,这种熔融现象可以用洋脊俯冲来解释,无论是年轻洋壳(≤25 Ma)还是古老洋壳(>25 Ma),活动的新特提斯洋洋脊俯冲,软流圈地幔物质都会穿过板片窗上涌并发生部分熔融形成玄武质岩浆,这些基性岩浆为这种熔融提供足够的热量<sup>[57,106-107]</sup>。④新特提斯洋洋脊俯冲的持续时间约20 Ma(从100 Ma到80 Ma),与典型的洋脊俯冲持续时间<sup>[108]</sup>一致。例如,洋脊俯冲在中国新疆准噶尔西部持续了25 Ma(从315 Ma到290 Ma)<sup>[104,108-109]</sup>,在日本西南部持续了24 Ma(从59 Ma到35 Ma)<sup>[110]</sup>。⑤晚白垩世大规模带状岩浆作用分布于南部拉萨地体,并且岩石类型具有从基性到酸性的特点,支持洋脊俯冲模式来解释南部拉萨地体晚白垩世岩浆作用的成因<sup>[56]</sup>。基于以上证据,可以认为新特提斯洋洋脊俯冲作用会使软流圈上涌引发减压熔融,穿过板片窗的高热量促使地幔楔部分熔融形成角闪辉长岩以及下地壳岩石部分熔融形

成石英闪长岩,并导致南部拉萨地体晚白垩世早期岩浆爆发(图12)。



图件引自文献[3],有所修改

图12 角闪辉长岩和石英闪长岩成因模式

Fig. 12 Genetic Pattern of Hornblende Gabbros and Quartz Diorites

综上所述,南部拉萨地体晚白垩世早期岩浆活动可能与平板俯冲/北向低角度俯冲和板片回转无关,而以新特提斯洋洋脊俯冲模式来解释更为合理。在洋脊俯冲条件下,洋脊之下的软流圈物质会通过板片窗上涌并发生减压熔融形成玄武质岩浆,这些基性岩浆提供足够的热量促使地幔楔和下地壳岩石发生部分熔融,该机制可以合理解释南部拉萨地体100~80 Ma大规模岩浆活动<sup>[8,31,51,95]</sup>。因此,洋脊俯冲模式是南部拉萨地体晚白垩世大规模带状岩浆作用的一种可能机制。

## 5 结语

(1)拉萨地体南缘曲水县茶巴拉地区角闪辉长岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 91~87 Ma,石英闪长岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 81 Ma,指示岩浆活动形成于晚白垩世早期。

(2)茶巴拉地区角闪辉长岩  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  值为 2.50~3.96, ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ )<sub>i</sub> 值为 0.703 925~0.704 380, 具有较高的  $\text{Mg}^\#$  值(43.40~68.61), 表明角闪辉长岩来源于受俯冲板片释放流体交代的亏损地幔楔部分熔融, 并且不受地壳混染的显著影响。石英闪长岩为准铝质 I 型花岗岩, 可能是下地壳在角闪岩相条件下发生部分熔融的产物, 并有少量地幔物质的加入。

(3)南部拉萨地体晚白垩世早期 100~80 Ma 岩浆岩可能是新特提斯洋洋脊北向俯冲的结果。在新特提斯洋洋脊俯冲背景下, 热的软流圈物质上涌穿过板片窗, 诱发了地幔楔和下地壳岩石发生大规模部分熔融, 从而导致南部拉萨地体晚白垩世大规模

模岩浆作用。

## 参考文献:

### References:

- [1] YIN A, HARRISON T M. Geologic Evolution of the Himalayan-Tibetan Orogen [J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 2000, 28: 211-280.
- [2] ZHU D C, ZHAO Z D, NIU Y L, et al. The Lhasa Terrane: Record of a Microcontinent and Its Histories of Drift and Growth [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2011, 301(1/2): 241-255.
- [3] ZHU D C, ZHAO Z D, NIU Y L, et al. The Origin and Pre-Cenozoic Evolution of the Tibetan Plateau [J]. Gondwana Research, 2013, 23(4): 1429-1454.
- [4] PAN G T, WANG L Q, LI R S, et al. Tectonic Evolution of the Qinghai-Tibet Plateau [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2012, 53: 3-14.
- [5] 潘桂棠, 王立全, 朱弟成. 青藏高原区域地质调查中几个重大科学问题的思考 [J]. 地质通报, 2004, 23(1): 12-19.
- PAN Gui-tang, WANG Li-quan, ZHU Di-cheng. Thoughts on Some Important Scientific Problems in Regional Geological Survey of the Qinghai-Tibet Plateau [J]. Geological Bulletin of China, 2004, 23(1): 12-19.
- [6] 潘桂棠, 莫宣学, 侯增谦, 等. 冈底斯造山带的时空结构及演化 [J]. 岩石学报, 2006, 22(3): 521-533.
- PAN Gui-tang, MO Xuan-xue, HOU Zeng-qian, et al. Spatial-temporal Framework of the Gangdese Orogenic Belt and Its Evolution [J]. Acta Petrologica Sinica, 2006, 22(3): 521-533.
- [7] ZHU D C, WANG Q, CAWOOD P A, et al. Raising the Gangdese Mountains in Southern Tibet [J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2017, 122(1): 214-223.
- [8] ZHU D C, MO X X, NIU Y L, et al. Geochemical Investigation of Early Cretaceous Igneous Rocks Along an East-west Traverse Throughout the Central Lhasa Terrane, Tibet [J]. Chemical Geology, 2009, 268(3/4): 298-312.
- [9] MA L, WANG Q, WYMAN D A, et al. 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 Tibet [J]. Lithos, 2013, 175/176: 315-332.
- [10] ZHENG Y C, HOU Z Q, GONG Y L, et al. Petrogenesis of Cretaceous Adakite-like Intrusions of the Gangdese Plutonic Belt, Southern Tibet: Implications for Mid-ocean Ridge Subduction and Crustal Growth [J]. Lithos, 2014, 190: 240-263.
- [11] ZHU D C, WANG Q, ZHAO Z D, et al. Magmatic Record of India-Asia Collision [J]. Scientific Reports, 2015, 5: 14289.
- [12] ZHU D C, WANG Q, CHUNG S L, et al. Gangdese Magmatism in Southern Tibet and India-Asia Convergence Since 120 Ma [J]. Geological Society, London, Special Publications, 2019, 483: 583-596.
- [13] CHU M F, CHUNG S L, SONG B A, et al. Zircon U-Pb and Hf Isotope Constraints on the Mesozoic Tectonics and Crustal Evolution of Southern Tibet [J]. Geology, 2006, 34: 745-748.
- [14] JI W Q, WU F Y, CHUNG S L, et al. Zircon U-Pb Geochronology and Hf Isotopic Constraints on Petrogenesis of the Gangdese Batholith, Southern Tibet [J]. Chemical Geology, 2009, 262: 229-245.
- [15] TANG J X, LANG X H, XIE F W, et al. Geological Characteristics and Genesis of the Jurassic No. I Porphyry Cu-Au Deposit in the Xiongcu District, Gangdese Porphyry Copper Belt, Tibet [J]. Ore Geology Reviews, 2015, 70: 438-456.
- [16] WEI Y Q, ZHAO Z D, NIU Y L, et al. Geochronology and Geochemistry of the Early Jurassic Yeba Formation Volcanic Rocks in Southern Tibet: Initiation of Back-arc Rifting and Crustal Accretion in the Southern Lhasa Terrane [J]. Lithos, 2017, 278/279/280/281: 477-490.
- [17] WANG R Q, QIU J S, YU S B, et al. Crust-mantle Interaction During Early Jurassic Subduction of Neotethyan Oceanic Slab: Evidence from the Dongga Gabbro-granite Complex in the Southern Lhasa Subterrane, Tibet [J]. Lithos, 2017, 292(7): 262-277.
- [18] WANG X H, LANG X H, TANG J X, et al. Early-Middle Jurassic (182-170 Ma) Ruocuo Adakitic Porphyries, Southern Margin of the Lhasa Terrane, Tibet: Implications for Geodynamic Setting and Porphyry Cu-Au Mineralization [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2019, 173: 336-351.
- [19] LANG X H, WANG X H, TANG J X, et al. Composition and Age of Jurassic Diabase Dikes in the Xiongcu Porphyry Copper-gold District, Southern Margin of the Lhasa Terrane, Tibet, China: Petrogenesis and Tectonic Setting [J]. Geological Journal, 2018, 53: 973-1993.
- [20] LANG X H, LIU D, DENG Y L, et al. Detrital Zircon Geochronology and Geochemistry of Jurassic Sand-

- stones in the Xiongcu District, Southern Lhasa Subterranean, Tibet, China; Implications for Provenance and Tectonic Setting[J]. *Geological Magazine*, 2019, 156(4):683-701.
- [21] LANG X H, DENG Y L, WANG X H, et al. Geochronology and Geochemistry of Volcanic Rocks of the Bima Formation, Southern Lhasa Subterranean, Tibet; Implications for Early Neo-Tethyan Subduction [J]. *Gondwana Research*, 2020, 80:335-349.
- [22] WANG C, DING L, ZHANG L Y, et al. Early Jurassic High-Mg Andesites in the Quxu Area, Southern Lhasa Terrane; Implications for Magma Evolution Related to a Slab Rollback of the Neo-Tethyan Ocean [J]. *Geological Journal*, 2019, 54(4):2508-2524.
- [23] MENG Y K, DONG H, CONG Y, et al. The Early-stage Evolution of the Neo-Tethys Ocean; Evidence from Granitoids in the Middle Gangdese Batholith, Southern Tibet[J]. *Journal of Geodynamics*, 2016, 94:34-49.
- [24] 王旭辉, 郎兴海, 邓煜霖, 等. 西藏拉萨地体南缘汤白地区始新世辉绿岩脉: 新特提斯洋壳断离的证据[J]. *中国地质*, 2019, 46(6):1336-1355.  
WANG Xu-hui, LANG Xing-hai, DENG Yu-lin, et al. Eocene Diabase Dikes in the Tangbai Area, Southern Margin of Lhasa Terrane, Tibet; Evidence for the Slab Break-off of the Neo-Tethys Ocean [J]. *Geology in China*, 2019, 46(6):1336-1355.
- [25] WEN D R, LIU D Y, CHUNG S L, et al. Zircon SHRIMP U-Pb Ages of the Gangdese Batholith and Implications for Neotethyan Subduction in Southern Tibet[J]. *Chemical Geology*, 2008, 252:191-201.
- [26] ZHANG Z M, ZHAO G C, SANTOSH M, et al. Late Cretaceous Charnockite with Adakitic Affinities from the Gangdese Batholith, Southeastern Tibet; Evidence for Neo-Tethyan Mid-Ocean Ridge Subduction? [J]. *Gondwana Research*, 2010, 17(4):615-631.
- [27] 董汉文, 许志琴, 李源, 等. 冈底斯带东段墨脱地区早侏罗世辉长岩的成因及其构造意义[J]. *岩石学报*, 2016, 32(12):3624-3634.  
DONG Han-wen, XU Zhi-qin, LI Yuan, et al. Genesis and Geological Significance of Early Jurassic Gabbro in Medog Area, the Eastern Part of the Gangdese Magmatic Belt [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2016, 32(12):3624-3634.
- [28] LI S M, WANG Q, ZHU D C, et al. One or Two Early Cretaceous Arc Systems in the Lhasa Terrane, Southern Tibet [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2018, 123(5):3391-3413.
- [29] GUO L, LIU Y, LIU S, et al. Petrogenesis of Early to Middle Jurassic Granitoid Rocks from the Gangdese Belt, Southern Tibet; Implications for Early History of the Neo-Tethys [J]. *Lithos*, 2013, 179:320-333.
- [30] KANG Z Q, XU J F, WILDE S A, et al. 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 [J]. *Lithos*, 2014, 200/201:157-168.
- [31] LEE H Y, CHUNG S L, LO C H, et al. Eocene Neotethyan Slab Breakoff in Southern Tibet Inferred from the Linzizong Volcanic Record [J]. *Tectonophysics*, 2009, 477(1/2):20-35.
- [32] HARRIS N B W, XU R H, LEWIS C L, et al. Isotope Geochemistry of the 1985 Tibet Geotraverse, Lhasa to Golmud [J]. *The Royal Society*, 1988, 327:263-285.
- [33] DONG X, ZHANG Z M, SANTOSH M, et al. Late Neoproterozoic Thermal Events in the Northern Lhasa Terrane, South Tibet; Zircon Chronology and Tectonic Implications [J]. *Journal of Geodynamics*, 2011, 52:389-405.
- [34] ZHANG Z M, DONG X, LIU F, et al. The Making of Gondwana: Discovery of 650 Ma HP Granulites from the North Lhasa, Tibet [J]. *Precambrian Research*, 2012, 212/213:107-116.
- [35] HOU Z Q, DUAN L F, LU Y J, et al. Lithospheric Architecture of the Lhasa Terrane and Its Control on Ore Deposits in the Himalayan-Tibetan Orogen [J]. *Economic Geology*, 2015, 110:1541-1575.
- [36] 张立雪, 王青, 朱弟成, 等. 拉萨地体锆石 Hf 同位素填图: 对地壳性质和成矿潜力的约束 [J]. *岩石学报*, 2013, 29(11):3681-3688.  
ZHANG Li-xue, WANG Qing, ZHU Di-cheng, et al. Mapping the Lhasa Terrane Through Zircon Hf Isotopes: Constraints on the Nature of the Crust and Metallogenic Potential [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2013, 29(11):3681-3688.
- [37] 唐菊兴, 李志军, 董树义, 等. 西藏日喀则市汤白铜矿地质勘查报告 [R]. 成都: 成都理工大学, 2005.  
TANG Ju-xing, LI Zhi-jun, DONG Shu-yi, et al. *Geologic Exploration Report of Tangbai Copper Deposit in Xigaze, Tibet* [R]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2005.
- [38] HOU Z Q, COOK N J. Metallogenesis of the Tibetan Collisional Orogen: A Review and Introduction to the Special Issue [J]. *Ore Geology Reviews*, 2009, 36(1/2/3):2-24.

- [39] WIEDENBECK M, ALLE P, CORFU F, et al. Three Natural Zircon Standards for U-Th-Pb, Lu-Hf, Trace Element and REE Analyses[J]. Geostandards News-letter, 1995, 19(1): 1-23.
- [40] JACKSON S E, PEARSON N J, GRIFFIN W L, et al. The Application of Laser Ablation-inductively Coupled Plasma-mass Spectrometry to *In-situ* U-Pb Zircon Geochronology[J]. Chemical Geology, 2004, 211(1/2): 1-69.
- [41] 刘栋, 赵志丹, 朱弟成, 等. 青藏高原南部拉萨地块中新世超钾质岩石中的锆石记录[J]. 岩石学报, 2013, 29(11): 3703-3715.  
LIU Dong, ZHAO Zhi-dan, ZHU Di-cheng, et al. Zircon Records of Miocene Ultrapotassic Rocks from Southern Lhasa Subterranean, Tibetan Plateau[J]. Acta Petrologica Sinica, 2013, 29(11): 3703-3715.
- [42] CHEN S, WANG X H, NIU Y L, et al. Simple and Cost-effective Methods for Precise Analysis of Trace Element Abundances in Geological Materials with ICP-MS[J]. Science Bulletin, 2017, 62(4): 277-289.
- [43] PIN C, GANNOUN A, DUPONT A. Rapid, Simultaneous Separation of Sr, Pb, and Nd by Extraction Chromatography Prior to Isotope Ratios Determination by TIMS and MC-ICP-MS[J]. Journal of Analytical Atomic Spectrometry, 2014, 29: 1858-1870.
- [44] 濮巍, 高剑峰, 赵葵东, 等. 利用 DCTA 和 HIBA 快速有效分离 Rb-Sr, Sm-Nd 的方法[J]. 南京大学学报(自然科学), 2005, 41(4): 445-450.  
PU Wei, GAO Jian-feng, ZHAO Kui-dong, et al. Separation Method of Rb-Sr, Sm-Nd Using DCTA and HIBA[J]. Journal of Nanjing University(Natural Sciences), 2005, 41(4): 445-450.
- [45] WILSON M. Igneous Petrogenesis[M]. Dordrecht: Springer, 1989.
- [46] PECCERILLO A, TAYLOR S R. Geochemistry of Eocene Calc-alkaline Volcanic Rocks from the Kastamonu Area, Northern Turkey[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1976, 58: 63-81.
- [47] XU W C, ZHANG H F, LUO B J, et al. Adakite-like Geochemical Signature Produced by Amphibole-dominated Fractionation of Arc Magmas: An Example from the Late Cretaceous Magmatism in Gangdese Belt, South Tibet[J]. Lithos, 2015, 232: 197-210.
- [48] MENG F Y, ZHAO Z, ZHU D C, et al. Late Cretaceous Magmatism in Mamba Area, Central Lhasa Subterranean: Products of Back-arc Extension of Neo-Tethyan Ocean? [J]. Gondwana Research, 2014, 26(2): 505-520.
- [49] DONG X, ZHANG Z M, KLEMD R, et al. Late Cretaceous Tectonothermal Evolution of the Southern Lhasa Terrane, South Tibet: Consequence of a Mesozoic Andean-type Orogeny[J]. Tectonophysics, 2018, 730: 100-113.
- [50] MA L, WANG Q, WYMAN D A, et al. 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[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2015, 120(9): 6159-6181.
- [51] WEN D R, CHUNG S L, SONG B, et al. Late Cretaceous Gangdese Intrusions of Adakitic Geochemical Characteristics, SE Tibet: Petrogenesis and Tectonic Implications[J]. Lithos, 2008, 105(1/2): 1-11.
- [52] JI W Q, WU F Y, CHUNG S L, et al. The Gangdese Magmatic Constraints on a Latest Cretaceous Lithospheric Delamination of the Lhasa Terrane, Southern Tibet[J]. Lithos, 2014, 210/211: 168-180.
- [53] 高家昊, 曾令森, 郭春丽, 等. 藏南冈底斯岩基晚白垩世构造岩浆作用: 以拉萨白堆复合岩体中一基性岩脉群为例[J]. 岩石学报, 2017, 33(8): 2412-2436.  
GAO Jia-hao, ZENG Ling-sen, GUO Chun-li, et al. Late Cretaceous Tectonics and Magmatism in Gangdese Batholith, Southern Tibet: A Record from the Mafic-dioritic Dike Swarms Within the Baidui Complex, Lhasa[J]. Acta Petrologica Sinica, 2017, 33(8): 2412-2436.
- [54] MA L, WANG Q, LI Z X, et al. 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 (Tibet) [J]. Lithos, 2013, 172/173: 17-30.
- [55] 管琪, 朱弟成, 赵志丹, 等. 西藏拉萨地块南缘晚白垩世镁铁质岩浆作用的年代学、地球化学及意义[J]. 岩石学报, 2011, 27(7): 2083-2094.  
GUAN Qi, ZHU Di-cheng, ZHAO Zhi-dan, et al. Zircon U-Pb Chronology, Geochemistry of the Late Cretaceous Mafic Magmatism in the Southern Lhasa Terrane and Its Implications[J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27(7): 2083-2094.
- [56] 管琪, 朱弟成, 赵志丹, 等. 西藏南部冈底斯带东段晚白垩世埃达克岩: 新特提斯洋俯冲的产物? [J]. 岩石学报, 2010, 26(7): 2165-2179.  
GUAN Qi, ZHU Di-cheng, ZHAO Zhi-dan, et al. Late Cretaceous Adakites in the Eastern Segment of the

- Gangdese Belt, Southern Tibet: Products of Neo-Tethyan Ridge Subduction? [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2010, 26(7): 2165-2179.
- [57] ZHANG L L, ZHU D C, WANG Q, et al. Late Cretaceous Volcanic Rocks in the Sangri Area, Southern Lhasa Terrane, Tibet: Evidence for Oceanic Ridge Subduction[J]. *Lithos*, 2019, 326/327: 144-157.
- [58] 代作文, 李光明, 丁俊, 等. 西藏努日晚白垩世埃达克岩: 洋脊俯冲的产物[J]. *地球科学*, 2018, 43(8): 2727-2741.  
DAI Zuo-wen, LI Guang-ming, DING Jun, et al. Late Cretaceous Adakite in Nuri Area, Tibet: Products of Ridge Subduction[J]. *Earth Science*, 2018, 43(8): 2727-2741.
- [59] 侯德华, 潘志龙, 杨鑫朋, 等. 西藏札佐晚白垩世中期埃达克岩年代学、地球化学及其构造意义[J]. *沉积与特提斯地质*, 2021, DOI: 10.19826/j.cnki.1009-3850.2021.01006.  
HOU De-hua, PAN Zhi-long, YANG Xin-peng, et al. Geochronology, Geochemistry and Tectonic Significance of the Middle Late Cretaceous Adakite in Zazuo, Tibet [J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 2021, DOI: 10.19826/j.cnki.1009-3850.2021.01006.
- [60] 叶丽娟, 赵志丹, 刘栋, 等. 西藏南木林晚白垩世辉绿岩与花岗质脉岩成因及其揭示的伸展背景[J]. *岩石学报*, 2015, 31(5): 1298-1312.  
YE Li-juan, ZHAO Zhi-dan, LIU Dong, et al. Late Cretaceous Diabase and Granite Dike in Namling, Tibet: Petrogenesis and Implications for Extension[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2015, 31(5): 1298-1312.
- [61] 唐演, 赵志丹, 齐宁远, 等. 西藏冈底斯岩基南木林晚白垩世岩体和脉岩地球化学与岩石成因[J]. *岩石学报*, 2019, 35(2): 387-404.  
TANG Yan, ZHAO Zhi-dan, QI Ning-yuan, et al. Geochemistry and Petrogenesis of Late Cretaceous Namling Gabbro and Dykes in Gangdese Batholith, Tibet[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2019, 35(2): 387-404.
- [62] 朱弟成, 潘桂棠, 王立全, 等. 西藏冈底斯带中生代岩浆岩的时空分布和相关问题的讨论[J]. *地质通报*, 2008, 27(9): 1535-1550.  
ZHU Di-cheng, PAN Gui-tang, WANG Li-quan, et al. Tempo-spatial Variations of Mesozoic Magmatic Rocks in the Gangdise Belt, Tibet, China, with a Discussion of Geodynamic Setting-related Issues[J]. *Geological Bulletin of China*, 2008, 27(9): 1535-1550.
- [63] MA L, WANG Q, WYMAN D A, et al. Late Cretaceous Crustal Growth in the Gangdese Area, Southern Tibet: Petrological and Sr-Nd-Hf-O Isotopic Evidence from Zhengga Diorite-gabbro[J]. *Chemical Geology*, 2013, 349/350: 54-70.
- [64] HE Q, LANG X H, LI L, et al. U-Pb Zircon Age and Geochemistry of the Cuocun Gabbro in the Southern Lhasa Terrane: Implications for Early Cretaceous Rollback of the Neo-Tethyan Oceanic Slab[J]. *Geological Journal*, 2020, 56(3): 1424-1444.
- [65] DEPAOLO D J. Neodymium Isotope Geochemistry: An Introduction[M]. Berlin: Springer-Verlag, 1988.
- [66] RUDNICK R, GAO S. The Role of Lower Crustal Recycling in Continent Formation[J]. *Geochimica and Cosmochimica Acta Supplement*, 2003, 67: 403.
- [67] AYERS J. Trace Element Modeling of Aqueous Fluid-peridotite Interaction in the Mantle Wedge of Subduction Zones[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1998, 132(4): 390-404.
- [68] CLASS C, MILLER D M, GOLDSTEIN S L, et al. Distinguishing Melt and Fluid Subduction Components in Umnak Volcanics, Aleutian Arc [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2000, 6(1): 1-28.
- [69] KIMURA J, YOSHIDA T. Contributions of Slab Fluid, Mantle Wedge and Crust to the Origin of Quaternary Lavas in the NE Japan Arc[J]. *Journal of Petrology*, 2006, 47(11): 2185-2232.
- [70] SUN S S, MCDONOUGH W F. Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts: Implications for Mantle Composition and Processes[J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 1989, 42: 313-345.
- [71] HAWKESWORTH C J, GALLAGHER K, HERGT J M, et al. Mantle and Slab Contribution in Arc Magmas[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 1993, 21(1): 175-204.
- [72] 陈炳辉, 韦慧晓, 黄志国, 等. 表生地质的 Ce 异常及其影响因素综述[J]. *稀土*, 2007, 28(4): 79-83.  
CHEN Bing-hui, WEI Hui-xiao, HUANG Zhi-guo, et al. Cerium Anomalies in Supergene Geological Bodies and Its Effecting Factors[J]. *Chinese Rare Earths*, 2007, 28(4): 79-83.
- [73] KERRICH R, SAID N. Extreme Positive Ce-anomalies in a 3.0 Ga Submarine Volcanic Sequence, Murchison Province: Oxygenated Marine Bottom Waters [J]. *Chemical Geology*, 2011, 280(1/2): 232-241.
- [74] LIU A L, WANG Q, ZHU D C, et al. Origin of the ca. 50 Ma Linzizong Shoshonitic Volcanic Rocks in the Eastern Gangdese Arc, Southern Tibet [J]. *Lithos*, 2018, 304/305/306/307: 374-387.

- [75] CHAPPELL B W, WHITE A J R. Two Contrasting Granite Types[J]. Australian Journal of Earth Sciences, 1974, 8: 173-174.
- [76] KING P L, WHITE A J R, CHAPPELL B W. Characterization and Origin of Aluminous A-type Granites from the Lachlan Fold Belt, Southeastern Australia[J]. Journal of Petrology, 1997, 38(3): 371-391.
- [77] YANG L Q, DENG J, DILEK Y, et al. Structure, Geochronology, and Petrogenesis of the Late Triassic Puziba Granitoid Dikes in the Mianlue Suture Zone, Qinling Orogen, China[J]. Geological Society of America Bulletin, 2015, 127(11/12): 1831-1854.
- [78] CHAPPELL B W, WHITE A J R. I- and S-types Granites in the Lachland Fold Belt[J]. Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth Sciences, 1992, 83: 1-26.
- [79] ROBERTS M P, CLEMENS J D. Origin of High-potassium, Calc-alkaline, I-type Granitoids[J]. Geology, 1993, 21: 825-828.
- [80] HILDRETH W, MOORBATH S. Crustal Contributions to Arc Magmatism in the Andes of Central Chile [J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1988, 98: 455-489.
- [81] MACPHERSON C G, DREBER S T, THIRWALL M F. Adakites Without Slab Melting: High Pressure Differentiation of Island Arc Magma, Mindanao, the Philippines [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2006, 243(3/4): 581-593.
- [82] RAPP R P, WATSON E B. Dehydration Melting of Metabasalt at 8–32 kbar: Implications for Continental Growth and Crust-mantle Recycling[J]. Journal of Petrology, 1995, 36(4): 891-931.
- [83] HAWKINS J W, ISHIZUKA O. Petrologic Evolution of Palau, a Nascent Island Arc[J]. Island Arc, 2009, 18(4): 599-641.
- [84] KEPEZHINSKAS P, MCDERMOTT F, DEFANT M J, et al. Trace Element and Sr-Nd-Pb Isotopic Constraints on a Three-component Model of Kamchatka Arc Petrogenesis[J]. Geochimica and Cosmochimica Acta, 1997, 61(3): 577-600.
- [85] HE Y H, ZHAO G C, SUN M, et al. Petrogenesis and Tectonic Setting of Volcanic Rocks in the Xiaoshan and Waifangshan Areas Along the Southern Margin of the North China Craton: Constraints from Bulk-rock Geochemistry and Sr-Nd Isotopic Composition [J]. Lithos, 2010, 114(1/2): 186-199.
- [86] 高永丰, 侯增谦, 魏瑞华. 冈底斯晚第三纪斑岩的岩石学、地球化学及其地球动力学意义[J]. 岩石学报, 2003, 19(3): 418-428.
- GAO Yong-feng, HOU Zeng-qian, WEI Rui-hua. Neogene Prophyries from Gangdese: Petrological, Geochemical Characteristics and Geodynamic Significances [J]. Acta Petrologica Sinica, 2003, 19(3): 418-428.
- [87] PEARCE J A, HARRIS N B W, TINDLE A G. Trace Element Discrimination Diagrams for the Tectonic Interpretation of Granitic Rocks[J]. Journal of Petrology, 1984, 25(4): 956-983.
- [88] CHEN L, QIN K Z, LI G M, et al. Zircon U-Pb Ages, Geochemistry, and Sr-Nd-Pb-Hf Isotopes of the Nuri Intrusive Rocks in the Gangdese Area, Southern Tibet: Constraints on Timing, Petrogenesis, and Tectonic Transformation [J]. Lithos, 2015, 212/213/214/215: 379-396.
- [89] ZHANG L H, GUO Z F, ZHANG M L, et al. Post-collisional Potassic Magmatism in the Eastern Lhasa Terrane, South Tibet: Products of Partial Melting of Mélanges in a Continental Subduction Channel [J]. Gondwana Research, 2017, 41: 9-28.
- [90] HAO L L, WANG Q, ZHANG C F, et al. Oceanic Plateau Subduction During Closure of the Bangong-Nujiang Tethyan Ocean: Insights from Central Tibetan Volcanic Rocks[J]. Geological Society of America Bulletin, 2018, 131: 864-880.
- [91] MENG Y K, XIONG F H, XU Z Q, et al. Petrogenesis of Late Cretaceous Mafic Enclaves and Their Host Granites in the Nyemo Region of Southern Tibet: Implications for the Tectonic-magmatic Evolution of the Central Gangdese Belt[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2019, 176: 27-41.
- [92] FAN J J, LI C, SUN Z M, et al. Early Cretaceous MORB-type Basalt and A-type Rhyolite in Northern Tibet: Evidence for Ridge Subduction in the Bangong-Nujiang Tethyan Ocean[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2018, 154: 187-201.
- [93] WU C D, ZHENG Y C, XU B, et al. The Genetic Relationship Between JTA-like Magmas and Typical Adakites: An Example from the Late Cretaceous Nuri Complex, Southern Tibet[J]. Lithos, 2018, 320/321: 265-279.
- [94] COLLINS W J, BEAMS S D, WHITE A J R, et al. Nature and Origin of A-type Granites with Particular Reference to Southeastern Australia[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1982, 80(2): 189-200.
- [95] CHUNG S L, CHU M F, JI J Q, et al. The Nature and Timing of Crustal Thickening in Southern Tibet: Geochemical and Zircon Hf Isotopic Constraints from Po-

- stcollisional Adakites [J]. *Tectonophysics*, 2009, 477 (1/2): 36-48.
- [96] ALTHERR R, SIEBEL W. I-type Plutonism in a Continental Back-arc Setting; Miocene Granitoids and Monzonites from the Central Aegean Sea, Greece [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2002, 143: 397-415.
- [97] MARTIN H, SMITHIES R H, RAPP R, et al. An Overview of Adakite, Tonalite-trondhjemite-granodiorite (TTG), and Sanukitoid; Relationships and Some Implications for Crustal Evolution [J]. *Lithos*, 2005, 79 (1/2): 1-24.
- [98] PATIÑO DOUCE A E. What Do Experiments Tell Us About the Relative Contributions of Crust and Mantle to the Origin of Granitic Magmas? [J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 1999, 168: 55-75.
- [99] 王海涛, 曾令森, 许翠萍, 等. 藏南冈底斯岩基东段米林地区晚侏罗世—白垩纪侵入岩的岩石成因和地球动力学意义 [J]. *岩石学报*, 2020, 36(10): 3041-3062.  
WANG Hai-tao, ZENG Ling-sen, XU Cui-ping, et al. Petrogenesis and Geodynamic Significances of Late Jurassic-Cretaceous Intrusion in the Mainling Area, Eastern Gangdese, Southern Tibet [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2020, 36(10): 3041-3062.
- [100] 孟繁一, 赵志丹, 朱弟成, 等. 西藏冈底斯东部门巴地区晚白垩世埃达克质岩的岩石成因 [J]. *岩石学报*, 2010, 26(7): 2180-2192.  
MENG Fan-yi, ZHAO Zhi-dan, ZHU Di-cheng, et al. Petrogenesis of Late Cretaceous Adakite-like Rocks in Mamba from the Eastern Gangdese, Tibet [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2010, 26(7): 2180-2192.
- [101] ZENG L S, GAO L E, XIE K J, et al. Mid-Eocene High Sr/Y Granites in the Northern Himalayan Gneiss Domes; Melting Thickened Lower Continental Crust [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2011, 303(3/4): 251-266.
- [102] CABANIS B, LECOLLE M. Le Diagramme La/10-Y/15-Nb/8; Un Outil Pour La Discrimination des Series Volcaniques et Lamise en Evidence des Processus de Mélange et/ou de Contamination Crustale [J]. *Compte Rendus de l'Academie des Sciences Series II*, 1989, 309: 2023-2029.
- [103] COLE R B, STEWART B W. Continental Margin Volcanism at Sites of Spreading Ridge Subduction; Examples from Southern Alaska and Western California [J]. *Tectonophysics*, 2009, 464(1/2/3/4): 118-136.
- [104] TANG G J, WYMAN D A, WANG Q, et al. Asthenosphere-lithosphere Interaction Triggered by a Slab Window During Ridge Subduction; Trace Element and Sr-Nd-Hf-Os Isotopic Evidence from Late Carboniferous Tholeiites in the Western Junggar Area (NW China) [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2012, 329/330: 84-96.
- [105] 孙敏, 龙晓平, 蔡克大, 等. 阿尔泰早古生代末期洋中脊俯冲: 锆石 Hf 同位素组成突变的启示 [J]. *中国科学: D 辑, 地球科学*, 2009, 39(7): 935-948.  
SUN Min, LONG Xiao-ping, CAI Ke-da, et al. Early Paleozoic Ridge Subduction in the Chinese Altai; Insight from the Abrupt Change in Zircon Hf Isotopic Compositions [J]. *Science in China: Series D, Earth Sciences*, 2009, 39(7): 935-948.
- [106] BREITSPRECHER K, THORKELSON D J, GROOME W G, et al. Geochemical Confirmation of the Kula-Farallon Slab Window Beneath the Pacific Northwest in Eocene Time [J]. *Geology*, 2003, 31(4): 351-354.
- [107] WEIS D, KIEFFER B, MAERSCHALK C, et al. High-precision Pb-Sr-Nd-Hf Isotopic Characterization of USGS BHVO-1 and BHVO-2 Reference Materials [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2005, 6(2): Q02002.
- [108] 唐功建, 王强. 高镁安山岩及其地球动力学意义 [J]. *岩石学报*, 2010, 26(8): 2495-2512.  
TANG Gong-jian, WANG Qiang. High-Mg Andesites and Their Geodynamic Implications [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2010, 26(8): 2495-2512.
- [109] YIN J Y, YUAN C, SUN M, et al. Late Carboniferous High-Mg Dioritic Dikes in Western Junggar, NW China; Geochemical Features, Petrogenesis and Tectonic Implications [J]. *Gondwana Research*, 2010, 17(1): 145-152.
- [110] COLE R B, NELSON S W, LAYER P W, et al. Eocene Volcanism Above a Depleted Mantle Slab Window in Southern Alaska [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2006, 118(1/2): 140-158.