

藏南早侏罗世新特提斯洋俯冲过程中壳幔混合作用： 来自日喀则东嘎闪长质岩体的证据

舒楚天^{1,2}, 龙晓平^{3*}, 王 强¹, 袁 超¹

(1. 中国科学院 广州地球化学研究所, 同位素地球化学国家重点实验室, 广东 广州 510640; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 西北大学 地质学系, 大陆动力学国家重点实验室, 陕西 西安 710069)

摘 要: 大陆地壳的总体成分是闪长质的, 闪长岩的成因是理解大陆地壳形成的关键。发育在青藏高原南部的冈底斯岩基, 其总体成分是闪长质的, 但是前人的研究主要集中在讨论镁铁质和长英质岩石的成因, 很少涉及闪长岩。本工作选取冈底斯岩基中部东嘎闪长质岩体作为研究对象, 以揭示冈底斯带闪长岩的成因及其与地壳生长的关系。锆石 U-Pb 定年显示东嘎闪长岩形成于(176.5±1.2) Ma, 并且有(191.3±1.2) Ma 的继承锆石, 指示有早期地壳组分的加入。这些闪长岩具有相对较高的 $Mg^{\#}$ (0.40~0.44), 亏损的 $Sr((^{87}Sr/^{86}Sr)_i=0.703570\sim 0.703595)$ 、 $Nd(\epsilon_{Nd}(t)=+6.1\sim+6.5)$ 和锆石 Hf ($\epsilon_{Hf}(t)=+12.0\sim+14.7$)同位素组成, 以及较高的 $^{147}Sm/^{144}Nd$ 值, 表明岩浆源区有地幔物质贡献。岩相学上, 闪长岩中镁铁质聚晶团块附近的针状磷灰石, 以及东嘎岩体中广泛发育的镁铁质包体, 暗示闪长岩为岩浆混合成因。岩浆混合的地球化学检验, 也证实东嘎闪长岩是由幔源和壳源岩浆混合形成。东嘎闪长岩的壳幔混合成因表明在早侏罗世新特提斯洋俯冲过程中发生了垂向大陆地壳生长。

关键词: 冈底斯岩基; 闪长岩; 岩浆混合; 地壳生长; 青藏高原

中图分类号: P595; P597 文献标识码: A 文章编号: 0379-1726(2018)05-0478-13

DOI: 10.19700/j.0379-1726.2018.05.003

Mixing of Early Jurassic crustal and mantle-derived magmas induced by subduction of the Neo-Tethyan Ocean: Evidence from the Dongga dioritic pluton, South Tibet

SHU Chu-tian^{1,2}, LONG Xiao-ping^{3*}, WANG Qiang¹ and YUAN Chao¹

1. State Key Laboratory of Isotope Geochemistry, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. State Key Laboratory of Continental Dynamics, Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, China

Abstract: The geochemical composition of bulk continental crust is dioritic and therefore the petrogenesis of diorite is key to understanding the formation of continental crust. The Gangdese batholith in southern Tibet is dominated by dioritic rocks. However, previous studies mostly focused on the petrogenesis of mafic and felsic rocks instead of diorites. Thus, we carry out researches on the Dongga dioritic pluton in the central Gangdese batholith in order to decipher the petrogenesis of Gangdese diorite and its relationship with crustal growth. Zircon U-Pb dating reveals that the Dongga diorites were crystallized at (176.5±1.2) Ma. The abundant (191.3±1.2) Ma inherited zircons in the dated sample imply that crustal materials were involved in the magma source. These diorites have relatively high $Mg^{\#}$ values, depleted $(^{87}Sr/^{86}Sr)_i$ ratios (0.703570 – 0.703595), $\epsilon_{Nd}(t)$ values (+6.1 – +6.5) and zircon $\epsilon_{Hf}(t)$ values (+12.0 – +14.7), and relatively high $^{147}Sm/^{144}Nd$ ratios, thereby indicating non-negligible mantle contributions. In petrography, acicular apatite crystals surrounding mafic clots in the Dongga diorites, together with the abundant mafic enclaves in the neighbouring coeval pluton, imply a magma mixing origin for the diorites. The geochemical simulation of the magma mixing also confirms that the Dongga

收稿日期(Received): 2017-12-29; 改回日期(Revised): 2018-02-06; 接受日期(Accepted): 2018-02-12

基金项目: 国家自然科学基金(41522202)

作者简介: 舒楚天(1994-), 男, 硕士研究生, 岩石地球化学专业。E-mail: shuchutian15@mails.ucas.ac.cn

* 通讯作者(Corresponding author): LONG Xiao-ping, E-mail: longxp@nwu.edu.cn; Tel: +86-29-88302456

diorites were formed by mixing of crustal and mantle-derived magmas. In addition, the petrogenesis of magma mixing supports vertical continental crustal growth during the subduction of the Neo-Tethyan Ocean at the Early Jurassic.

Key words: Gangdese batholith; diorite; magma mixing; crustal growth; Tibetan plateau

0 引言

地球是太阳系中的一颗独特的行星, 具有其他行星没有的演化的大陆地壳^[1]。地球大陆地壳的形成与演化, 一直是固体地球科学中热点研究课题之一^[2]。大陆地壳总体是安山质成分, 而形成于俯冲带之上的弧型岩石以安山质成分为主, 所以大陆地壳的形成与俯冲带密切相关^[1,3]。对俯冲带安山岩或闪长岩开展研究, 在一定程度上可以揭示大陆地壳的形成与演化过程。位于青藏高原南部的拉萨地体南缘, 发育一条长约 1600 km 的冈底斯岩浆岩带(冈底斯岩基)^[4], 由晚三叠世-中新世的辉长质-花岗质侵入岩构成, 总体成分以闪长质为主^[5]。这些岩石的形

成与新特提斯洋俯冲和印度-亚洲大陆碰撞密切相关^[6]。在本次研究中, 我们选取冈底斯带上与新特提斯洋俯冲作用相关的东嘎侵入杂岩中的闪长岩作为研究对象, 开展了详细的岩相学、锆石 U-Pb 定年、锆石 Hf 同位素、全岩地球化学和 Sr-Nd 同位素研究, 以揭示冈底斯岩基中闪长岩的成因及其与地壳生长的关系。

1 地质背景与样品特征

青藏高原是地球上典型的陆-陆碰撞造山带, 主要由松潘-甘孜地体、羌塘地体、拉萨地体和喜马拉雅地体构成^[7]。这四个地体分别被金沙江缝合带、班公-怒江缝合带和雅鲁藏布江缝合带隔离^[7-8](图 1a)。

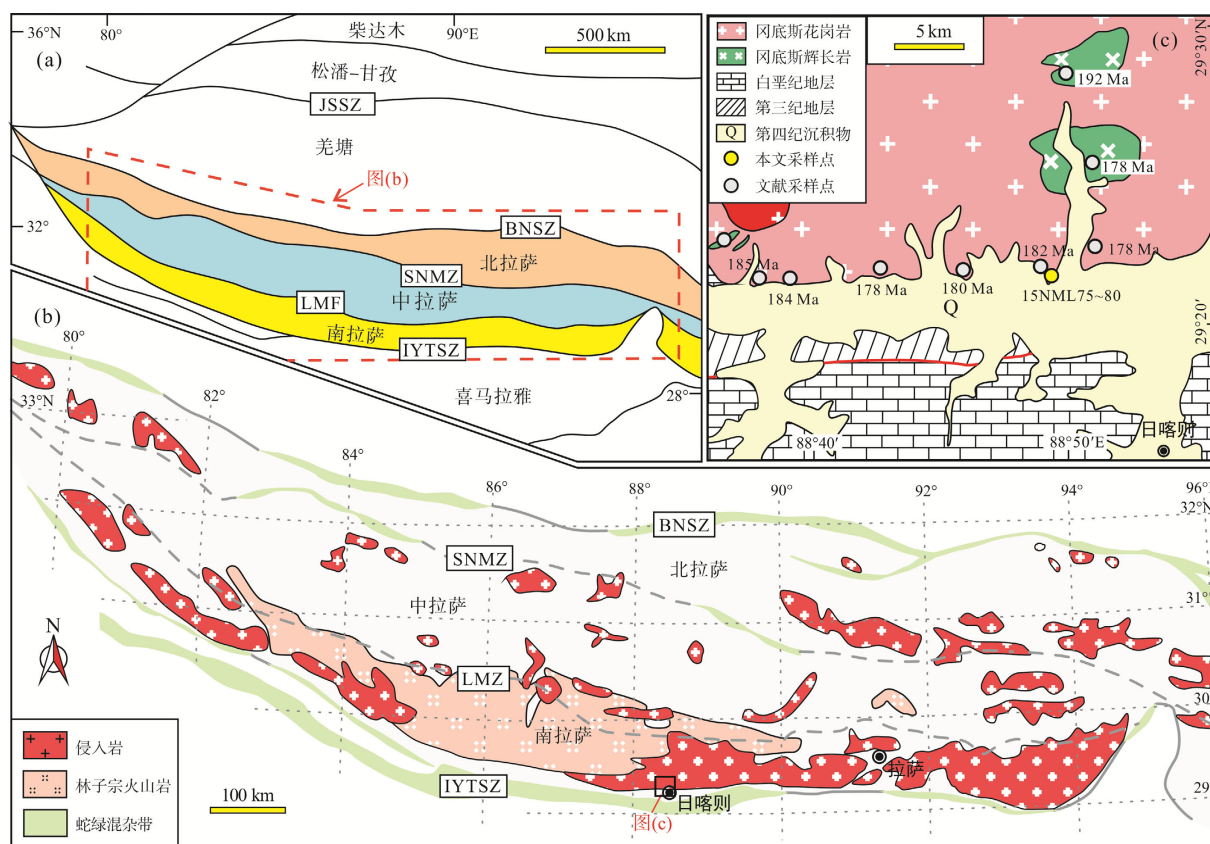


图1 青藏高原构造格局(a, 据文献[9])、拉萨地体(b, 据文献[9-10]修改)和东嘎地区(c, 采样点据文献[11-14])地质简图

Fig.1 Tectonic framework of the Tibetan Plateau (a, after reference [9]), geological map of the Lhasa Block (b, after references [9-10]) and the Dongga area (c, sample ages after references [11-14])

JSSZ-金沙江缝合带; BNSZ-班公-怒江缝合带; SNMZ-狮泉河-纳木错混杂带; LMF-洛巴堆-米拉山断层; IYTSZ-印度河-雅鲁藏布江缝合带。
JSSZ-Jinsha suture belt; BNSZ-Bangong-Nujiang suture belt; SNMZ-Shiquan River-Nam Tso mélange belt; LMF-Luobadui-Milashan fault; IYTSZ-Indus-Yarlung Tsangpo suture belt.

其中拉萨地体可能在晚泥盆世从冈瓦纳大陆分离^[15-16], 然后一直向北漂移, 于晚侏罗世-早白垩世通过与羌塘地体的碰撞拼贴至亚洲板块南缘^[7]。拉萨地体南部, 新特提斯洋板片在晚三叠世开始向北俯冲于拉萨地体之下^[17-19], 最终导致印度板块与亚洲板块在新生代早期(65~55 Ma)发生碰撞^[20-26]。

根据拉萨地体的基地性质、沉积岩及蛇绿岩的分布, 以狮泉河-纳木错混杂带和洛巴堆-米拉山断层为界, 可以将拉萨地体划分为北拉萨地体、中拉萨地体和南拉萨地体^[9,27,28](图 1a, 图 1b)。南拉萨地体以发育大面积的岩浆岩为特征(图 1b)。火山岩主要有下-中侏罗统的叶巴组火山岩^[29], 上侏罗统-下白垩统的桑日群火山岩^[30]和古新世-始新世的林子宗火山岩^[21,31]。侵入岩主要是约 1600 km 长的冈底斯岩基, 它由辉长岩-花岗岩构成, 总体成分以闪长质为主^[5]。研究发现, 冈底斯岩基主要有四期岩浆活动, 分别是 205~152 Ma、109~80 Ma、65~41 Ma 和 33~14 Ma^[18-19]。冈底斯带上大部分岩石显示亏损的同位素特征^[6,9,32,33], 指示与新特提斯洋俯冲和印度-亚洲碰撞相关的地壳生长事件。

东嘎侵入杂岩位于冈底斯带中部, 日喀则以北 15 km 处, 主要形成于早侏罗世, 由辉长岩、闪长岩、花岗闪长岩和花岗岩构成^[11-14](图 1b, 图 1c)。花岗质岩石中有较多镁铁质包体(MME), 成分多为辉长质^[11-12]。我们在东嘎乡(29°21'37.1"N, 88°48'53.8"E)采集了 6 块石英闪长岩样品(15NML75~80)。岩石的矿物颗粒在 0.5~1.0 mm 之间, 呈中-细粒结构(图 2), 主要组成矿物有角闪石(10%~15%)、黑云母(5%~10%)、斜长石(40%~50%)、钾长石(<5%)、石英(15%~20%)和少量副矿物如锆石、榍石和磷灰石(图 2d, 图 2e, 图 2f)。样品中斜长石多呈半自形, 普遍发育有聚片双晶(图 2b), 部分斜长石具有环带结构。角闪石一般呈半自形-自形, 可以分为阳起石和普通角闪石两类。阳起石一般呈镁铁质聚晶团块出现(mafic clot)(图 2c), 通常认为是含水熔体与辉石反应的产物, 代表辉石的假晶^[34]。普通角闪石也经常出现在镁铁质聚晶团块中(图 2c), 或呈数个颗粒离散地分布在岩石中, 与黑云母共生(图 2b)。黑云母多呈细片片状, 组成镁铁质矿物聚晶团块, 或与角闪石共生(图 2b)。钾长石和石英经常沿空隙生长, 多呈他形(图 2b, 图 2d)。在靠近镁铁质团块的磷灰石多呈针状(图 2d, 图 2e), 而远离镁铁质团块的磷灰石多呈短柱状(图 2f)。

2 分析方法

全岩主元素和 Sr-Nd 同位素测试在中国科学院广州地球化学研究所同位素地球化学国家重点实验室完成。主元素用 XRF 法测定, 具体方法见文献^[35], 分析精度优于 5%。Sr-Nd 同位素用 MC-ICP-MS 法测定, 具体方法见文献^[36-37], 标样 JB-3 的 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 值为 $0.513054 \pm 8(2\sigma)$, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值为 $0.703415(2\sigma)$ 。 ^{87}Rb 和 ^{147}Sm 衰变常数分别选用 $1.42 \times 10^{-11} \text{ a}^{-1}$ ^[38] 和 $6.54 \times 10^{-12} \text{ a}^{-1}$ ^[39]。现今亏损地幔值^[40] ($^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}_{\text{DM}} = 0.51315$, $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}_{\text{DM}} = 0.2136$), 球粒陨石值^[41-42] ($^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}_{\text{CHUR}} = 0.512638$, $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}_{\text{CHUR}} = 0.1967$) 和平均大陆地壳值^[43] ($^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}_{\text{DM}} = 0.118$) 被用于计算 ϵ_{Nd} 值和模式年龄。微量元素测试在南京聚谱公司完成, 用 ICP-MS 方法测定, 分析精度优于 10%。主元素、微量元素及 Sr-Nd 同位素测试结果见表 1。

1 个石英闪长岩样品(15NML75)用于分选锆石。锆石原位分析在西北大学大陆动力学国家重点实验室完成。其中 U-Pb 同位素用 LA-ICP-MS 测定, Lu-Hf 同位素分析用 LA-MC-ICP-MS 测定, 具体方法见文献^[44-45]。锆石定年采用 91500 锆石作为标样, 数据处理用 GLITTER 程序, U-Pb 年龄计算、谐和图绘制用 Isoplot 程序^[46]。 ^{176}Lu 衰变常数 $1.867 \times 10^{-11} \text{ a}^{-1}$ ^[47], 现今球粒陨石值^[48] ($^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf} = 0.0336$, $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf} = 0.282785$), 现今亏损地幔值^[49] ($^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf} = 0.28325$, $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf} = 0.0384$) 和现今平均大陆地壳 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值^[50] (0.015) 被用于计算 ϵ_{Hf} 值和模式年龄。锆石 U-Pb 定年结果见表 2, Hf 同位素分析结果见表 3。

3 分析结果

3.1 锆石 U-Pb 年龄

石英闪长岩的锆石呈灰色透明状, 多为自形-半自形(图 3), 颗粒直径介于 80~200 μm 之间, 长宽比变化范围为 3~1。锆石的 Th/U 值较大, 介于 0.45~0.82 之间(表 2)。CL 图像显示锆石发育典型的岩浆振荡环带(图 3), 具有岩浆成因锆石的特征^[51]。锆石的 25 个测试点基本分布在谐和线上, 明显呈现两群不同的年龄(图 3)。其中 6 个点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄主要集中在 189~195 Ma 之间, 加权平均值为 $(191.3 \pm 1.6) \text{ Ma}$ (MSWD=1.14), 这些锆石常呈他形或半自形(图 3)。另外 19 个点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄主要集中在

167~179 Ma 之间, 加权平均值为 (176.5 ± 1.2) Ma (MSWD=0.73)。由于东嘎乡附近出露有约 190 Ma 的岩石^[11,14], 并且闪长岩中 189~195 Ma 的锆石多为他形-半自形, 我们认为其为捕获或者继承围岩的锆石, 而 (176.5 ± 1.2) Ma 代表东嘎闪长岩体的结晶年龄。

3.2 全岩主元素和微量元素

东嘎石英闪长岩具有较窄的 SiO_2 范围(60.79%~61.83%), 中等 MgO 含量(1.74%~2.48%)和较低的全

碱含量(4.36%~5.25%)。其 $\text{Mg}^\#$ 值较高, 介于 0.40~0.44 之间。在 TAS 图中(图 4a), 所有的样品落入了亚碱性系列闪长岩范围, 在 $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ 图中(图 4b), 样品落入拉斑和钙碱性系列范围。

在球粒陨石标准化稀土元素分布模式图中(图 5a), 所有石英闪长岩显示近乎平行的稀土元素分布模式。岩石的稀土元素含量中等($\sum\text{REE}=55.36\sim78.86 \mu\text{g/g}$), LREE 相对 HREE 更为富集($(\text{La}/\text{Yb})_N=4.38\sim5.88$), 而 HREE 相对平坦, 无明显的 Eu 异常($\delta\text{Eu}=0.95\sim1.12$)。在原始地幔标准化微量元素蛛网图中(图 5b), 所有

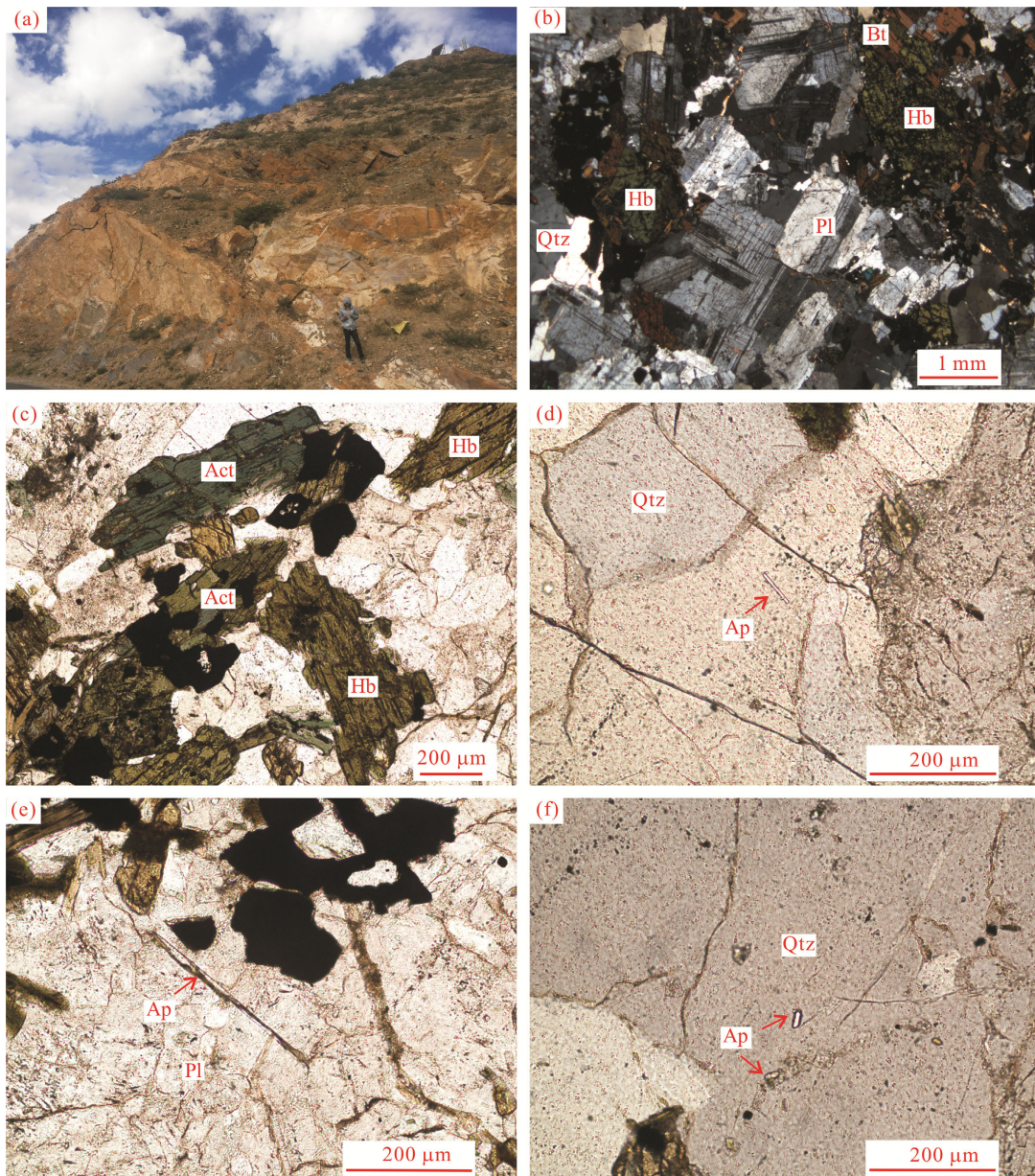


图2 东嘎闪长岩体野外露头照片(a); 东嘎闪长岩中的矿物组成及镁铁质团块(b); 闪长岩中角闪石组成的镁铁质团块(c); 镁铁质团块附近的针状磷灰石(d, e); 远离镁铁质团块中的短柱状磷灰石(f)

Fig.2 Out crop of the Dongga dioritic pluton (a); Mineral components and mafic clots in the Dongga diorite (b); mafic clots consisting of amphiboles in the Dongga diorite (c); acicular apatite near the mafic clots in the Dongga diorite (d, e); and stubby apatite far from the mafic clots in the Dongga diorite (f)
Bt-黑云母; Hb-角闪石; Act-阳起石; Ap-磷灰石; Pl-斜长石; Qtz-石英。

表 1 东嘎闪长岩主元素(%), 微量元素含量($\mu\text{g/g}$)和 Sr-Nd 同位素分析结果Table 1 Major (%) and trace element ($\mu\text{g/g}$) concentrations and whole-rock Sr-Nd isotopic compositions for the Dongga diorites

样号	15NML76	15NML77	15NML78	15NML79	15NML80	样号	15NML76	15NML77	15NML78	15NML79	15NML80
SiO ₂	60.79	61.03	61.74	61.69	61.83	Sm	3.26	2.71	2.18	2.19	2.41
TiO ₂	0.69	0.64	0.61	0.62	0.64	Eu	1.04	0.93	0.75	0.76	0.92
Al ₂ O ₃	16.74	16.79	17.37	16.72	15.49	Gd	3.45	2.91	2.08	2.12	2.63
TFe ₂ O ₃	6.52	6.23	5.24	5.73	6.30	Tb	0.55	0.45	0.32	0.32	0.41
MnO	0.14	0.11	0.1	0.12	0.16	Dy	3.55	2.94	2.04	2.04	2.68
MgO	2.44	2.21	1.74	2.04	2.48	Ho	0.76	0.63	0.42	0.42	0.56
CaO	5.8	5.3	5.29	5.47	6.61	Er	2.22	1.82	1.22	1.22	1.66
Na ₂ O	3.72	4.05	3.91	3.85	3.48	Tm	0.34	0.28	0.19	0.19	0.25
K ₂ O	1.17	1.2	0.95	1.08	0.88	Yb	2.26	1.91	1.3	1.32	1.67
P ₂ O ₅	0.15	0.14	0.14	0.14	0.13	Lu	0.35	0.3	0.2	0.2	0.26
LOI	1.36	1.6	2.35	2.08	1.92	Hf	3.13	3.19	2.68	2.74	2.37
Total	99.53	99.31	99.45	99.55	99.91	Ta	0.54	0.37	0.41	0.37	0.3
Mg [#]	0.43	0.41	0.4	0.41	0.44	Pb	6.03	6.69	5.93	5.99	6.19
Co	14.9	12.2	11.2	11	12.2	Th	2.64	2.22	2.12	2.36	1.78
Ni	6.56	8.3	5.23	5.3	6.89	U	0.84	0.83	0.77	0.77	0.63
Rb	26.1	28.1	20.5	20.7	18.6	∑REE	78.86	66.07	55.36	56.55	58.84
Sr	402	381	374	372	385	(La/Yb) _N	4.38	4.44	5.75	5.88	4.41
Y	22	18.7	11.4	11	16.9	δEu	0.95	1.01	1.08	1.07	1.12
Zr	122	122	102	104	89.8	⁸⁷ Rb/ ⁸⁶ Sr	0.70404				0.703946
Nb	6.73	5.59	5.63	5.42	4.79	2σ	0.00001				0.000011
Cs	3.39	3.93	3.43	3.34	5.07	(⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr) _i	0.703570				0.703595
Ba	275	237	199	202	165	¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd	0.512878				0.512898
La	13.8	11.8	10.5	10.8	10.3	2σ	0.000008				0.000008
Ce	29	24.3	21.2	21.8	21.7	ε _{Nd(t)}	6.1				6.5
Pr	3.38	2.79	2.45	2.51	2.46	t _{DM} (Ma)	511				481
Nd	14.9	12.3	10.5	10.6	10.9	t _{DM,C} (Ma)	461				431

表 2 东嘎闪长岩锆石 U-Pb 定年结果

Table 2 Zircon U-Pb dating results of the Dongga diorites

分析点	含量($\mu\text{g/g}$)		Th/U	同位素比值				年龄(Ma)			
	Th	U		²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ
15NML75-01	69.3	127	0.55	0.19315	0.01561	0.02797	0.00053	179	13	178	3
15NML75-02	49.3	97.4	0.51	0.19216	0.01303	0.02815	0.0004	179	11	179	3
15NML75-03	90.6	158	0.57	0.19136	0.01303	0.02645	0.00043	178	11	168	3
15NML75-04	87.2	136	0.64	0.19427	0.01069	0.02725	0.00036	180	9	173	2
15NML75-05	57.9	122	0.48	0.18846	0.01125	0.02776	0.00037	175	10	177	2
15NML75-06	63.7	107	0.60	0.19047	0.011	0.02778	0.00036	177	9	177	2
15NML75-07	129	159	0.81	0.21008	0.01522	0.02977	0.0005	194	13	189	3
15NML75-08	96.0	143	0.67	0.1899	0.01312	0.02807	0.00045	177	11	179	3
15NML75-09	70.7	122	0.58	0.19154	0.00872	0.0271	0.0003	178	7	172	2
15NML75-10	52.3	94.2	0.56	0.20996	0.02076	0.03031	0.00066	194	17	193	4
15NML75-11	126	153	0.82	0.19158	0.01453	0.02626	0.00049	178	12	167	3
15NML75-12	63.9	91.9	0.69	0.19021	0.01401	0.02808	0.00043	177	12	179	3
15NML75-13	70.0	99.5	0.70	0.19084	0.02016	0.02746	0.00066	177	17	175	4
615NML75-14	88.0	152	0.58	0.18938	0.01399	0.0276	0.00048	176	12	176	3
15NML75-15	44.0	80.8	0.54	0.19002	0.01732	0.02736	0.00054	177	15	174	3

(续表 2)

分析点	含量($\mu\text{g/g}$)		Th/U	同位素比值				年龄(Ma)			
	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ
15NML75-16	64.2	107	0.60	0.18954	0.01579	0.02776	0.00051	176	14	177	3
15NML75-17	30.9	68.9	0.45	0.21007	0.02421	0.03023	0.00078	194	20	192	5
15NML75-18	75.4	109	0.69	0.21058	0.02257	0.03013	0.00073	194	19	191	5
15NML75-19	58.8	110	0.54	0.19048	0.0112	0.02797	0.00037	177	10	178	2
15NML75-20	87.7	123	0.71	0.21246	0.01765	0.02993	0.00058	196	15	190	4
15NML75-21	73.5	116	0.63	0.19074	0.01163	0.02795	0.00039	177	10	178	2
15NML75-22	80.8	120	0.67	0.19004	0.01229	0.02794	0.00039	177	11	178	2
15NML75-23	67.4	125	0.54	0.19067	0.01149	0.02792	0.0004	177	10	178	3
15NML75-24	88.3	150	0.59	0.19091	0.01048	0.02816	0.00037	177	9	179	2
15NML75-25	53.1	103	0.51	0.21048	0.01877	0.03064	0.0006	194	16	195	4

表 3 东嘎闪长岩锆石 Lu-Hf 同位素分析结果

Table 3 Analytical results of zircon Lu-Hf isotopic compositions of the Dongga diorites

分析点	Age (Ma)	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_i$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	$t_{\text{DM}}(\text{Ma})$	$t_{\text{DM,C}}(\text{Ma})$
15NML75-01	177.8	0.001737	0.283013	0.000015	0.283007	+12.2	346	440
15NML75-02	178.9	0.001247	0.283067	0.000017	0.283063	+14.2	263	312
15NML75-03	168.3	0.001435	0.283057	0.000018	0.283052	+13.6	280	343
15NML75-04	173.3	0.001621	0.283024	0.000016	0.283018	+12.5	329	417
15NML75-05	176.5	0.001199	0.283043	0.000016	0.283039	+13.3	297	368
15NML75-06	176.6	0.001426	0.283039	0.000015	0.283034	+13.2	305	379
15NML75-07	189.1	0.001820	0.283074	0.000017	0.283068	+14.6	257	295
15NML75-08	178.5	0.001606	0.283046	0.000015	0.283041	+13.4	296	363
15NML75-09	172.4	0.001666	0.283010	0.000017	0.283005	+12.0	349	448
15NML75-10	192.5	0.001198	0.283064	0.000015	0.283059	+14.4	268	312
15NML75-11	167.1	0.001268	0.283031	0.000016	0.283027	+12.7	315	401
15NML75-12	178.5	0.001245	0.283032	0.000018	0.283028	+13.0	314	392
15NML75-13	174.6	0.001010	0.283027	0.000016	0.283024	+12.8	318	403
15NML75-14	175.5	0.001521	0.283035	0.000014	0.283030	+13.0	312	390
15NML75-15	174.0	0.001660	0.283075	0.000017	0.283070	+14.4	255	300
15NML75-16	176.5	0.001003	0.283081	0.000013	0.283078	+14.7	242	281
15NML75-17	192.0	0.001332	0.283020	0.000018	0.283015	+12.8	332	413
15NML75-18	191.3	0.001225	0.283058	0.000015	0.283053	+14.2	277	326
15NML75-19	177.8	0.000772	0.283054	0.000014	0.283052	+13.8	278	339
15NML75-20	190.1	0.001358	0.283039	0.000015	0.283034	+13.4	305	371
15NML75-21	177.7	0.001370	0.283035	0.000014	0.283031	+13.1	310	386

样品的分布模式也十分相似, 均相对富集 Cs、U、K、Pb 和 Sr 等流体活动性元素, 亏损 Nb、Ta 和 Ti 等高场强元素。东嘎闪长岩大多数稀土元素与微量元素含量介于区域同期最酸性岩石(XRX-3)和中酸性岩石中镁铁质包体之间(图 5a, 图 5b)。

3.3 全岩 Sr-Nd 同位素组成

东嘎闪长岩体 Sr-Nd 同位素表现为较强亏损的 Sr 和 Nd 同位素特征(表 1)。其 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 和 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$

值变化范围较小, 分别为 0.703946~0.704040 和 0.512878~0.512898。用年龄校正得到的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 值范围为 0.703570~0.703595, $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 为 +6.1~+6.5, 一阶段模式年龄 t_{DM} 为 481~511 Ma, 平均地壳模式年龄 $t_{\text{DM,C}}$ 为 431~461 Ma。这些样品的地壳模式年龄比一阶段模式年龄小, 表明它们具有比平均大陆地壳高的 $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ 值。这一结果和前人研究东嘎地区同时期辉长岩及英云闪长岩同位素十分接近^[11,14](图 6a)。

3.4 锆石 Hf 同位素组成

对东嘎闪长岩中进行过 U-Pb 年龄测试的 25 颗

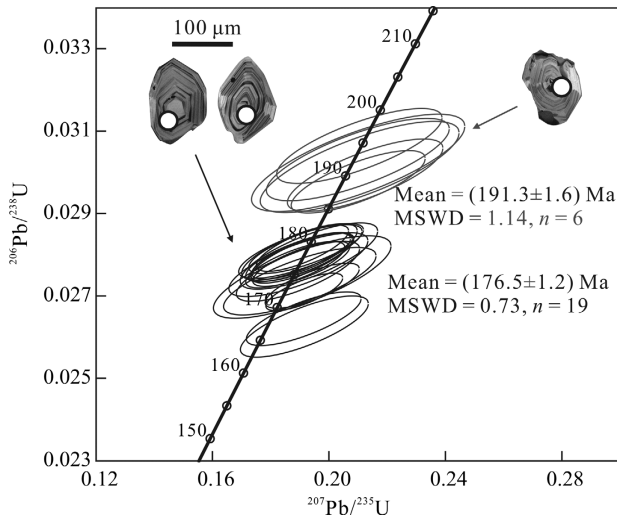


图 3 东嘎闪长岩的锆石 U-Pb 年龄谐和图及代表性锆石 CL 图像

Fig.3 U-Pb concordia diagram and representative CL images of zircons from the Dongga diorite

锆石中的 21 颗锆石进行 Hf 同位素原位分析, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值均为较高的正值(表 3)。 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄主要集中在 167~179 Ma 之间的 16 颗锆石, 其 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 变化范围介于 0.283010~0.283081 之间, 年龄校正的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值介于 +12.0~+14.7, 最高的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值(+14.7) 十分接近当时的亏损地幔值(+16.3)。其一阶段模式年龄 t_{DM} 为 242~349 Ma, 平均地壳模式年龄(二阶段模式年龄) $t_{\text{DM,C}}$ 为 281~448 Ma。6 颗 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄集中在 189~195 Ma 之间的锆石中有 5 颗进行了 Hf 同位素分析, 它们的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 变化范围介于 0.283020~0.283074 之间, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为 +12.8~+14.6, t_{DM} 为 257~332 Ma, $t_{\text{DM,C}}$ 为 295~413 Ma。

分析结果显示约 176.5 Ma 锆石群的 Hf 同位素组成和前人在东嘎地区报道的相同年龄岩体中锆石的 Hf 同位素组成相近(图 6b), 约 191.3 Ma 锆石群的 Hf 同位素组成也和前人报道的约 190 Ma 岩石中锆石的 Hf 同位素组成一致^[11-14]。

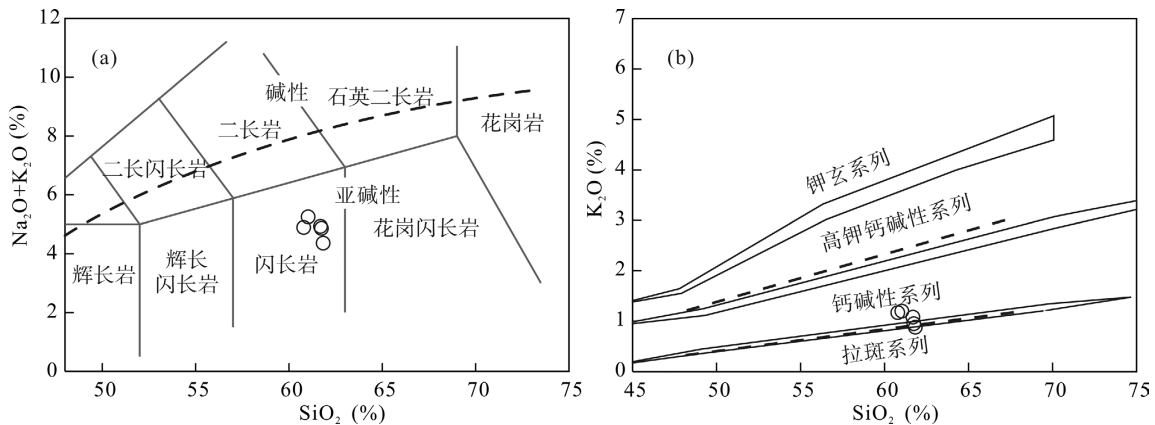


图 4 东嘎闪长岩主元素分类图(据文献[52-53])

Fig.4 Classification diagrams for the Dongga diorite (after references [52-53])

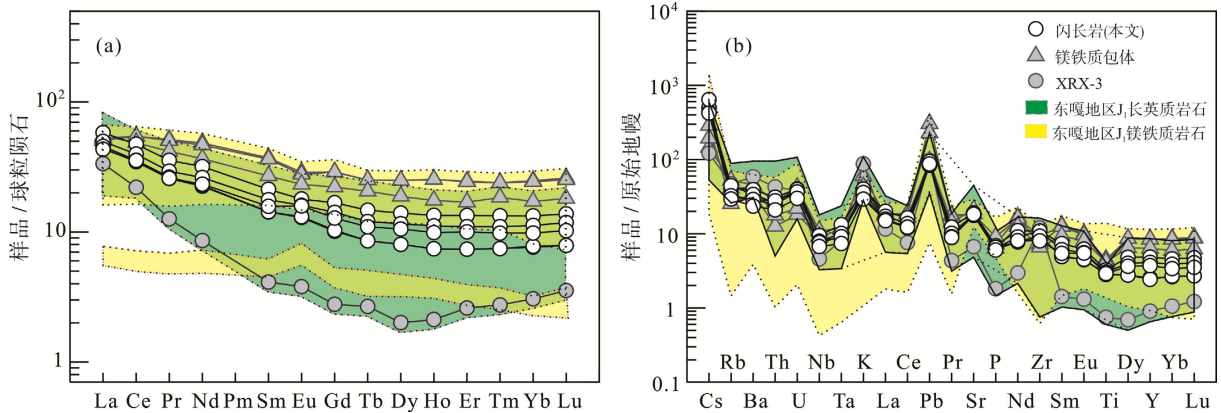


图 5 东嘎闪长岩球粒陨石标准化稀土元素分布模式(a)和原始地幔标准化微量元素蛛网图(b) (标准化值据文献[54], 其他数据据文献[11-14])

Fig.5 Chondrite-normalized REE patterns and primitive mantle-normalized trace element spider diagrams for the Dongga diorite (chondrite and primitive mantle values are from reference [54], synthesized data from references [11-14])

4 讨论

4.1 岩石成因

东嘎闪长岩形成于早侏罗世(176.5 Ma), 新特提斯洋向北俯冲的背景下^[18]。俯冲带安山质/闪长质

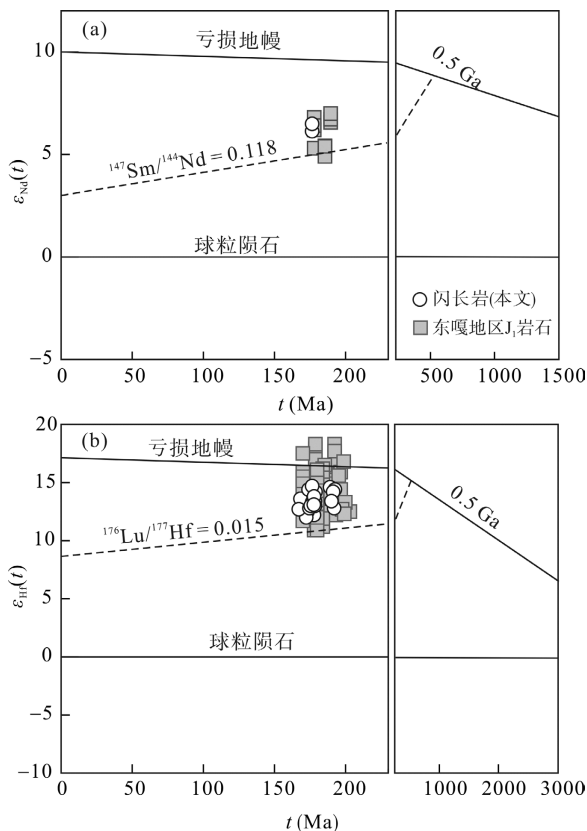


图 6 东嘎地区早侏罗世侵入岩 $\epsilon_{Nd}(t)-t$ (a)和 $\epsilon_{Hf}(t)-t$ (b)图 (其他数据据文献[11,12,14])

Fig.6 Plots of $\epsilon_{Nd}(t)$ vs. t (a) and $\epsilon_{Hf}(t)$ vs. t (b) of the intrusive rocks from the Dongga area (synthesized data from references [11,12,14])

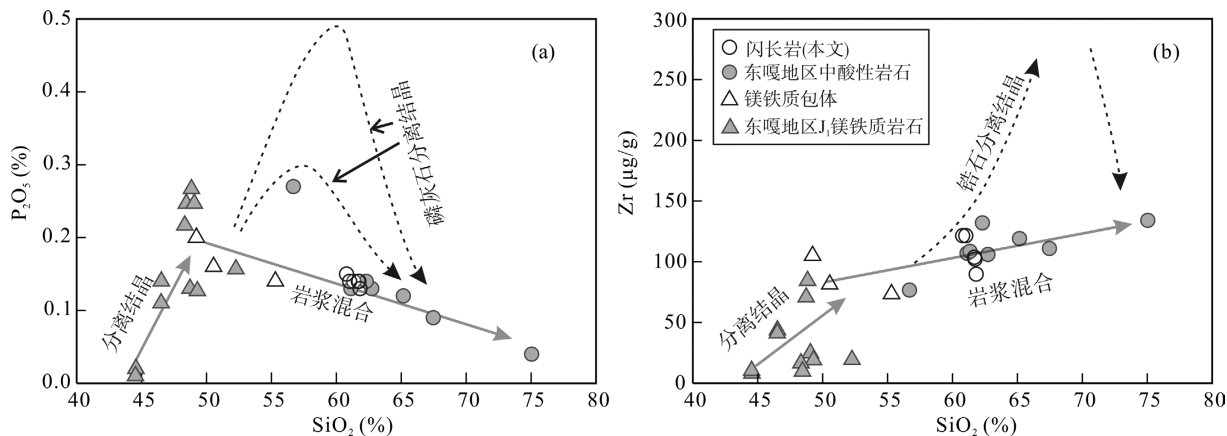


图 7 东嘎地区早侏罗世侵入岩 $P_2O_5-SiO_2$ (a)和 $Zr-SiO_2$ (b)协变图 (其他数据据文献[11-14], 磷灰石和锆石分离结晶演化线据文献[55])

Fig.7 Diagrams of P_2O_5 vs. SiO_2 (a), and Zr vs. SiO_2 (b) for the Early Jurassic intrusive rocks of the Dongga area (synthesized data from references [11-14], the dashed lines of apatite and zircon from reference [55])

岩石的成因主要有以下几种模式: (1)玄武质地壳物质部分熔融^[55-56]; (2)幔源玄武质岩浆分离结晶^[55,57,58]; (3)俯冲板片部分熔融^[55,59]; (4)水饱和上地幔部分熔融^[55,60]; (5)幔源镁铁质熔体和壳源酸性熔体的混合^[55,61]。东嘎闪长质岩石具有中等 $Mg^{\#}$ 含量(1.74%~2.48%), 相对较高的 $Mg^{\#}$ 值(0.40~0.44), 及亏损的 Nd 和锆石 Hf 同位素组成。岩石中含有较多阳起石, 可能是替代辉石的产物^[34]。这些现象暗示东嘎闪长岩有地幔物质的贡献。实验岩石学表明, 玄武质地壳物质部分熔融形成的熔体, $Mg^{\#}$ 不会高于 0.40^[56], 因此这些岩石很可能不是玄武质下地壳物质熔融产物。同时, 这些岩石的 Nd 同位素地壳模式年龄小于一阶段模式年龄, 也不支持下地壳部分熔融的产物。因为在地壳中 Sm 的不相容性小于 Nd, 如果是地壳部分熔融的产物, $^{147}Sm/^{144}Nd$ 值会发生分异, 二阶段模式年龄会大于一阶段模式年龄。幔源玄武质岩浆分离结晶的岩石, 当 SiO_2 含量介于 55%~65% 时, 其 $Mg^{\#} < 0.00294SiO_2^2 - 0.3697SiO_2 + 11.953$ ^[55], 东嘎闪长岩 $Mg^{\#} > 0.00294SiO_2^2 - 0.3697SiO_2 + 11.953$ 。此外, 东嘎地区同时期的镁铁质岩石和中酸性岩石在 $P_2O_5-SiO_2$ 和 $Zr-SiO_2$ 图中(图 7a, 图 7b)总体呈现偏离磷灰石和锆石分离结晶的演化趋势, 所以这些闪长岩也很可能不是幔源玄武质熔体分离结晶的结果。洋壳部分熔融的熔体^[62], 一般具有埃达克岩的特征(高 Sr/Y、(La/Yb)_N 值), 东嘎闪长岩并不具有这些特征, 因此排除了俯冲板片部分熔融的可能性。高镁安山岩, 如玻安岩, 可能是地幔直接熔融的

产物^[63]。东嘎闪长岩虽然具有较高 $Mg^{\#}$, 但其 MgO 含量较低(1.74%~2.48%), 不是典型的高镁安山岩类。而且, 与 MORB 源区相当的上地幔($Zr=5 \mu g/g$)发生 10%~20%的部分熔融只会产生 25~50 $\mu g/g$ 的 Zr ^[55]。东嘎闪长岩的高 Zr 含量不支持其是地幔直接熔融的产物(图 7b)。

这些闪长岩很可能是由幔源玄武质熔体和约 190 Ma 的壳源物质部分熔融形成的酸性熔体混合形成。闪长岩中经常观察到一些指示混合作用的不平衡结构, 如由很多暗色矿物组成的镁铁质团块(图 2b, 图 2c), 常被认为是解离在寄主岩石中的细小包体; 较多的阳起石(图 2c)很可能是辉石与酸性熔体反应形成^[34]; 此外, 针状磷灰石(图 2d, 图 2e)在闪长岩中也很常见。地幔熔体和地壳熔体的混合可以很好地同时解释闪长岩的不平衡结构, 以及各种地球化学特征, 如闪长岩具有比地壳物质熔体稍高的 $Mg^{\#}$ 值, 可以解释为地幔物质的加入导致 $Mg^{\#}$ 值升高; 闪长岩中约 191.3 Ma 的继承锆石可能是随着约 190 Ma 地壳物质部分熔融的岩浆通过混合加入到闪长岩中。实际上, 东嘎地区广泛分布有约 190 Ma 的辉长岩(图 1c), 其锆石具有强烈亏损的 Hf 同位素组成^[11,14], 而闪长岩的继承锆石的 Hf 同位素组成与这些辉长岩的 Hf 同位素组成非常相似(图 6b), 因此, 约 190 Ma 玄武质/辉长质新生地壳物质很可能是酸性端元熔体的源区。而分布在东嘎侵入杂岩中花岗岩质岩石中的镁铁质包体, 很可能代表的是混合过程中的基性端元。

4.2 岩浆混合的地球化学检验

如以上的讨论, 若东嘎闪长岩是岩浆混合形成, 那么东嘎闪长岩的地球化学特征就是岩浆混合后的结果。从理论上讲, 只要能找到混合的端元就能重现在混合后岩石中观察到的地球化学特征。但是, 由于拉萨地体南部以新生地壳为主^[6,9], 新生地壳的熔体、幔源熔体以及二者的混合产物很难由同位素将其区分^[64]。这种情况下, 只能从主元素和微量元素揭示岩浆混合过程。东嘎地区报道的同时期最酸性的样品是 XRX-3(178 Ma), 其 SiO_2 含量为 75.04%^[13]。在 $La/Sm-La$ 图中(图 8), 镁铁质包体(MME)显示与镁铁质岩石呈分离结晶趋势, SiO_2 最高的样品 XRX-3 呈部分熔融的趋势, 其他 SiO_2 含量介于中间的样品没有明显的演化规律。同时, XRX-3 有较多的继承锆石, 平均年龄为(198±6) Ma^[32], 很可能就是约 198 Ma 玄武质新生下地壳熔融的产物。在稀土

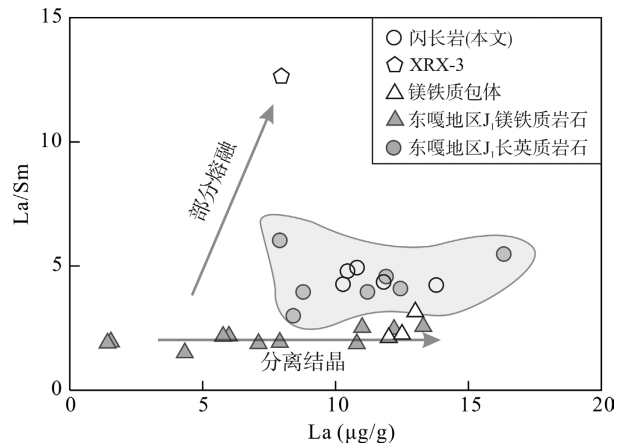


图 8 东嘎地区早侏罗世镁铁质端元和长英质端元岩石 $La/Sm-La$ 图(其他数据据文献[11-14])

Fig.8 Diagram of La/Sm vs. La for the J_1 mafic and felsic end-members of Dongga area (data from references [11-14])

元素分布模式图和微量元素蛛网图中(图 5), MME 显示比镁铁质岩石具有更高的元素含量, 但总体分布模式相近, 也指示其是镁铁质岩石分离结晶的产物。因此我们选取 SiO_2 最低的辉长质包体(TB-10-2)^[11] 作为基性端元, SiO_2 最高的 XRX-3^[13] 作为酸性端元, 用以检验岩浆混合的可能性。

首先, 在主元素上基性端元镁铁质包体(TB-10-2)和酸性端元(XRX-3)之间的样品确实显示混合的线性关系^[55,65]。在元素- SiO_2 协变图中(图 7, 图 9), 演化线在辉长质包体的位置有一个明显的转折。闪长岩及其他酸性岩石与辉长质包体呈现出很好的线性关系, 而基性岩石与包体呈现斜率不同的线性关系(图 7, 图 9)。单熔体体系的 Zr 和 P_2O_5 随 SiO_2 的演化趋势分别主要由锆石和磷灰石分离结晶控制^[55]。从图 7a 和图 7b 中我们可以看到, 闪长岩及其他酸性岩石与辉长质包体之间的线性关系明显偏离锆石和磷灰石分离结晶的演化趋势, 故不能由分离结晶解释; 基性岩石与包体的线性关系近乎平行锆石和磷灰石的分离结晶的演化趋势。综上可以将镁铁质岩石与辉长质包体之间的线性关系解释为分离结晶的结果, 而酸性岩石与镁铁质包体之间的线性关系解释为岩浆混合的结果^[34,55](图 9)。

对于微量元素同样可以进行岩浆混合检验。如果岩浆混合成立, 任何一个元素 i 会满足以下关系:

$$C_m^i = C_1^i + (1 - \alpha) C_2^i \quad [65] \quad (1)$$

其中: C_m^i 为混合后的样品中元素 i 的浓度; C_1^i 为端元 1 中元素 i 的浓度; C_2^i 为端元 2 中元素 i 的浓度; α 为端元 1 对混合后的样品的贡献比例。该公式可以转换为:

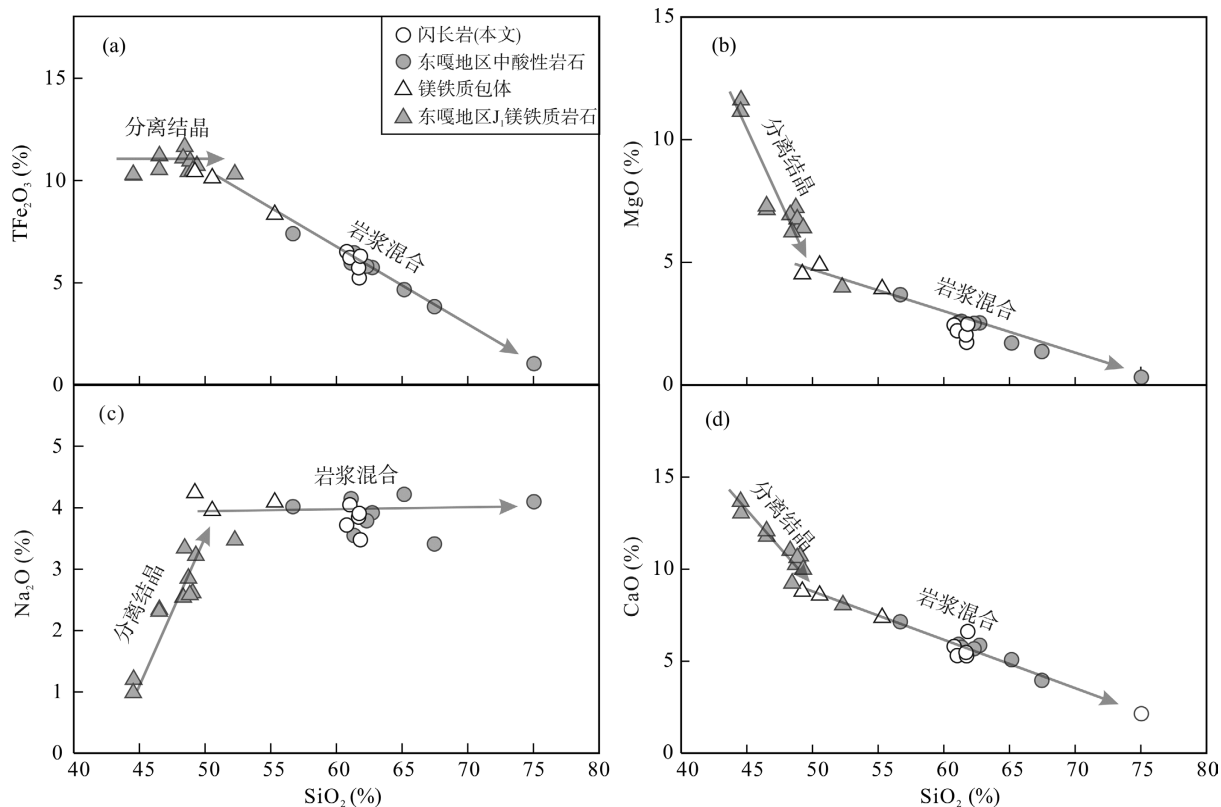


图 9 东嘎地区早侏罗世侵入岩 Harker 图解(其他数据据文献[23-26])

Fig.9 Harker diagrams for the Early Jurassic intrusive rocks of the Dongga area (synthesized data from references [23-26])

$$C_m^i - C_2^i = \alpha(C_1^i - C_2^i) \quad (2)$$

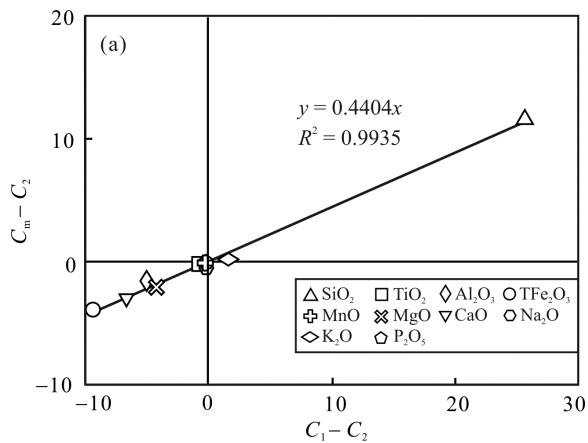
根据这个公式, 可以通过部分元素的含量确定 α 值, 再将得到的 α 值应用到其他元素以检验混合作用。

将最酸性样品 XRX-3 作为 C_1 端元, 镁铁质包体 TB-10-2 作为 C_2 端元, 1 个代表性闪长岩样品 (15NML76) 作为 C_m 。根据公式(2), 对这 3 个样品的所有主元素做线性回归得到 α 值为 0.4404, $R^2=0.9935$ (即地壳端元的贡献为 44.04%, 地幔端元的贡献为 55.96%, 图 10a)。再将据主元素回归得到的混合比例 α 值代入公式(1)计算得到不同微量元素的含量。

二元混合计算模拟得到的 REE 与微量元素含量和闪长岩样品 15NML76 测得的微量元素含量十分吻合 (图 10b, 图 10c)。因此混合检验支持东嘎闪长岩是幔源熔体和壳源熔体混合作用形成。

4.3 东嘎闪长岩与地壳生长

东嘎闪长岩由幔源熔体与壳源熔体混合而成, 主元素和微量元素混合检验计算得到该闪长岩类岩有约 56% 地幔物质的贡献, 说明在早侏罗世新特提斯洋俯冲过程中引发了幔源岩浆的底侵。东嘎地区发现的同时期辉长岩也证实了存在幔源岩浆底侵^[11,14]。



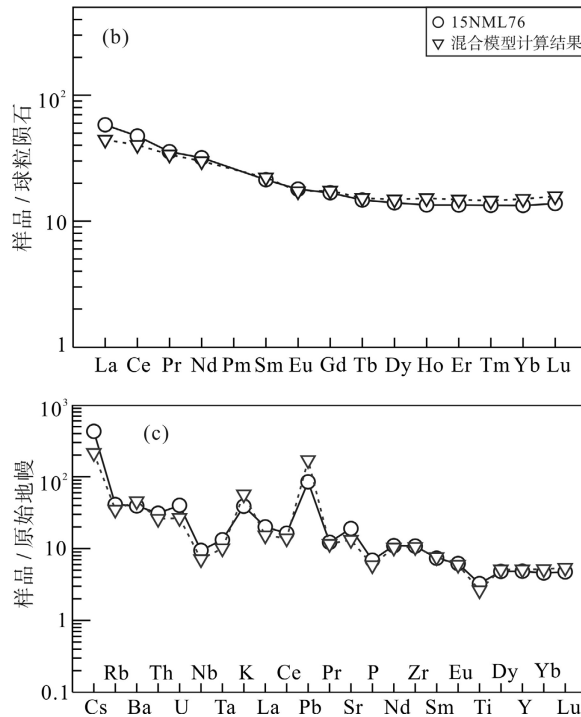


图 10 东嘎闪长岩的质量平衡二元混合检验

Fig.10 Mass-balance binary-mixing test for the Dongga diorite

由于地壳生长是指侵位于地壳中的地幔岩浆，同时包括混合岩浆中的新生幔源组分^[67]，东嘎地区的闪长岩和辉长岩都指示在早侏罗世新特提斯洋俯冲过程中南拉萨地体发生过垂向的地壳生长。

5 结 论

(1) 东嘎闪长岩形成于早侏罗世，锆石 U-Pb 年龄为(176.5±1.2) Ma，形成于新特提斯洋板片俯冲环境。

(2) 东嘎闪长岩是由演化的幔源镁铁质熔体与壳源长英质熔体通过岩浆混合而形成。

(3) 在早侏罗世新特提斯洋俯冲过程中有地幔新生物质加入到大陆地壳，导致大陆地壳垂向生长。

参考文献(References):

- [1] Taylor S R, McLennan S M. The Continental Crust: Its Composition and Evolution [M]. Oxford: Blackwell, 1985: 312.
- [2] Hawkesworth C, Kemp T. Using hafnium and oxygen isotopes in zircons to unravel the record of crustal evolution [J]. Chem Geol, 2006, 226: 144–162.
- [3] Rudnick R L, Gao S. Composition of the continental crust [M] // Treatise on Geochemistry. Elsevier, 2003: 1–64.
- [4] Allegre C J, Courtillot V, Tapponnier P, Hirn A, Mattauer M, Coulon C, Jaeger J J, Achache J, Schärer U, Marcoux J, Burg J P, Armijo J G R, Gariépy C, Gopel C, Li T D, Xiao X C, Chang C F, Li G Q, Lin B Y, Teng J W, Wang N W, Chen G M, Han T L, Wang X B, Den W M, Sheng H B, Cao Y G, Zhou J, Qiu H R, Bao P S, Wang S C, Wang B X, Zhou Y X, Xu R H. Structure and evolution of the Himalaya-Tibet orogenic belt [J]. Nature, 1984, 307(5946): 17–22.
- [5] Niu Y L, Zhao Z D, Zhu D C, Mo X X. Continental collision zones are primary sites for net continental crust growth — A testable hypothesis [J]. Earth Sci Rev, 2013, 127: 96–110.
- [6] Hou Z Q, Duan L F, Lu Y J, Zheng Y C, Zhu D C, Yang Z M, Yang Z S, Wang B D, Pei Y R, Zhao Z D, McCuaig T C. Lithospheric architecture of the Lhasa terrane and its control on ore deposits in the Himalayan-Tibetan orogeny [J]. Econ Geol, 2015, 110: 1541–1575.
- [7] Yin A, Harrison T M. Geologic evolution of the Himalayan-Tibetan orogeny [J]. Annu Rev Earth Planet Sci, 2000, 28: 211–280.
- [8] 潘桂棠, 王立全, 李荣社, 尹福光, 朱弟成. 多岛弧盆系构造模式: 认识大陆地质的关键[J]. 沉积与特提斯地质, 2012, 32(3): 1–20.
Pan Gui-tang, Wang Li-quan, Li Rong-she, Yin Fu-guang, Zhu Di-cheng. Tectonic model of archipelagic arc-basin systems: The key to the continental geology [J]. Sediment Geol Tethyan Geol, 2012, 32(3): 1–20 (in Chinese with English abstract).
- [9] Zhu D C, Zhao Z D, Niu Y L, Mo X X, Chung S L, Hou Z Q, Wang L Q, Wu F Y. The Lhasa terrane: Record of a microcontinent and its histories of drift and growth [J]. Earth Planet Sci Lett, 2011, 301(1–2): 241–255.
- [10] Chung S-L, Chu M F, Ji J Q, O'Reilly S Y, Pearson N J, Liu D Y, Lee T Y, Lo C H. The nature and timing of crustal thickening in southern Tibet: Geochemical and zircon Hf isotopic constraints from postcollisional adakites [J]. Tectonophysics, 2009, 477(1): 36–48.
- [11] Wang R Q, Qiu J S, Yu S B, Zhao J L. Crust-mantle interaction during early Jurassic subduction of Neo-Tethyan oceanic slab: Evidence from the Dongga gabbro-granite complex in the southern Lhasa subterranean, Tibet [J]. Lithos, 2017, 292–293: 262–277.

- [12] 邱检生, 王睿强, 赵蛟龙, 喻思斌. 冈底斯中段早侏罗世辉长岩-花岗岩杂岩体成因及其对新特提斯构造演化的启示: 以日喀则东嘎岩体为例[J]. 岩石学报, 2015, 31(12): 3569–3580.
Qiu Jian-sheng, Wang Rui-qiang, Zhao Jiao-long, Yu Si-bin. Petrogenesis of the Early Jurassic gabbro-granite complex in the middle segment of the Gangdese belt and its implications for tectonic evolution of Neo-Tethys: A case study of the Dongga pluton in Xi'gaze [J]. *Acta Petrol Sinica*, 2015, 31(12): 3569–3580 (in Chinese with English abstract).
- [13] Guo L S, Liu Y L, Liu S W, Cawood P A, Wang Z H, Liu H F. 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.
- [14] Xu B, Hou Z Q, Zheng Y C, Zhou Y, Zhou L M, Yang Y, Han Y W, Zhen G, Wu C D. Jurassic hornblende gabbros in Dongga, Eastern Gangdese, Tibet: Partial melting of mantle wedge and implications for crustal growth [J]. *Acta Geol Sinica*, 2017, 91(2): 545–564.
- [15] Zhu D C, Zhao Z D, Niu Y L, Dilek Y, Mo X X. Lhasa terrane in southern Tibet came from Australia [J]. *Geology*, 2011, 39(8): 727–730.
- [16] 朱弟成, 赵志丹, 牛耀龄, 王青, Dilek Y, 董国臣, 莫宣学. 拉萨地体的起源和古生代构造演化[J]. 高校地质学报, 2012, 18(1): 1–15.
Zhu Di-cheng, Zhao Zhi-dan, Niu Yao-ling, Wang Qing, Dilek Y, Dong Guo-chen, Mo Xuan-xue. Origin and Paleozoic tectonic evolution of the Lhasa terrane [J]. *Geol J Chin Univ*, 2012, 18(1): 1–15 (in Chinese with English abstract).
- [17] Chu M F, Chung S L, Song B, Liu D Y, O'Reilly S Y, Pearson N J, Ji J Q, Wen D R. Zircon U-Pb and Hf isotope constraints on the Mesozoic tectonics and crustal evolution of southern Tibet [J]. *Geology*, 2006, 34(9): 745–748.
- [18] Ji W Q, Wu F Y, Chung S L, Li J X, Liu C Z. Zircon U-Pb geochronology and Hf isotopic constraints on petrogenesis of the Gangdese batholith, southern Tibet [J]. *Chem Geol*, 2009, 262: 229–245.
- [19] Ji W Q, Wu F Y, Chung S L, Liu C Z. Geochronology and petrogenesis of granitic rocks in Gangdese batholith, southern Tibet [J]. *Sci China (D)*, 2009, 52(9): 849–871.
- [20] Zhu D C, Wang Q, Zhao Z D, Chung S L, Cawood P A, Niu Y L, Liu S A, Wu F Y, Mo X X. Magmatic record of India-Asia collision [J]. *Sci Rep*, 2015, 5: 1–8.
- [21] 莫宣学, 赵志丹, 邓晋福, 董国臣, 周肃, 郭铁鹰, 张双全, 王亮亮. 印度-亚洲大陆主碰撞过程的火山作用响应[J]. 地学前缘, 2003, 10(3): 135–148.
Mo Xuan-xue, Zhao Zhi-dan, Deng Jin-fu, Dong Guo-chen, Zhou Su, Guo Tie-ying, Zhang Shuang-quan, Wang Liang-liang. Response of volcanism to the India-Asian collision [J]. *Earth Sci Front*, 2013, 10(3): 135–148 (in Chinese with English abstract).
- [22] Chen J S, Huang B C, Sun L S. New constraints to the onset of the India-Asia collision: Paleomagnetic reconnaissance on the Linzizong group in the Lhasa block, China [J]. *Tectonophysics*, 2010, 489: 189–209.
- [23] de Sigoyer J, Chavagnac V, Blichert-Toft J, Villa I M, Luais B, Guillot S, Cosca M, Mascle G. Dating the Indian continental subduction and collisional thickening in the northwest Himalaya: Multichronology of the Tso Moriri eclogites [J]. *Geology*, 2000, 28(6): 487–490.
- [24] Ding L, Kapp P, Wan X Q. Paleocene-Eocene record of ophiolite obduction and initial India-Asia collision, south central Tibet [J]. *Tectonics*, 2005, 24: 1–18.
- [25] Leech M L, Singh S, Jain A K, Klemperer S L, Manickavasagam R M. The onset of India-Asia continental collision: Early, steep subduction required by the timing of UHP metamorphism in the western Himalaya [J]. *Earth Planet Sci Lett*, 2005, 234(1–2): 83–97.
- [26] Wu F Y, Ji W Q, Wang J G, Liu C Z, Chung S L, Clift P D. Zircon U-Pb and Hf isotopic constraints on the onset time of India-Asia collision [J]. *Am J Sci*, 2014, 314(2): 548–579.
- [27] 潘桂棠, 莫宣学, 侯增谦, 朱弟成, 王立全, 李光明, 赵志丹, 耿全如, 廖忠礼. 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, Zhu Di-cheng, Wang Li-quan, Li Guang-ming, Zhao Zhi-dan, Geng Quan-ru, Liao Zhong-li. Spatial-temporal framework of the Gangdese Orogenic Belt and its evolution [J]. *Acta Petrol Sinica*, 2006, 22(3): 521–533 (in Chinese with English abstract).
- [28] Zhu D C, Zhao Z D, Niu Y L, Dilek Y, Hou Z Q, Mo X X. The origin and pre-Cenozoic evolution of the Tibetan Plateau [J]. *Gondwa Res*, 2013, 23(4): 1429–1454.
- [29] Zhu D C, Pan G T, Chung S L, Liao Z L, Wang L Q, Li G M. SHRIMP zircon age and geochemical constraints on the origin of lower Jurassic volcanic rocks from the Yebe formation, southern Gangdese, south Tibet [J]. *Int Geol Rev*, 2008, 50(5): 442–471.
- [30] Zhu D C, Zhao Z D, Pan G T, Lee H Y, Kang Z Q, Liao Z L, Wang L Q, Li G M, Dong G C, Liu B. Early Cretaceous subduction-related adakite-like rocks of the Gangdese belt, southern Tibet: Products of slab melting and subsequent melt-peridotite interaction? [J]. *J Asian Earth Sci*, 2009, 34(3): 298–309.
- [31] 李皓扬, 钟孙霖, 王彦斌, 朱弟成, 杨进辉, 宋彪, 刘敦一, 吴福元. 藏南林周盆地林子宗火山岩的时代、成因及其地质意义: 锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素证据[J]. 岩石学报, 2007, 23(2): 493–500.
Lee Hao-yang, Chung Sun-lin, Wang Yan-bin, Zhu Di-cheng, Yang Jin-hui, Song Biao, Liu Dun-yi, Wu Fu-yuan. Age, petrogenesis and geological significance of the Linzizong volcanic successions in the Linzhou Basin, southern Tibet: Evidence from zircon U-Pb dates and Hf isotopes [J]. *Acta Petrol Sinica*, 2007, 23(2): 493–500 (in Chinese with English abstract).
- [32] Ma L, Wang Q, Wyman D A, Li Z X, Jiang Z Q, Yang J H, Gou G N, Guo H F. 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.
- [33] Ma L, Wang Q, Wyman D A, Jiang Z Q, Yang J H, Li Q L, Gou G N, Guo H F. Late Cretaceous crustal growth in the Gangdese area, southern Tibet: Petrological and Sr-Nd-Hf-O isotopic evidence from Zhengga diorite-gabbro [J]. *Chem Geol*, 2013, 349–350: 54–70.
- [34] Zorpi M, Coulon C, Orsini J. Hybridization between felsic and mafic magmas in calc-alkaline granitoids — A case study in northern Sardinia, Italy [J]. *Chem Geol*, 1991, 92: 45–86.
- [35] Li X H, Qi C S, Liu Y, Liang X R, Tu X L, Xie L W, Yang Y H. Petrogenesis of the Neoproterozoic bimodal volcanic rocks

- along the western margin of the Yangtze block: New constraints from Hf isotopes and Fe/Mn ratios [J]. *Chin Sci Bull*, 2005, 50(21): 2481–2486.
- [36] 梁细荣, 韦刚健, 李献华, 刘颖. 多收集器等离子体质谱快速精确测定钕同位素比值[J]. *岩矿测试*, 2002, 21(4): 247–251.
Liang Xi-rong, Wei Gang-jian, Li Xian-hua, Liu Ying. Rapid and precise measurement for $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ isotopic ratios using a Multi-Collector Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometer [J]. *Rock Miner Anal*, 2002, 21(4): 247–251 (in Chinese with English abstract).
- [37] 韦刚健, 梁细荣, 李献华, 刘颖. (LP)MC-ICPMS 方法精确测定液体和固体样品的 Sr 同位素组成[J]. *地球化学*, 2002, 31(3): 295–299.
Wei Gang-jian, Liang Xi-rong, Li Xian-hua, Liu Ying. Precise measurement of Sr isotopic composition of liquid and solid base using (LP)MC-ICPMS [J]. *Geochimica*, 2002, 31(3): 295–299 (in Chinese with English abstract).
- [38] Steiger R H, Jager E. Subcommittee on geochronology: Convention on the use of decay constants in geo- and cosmochronology [J]. *Earth Planet Sci Lett*, 1977, 36(3): 359–362.
- [39] Lugmair G W, Marti K. Lunar initial $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$: Differential evolution of the lunar crust and mantle [J]. *Earth Planet Sci Lett*, 1978, 39(3): 349–357.
- [40] Miller R G, Onions R K. Source of precambrian chemical and clastic sediments [J]. *Nature*, 1985, 314(6009): 325–330.
- [41] Goldstein S L, Onions R K, Hamilton P J. A Sm-Nd isotopic study of atmospheric dusts and particulates from major river systems [J]. *Earth Planet Sci Lett*, 1984, 70(2): 221–236.
- [42] Jacobsen S B, Wasserburg G J. Sm-Nd isotopic evolution of chondrites [J]. *Earth Planet Sci Lett*, 1980, 50(1): 139–155.
- [43] Arndt N T, Goldstein S L. Use and abuse of crust-formation ages [J]. *Geology*, 1987, 15: 893–895.
- [44] Diwu C R, Sun Y, Guo A L, Wang H L, Liu X M. Crustal growth in the North China Craton at ~2.5 Ga: Evidence from *in situ* zircon U-Pb ages, Hf isotopes and whole-rock geochemistry of the Dengfeng complex [J]. *Gondwa Res*, 2011, 20(1): 149–170.
- [45] Yuan H L, Gao S, Dai M N, Zong C L, Gunther D, Fontaine G H, Liu X M, Diwu C R. Simultaneous determinations of U-Pb age, Hf isotopes and trace element compositions of zircon by excimer laser-ablation quadrupole and multiple-collector ICP-MS [J]. *Chem Geol*, 2008, 247: 100–118.
- [46] Ludwig K R. User's Manual for Isoplot 3.00: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel [M]. Berkeley Geochronology Centre Special Publication, 2003.
- [47] Söderlund U, Patchett P J, Vervoort J D, Isachsen C E. The ^{176}Lu decay constant determined by Lu-Hf and U-Pb isotope systematics of precambrian mafic intrusions [J]. *Earth Planet Sci Lett*, 2004, 219(3–4): 311–324.
- [48] Bouvier A, Vervoort J D, Patchett P J. The Lu-Hf and Sm-Nd isotopic composition of CHUR: Constraints from unequilibrated chondrites and implications for the bulk composition of terrestrial planets [J]. *Earth Planet Sci Lett*, 2008, 273(1–2): 48–57.
- [49] Griffin W L, Pearson N J, Belousova E, Jackson S E, Van Achterbergh E, O'Reilly S Y, Shee S R. The Hf isotope composition of cratonic mantle: LAM-MC-ICPMS analysis of zircon megacrysts in kimberlites [J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 2000, 64(1): 133–147.
- [50] Griffin W L, Wang X, Jackson S E, Pearson N J, O'Reilly S Y, Xu, X S, Zhou, X M. Zircon chemistry and magma mixing, SE China: *In-situ* analysis of Hf isotopes, Tonglu and Pingtan igneous complexes [J]. *Lithos*, 2002, 61: 237–269.
- [51] Hoskin P W, Schaltegger U. The composition of zircon and igneous and metamorphic Petrogenesis [J]. *Rev Miner Geochem*, 2003, 53(1): 27–62.
- [52] Middlemost E A K. Naming materials in the magma/igneous rock system [J]. *Earth Sci Rev*, 1994, 37(3–4): 215–224.
- [53] Maniar P D, Piccoli P M. Tectonic discrimination of granitoids [J]. *Geol Soc Am Bull*, 1989, 101(5): 635–643.
- [54] Sun S-s, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes [J]. *Geol Soc London Spec Publ*, 1989, 42: 313–345.
- [55] Lee C-T A, Bachmann O. How important is the role of crystal fractionation in making intermediate magmas? Insights from Zr and P systematics [J]. *Earth Planet Sci Lett*, 2014, 393(3): 266–274.
- [56] Rapp R P, Watson E B. Dehydration melting of metabasalt at 8–32 kbar: Implications for continental growth and crust-mantle recycling [J]. *J Petrol*, 1995, 36(4): 891–931.
- [57] Dessimoz M, Müntener O, Ulmer P. A case for hornblende dominated fractionation of arc magmas: The Chelan Complex (Washington Cascades) [J]. *Contrib Mineral Petrol*, 2011, 163: 567–589.
- [58] Jagoutz O E, Burg J-P, Hussain S, Dawood H, Pettke T, Iizuka T, Maruyama S. Construction of the granitoid crust of an island arc part I: Geochronological and geochemical constraints from the plutonic Kohistan (NW Pakistan) [J]. *Contrib Mineral Petrol*, 2009, 158: 739–755.
- [59] Yogodzinski G M, Lees J M, Churikova T G, Dorendorf F, Woerner G, Volynets O N. Geochemical evidence for the melting of subducting oceanic lithosphere at plate edges [J]. *Nature*, 2001, 409: 500–504.
- [60] Grove T L, Till C B, Krawczynski M J. The role of H₂O in subduction zone magmatism [J]. *Annu Rev Earth Planet Sci*, 2012, 40: 413–439.
- [61] Clyne M A. A complex magma mixing origin for rocks erupted in 1915, Lassen Peak, California [J]. *J Petrol*, 1999, 40: 105–132.
- [62] Defant M J, Drummond M S. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere [J]. *Nature*, 1990, 347(6294): 662–665.
- [63] Falloon T J, Danyushevsky L V. Melting of refractory mantle at 1.5, 2 and 2.5 GPa under anhydrous and H₂O-undersaturated conditions: Implications for the petrogenesis of high-Ca boninites and the influence of subduction components on mantle melting [J]. *J Petrol*, 2000, 41: 257–283.
- [64] Vervoort J D, Kemp A I S. Clarifying the zircon Hf isotope record of crust-mantle evolution [J]. *Chem Geol*, 2016, 425: 65–75.
- [65] Langmuir C H, Vocke R D, Hanson G N, Hart S R. A general mixing equation with applications to Icelandic basalts [J]. *Earth Planet Sci Lett*, 1978, 37(3): 380–392.
- [66] Cantagrel J-M, Didier J, Gourgaud A. Magma mixing: Origin of intermediate rocks and “enclaves” from volcanism to plutonism [J]. *Phys Earth Planet Inter*, 1984, 35(1–3): 63–76.
- [67] Kemp A I S, Hawkesworth C J. Growth and differentiation of the continental crust from isotope studies of accessory minerals [M] // Holland H D, Twreikian K K. *Treatise on Geochemistry*. Elsevier, 2014: 379–421.