

中拉萨地块亚热地区早白垩世辉长岩:班公湖-怒江洋南向俯冲板片断离的岩浆作用响应

张士贞,李奋其,刘函,李俊,苟正彬,秦雅东

ZHANG Shizhen, LI Fenqi, LIU Han, LI Jun, GOU Zhengbin, QIN Yadong

中国地质调查局成都地质调查中心,四川 成都 610081

Chengdu Center, China Geological Survey, Chengdu 610081, Sichuan, China

摘要:为深入认识拉萨地块中北部地区早白垩世构造-岩浆过程,对中拉萨地块西段亚热地区早白垩世辉长岩进行了研究。辉长岩的锆石 U-Pb 年龄为 115.5 ± 0.5 Ma。岩石属于拉斑玄武岩系列,具有与洋岛玄武岩(OIB)相似的稀土元素特征, $Mg^{\#}$ 值(46.07~48.05)、Cr(6.97×10^{-6} ~ 18.5×10^{-6})和 Ni(6.87×10^{-6} ~ 11.2×10^{-6})元素含量较低,Rb、Ba、K、Sr等大离子亲石元素富集,Th、U和Pb元素呈现明显的正异常,Nb、Ta、Zr、Hf、P、Ti等高场强元素表现为负异常,显示具有部分弧火山岩性质;具有正的锆石 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 值(+4.3~+7.9)和较年轻的 Hf 亏损地幔模式年龄($T_{DM1} = 489 \sim 614$ Ma)。综合分析认为,亚热地区早白垩世辉长岩形成于南向俯冲的班公湖-怒江特提斯洋岩石圈板片断离的构造背景,可能是受近期俯冲板片熔体或超临界流体交代的软流圈地幔部分熔融的产物,并经历了不同程度的分离结晶作用。

关键词:中拉萨地块;亚热地区;早白垩世;辉长岩;板片断离

中图分类号: P534.53; P588.12⁺4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-2552(2021)11-1852-13

Zhang S Z, Li F Q, Liu H, Li J, Gou Z B, Qin Y D. The Early Cretaceous gabbro in Yare area, middle Lhasa Block: Magmatism response to the slab break-off of the southward subduction Bangong-Nujiang Ocean lithosphere. *Geological Bulletin of China*, 2021, 40(11): 1852-1864

Abstract: In order to understand the Early Cretaceous tectonic-magmatic process in the central and north Lhasa Block, the Early Cretaceous gabbro in the Yare area of western part of middle Lhasa Block were studied. The zircon U-Pb age of gabbro is 115.5 ± 0.5 Ma. The rocks belong to tholeiite series, and their characteristics of rare earth elements are similar to those of oceanic island basalt (OIB). $Mg^{\#}$ value (46.07~48.05) and contents of Cr (6.97×10^{-6} ~ 18.5×10^{-6}), Ni (6.87×10^{-6} ~ 11.2×10^{-6}) are relatively low. The large ion lithophile elements such as Rb, Ba, K, Sr of gabbro samples are relatively enriched, Th, U and Pb show positive anomalies, and the high field strength elements such as Nb, Ta, Zr, Hf, P and Ti show negative anomalies, indicating that the gabbro samples have some "arc volcanic rock" properties. The gabbro show positive zircon $\varepsilon_{Hf}(t)$ values (+4.3~+7.9) and younger Hf-depleted mantle model ages (T_{DM1}) of 489~614 Ma. By comprehensive analysis, it is proposed that the Early Cretaceous gabbro in the Yare area is most likely triggered by the slab break-off of the southward subducting Bangong-Nujiang Tethyan Ocean lithosphere, and can be considered as the product of partial melting of the asthenosphere mantle which was metasomatized by recent melts or supercritical fluids from the subduction slab, and subsequently experienced varying degrees of fractional crystallization.

Key words: middle Lhasa Block; Yare area; Early Cretaceous; gabbro; slab break-off

收稿日期:2021-04-28;修订日期:2021-06-08

资助项目:中国地质调查局项目《中尼铁路(境内段)沿线区域地质调查》(编号:DD20211195)、《三江造山带昌都-澜沧地区区域地质调查》(编号:DD20190053)和国家自然科学基金项目《西藏那曲地区中晚侏罗世拉贡塘组沉积作用对班公湖-怒江构造带地质演化的制约》(批准号:41972113)、《措勤-改则地区木纠错组时代厘定:对拉萨地块晚二叠世-三叠纪沉积演化的制约》(批准号:42002032)

作者简介:张士贞(1984-),男,高级工程师,从事青藏高原基础地质调查和研究工作。E-mail:zszcd2010@126.com

早白垩世岩浆岩广泛出露于拉萨地块中北部地区,其地球动力学机制存在争议。早期研究者多认为是雅鲁藏布江新特提斯洋北向平板俯冲的产物^[1-5],也有部分学者提出可能与狮泉河-永珠-纳木错-嘉黎蛇绿岩带所代表的古洋(Slainajap)的南向俯冲有关^[6-7];但近年越来越多的资料和数据表明,它们很可能与班公湖-怒江特提斯洋向南俯冲及随后的板片断离等复杂的动力学过程有关^[8-24],约 113 Ma 发生的大规模带状岩浆作用可能是板片断离的结果^[18-24]。目前,板片断离模型在造山带研究中逐渐得到应用,在解释大规模岩浆作用方面取得了良好的效果,但板片断离所导致的复杂的岩浆活动还有待进一步研究。

值得指出的是,前人对中北拉萨地块早白垩世岩浆岩的研究主要集中于中酸性岩石,而对能够敏感指示构造背景的镁铁质岩浆岩的研究较少。本

次选取中拉萨地块西部亚热地区的早白垩世辉长岩为研究对象,在进行岩石学、地球化学、锆石U-Pb 年代学及 Hf 同位素系统研究的基础上,探讨其岩浆源区和岩石成因,为深入认识中北拉萨地块早白垩世构造-岩浆过程提供新的证据。

1 地质背景和样品描述

拉萨地块为夹持于班公湖-怒江缝合带与雅鲁藏布缝合带之间的东西向狭长巨型构造岩浆带,南北宽 150~300 km,东西长约 2500 km,是整个青藏高原岩浆作用最为发育的地区^[25]。以狮泉河-永珠-纳木错-嘉黎蛇绿混杂岩带(SNMZ)和洛巴堆-米拉山断裂带(LMF)为界,将拉萨地块分为北(NL)、中(CL)和南(SL)3个亚地体^[19](图 1-a)。中北拉萨地块出露大量中生代岩浆岩,包括则弄群、多尼组和去申拉组火山岩及大量中、酸性侵入

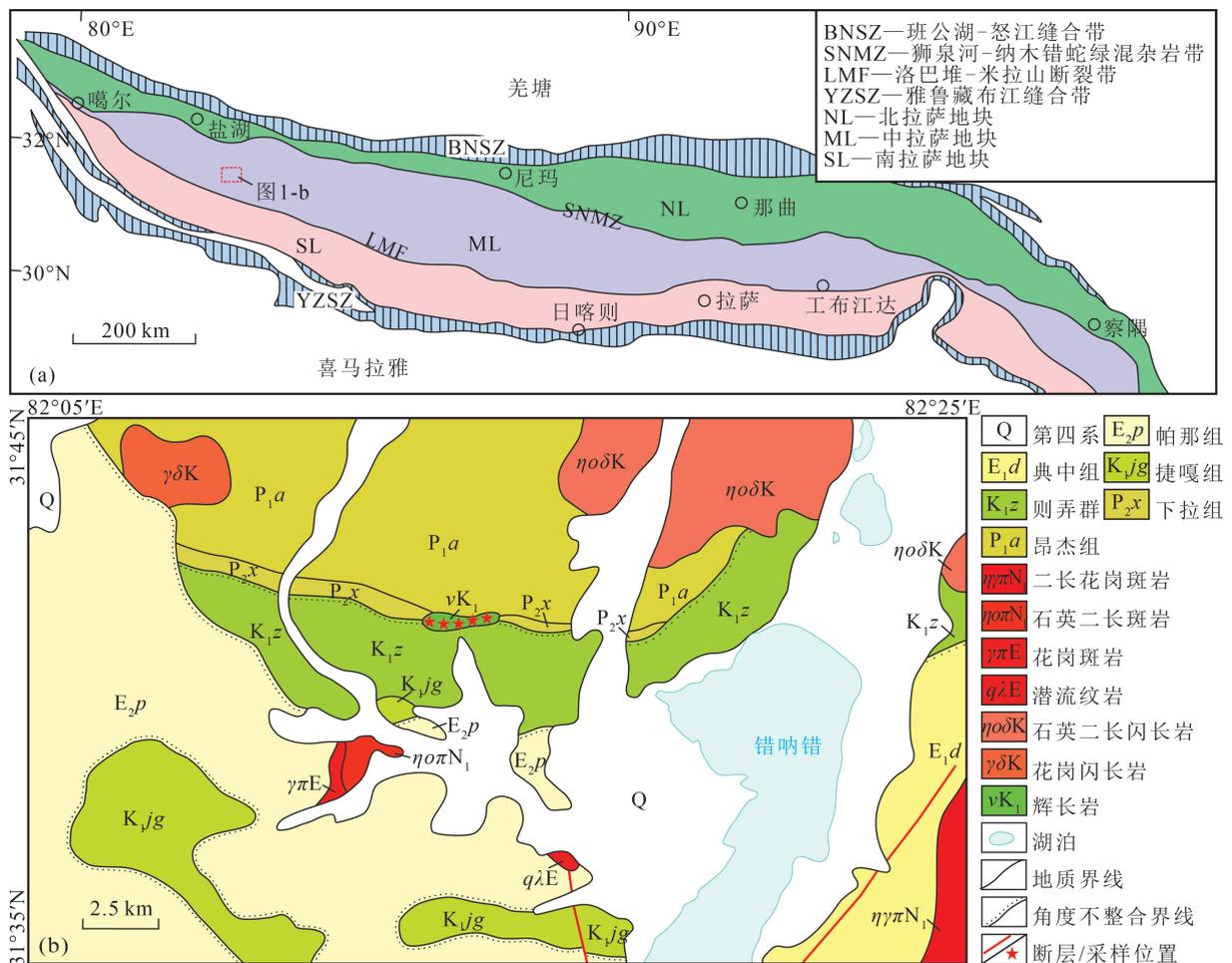


图 1 拉萨地块构造简图(a) (据参考文献[19]修改)和研究区地质简图(b)

Fig. 1 Simplified tectonic map of the Lhasa Block (a) and simplified geological map of the study area (b)

岩和少量基性岩脉。

研究区位于中拉萨地块,革吉县亚热乡北约20 km(图1-b)。该地区出露的地层包括昂杰组变质碎屑岩(P_1a)、下拉组变质灰岩夹碎屑岩(P_2x)、则弄群碎屑岩夹火山岩(K_1z)、捷嘎组灰岩(K_1jg)、林子宗群帕那组火山岩(E_2p)和第四系(Q)。区内侵入岩主要包括白垩纪石英二长闪长岩、花岗闪长岩和辉长岩,古近纪花岗斑岩、潜流纹岩和新近纪石英二长斑岩,以岩体、岩枝和岩脉状产出。

本次研究的早白垩世辉长岩脉呈近东西向延伸,围岩为昂杰组(P_1a)、下拉组(P_2x)及则弄群(K_1z),出露面积约1 km²。岩石新鲜面为灰绿色,细粒辉长结构,块状构造,岩石主要由斜长石(约70%)、单斜辉石(约15%)和黑云母(约15%)组成(图2-a,b)。斜长石呈半自形板状,粒径为0.1~1.5 mm,杂乱分布,部分长轴显定向排列,可见聚片双

晶,根据 $\perp(010)$ 晶带最大消光角法测得 $(010) > NP' = 28$,斜长石牌号 $An = 52$,属于拉长石,少量可见环带构造,后期具粘土化、白云母化、褐铁矿化,部分具绿帘石化、碳酸盐化;单斜辉石呈半自形柱状,粒径为0.02~1.25 mm,杂乱分布,单偏光下呈无色、淡黄色,部分发育聚片双晶,后期具褐铁矿化,部分被黑云母交代;黑云母呈鳞片状、片状,片径为0.05~0.75 mm,杂乱分布,后期多具绿泥石化、褐铁矿化,部分呈假象产出,少残留,单偏光下具黄褐-黄色多色性,个别可见辉石的逆反应边,推测岩石后期经历了轻微混杂岩化作用(图2-c,d)。副矿物主要为钛铁矿、磁铁矿和磷灰石,呈星散状分布,钛铁矿常呈树枝状骸晶产出。岩石内可见被碳酸盐矿物、绿帘石充填的裂隙。

2 分析方法

选取新鲜的样品进行锆石 U-Pb 测年、Hf 同位

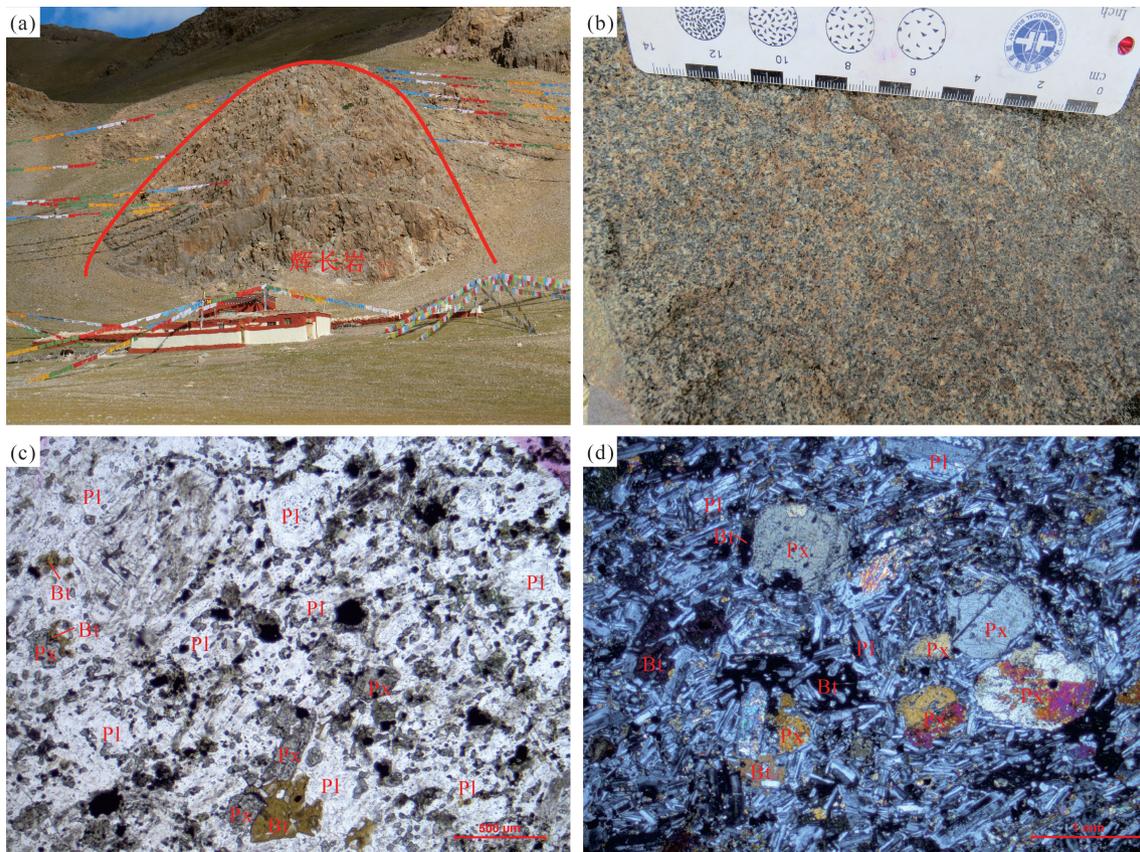


图2 亚热地区早白垩世辉长岩野外(a,b)和显微(c,d)照片

Fig. 2 Field photos (a,b) and photomicrographs (c,d) of the Early Cretaceous gabbro in the Yare area

Pl—斜长石;Px—辉石;Bt—黑云母

素和地球化学分析。锆石单矿物分选在河北廊坊市诚信地质服务有限公司完成。锆石制靶、显微照相(透射光和反射光)和阴极发光(CL)图像在北京铭年领航科技有限公司完成。锆石 U-Pb 同位素定年和微量元素含量在武汉上谱分析科技有限责任公司利用 LA-ICP-MS 同时分析完成。分析采用 Geolas HD 193 nm 准分子激光剥蚀系统和 Agilent 7900 型号 ICP-MS 质谱仪,激光束斑直径为 32 μm 。在激光剥蚀过程中,采用单点剥蚀的方式,以氦气作为剥蚀物质的载气、氩气为补偿气,采用锆石标准 91500 和玻璃标准物质 NIST610 作外标进行同位素和微量元素的分馏校正。对分析数据的离线处理(包括对样品和空白信号的选择、仪器灵敏度漂移校正、元素含量及 U-Th-Pb 同位素比值和年龄计算)采用软件 ICPMSDataCal 完成,详细的仪器操作条件和数据处理方法见参考文献[26]。锆石 U-Pb 年龄谱和图绘制和年龄加权平均计算利用 Isoplot 3.0 完成。

锆石 Hf 同位素组成分析在武汉上谱分析科技有限责任公司利用激光剥蚀多接收杯等离子体质谱(LA-MC-ICP-MS)完成。激光剥蚀系统为 Geolas HD,多接收等离子体质谱仪(MC-ICP-MS)为 Neptune Plus。激光输出能量密度为 7.0 J/cm²,剥蚀斑束为 44 μm 。使用 ¹⁷⁶Yb/¹⁷³Yb = 0.79639 和 ¹⁷⁶Lu/¹⁷⁵Lu = 0.02656 来扣除 ¹⁷⁶Yb 和 ¹⁷⁶Lu 对 ¹⁷⁶Hf 的同量异位干扰。测试采用 91500 和 GJ-1 作标样,测试值在误差范围内与推荐值吻合。详细仪器操作条件和分析方法见参考文献[27]。计算 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 时,球粒陨石的 ¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf 值为 0.282772, ¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf 值为 0.0332,单阶段 Hf 模式年龄(T_{DM1})计算时,亏损地幔的值采用 ¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf = 0.28325, ¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf =

0.0384,两阶段 Hf 模式年龄(T_{DM2})计算时,平均地壳的 ¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf 值为 0.015^[28]。

样品的主量、微量和稀土元素测试由自然资源部沉积盆地与油气资源重点实验室完成。主量元素测定采用 AXIOS-X 射线荧光光谱仪,微量和稀土元素采用 iCAP Q 等离子体质谱仪完成测试分析。

3 分析结果

3.1 锆石 U-Pb 年龄

辉长岩样品 YR03-N1 的锆石多为自形-半自形长柱状或破碎粒状,粒径在 80~300 μm 之间,长宽比为 1:1~1:3。阴极发光(CL)图像显示,大多数锆石结晶环带较清晰(图 3),呈现出岩浆锆石特征^[29]。选取无明显裂隙、环带清晰的锆石颗粒或部位进行测试,共获得 24 个有效点数据(表 1)。结果显示,样品锆石的 Th、U 含量分别在 $1446 \times 10^{-6} \sim 12027 \times 10^{-6}$ 和 $1117 \times 10^{-6} \sim 5442 \times 10^{-6}$ 之间,二者具有较好的正相关关系,Th/U 值较高,为 0.75~2.24(表 1),显示所测锆石为岩浆成因^[29]。所有测点在谐和曲线附近构成一个年龄集中区,其 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄分布范围为 115~117 Ma,计算获得年龄加权平均值为 115.5 ± 0.5 Ma (MSWD = 0.24, $n = 24$) (图 4),基本可以代表辉长岩的结晶年龄。

3.2 锆石 Hf 同位素组成

在锆石 U-Pb 定年的基础上,对样品 YR03-N1 进行了锆石 Hf 同位素分析,测试位置与年龄测定点位相近(图 3)。 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值等相关参数根据相应测点的锆石 U-Pb 年龄计算,测试及相关数据计算结果列于表 2。结果显示,样品中锆石的 ¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf 值较低,大多数小于 0.002,说明锆石在形成后没有

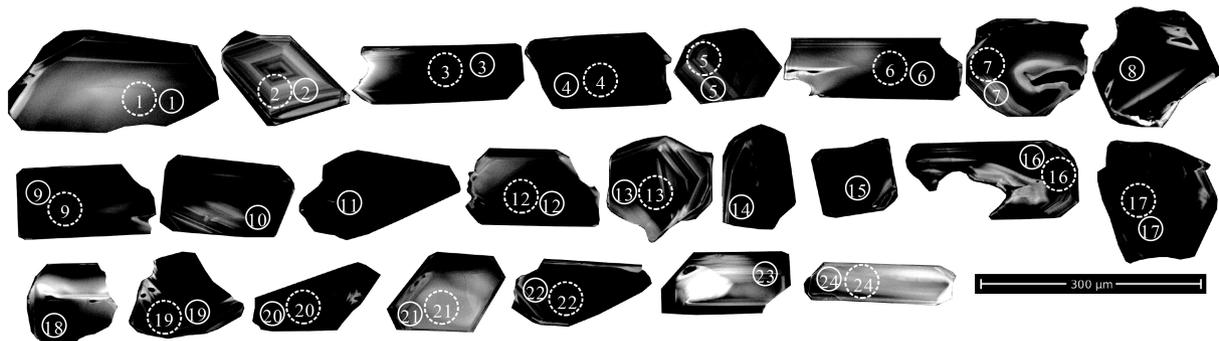


图 3 亚热地区早白垩世辉长岩锆石阴极发光(CL)图像
(实线圆圈和数字表示锆石 U-Pb 测点位置和点号,虚线圆圈和数字表示锆石 Hf 同位素测点位置和点号)

Fig. 3 CL images of the zircons from the Early Cretaceous gabbro in the Yare area

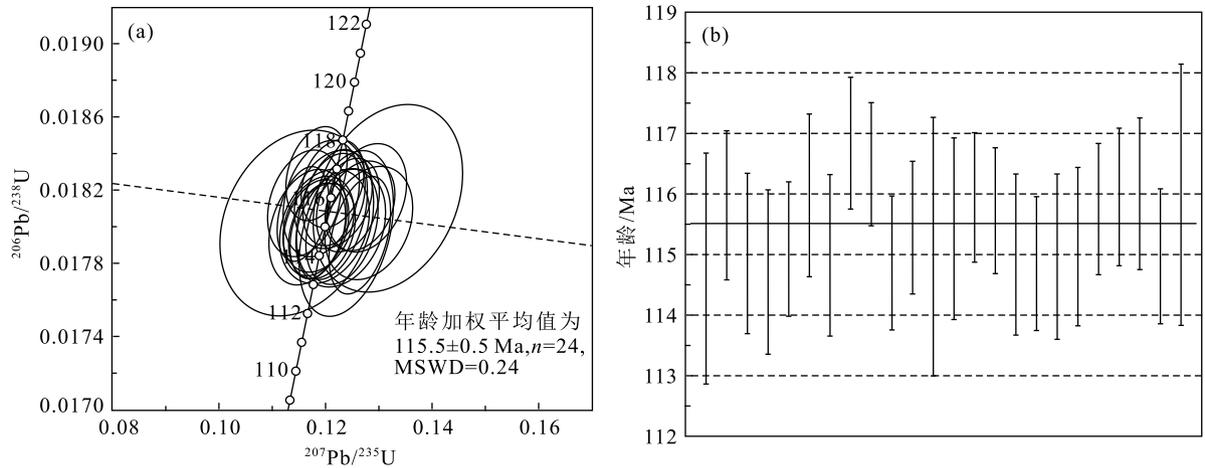


图4 亚热地区早白垩世辉长岩锆石 U-Pb 谐和图(a)和年龄加权平均值图(b)

Fig. 4 U-Pb concordia diagram (a) and weighted average age (b) of the zircons from the Early Cretaceous gabbro in the Yare area

表1 亚热地区早白垩世辉长岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Th-Pb 定年结果

Table 1 Zircon LA-ICP-MS U-Th-Pb dating results of the Early Cretaceous gabbro in the Yare area

测点	含量/ 10^{-6}			Th/U	同位素比值						年龄/Ma			
	Pb	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb} \pm 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U} \pm 1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U} \pm 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U} \pm 1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U} \pm 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U} \pm 1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U} \pm 1\sigma$			
YR03-N1: 细粒辉长岩, 115.5±0.5 Ma (MSWD=0.24, n=24)														
1	63.8	3149	2424	1.30	0.0497	0.0023	0.1239	0.0059	0.0180	0.0003	119	5.3	115	1.9
2	58.1	2004	2455	0.82	0.0463	0.0019	0.1160	0.0046	0.0181	0.0002	111	4.2	116	1.2
3	101.8	6586	3422	1.92	0.0483	0.0024	0.1198	0.0056	0.0180	0.0002	115	5.1	115	1.3
4	171	12027	5389	2.23	0.0507	0.0014	0.1264	0.0039	0.0180	0.0002	121	3.5	115	1.4
5	67.5	2940	2638	1.11	0.0475	0.0018	0.1187	0.0045	0.0180	0.0002	114	4.1	115	1.1
6	113.5	7009	3855	1.82	0.0474	0.0018	0.1192	0.0048	0.0182	0.0002	114	4.4	116	1.3
7	46.7	1560	1988	0.78	0.0469	0.0020	0.1167	0.0049	0.0180	0.0002	112	4.5	115	1.3
8	128.9	7023	4503	1.56	0.0467	0.0015	0.1183	0.0039	0.0183	0.0002	114	3.5	117	1.1
9	119.3	6708	4287	1.56	0.0480	0.0016	0.1213	0.0040	0.0182	0.0002	116	3.6	116	1.0
10	72.9	3814	2756	1.38	0.0479	0.0015	0.1185	0.0035	0.0180	0.0002	114	3.2	115	1.1
11	150.9	8583	5442	1.58	0.0463	0.0013	0.1158	0.0033	0.0181	0.0002	111	3.0	115	1.1
12	73.1	4645	2553	1.82	0.0459	0.0038	0.1146	0.0096	0.0180	0.0003	110	8.7	115	2.1
13	82.5	4571	3123	1.46	0.0488	0.0019	0.1212	0.0045	0.0181	0.0002	116	4.0	115	1.5
14	100.7	4763	3927	1.21	0.0485	0.0016	0.1216	0.0039	0.0181	0.0002	117	3.6	116	1.1
15	98.5	4945	3703	1.34	0.0505	0.0018	0.1265	0.0044	0.0181	0.0002	121	4.0	116	1.0
16	109.7	6310	3925	1.61	0.0494	0.0018	0.1231	0.0045	0.0180	0.0002	118	4.1	115	1.3
17	72.0	2447	3092	0.79	0.0481	0.0017	0.1193	0.0042	0.0180	0.0002	114	3.8	115	1.1
18	52.2	2851	1877	1.52	0.0496	0.0023	0.1228	0.0056	0.0180	0.0002	118	5.1	115	1.4
19	61.9	3042	2365	1.29	0.0519	0.0023	0.1281	0.0055	0.0180	0.0002	122	5.0	115	1.3
20	149	10657	4758	2.24	0.0496	0.0016	0.1242	0.0040	0.0181	0.0002	119	3.6	116	1.1
21	48.5	1558	2072	0.75	0.0483	0.0019	0.1215	0.0049	0.0181	0.0002	116	4.4	116	1.1
22	73.4	3844	2798	1.37	0.0507	0.0020	0.1277	0.0050	0.0182	0.0002	122	4.5	116	1.3
23	137.8	8344	4834	1.73	0.0471	0.0016	0.1182	0.0041	0.0180	0.0002	113	3.7	115	1.1
24	29.7	1446	1117	1.29	0.0523	0.0038	0.1317	0.0093	0.0182	0.0003	126	8.4	116	2.2

表 2 亚热地区早白垩世辉长岩锆石 Hf 同位素组成

Table 2 Zircon Hf isotopic compositions of the Early Cretaceous gabbro in the Yare area

测点	年龄/Ma	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	1σ	$(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_i$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(0)$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	T_{DM1}/Ma	T_{DM2}/Ma	$f_{\text{Lu/Hf}}$
1	115	0.034591	0.001233	0.282841	0.000011	0.282839	2.5	4.9	586	859	-0.96
2	116	0.031632	0.001115	0.282837	0.000009	0.282835	2.3	4.8	590	868	-0.97
3	115	0.036831	0.001321	0.282869	0.000009	0.282866	3.4	5.9	547	797	-0.96
4	115	0.106599	0.003638	0.282931	0.000009	0.282924	5.6	7.9	489	668	-0.89
5	115	0.035429	0.001266	0.282831	0.000009	0.282828	2.1	4.5	601	883	-0.96
6	116	0.054628	0.001919	0.282835	0.000012	0.282831	2.2	4.6	606	877	-0.94
7	115	0.023673	0.000850	0.282848	0.000008	0.282846	2.7	5.1	571	843	-0.97
8	117	0.045489	0.001628	0.282852	0.000009	0.282848	2.8	5.3	577	837	-0.95
12	115	0.072057	0.002395	0.282882	0.000011	0.282877	3.9	6.2	545	773	-0.93
13	115	0.028848	0.001027	0.282824	0.000009	0.282821	1.8	4.3	608	898	-0.97
16	115	0.047060	0.001653	0.282874	0.000008	0.282870	3.6	6.0	545	788	-0.95
17	115	0.032015	0.001215	0.282855	0.000011	0.282852	2.9	5.4	566	829	-0.96
19	115	0.034776	0.001250	0.282842	0.000007	0.282839	2.5	4.9	585	858	-0.96
20	116	0.054467	0.001885	0.282829	0.000009	0.282825	2.0	4.4	614	890	-0.94
21	116	0.014140	0.000527	0.282833	0.000007	0.282832	2.2	4.7	586	873	-0.98
22	116	0.045963	0.001585	0.282854	0.000011	0.282850	2.9	5.3	574	833	-0.95
24	116	0.060981	0.002101	0.282888	0.000009	0.282883	4.1	6.5	532	759	-0.94

明显的放射性成因 Hf 的积累,测定的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值基本可以代表其形成时体系的 Hf 同位素组成^[28]。17 个分析点的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 同位素变化范围为 0.282824~ 0.282931, $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 +4.3~ +7.9, 对应的 Hf 单阶段亏损地幔模式年龄 (T_{DM1}) 为 489~ 614 Ma。

3.3 地球化学特征

主量、微量和稀土元素分析结果见表 3。本次选取的辉长岩样品 SiO_2 含量为 50.14%~51.38%, 属

基性岩范畴,具有较高的 CaO (8.74%~9.5%)、 Al_2O_3 (16.76%~19.16%)、 TFeO (8.44%~9.91%)、 P_2O_5 (0.34%~0.69%), 较低的 MgO (4.08%~4.86%) 和全碱含量 ($\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}=4.52\%\sim 4.71\%$), $\text{Na}_2\text{O} > \text{K}_2\text{O}$, $\text{Mg}^\# = 46.07\sim 48.05$ 。扣除烧失量并换算成 100% 后进行投图,在 TAS 图解 (图 5-a) 中,样品点落在亚碱性辉长岩区域,在 $\text{SiO}_2-\text{TFeO}/\text{MgO}$ 图解 (图 5-b) 中,样品点都落入拉斑玄武岩区。

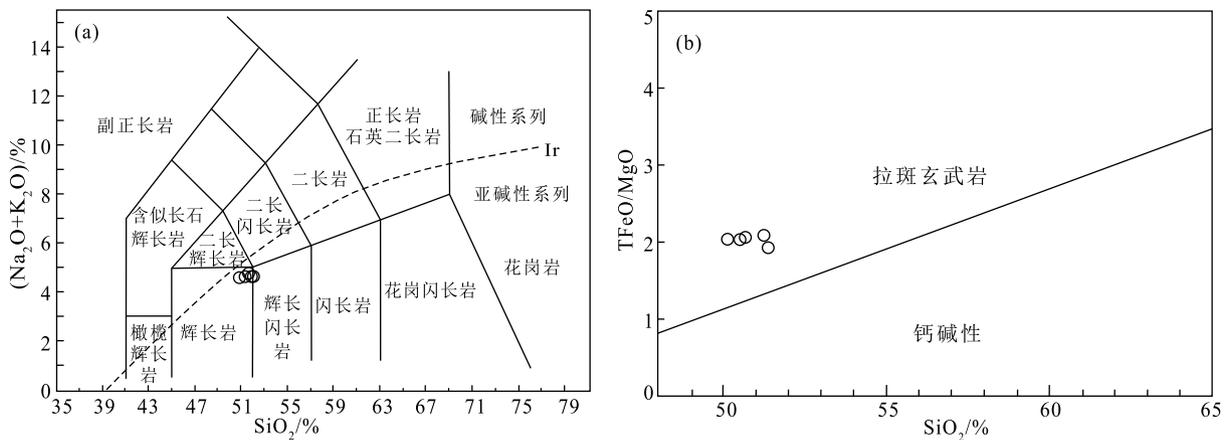


图 5 辉长岩 TAS 图解 (a) 和 $\text{SiO}_2-\text{TFeO}/\text{MgO}$ 图解 (b)

Fig. 5 TAS (a) and $\text{SiO}_2-\text{TFeO}/\text{MgO}$ (b) diagrams of the gabbro samples

表3 亚热带地区早白垩世辉长岩主量、微量和稀土元素数据

Table 3 Major, trace and rare earth element concentrations of the Early Cretaceous gabbro in the Yare area

编号	YR03-H1	YR03-H2	YR03-H3	YR03-H4	YR03-H5	编号	YR03-H1	YR03-H2	YR03-H3	YR03-H4	YR03-H5
SiO ₂	51.38	50.14	51.25	50.68	50.5	Zr	173	208	153	221	217
TiO ₂	0.9	0.96	0.87	0.9	0.92	Nb	13.3	12.9	11.3	13.7	12.9
Al ₂ O ₃	18.7	16.76	19.16	17.2	17.27	Cs	3.98	2.07	3.6	1.34	1.58
Fe ₂ O ₃	9.38	11.01	9.46	10.36	10.47	Ba	375	449	407	632	588
MnO	0.16	0.19	0.15	0.19	0.19	La	54.3	71.3	42.9	80.2	79.3
MgO	4.38	4.86	4.08	4.52	4.63	Ce	101	134	87	149	147
CaO	8.74	9.5	8.95	9.04	9.24	Pr	10.6	14	9.03	15.6	15.5
Na ₂ O	3.29	2.63	3.25	2.92	2.78	Nd	37.8	51	32.8	55.7	56.8
K ₂ O	1.28	1.89	1.34	1.79	1.77	Sm	7.12	9.77	6.24	10.8	10.9
P ₂ O ₅	0.41	0.69	0.34	0.59	0.59	Eu	1.99	2.5	1.81	2.88	2.86
烧失量(LOI)	1.24	1.18	1.01	1.62	1.42	Gd	5.84	8.02	5.19	8.78	8.89
总和	99.86	99.81	99.86	99.81	99.78	Tb	0.74	0.99	0.68	1.09	1.1
TFeO	8.44	9.91	8.51	9.32	9.42	Dy	3.96	5.21	3.77	5.69	5.73
K ₂ O+Na ₂ O	4.57	4.52	4.59	4.71	4.55	Ho	0.72	0.94	0.7	1.02	1.02
K ₂ O/Na ₂ O	0.39	0.72	0.41	0.61	0.64	Er	2.03	2.5	1.99	2.71	2.75
Mg [#]	48.05	46.65	46.07	46.36	46.69	Tm	0.27	0.34	0.27	0.37	0.38
δ	2.49	2.86	2.55	2.89	2.76	Yb	1.78	2.17	1.75	2.4	2.4
F ₁	0.06	0.08	0.06	0.08	0.07	Lu	0.27	0.32	0.26	0.36	0.35
F ₂	-1.42	-1.35	-1.41	-1.35	-1.36	Hf	4.05	4.86	3.79	5.36	5.33
Sc	23.5	24.3	22.1	25.3	25.6	Ta	0.55	0.63	0.46	0.66	0.61
V	247	271	268	277	276	Pb	12.6	12.9	12.5	15.1	14.3
Cr	18.5	9.96	6.97	11.4	10.7	Th	12.1	18	11.2	22	19.4
Co	27.6	28.7	27	28.8	29.3	U	2.38	4.33	2.28	4.81	4.2
Ni	11.2	8.64	6.87	8.63	8.36	∑REE	228.42	303.06	194.39	336.60	334.98
Cu	58.6	192	14.1	160	105	LREE/HREE	18.42	19.24	16.31	19.38	19.19
Zn	122	103	103	104	109	(La/Yb) _N	21.46	23.11	17.24	23.50	23.24
Ga	24	20.2	23.5	21.7	21.6	δEu	0.96	0.87	0.98	0.92	0.90
Ge	1.52	1.49	1.43	1.59	1.59	Zr/Ba	0.46	0.46	0.38	0.35	0.37
Rb	39.8	54.6	35.2	56.1	55.5	(Th/Ta) _N	10.61	13.78	11.74	16.08	15.34
Sr	828	882	790	1166	1116	(La/Nb) _N	4.24	5.74	3.94	6.08	6.38
Y	20.7	26.4	19.4	28.6	28.7						

注:主量元素含量单位为%,微量和稀土元素含量单位为 10^{-6} ; $Mg^{\#} = 100 \times (MgO/40.304) / (MgO/40.304 + 2 \times Fe_2O_3/159.691 + FeO/71.846)$; 里特曼指数 $\delta = (K_2O + Na_2O)^2 / (SiO_2 - 43)$; $F_1 = 0.0088(SiO_2) - 0.0774(TiO_2) - 0.0102(Al_2O_3) + 0.0066(TFeO) - 0.0017(MgO) - 0.0143(CaO) - 0.0155(Na_2O) - 0.0007(K_2O)$; $F_2 = -0.0130(SiO_2) - 0.0185(TiO_2) - 0.0129(Al_2O_3) - 0.0134(TFeO) - 0.0300(MgO) - 0.0204(CaO) - 0.0481(Na_2O) + 0.0715(K_2O)$; $\delta Eu = Eu_N / \sqrt{Sm_N * Gd_N}$

辉长岩的稀土元素总量较高, $\sum REE = 194.39 \times 10^{-6} \sim 336.60 \times 10^{-6}$ 。轻、重稀土元素分馏明显, $(La/Yb)_N = 17.24 \sim 23.50$, $LREE/HREE = 16.31 \sim$

19.38,在稀土元素球粒陨石标准化图解(图6-a)中,样品的配分曲线都呈轻稀土元素富集的右倾型,类似于典型的洋岛玄武岩(OIB); $\delta Eu = 0.87 \sim$

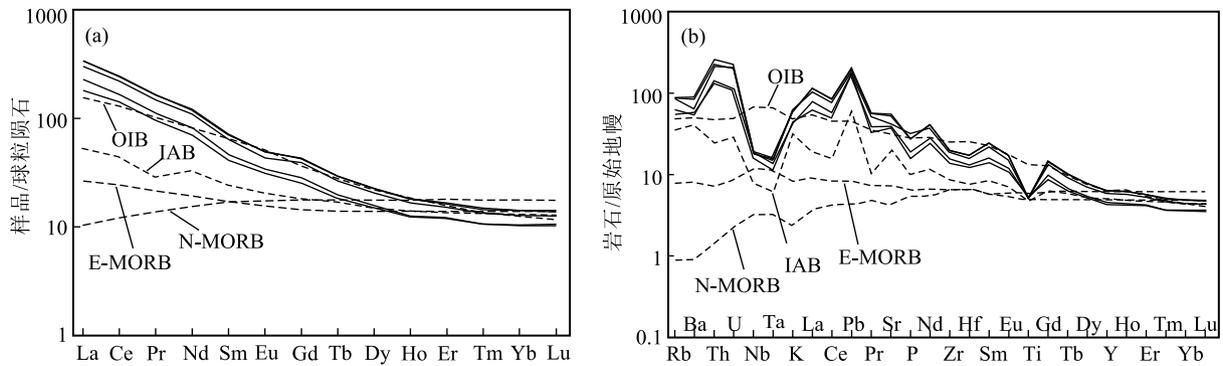


图 6 辉长岩样品球粒陨石标准化稀土元素配分曲线(a)和原始地幔标准化微量元素蛛网图(b)
(球粒陨石和原始地幔标准化数据、OIB、N-MORB 和 E-MORB 数据据参考文献[30], IAB 数据据参考文献[31])

Fig. 6 The chondrite-normalized REE pattern (a) and primitive mantle-normalized trace element spider diagram (b) of the gabbro samples

OIB—洋岛玄武岩; N-MORB—正常洋中脊玄武岩; E-MORB—富集洋中脊玄武岩; IAB—岛弧玄武岩

0.98, 显示轻微的负 Eu 异常。辉长岩的 Cr ($6.97 \times 10^{-6} \sim 18.5 \times 10^{-6}$)、Ni ($6.87 \times 10^{-6} \sim 11.2 \times 10^{-6}$) 含量较低, 在微量元素原始地幔标准化图解(图 6-b)中, Rb、Ba、K、Sr 等大离子亲石元素相对富集, Th、U、Pb 等元素呈现明显的正异常, Nb、Ta、Zr、Hf、P、Ti 等高场强元素表现为负异常, 指示样品具有部分“弧火山岩”性质。

4 讨论

4.1 源区性质和岩石成因

众所周知, 基性岩浆岩源自地幔, 而在 SiO_2 - TFeO/MgO 图解(图 5-b)中, 辉长岩样品均落入拉斑玄武岩区域, 表明辉长岩岩浆为玄武质岩浆。Ormerod 等^[32]指出, Zr/Ba 值大于 0.2 的玄武岩源区来自软流圈地幔, Zr/Ba 值小于 0.2 则来自岩石圈地幔, 亚热早白垩世辉长岩的 Zr/Ba 值为 0.35~0.46, 暗示其岩浆源区来自更深的软流圈地幔。锆石的 Lu-Hf 同位素体系由于具有很高的封闭温度, 其同位素比值不会随后期部分熔融或分离结晶而变化, 因此锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值代表了岩浆源区的成分特征。通常认为, 具有正 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值的岩浆岩来自亏损地幔或从亏损地幔中新生的年轻地壳物质部分熔融^[33-34], 负的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值及老的模式年龄, 通常代表富集岩石圈地幔或古老地壳成因^[28, 35-40]。本文辉长岩具有正的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值 (+4.3~+7.9) 和年轻的 Hf 单阶段模式年龄 (489~614 Ma), 指示其源区的亏损

地幔特征。但地球化学特征显示, 辉长岩明显富集 Th、U、Pb 和轻稀土元素, 亏损 Nb、Ta、Ti 等高场强元素, 具有明显不同于亏损地幔来源的岩石的地球化学性质。一般认为, 这些特征可以由两方面因素引起^[41]: 一是岩浆在上升过程中遭受了地壳物质的混染; 二是源区富集, 即地幔岩浆源区受到因俯冲进入地幔的地壳物质组分的影响。

辉长岩野外调查未发现捕虏体, 镜下观察未见壳源碎屑组分, 锆石年龄测试也未见捕获和继承锆石, 均反映没有明显的地壳物质加入。较高且均一的锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值 (+4.3~+7.9) 也说明岩浆受地壳物质混染的影响较小。 $(\text{Th}/\text{Ta})_{\text{N}}$ 和 $(\text{La}/\text{Nb})_{\text{N}}$ 值通常用来识别玄武岩中地壳物质的贡献^[42-43]。辉长岩的 $(\text{Th}/\text{Ta})_{\text{N}}$ 值 (10.61~16.08) 和 $(\text{La}/\text{Nb})_{\text{N}}$ 值 (3.94~6.38) 远高于大陆地壳平均值 (分别为 3.9、2.6) 和上地壳值 (分别为 5.6、2.7)^[44], 这是简单的地壳物质混染无法解释的。地壳混染作用会在造成 Nb、Ta 负异常的同时使 Zr 和 Hf 表现出正异常^[45-46]。在微量元素原始地幔标准化蛛网图(图 6-b)上, 虽然 Nb、Ta 表现为负异常, 但是 Zr、Hf 均未呈现正异常, 甚至表现出弱的负异常, 说明辉长岩岩浆没有受到明显的地壳混染。

研究表明, 来自俯冲板片的流体及其上覆沉积物的熔体通常富集 Rb、Ba、K、Sr 等大离子亲石元素 (LILE) 和 Th、U、Pb 等元素, 亏损 Nb、Ta、Zr、Hf 等高场强元素 (HFSE)^[47]。辉长岩具有较高的 LIFE/HFSE 和 LREE/HREE 值, 暗示源区受到显著的俯

冲带流体或熔体改造。一般流体交代会导致地幔源区减少 REE、HFSE 和 Th 含量,且富集 LILE、Pb 和 U;而发生熔体交代会导致源区富集 Th、LILE 和 LREE^[48-50]。本文辉长岩不仅富集 LREE 和 LILE,还具有高 Th 含量($11.2 \times 10^{-6} \sim 22 \times 10^{-6}$),在 Ba/La-Th/Yb 和 Th/Nb-U/Th 图解(图 7)中,辉长岩样品显示出俯冲沉积物熔体交代的趋势,指示沉积物熔体可能是主要的地幔交代介质。最近研究也显示,俯冲板片超临界流体的溶质含量介于富水流体和硅酸盐熔体之间,具有比富水流体和熔体更强的元素迁移能力^[53-54],受其交代的地幔源区也可以富集 Th、LILE 和 LREE,与发生熔体交代的源区性质相似。因此,俯冲板片超临界流体也可以作为主要的交代介质。本文辉长岩的岩浆源区应该是受俯冲板片熔体或超临界流体交代形成的富集地幔。锆石 Hf 同位素表现出的地幔亏损与微量元素表现出的源区富集不一致(解耦现象),可能与地幔源区经历了近期的熔体或超临界流体交代有关,交代作用导致源区的微量元素富集,但由于交代历史较短,没有引起足够的放射性成因同位素的积累^[55-56]。

辉长岩的 Mg[#]、Cr 和 Ni 元素含量远低于原生玄武岩浆范围(Mg[#]=68~76, Ni= $300 \times 10^{-6} \sim 400 \times 10^{-6}$, Cr= $300 \times 10^{-6} \sim 500 \times 10^{-6}$)^[57-58],表明其可能经历了橄榄石、单斜辉石的分离结晶;轻微的 Sr、Eu 负异常,说明可能存在少量的斜长石结晶分异。

综上所述,亚热早白垩世辉长岩可能来源于受近期俯冲板片熔体或超临界流体交代的软流圈地

幔的部分熔融,岩浆在演化过程中经历了不同程度的分离结晶作用。

4.2 构造背景及地质意义

在微量元素原始地幔标准化图解(图 6-b)上, Nb、Ta、Ti 元素呈明显负异常,显示亚热早白垩世辉长岩具有类似岛弧玄武岩的特征。但与典型岛弧玄武岩相比,辉长岩的 Nb ($11.3 \times 10^{-6} \sim 13.7 \times 10^{-6}$)、Sr ($790 \times 10^{-6} \sim 1166 \times 10^{-6}$) 等元素含量(典型岛弧玄武岩 Nb $< 4 \times 10^{-6}$, Sr $< 400 \times 10^{-6}$)^[59]明显偏高,轻稀土元素也更富集,显示出洋岛玄武岩的地球化学亲缘性。岛弧玄武岩总体上以具有较低的 Zr 含量($< 130 \times 10^{-6}$)和 Zr/Y 值(< 4)为特征^[60],而本文辉长岩的 Zr 含量($153 \times 10^{-6} \sim 221 \times 10^{-6}$)和 Zr/Y 值(7.56~8.36)均较高,在 Zr-Zr/Y、F₁-F₂和 Zr/4-Nb×2-Y 图解(图 8-a、b、c)中所有样品点落入板内玄武岩区域,在 Ta/Hf-Th/Hf 图解(图 8-d)中,所有样品点落入大陆伸展带或初始裂谷玄武岩区域,指示辉长岩形成于板内伸展的构造环境。

前已述及,尽管中北拉萨地块早白垩世岩浆作用的地球动力学机制仍存在争议,但近年越来越多的研究者认为,它们很可能与班公湖-怒江特提斯洋向南俯冲及随后的板片断离作用有关。前人研究表明,班公湖-怒江洋可能于中二叠世晚期(约 263 Ma 或更早)已经开始向南俯冲,早白垩世早期拉萨地块与羌塘地块发生碰撞,在早白垩世晚期(约 113 Ma)班公湖-怒江洋板片发生断离^[18-19, 65-66]。大量地质事实和数值模拟结果表明,俯冲板片断离会导致板片构造窗形成,从板片构造窗上升的软流圈地幔

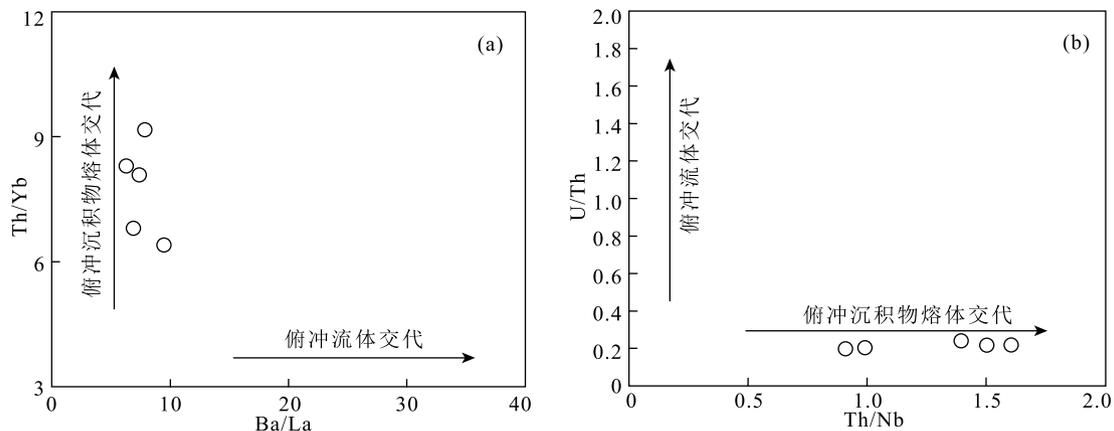


图 7 辉长岩 Ba/La-Th/Yb(a)^[51]和 Th/Nb-U/Th(b)^[52]图解

Fig. 7 Ba/La-Th/Yb (a) and Th/Nb-U/Th (b) diagrams of the gabbro samples

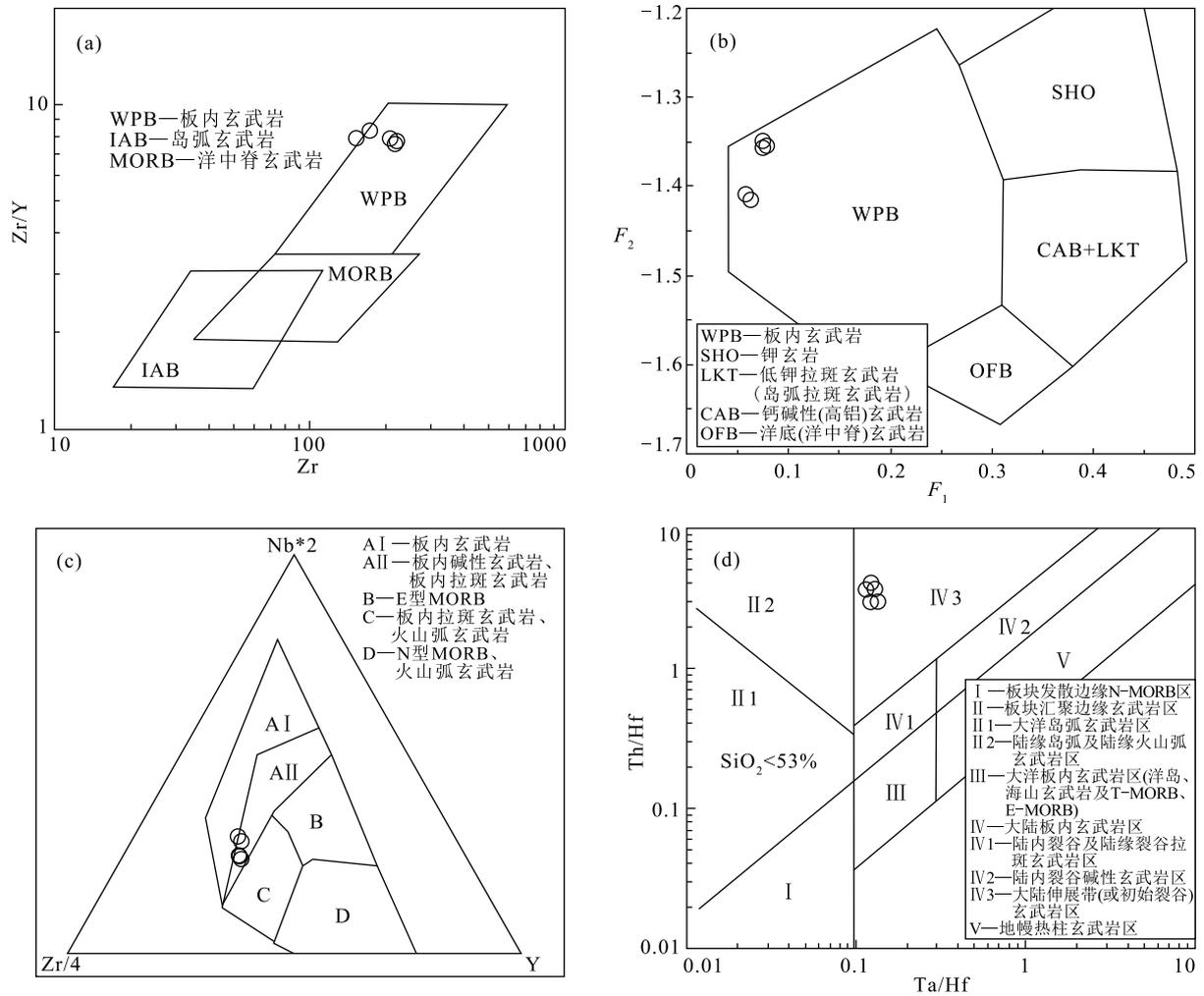


图 8 辉长岩样品 Zr-Zr/Y (a)^[61]、 F_1 - F_2 (b)^[62]、Zr/4-Nb×2-Y (c)^[63] 和 Ta/Hf-Th/Hf (d)^[64] 图解
 Fig. 8 Zr-Zr/Y (a), F_1 - F_2 (b), Zr/4-Nb×2-Y (c) and Ta/Hf-Th/Hf (d) diagrams of the gabbro samples

物质发生减压熔融, 形成具有类似板内玄武岩地球化学特征的基性岩浆^[67], 并导致上覆岩石圈发生伸展^[68]。同时, 热的软流圈地幔上涌会导致断离的板片、富集的岩石圈地幔、上覆地壳等发生部分熔融, 在板片断离区形成复杂多样的岩浆岩。中北拉萨地块在 113 Ma 左右发生的大规模岩浆爆发事件^[14, 18-24, 69-72]很可能与南向俯冲的班公湖-怒江洋板片的断离有关。亚热早白垩世辉长岩 (115 Ma) 形成于板内伸展环境, 应该也是这次板片断离事件的产物。在班公湖-怒江洋岩石圈向南俯冲消减的过程中, 受俯冲板片熔体或超临界流体的交代作用影响, 拉萨地块深部软流圈地幔逐渐富集大离子亲石元素、轻稀土元素和 Th、U、Pb 等元素, 相对亏损高场强元素 Nb、Ta、Ti、Zr、Hf 等。115 Ma 左右, 班

公湖-怒江洋板片发生断离时, 受交代的软流圈地幔沿板片构造窗上升并发生减压熔融, 在中拉萨地块西段形成兼具板内玄武岩和岛弧火山岩性质的亚热辉长岩。亚热早白垩世辉长岩的研究为班公湖-怒江洋的南向俯冲和板片断离, 提供了直接的岩石学、年代学和地球化学证据。

5 结论

(1) 中拉萨地块西部亚热辉长岩的锆石 U-Pb 年龄为 115.5 ± 0.5 Ma, 为中拉萨地块早白垩世晚期岩浆活动的产物。

(2) 亚热辉长岩具有与洋岛玄武岩相似的稀土元素特征, 并显示部分“弧火山岩”性质, 可能来源于受近期俯冲板片熔体或超临界流体交代的软流

圈地幔的部分熔融,岩浆在演化过程中可能经历了不同程度的分离结晶作用。

(3) 亚热早白垩世辉长岩形成于板内伸展环境,可能与南向俯冲的班公湖-怒江特提斯洋岩石圈板片的断离有关。

致谢: 样品测试过程中得到实验室相关工作人员的热心帮助,审稿专家对论文提出许多建设性的意见和建议,在此一并表示感谢。平时工作和论文撰写过程中受到了潘桂棠老师许多的指导和帮助,谨以此文向潘老师表示诚挚的谢意和祝福,祝愿潘老师身体健康、万事顺遂!

参考文献

- [1] Coulon C, Maluski H, Bollinger C, et al. Mesozoic and Cenozoic volcanic rocks from central and southern Tibet: $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ dating, petrological characteristics and geodynamical significance[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1986, 79(3/4): 281-302.
- [2] Ding L, Kapp P, Zhong D L, et al. Cenozoic volcanism in Tibet: evidence for a transition from oceanic to continental subduction[J]. *Journal of Petrology*, 2003, 44(10): 1833-1865.
- [3] Kapp P, DeCelles P G, Gehrels G E, et al. Geological records of the Lhasa-Qiangtang and Indo-Asian collisions in the Nima area of central Tibet[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2007, 119(7/8): 917-932.
- [4] 马国林, 岳雅慧. 西藏拉萨地块北部白垩纪火山岩及其对冈底斯岛弧构造演化的制约[J]. *岩石矿物学杂志*, 2010, 29(5): 525-538.
- [5] 崔浩杰, 苟正彬, 刘函, 等. 拉萨地块西段尼雄地区早白垩世晚期花岗岩闪长岩的成因及构造意义[J]. *沉积与特提斯地质*, 2019, 39(1): 1-13.
- [6] 康志强, 许继峰, 董彦辉, 等. 拉萨地块中北部白垩纪则弄群火山岩: Slainajap 洋南向俯冲的产物[J]. *岩石学报*, 2008, 24(2): 303-314.
- [7] 张彤, 黄波, 罗改, 等. 西藏中冈底斯带北部早白垩世构造属性: 来自则弄群火山岩锆石 U-Pb 年龄及地球化学的制约[J]. *沉积与特提斯地质*, 2020, 40(2): 75-90.
- [8] 朱弟成, 莫宣学, 赵志丹, 等. 西藏冈底斯带措勤地区则弄群火山岩锆石 U-Pb 年代学格架及构造意义[J]. *岩石学报*, 2008, 24(3): 401-412.
- [9] 康志强, 许继峰, 王保弟, 等. 拉萨地块北部白垩纪多尼组火山岩的地球化学: 形成的构造环境[J]. *地球科学*, 2009, 34(1): 89-104.
- [10] 高顺宝, 郑有业, 王进寿, 等. 西藏班戈地区侵入岩年代学和地球化学: 对班公湖-怒江洋盆演化时限的制约[J]. *岩石学报*, 2011, 27(7): 1973-1982.
- [11] 黄瀚霄, 李光明, 董随亮, 等. 西藏班戈地区青龙花岗岩闪长岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及其地球化学特征[J]. *地质通报*, 2012, 31(6): 852-859.
- [12] Qu X M, Wang R J, Xin H B, et al. Age and petrogenesis of A-type granites in the middle segment of the Bangonghu-Nujiang suture, Tibetan plateau[J]. *Lithos*, 2012, 146/147: 264-275.
- [13] 张予杰, 刘伟, 朱同兴, 等. 西藏申扎县买巴地区早白垩世侵入岩锆石 U-Pb 年龄及地球化学[J]. *中国地质*, 2014, 41(1): 50-60.
- [14] 隋清霖. 西藏拉萨地块盐湖地区早白垩世岩浆岩年代学、岩石成因及构造意义[D]. 中国地质大学(北京)硕士学位论文, 2014.
- [15] Wu H, Li C, Xu M J, et al. Early Cretaceous adakitic magmatism in the Dachagou area, northern Lhasa terrane, Tibet: Implications for slab roll-back and subsequent slab breakoff of the lithosphere of the Bangong-Nujiang Ocean[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2015, 97: 51-66.
- [16] 齐宁远, 赵志丹, 唐演, 等. 西藏中拉萨地块西段左左乡晚侏罗世-早白垩世花岗岩年代学、地球化学与岩石成因[J]. *岩石学报*, 2019, 35(2): 405-422.
- [17] 尹滔, 李威, 尹显科, 等. 西藏阿翁错地区早白垩世花岗岩闪长岩——班公湖-怒江洋壳南向俯冲消减证据[J]. *中国地质*, 2019, 46(5): 1105-1115.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 张亮亮, 朱弟成, 赵志丹, 等. 西藏北冈底斯巴尔达地区岩浆作用的成因: 地球化学、年代学及 Sr-Nd-Hf 同位素约束[J]. *岩石学报*, 2010, 26(6): 1871-1886.
- [21] 张亮亮, 朱弟成, 赵志丹, 等. 西藏申扎早白垩世花岗岩类: 板片断离的证据[J]. *岩石学报*, 2011, 27(7): 1938-1946.
- [22] 张晓倩, 朱弟成, 赵志丹, 等. 西藏措勤麦嘎岩基的锆石 U-Pb 年代学、地球化学和锆石 Hf 同位素: 对中部拉萨地块早白垩世花岗岩类岩石成因的约束[J]. *岩石学报*, 2012, 28(5): 1615-1634.
- [23] Chen Y, Zhu D C, Zhao Z D, et al. Slab breakoff triggered Ca. 113 Ma magmatism around Xainza area of the Lhasa Terrane, Tibet[J]. *Gondwana Research*, 2014, 26(2): 449-463.
- [24] Sui Q L, Wang Q, Zhu D C, et al. Compositional diversity of ca. 110 Ma magmatism in the northern Lhasa Terrane, Tibet: Implications for the magmatic origin and crustal growth in a continent-continent collision zone[J]. *Lithos*, 2013, 168/169: 145-159.
- [25] 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.
- [26] Liu Y S, Hu Z C, Zong K Q, et al. Reappraisal and refinement of zircon U-Pb isotope and trace element analyses by LA-ICP-MS[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2010, 55(15): 1535-1546.
- [27] Hu Z C, Zhang W, Liu Y S, et al. "Wave" signal-smoothing and mercury-removing device for laser ablation quadrupole and multiple collector ICPMS analysis: Application to lead isotope analysis[J]. *Analytical Chemistry*, 2015, 87(2): 1152-1157.
- [28] 吴福元, 李献华, 郑永飞, 等. Lu-Hf 同位素体系及其岩石学应用[J]. *岩石学报*, 2007, 23(2): 185-220.
- [29] Wu Y B, Zheng Y F. Genesis of Zircon and Its constraints On Interpretation of U-Pb Age[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2004, 49(15): 1554-1569.

- [30] Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of Oceanic Basalts: Implications for mantle composition and processes [C]// Saunders A D, Norry M J. *Magma-tism in the Ocean Basins*. London: Geological Society, London, Special Publications, 1989, 42(1): 313-345.
- [31] 杨婧, 王金荣, 张族, 等. 全球多弧玄武岩数据挖掘——在玄武岩判别图解上的表现及初步解释[J]. *地质通报*, 2016, 35(12): 1937-1949.
- [32] Onmerod D S, Hawkesworth C J, Rogers N W, et al. Tectonic and magmatic transitions in the western Great Basin, USA [J]. *Nature*, 1988, 333(6171): 349-353.
- [33] Zhou Z H, Mao J W, Peter L. Geochronology and isotopic geochemistry of the A-type granites from the Huanggang Sn-Fe deposit, southern Great Hinggan Range, NE China: Implication for their origin and tectonic setting[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2012, 49: 272-286.
- [34] 彭树华, 孙立新, 时学忠, 等. 冀北三面井岩体时代、地球化学特征及其地质意义[J]. *世界地质*, 2013, 32(4): 694-706
- [35] 杨岳衡, 张宏福, 谢烈文, 等. 华北克拉通中、新生代典型火山岩的岩石成因: Hf同位素新证据[J]. *岩石学报*, 2006, 22(6): 1665-1671.
- [36] Shi Y R, Liu D Y, Miao L C, et al. Devonian A-type granitic magmatism on the northern margin of the North China Craton: SHRIMP U-Pb zircon dating and Hf-isotopes of the Hongshan granite at Chifeng, Inner Mongolia, China [J]. *Gondwana Research*, 2010, 17(4): 632-641.
- [37] 第五春荣, 孙勇, 王倩. 华北克拉通地壳生长和演化: 来自现代河流碎屑锆石 Hf 同位素组成的启示[J]. *岩石学报*, 2012, 28(11): 3520-3530.
- [38] 杨浩田, 杨德彬, 师江朋, 等. 鲁西早白垩世岩石圈地幔的属性: 大昆仑辉长岩和辉绿岩年代学、岩石地球化学和 Sr-Nd-Pb-Hf 同位素制约[J]. *岩石学报*, 2018, 34(11): 3327-3340
- [39] 岳维好, 周家喜. 青海都兰县阿斯哈石英闪长岩岩石地球化学、锆石 U-Pb 年龄与 Hf 同位素特征[J]. *地质通报*, 2019, 38(2/3): 328-338.
- [40] 许强伟, 王玘, 王志强, 等. 内蒙古克什克腾旗长岭子斜长花岗岩锆石 U-Pb 年龄、成因与碰撞造山作用[J]. *中国地质*, 2021, 48(1): 229-246.
- [41] 梁国科, 吴祥珂, 蔡逸涛, 等. 桂北罗城地区云煌岩成因——地球化学及 U-Pb 年龄约束[J]. *地质通报*, 2020, 39(2/3): 267-278.
- [42] Neal C R, Mahoney J J, Chazey W J. Mantle sources and the highly variable role of continental lithosphere in basalt petrogenesis of the Kerguelen Plateau and Broken Ridge LIP: Results from ODP leg 183 [J]. *Journal of Petrology*, 2002, 43(7): 1177-1205
- [43] 朱弟成, 潘桂棠, 莫宣学, 等. 青藏高原中部中生代 OIB 型玄武岩的识别: 年代学、地球化学及其构造环境[J]. *地质学报*, 2006, 80(9): 1312-1328.
- [44] Rudnick R L, Gao S. Composition of the continental crust [C]// Holland H D, Turekian K K. *Treatise on Geochemistry (Second Edition)*. Oxford: Elsevier, 2014, 4: 1-51.
- [45] Zhao J H, Zhou M F. Geochemistry of Neoproterozoic mafic intrusions in the Panzihua district (Sichuan Province, SW China): implications for subduction-related metasomatism in the upper mantle [J]. *Precambrian Research*, 2007, 152(1): 27-47.
- [46] 杨崇辉, 杜利林, 任留东, 等. 中条山铜矿峪变质火山岩的时代、构造背景及对成矿的制约[J]. *地球学报*, 2015, 36(5): 613-633.
- [47] Kessel R, Schmidt M W, Ulmer P, et al. Trace element signature of subduction-zone fluids, melts and supercritical liquids at 120-180 km depth [J]. *Nature*, 2005, 437(29): 724-727.
- [48] Pearce J A. Trace element characteristics of lava from destructive plate boundaries [C]// Thorpe R S. *Orogenic andesites and related rocks*. Chichester: John Wiley and Sons, 1982: 528-548.
- [49] 杨逸云, 赵志丹, 雷杭山, 等. 云南腾冲全新世火山岩岩浆演化和岩石成因[J]. *岩石学报*, 2019, 35(2): 472-484.
- [50] Yu Y, Huang X L, Sun M, et al. Missing Sr-Nd isotopic decoupling in subduction zone: Decoding the multi-stage dehydration and melting of subducted slab in the Chinese Altai [J]. *Lithos*, 2020, 362/363, 105465: 1-14.
- [51] Woodhead J D, Hergt J M, Davidson J P, et al. Hafnium isotope evidence for conservative element mobility during subduction zone process [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2001, 192(3): 331-346.
- [52] Kohut E J, Stern R J, Kent A R L, et al. Evidence for adiabatic decompression melting in the Southern Mariana Arc from high-Mg lavas and melt inclusions [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2006, 152(2): 201-221.
- [53] Li W C, Ni H W. Dehydration at subduction zones and the geochemistry of slab fluids [J]. *Science China Earth Sciences*, 2020, 63(12): 1925-1937.
- [54] Xiong X L, Liu X C, Li L, et al. The partitioning behavior of trace elements in subduction zones: Advances and prospects [J]. *Science China Earth Sciences*, 2020, 63(12): 1938-1951.
- [55] 邱检生, 胡建, 蒋少涌, 等. 鲁西中、新生代镁铁质岩浆作用与地幔化学演化[J]. *地球科学——中国地质大学学报*, 2005, 30(6): 646-658.
- [56] 徐向珍, 熊发挥, 杨经绥, 等. 冈底斯中段卡热辉长岩锆石 U-Pb 年代学、地球化学及构造意义[J]. *地质学报*, 2019, 93(10): 2542-2555.
- [57] Frey F A, Green D H, Roy S D. Integrated models of basalt petrogenesis: A study of quartz tholeiites to olivine melilitites from southeastern Australia utilizing geochemical and experimental petrological data [J]. *Journal of Petrology*, 1978, 19(3): 463-513.
- [58] Hess P C. Phase equilibria constraints on the origin of ocean floor basalts [C]// Morgan J P, Blackman D K, Sinton J M. *Mantle Flow and Melt Generation at Mid-Ocean Ridges*. 1992, 71: 67-102.
- [59] 李永军, 沈锐, 王冉, 等. 新疆西准噶尔巴尔努克早石炭世富 Nb 岛弧玄武岩的发现及其地质意义 [J]. *岩石学报*, 2014, 30(12): 3501-3511.
- [60] 夏林圻, 夏祖春, 徐学义, 等. 利用地球化学方法判别大陆玄武岩和岛弧玄武岩 [J]. *岩石矿物学杂志*, 2007, 26(1): 77-89.
- [61] Pearce J A. Role of the sub-continental lithosphere in magma genesis at active continental margins [C]// Hawkesworth C J, Norry M J. *Continental basalts and mantle xenoliths*. Nantwich, Cheshire: Shiva Publications, 1983: 230-249.
- [62] Pearce J A. Statistical analysis of major element patterns in basalts [J]. *Journal of Petrology*, 1976, 17(1): 15-43.

- [63] Meschede M. A method of discriminating between different types of mid-ocean ridge basalts and continental tholeiites with the Nb-Zr-Y diagram[J]. *Chemical Geology*, 1986, 56(3/4): 207-218.
- [64] 汪云亮, 张成江, 修淑芝. 玄武岩类形成的大地构造环境的 Th/Hf-Ta/Hf 图解判别[J]. *岩石学报*, 2001, 17(3): 413-421.
- [65] Zhu D C, Zhao Z D, Niu Y L, et al. The origin and pre-Cenozoic evolution of the Tibetan Plateau[J]. *Gondwana Research*, 2012, 23(4): 1429-1454.
- [66] Zhu D C, Li S M, Cawood P A, et al. Assembly of the Lhasa and Qiangtang Terranes in Central Tibet by divergent double subduction[J]. *Lithos*, 2016, 245: 7-17.
- [67] Ferrari L. Slab detachment control on mafic volcanic pulse and mantle heterogeneity in Central Mexico[J]. *Geology*, 2004, 32(1): 77-80.
- [68] Duretz T, Gerya T V, May D A. Numerical modelling of spontaneous slab breakoff and subsequent topographic response[J]. *Tectonophysics*, 2011, 502(1/2): 244-256.
- [69] 于枫. 西藏冈底斯盐湖南部花岗岩的岩石学、地球化学与成因[D]. 中国地质大学(北京)硕士学位论文, 2010: 1-68.
- [70] 于玉帅, 高原, 杨竹森, 等. 西藏措勤尼雄矿田滚纠铁矿侵入岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄与地球化学特征[J]. *岩石学报*, 2011, 27(7): 1949-1960.
- [71] 曲晓明, 辛洪波, 杜德道, 等. 西藏班公湖-怒江缝合带中段碰撞后 A 型花岗岩的时代及其对洋盆时间的约束[J]. *地球化学*, 2012, 41(1): 1-14.
- [72] 苟正彬, 刘函, 李俊, 等. 拉萨地块中北部尼雄地区早白垩世火山岩的成因及构造意义[J]. *地球科学*, 2018, 43(8): 2780-2794.