

南迦巴瓦构造结墨脱地区高 Sr/Y 花岗岩的成因： 地球化学、锆石 U-Pb 年代学及 Hf 同位素约束*

董汉文¹ 许志琴^{1**} 李源¹ 刘钊² 李忠海¹

DONG HanWen¹, XU ZhiQin^{1**}, LI Yuan¹, LIU Zhao² and LI ZhongHai¹

1. 大陆构造与动力学国家重点实验室, 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037

2. 中国地质大学, 北京 100083

1. State Key Laboratory of Continental Tectonics and Dynamics, Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

2. China University of Geosciences, Beijing 100083, China

2013-01-21 收稿, 2013-04-22 改回.

Dong HW, Xu ZQ, Li Y, Liu Z and Li ZH. 2013. Petrogenesis of high Sr/Y granite in Motuo area of Namche Barwa Syntaxis: Constraints from geochemistry, zircon U-Pb geochronology and Hf isotopic compositions. Acta Petrologica Sinica, 29(6):2013-2023

Abstract The Motuo granite belt, which can be regard as the southeastern extension of Gangdese granite belt, locates in the east of Namche Barwa Syntaxis. This paper reports a systematic study of geochemical, LA-MC-ICP-MS U-Pb zircon dating and Hf isotopes data of both Beibeng and Damu granites. The dating indicates that these two granitic blocks emplaced at 62Ma and 64.5Ma, respectively. The chemical analyses show that: (1) the granites are high-K calc-alkaline peraluminous, with SiO₂ from 71.09% to 74.37%, K₂O from 1.38% to 5.93% and A/CNK from 1.01 to 1.02. (2) The Motuo granites are highly enriched in LREE ((La/Dy)_N = 13.55 ~ 31.3, (La/Yb)_N = 16.82 ~ 50.41) and depleted in HREE. They also demonstrate flat HREE patterns for elements from Ho to Lu with (Ho/Yb)_N = 0.93 ~ 1.42, positive or slightly negative Eu anomalies (0.78 ~ 1.09), relatively high Ba, Sr/Y and La/Yb, low Y and Mg[#] (<45), as well as depleted HFSE(Nb, Ti, Zr). The Motuo granites are heterogeneous in zircon ε_{Hf}(t) values (-11.22 ~ 4.87), and have relatively younger zircon Hf crustal modal ages of 552 ~ 1179Ma. Both zircon Hf isotopic data and bulk-rock zircon saturation temperature (746 ~ 791°C) indicate that mantle-derived materials may have played an important role in the generation of Motuo granites. We propose that, with the underplating of mantle-derived magma during India-Asia continental collision, the Motuo high Sr/Y granites were most likely generated from the magma mixing between mantle source and crust source.

Key words Namche Barwa Syntaxis; Motuo; Gangdese granitic belt; High Sr/Y granite

摘要 墨脱花岗岩带位于南迦巴瓦构造结东侧,是冈底斯岩浆带的东南延伸部分。本文报道了该地区背崩和达木2个花岗岩体的全岩地球化学、锆石 U-Pb 年代学及锆石 Hf 同位素数据。锆石 U-Pb 定年结果表明,背崩和达木花岗岩体的年龄分别为 62Ma 和 64.5Ma。岩石地球化学数据显示,两个花岗岩体 SiO₂ 含量为 71.09% ~ 74.37%, K₂O 的含量为 1.38% ~ 5.93%, A/CNK 为 1.01 ~ 1.02,均属于高钾钙碱性过铝质岩石。所有样品均显示出强烈的轻、重稀土分异 ((La/Dy)_N = 13.55 ~ 31.3; (La/Yb)_N = 16.82 ~ 50.41),平坦的 Ho 到 Lu 稀土元素分布样式 ((Ho/Yb)_N = 0.93 ~ 1.42), δEu 主要介于 0.78 ~ 1.09,总体上具有正-微弱负异常,具较高 Ba、Sr/Y、La/Yb 和低 Y、Mg[#] (<45),亏损 HFSE 元素 (Nb、Ti、Zr)。墨脱高 Sr/Y 花岗岩具有不均一的 ε_{Hf}(t) 值 (-11.22 ~ 4.87) 和相对年轻的 Hf 模式年龄 (552 ~ 1179Ma)。锆石 Hf 同位素数据和锆石饱和温度 (746 ~ 791°C) 均显示幔源物质在墨脱花岗岩形成过程中发挥了较为重要的作用。墨脱高 Sr/Y 花岗岩可能是在印度-亚洲大陆碰撞阶段,由新特提斯洋俯冲过程中产生的基性岩浆底侵作用使陆壳熔融并发生壳幔岩浆混合作用所形成。

* 本文受中国地质调查局地质调查项目(1212010818035)、国家自然科学基金创新研究群体项目(40921001)和中央级公益性科研院所基本科研业务费项目(J1304)联合资助。

第一作者简介:董汉文,男,1988年生,博士生,构造地质学专业,E-mail: donghanwen123@126.com

** 通讯作者:许志琴,女,研究员,中国科学院院士,构造地质学专业,长期从事大陆动力学研究工作,E-mail:xzq@ccsd.cn

关键词 南迦巴瓦构造结;墨脱;冈底斯岩浆带;高 Sr/Y 花岗岩

中图法分类号 P588.121; P597.3

1 引言

青藏高原拉萨地体南部的冈底斯带位于雅鲁藏布缝合带(YZSZ)和班公湖-怒江缝合带(BNSZ)之间,东西长约2500km,南北宽100~300km,是青藏高原岩浆活动期次最多、规模最大和岩浆岩类型最复杂的构造-岩浆岩带(Yin and Harrison, 2000;潘桂棠等,2006;莫宣学等,2003, 2009)。该带西部与印度、巴基斯坦的拉达克(Ladakh)、科希斯坦(Kohistan)相连,向东绕过雅鲁藏布江大拐弯处的南迦巴瓦构造结(Namche Barwa Syntaxis)呈近南北向,进入缅甸北部。

冈底斯岩浆岩带作为青藏高原的重要组成部分,一直是地学界的研究热点。近年来,许多学者对冈底斯带中、新生代岩浆活动及成因做了大量的研究,结果表明,西藏冈底斯带晚白垩纪-古近纪时期发生了大规模岩浆活动及岩浆混

合作用(Xu *et al.*, 1985;江万等,1999;Mo *et al.*, 2005, 2007; Chu *et al.*, 2006;潘桂棠等,2006;莫宣学等,2009;Dong *et al.*, 2005;董国臣等,2006;Ravikant *et al.*, 2009;Ji *et al.*, 2009;朱弟成等,2006, 2008, 2009)。虽然不同学者先后对其开展了工作,但对其岩石成因和地球动力学背景仍然存在很多不同的解释,包括:①新特提斯洋向北俯冲(Schärer *et al.*, 1984);②印度-亚洲同碰撞/碰撞后增厚地壳重熔(莫宣学等,2003;Ding *et al.*, 2005);③新特提斯洋板片回转及脱离(Chung *et al.*, 2005;李皓扬等,2007;Wen *et al.*, 2008;Ji *et al.*, 2009);④新特提斯洋脊俯冲(Zhang *et al.*, 2010;管琪等, 2010)。

作为冈底斯带中、新生代岩浆作用系统研究的一部分,本文报道了南迦巴瓦构造结东段墨脱地区高 Sr/Y 花岗岩的岩石地球化学、锆石 U-Pb 年代学及 Hf 同位素数据,并结合详细的野外地质和室内岩相学研究对墨脱地区高 Sr/Y 花岗

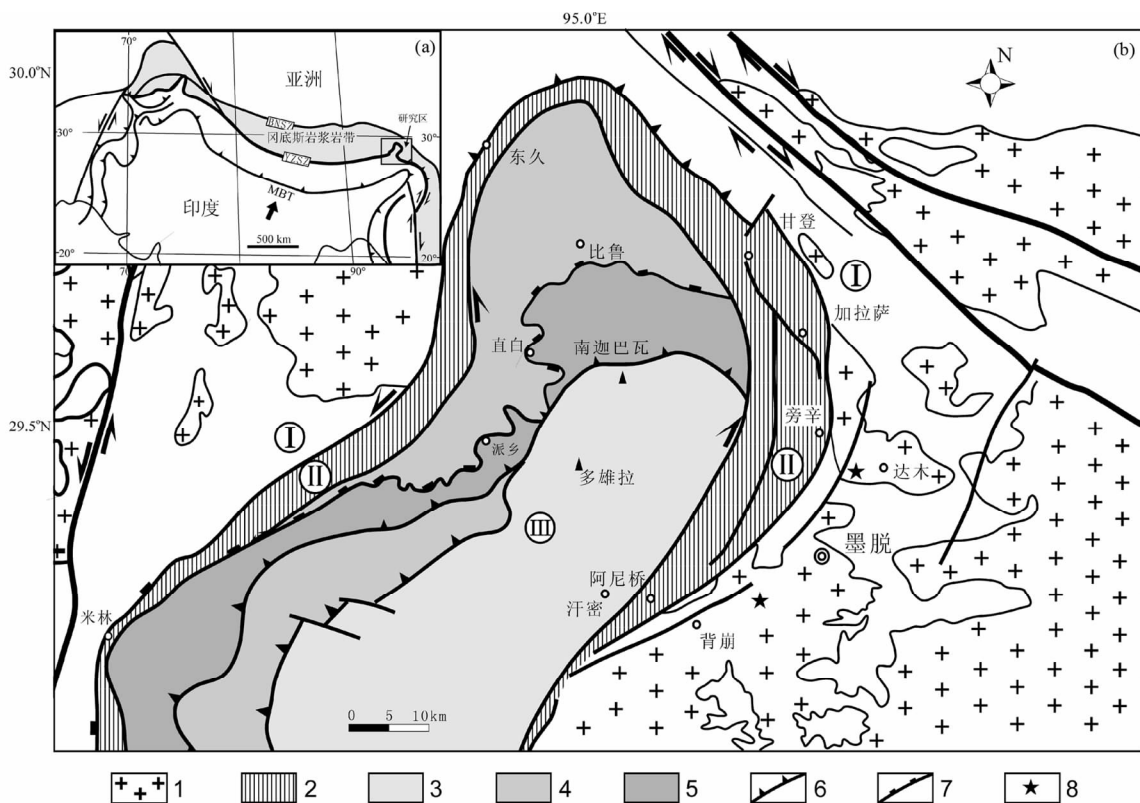


图1 南迦巴瓦构造结地质简图及采样位置(据许志琴等,2008;Xu *et al.*, 2012, 修改)

I-拉萨地体;II-雅鲁藏布缝合带;III-南迦巴瓦构造结;1-冈底斯花岗岩带;2-雅鲁藏布江缝合带(含蛇绿岩和混杂堆积);3-多雄拉组混合岩化角闪岩相变质岩;4-派乡组角闪岩相变质岩;5-直白组高压麻粒岩相带;6-逆冲断裂;7-拆离断裂;8-采样位置

Fig. 1 Geological sketch map of the Namche Barwa Syntaxis (after Xu *et al.*, 2008, 2012)

I-Lhasa terrain; II-Indus-Yarlung Tsangpo suture; III-Namche Barwa Syntaxis; 1-Gangdese granitic belt; 2-Indus-Yarlung Tsangpo suture (containing ophiolite and mélangé); 3-migmatitic amphibolites facies (Duoxiongla Formation); 4-amphibolites facies (Paixiang Formation); 5-high-pressure granulite facies (Zhibai Formation); 6-ductile thrust; 7-ductile detachment; 8-sampling position

岩岩石学成因和地球动力学背景进行了讨论。

2 地质背景及样品特征

喜马拉雅造山带东、西两端分别存在一个构造急剧转向的构造结,即:南迦巴瓦构造结(Namche Barwa Syntaxis)和南迦巴瓦(Nanga Parbat Syntaxis)。南迦巴瓦构造结处于欧亚、印度大陆及缅甸地块的交汇点(图 1a),是整个喜马拉雅造山带中构造应力最强烈、隆升和剥蚀速率最快、新生代岩浆活动、深熔作用和变质作用最强的地区(Ding *et al.*, 2001; Booth *et al.*, 2004; 郑来林等, 2004; 许志琴等, 2008; 戚学祥等, 2010; 张泽明等, 2009; Seward and Burg, 2008; Xu *et al.*, 2012),是研究造山作用过程中地壳再造(变质、变形和重熔)的野外实验室。南迦巴瓦构造结东部地区(墨脱-波密-察隅等地)出露大量中、新生代侵入岩,呈近北西-南东向带状展布,侵位于石炭-二叠系、泥盆系变沉积岩和元古代变质岩中(潘桂荣等, 2004; Liang *et al.*, 2008; Chiu *et al.*, 2009; 朱弟成等, 2009),主要以岩基状产出,亦见部分岩株。主体岩性为二长花岗岩,另有黑云母钾长花岗岩、黑云母花岗岩闪长岩、石英闪长岩和闪长岩脉等。

本文所研究的花岗岩采自墨脱县城南约 15km 的背崩岩体和北约 25km 的达木岩体(图 1b),紧邻雅鲁藏布江缝合带分布。两个花岗岩体野外特征较为相似,样品均为粗-中细粒半自形结构,块状构造,总体颜色较浅。经过显微镜详细鉴定,岩石主要矿物为:斜长石(35%~40%)、石英(20%~30%)、钾长石(30%~35%),次要矿物为黑云母(5%~10%)和少量白云母(<5%)。斜长石呈板状或柱状,聚片双晶发育;石英多呈他形粒状;钾长石呈板状,格子双晶明显;黑云母呈片状,多色性清楚(图 2)。副矿物主要为锆石、榍石、磁铁矿等。

3 样品制备及分析方法

用于锆石年代学测试的代表性样品首先经过破碎,经浮

选和电磁选等方法挑选出单颗粒锆石,然后在双目镜下挑纯,选样工作在河北省廊坊市大山地质矿业有限公司完成。手工挑出晶形完好、透明度和色泽度好的锆石,粘于环氧树脂表面,经抛光后进行透射光和反射光照相,在原位分析之前,通过双目镜和阴极发光(CL)图像详细研究锆石的晶体形貌和内部结构特征,以选择同位素分析的最佳点。CL 图像是在北京锆年领航科技有限公司电子探针实验室采用扫描电镜完成,加速电压为 15kV。最后根据 CL 图像选择典型的岩浆锆石进行 LA-MC-ICP-MS 测年分析。本次锆石 U-Pb 同位素测年分析在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室完成。分析仪器为 Geolas2005 激光剥蚀系统和 Agilent7500a 电感耦合等离子质谱仪(ICP-MS),激光束斑直径为 32 μm 。详细的仪器操作条件和数据处理方法见 Liu *et al.* (2010a, b)。采用 ICPMSDataCal8.3 软件对样品的同位素比值和 U-Pb 表面年龄数据进行处理,并利用 Andersen (2002)方法对普通 Pb 进行校正。锆石 U-Pb 年龄计算及谐和图均采用 ISOPLLOT 3.0 (Ludwig, 2003)程序完成。测试结果见表 1。

将新鲜样品进行无污染碎样至 200 目,粉末送至国土资源部国家实验测试中心进行主量及微量元素测试。主量元素通过 XRF(X 荧光光谱仪 3080E)方法测试,分析精度为 5%。微量元素和稀土元素(REE)通过等离子质谱仪(ICP-MS-Excell)分析,含量大于 10×10^{-6} 的元素的测试精度为 5%,而小于 10×10^{-6} 的元素精度为 10%。个别在样品中含量低的元素,测试误差大于 10%。分析结果见表 2。

锆石原位 Hf 同位素测试在中国地质科学院矿产资源研究所国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室完成,使用的仪器为 Neptune 多接收等离子质谱和 Newwave UP213 紫外激光剥蚀系统(LA-MC-ICP-MS),实验过程中采用 He 作为剥蚀物质载气,剥蚀直径采用 45~65 μm ,测试时使用锆石国际标样 GJ-1 作为参考物质,分析点与 U-Pb 定年分析点为同一位置或相邻位置。相关仪器运行条件及详细分析流程见侯可军等(2007)。测试结果见表 3。

4 分析结果

4.1 锆石 U-Pb 年代学

分别对两个岩体(样品 X6-10-2 取自背崩花岗岩体,样品 X19-4-1 取自达木花岗岩体)开展锆石 U-Pb 定年工作。样品 X6-10-2 中的锆石多为长柱状的自形晶形,长宽比为 1.5:1~4:1。CL 图像显示大多数锆石可见清楚的振荡环带特征,个别可见较窄的强阴极发光边(如图 3(a₁)中 4 测点),应为后期变质作用的结果。全部 20 个测点中 14 个测点的 Th 和 U 含量分别为 $498 \times 10^{-6} \sim 2486 \times 10^{-6}$ 和 $1570 \times 10^{-6} \sim 9407 \times 10^{-6}$,对应的 Th/U 比值介于 0.25~0.44 之间,锆石的结构和 Th/U 比值均表明其为典型的岩浆锆石(Hoskin and Schaltegger, 2003),这 14 个测点显示的 $^{206}\text{Pb}/$

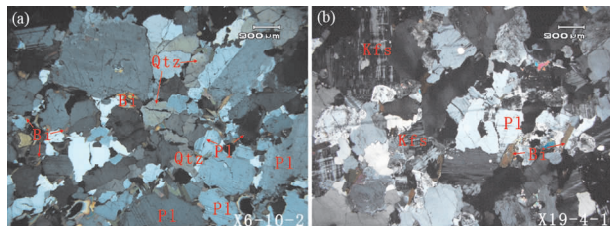


图 2 样品显微照片

(a)-背崩花岗岩体;(b)-达木花岗岩体。矿物代号:Qtz-石英;Pl-斜长石;Kfs-钾长石;Bi-黑云母

Fig. 2 Microphotograph of samples

(a)-Beibeng granite; (b)-Damu granite. Mineral symbols: Qtz-quartz; Pl-plagioclase; Kfs-K-feldspar; Bi-biotite

表 1 背崩花岗岩体(样品 X6-10-2)和达木花岗岩体(样品 X19-4-1) LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄数据

Table 1 LA-MC-ICP-MS U-Pb analytical results for zircons from Beibeng granite (sample X6-10-2) and Damu granite (sample X19-4-1)

Spot no.	Pb Th U			Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	
	($\times 10^{-6}$)										Age (Ma)	
背崩花岗岩体(X6-10-2)												
1	53.94	833	1889	0.44	0.0493	0.0047	0.0638	0.0064	0.0094	0.0003	60.3	1.8
2	193.42	2486	9407	0.26	0.0468	0.0020	0.0637	0.0029	0.0097	0.0002	62.3	1.0
3	87.0	1138	4148	0.27	0.0466	0.0026	0.0638	0.0036	0.0098	0.0001	62.8	0.9
4	79	1161	2765	0.42	0.0470	0.0031	0.0647	0.0044	0.0099	0.0002	63.7	1.1
5	58.5	883	2025	0.44	0.0474	0.0077	0.0639	0.0106	0.0100	0.0004	64.0	2.7
6	135	2020	7207	0.28	0.0466	0.0031	0.0647	0.0042	0.0100	0.0002	64.4	1.0
7	37	498	1784	0.28	0.0490	0.0055	0.0630	0.0061	0.0101	0.0004	64.5	2.3
8	92.0	1300	3813	0.34	0.0444	0.0036	0.0629	0.0051	0.0102	0.0003	65.5	1.6
9	40.0	613	1660	0.37	0.0475	0.0042	0.0663	0.0054	0.0103	0.0002	66.0	1.5
10	41.1	542	2211	0.25	0.0509	0.0048	0.0711	0.0062	0.0104	0.0002	66.5	1.5
11	53.8	796	2263	0.35	0.0454	0.0044	0.0650	0.0070	0.0104	0.0003	66.6	1.7
12	41	534	1570	0.34	0.0460	0.0049	0.0658	0.0082	0.0106	0.0003	68.2	2.0
13	45.6	646	1978	0.33	0.0471	0.0071	0.0677	0.0085	0.0107	0.0004	68.7	2.6
14	83.5	1060	3944	0.27	0.0460	0.0042	0.0658	0.0053	0.0107	0.0002	68.9	1.5
达木花岗岩体(X19-4-1)												
1	35.7	214	4196	0.05	0.0516	0.0030	0.0661	0.0041	0.0094	0.0002	60.4	1.1
2	53.4	580	4436	0.13	0.0468	0.0023	0.0598	0.0030	0.0094	0.0001	60.4	0.8
3	54	248	5734	0.04	0.0496	0.0035	0.0649	0.0045	0.0095	0.0001	61.0	0.9
4	46.5	321	4633	0.07	0.0488	0.0023	0.0641	0.0029	0.0096	0.0001	61.5	0.8
5	48.0	619	3408	0.18	0.0498	0.0032	0.0665	0.0042	0.0096	0.0002	61.9	1.1
6	102.2	1862	4131	0.45	0.0488	0.0021	0.0655	0.0027	0.0097	0.0001	62.5	0.8
7	52.3	620	2760	0.22	0.0503	0.0031	0.0670	0.0039	0.0098	0.0002	63.1	1.0
8	65.0	826	4443	0.19	0.0481	0.0036	0.0668	0.0047	0.0102	0.0003	65.6	1.8
9	33.6	163	3324	0.05	0.0464	0.0033	0.0658	0.0046	0.0104	0.0002	66.7	1.3

^{238}U 年龄范围为 60.3 ~ 68.9Ma, 在置信度 95% 时的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄值为 $64.5 \pm 1.3\text{Ma}$ (MSWD = 2.6) (图 3(a₂)), 代表了背崩花岗岩体的形成时代。样品 X19-4-1 中的锆石显示长柱状自形晶形, 长宽比为 2.5 : 1 ~ 7 : 1, CL 图像显示清楚的生长韵律或振荡环带(图 3(b₁))。9 个测点的 Th 和 U 含量分别为 163×10^{-6} ~ 1862×10^{-6} 和 2760×10^{-6} ~ 5734×10^{-6} , 对应的 Th/U 比值介于 0.05 ~ 0.45 之间, 锆石的结构及 Th/U 比值均表明其应为岩浆锆石 (Hoskin and Schaltegger, 2003), 这 9 个测点显示的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄范围为 60.4 ~ 66.7Ma, 在置信度 95% 时的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄值为 $62.0 \pm 1.4\text{Ma}$ (MSWD = 3.3) (图 3(b₂)), 代表了达木花岗岩体的形成时代。

4.2 全岩地球化学

地球化学数据显示, 背崩花岗岩体和达木花岗岩体具有较为一致的特征。主量元素特征表现为(表 2): SiO_2 含量较高, 介于 71.09% ~ 74.37% 之间, Al_2O_3 含量介于 13.2% ~ 14.09%, 与 Na_2O (2.97% ~ 3.7%) 相比, K_2O 的含量 (1.38% ~ 5.93%) 变化范围较大。根据 Irvine and Baragar

(1971) 的划分方法, 样品均落在亚碱性系列范围内(图 4a); 进一步根据 SiO_2 - K_2O 协变图解(图 4b), 样品总体表现为高钾钙碱性系列, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 比值介于 1.52 ~ 2.0, 只有 X6-10-2 的 K_2O 含量较低, 落入中钾拉斑系列, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 比值为 0.37。铝饱和指数 (A/CNK) 为 1.01 ~ 1.02, 属过铝质花岗岩(图 5)。样品的 MgO 含量较低 (0.23% ~ 1.16%), $\text{Mg}^\#$ 介于 31.5 ~ 42.5。主量元素协变图解中(图 6), 随着 SiO_2 含量的变化, Al_2O_3 、 TiO_2 、 MgO 、 FeO 、 CaO 及 Na_2O 具有较好的线性关系。

微量元素特征表现为(表 2): 富 Sr (274×10^{-6} ~ 391×10^{-6})、Ba (199×10^{-6} ~ 1179×10^{-6})、Zr (97.7×10^{-6} ~ 170×10^{-6}) 及 Rb (62.6×10^{-6} ~ 151×10^{-6}), 含较低的 Y ($< 8.3 \times 10^{-6}$)、Yb ($< 0.8 \times 10^{-6}$)、Nb ($< 11.2 \times 10^{-6}$)、Hf ($< 5.2 \times 10^{-6}$)、Ta ($< 0.83 \times 10^{-6}$)、Th ($< 12.5 \times 10^{-6}$) 及 U ($< 2.8 \times 10^{-6}$), Nb/Ta 比值在 9.41 ~ 27.43 之间, Rb/Sr 比值在 0.19 ~ 0.39 之间, 高 Sr/Y (40.56 ~ 83.89) 和 La/Yb (23.45 ~ 70.28), 即在微量元素原始地幔标准化图解中, 样品明显富集大离子亲石元素 (LILE), 亏损高场强元素 (HFSE) (图 7b)。

稀土元素特征表现为(表 2): 稀土元素球粒陨石标准化

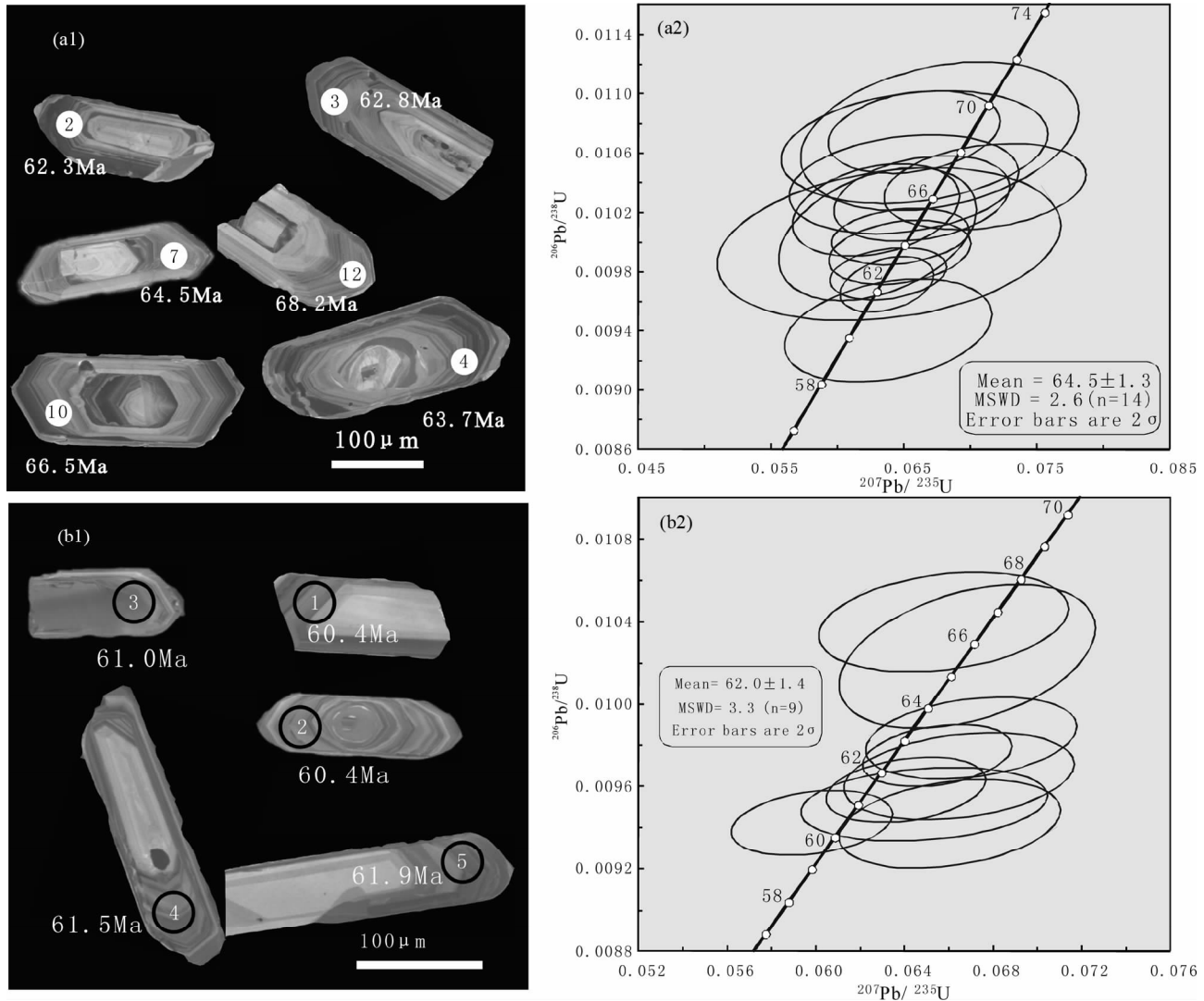


图3 样品锆石阴极发光(CL)图像及 U-Pb 年龄

Fig. 3 CL images and U-Pb ages of zircons from samples

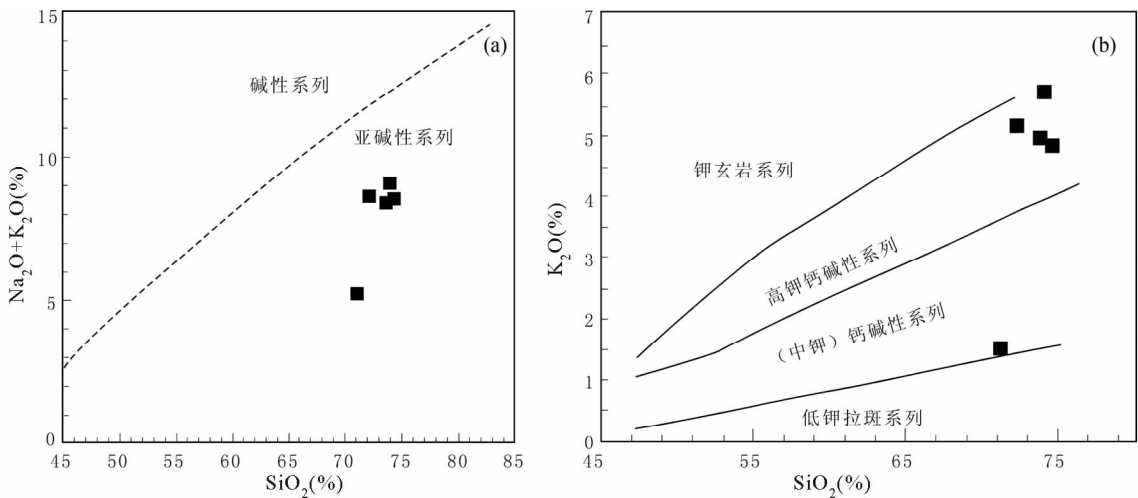
图4 TAS 系列划分图解(a, 据 Irvine and Baragar, 1971) 和 K_2O - Si_2O 图(b, 据 Rickwood, 1989)Fig. 4 Diagram of TAS series (a, after Irvine and Baragar, 1971) and plot of K_2O vs. Si_2O (b, after Rickwood, 1989)

表2 背崩花岗岩体和达木花岗岩体地球化学组成(主量元素:wt%;稀土和微量元素:×10⁻⁶)

Table 2 Whole-rock geochemical composition of Beibeng granite and Damu granite (Major elements: wt%; Trace elements: ×10⁻⁶)

样品号	背崩花岗岩体		达木花岗岩体		
	X-6-4-4	X-6-10-2	X-19-4-1	X-19-4-4	X-19-5-2
SiO ₂	74.37	71.09	73.96	73.69	72.17
TiO ₂	0.17	0.4	0.08	0.13	0.16
Al ₂ O ₃	13.2	13.8	13.64	13.44	14.09
Fe ₂ O ₃	0.78	0.72	0.25	0.57	0.59
FeO	0.52	2.37	0.34	0.72	0.93
MnO	0.02	0.07	0.01	0.02	0.03
MgO	0.32	1.16	0.23	0.51	0.54
CaO	1.16	3.36	1.12	1.47	1.67
Na ₂ O	3.34	3.7	2.97	3.04	3.07
K ₂ O	5.08	1.38	5.93	5.19	5.39
P ₂ O ₅	0.05	0.11	0.07	0.04	0.06
LOI	0.61	0.49	0.6	0.65	0.87
Total	99.62	98.65	99.2	99.47	99.57
A/CNK	1.01	1.01	1.02	1.01	1.01
A/NK	1.20	1.34	1.20	1.26	1.29
K ₂ O/Na ₂ O	1.52	0.37	2.00	1.71	1.76
Mg [#]	31.5	40.7	42.1	42.5	39.8
Rb	74.2	62.6	151	129	131
Sr	274	335	386	380	391
Y	4.19	8.26	5.09	4.53	7.99
Ba	1179	199	882	796	717
Cr	1.8	8.59	1.9	17.8	12.5
Sc	2.21	4.97	1.32	2.06	2.61
Co	2.15	6.35	0.8	1.99	2.06
Ni	0.73	3.85	0.93	9.93	7.01
Sn	1.25	2.13	1.47	1.65	2.03
Zr	127	167	97.7	170	148
Nb	1.92	11.1	3.2	2.88	5.56
V	19.2	54.3	6.63	16.7	16
Ta	0.07	0.82	0.34	0.21	0.59
Hf	3.78	5.15	3.13	4.94	4.7
Th	9.66	7.36	6.65	12.4	10.9
U	0.51	1.17	1.29	1.04	2.76
Sr/Y	65.39	40.56	75.83	83.89	48.94
Rb/Sr	0.27	0.19	0.39	0.34	0.34
Nb/Ta	27.43	13.54	9.41	13.71	9.42
La	25.3	24.2	12.9	29.5	28.7
Ce	44.5	46.7	23.3	53.8	52.6
Pr	4.72	4.77	2.5	5.63	5.67
Nd	16.3	17.7	8.89	19.1	19.6
Sm	2.65	3.11	1.52	2.89	3.08
Eu	0.61	0.91	0.52	0.7	0.75
Gd	2.15	2.64	1.39	2.1	2.48
Tb	0.23	0.31	0.18	0.23	0.32
Dy	1.1	1.82	1.02	1.01	1.76
Ho	0.17	0.33	0.17	0.17	0.3
Er	0.48	0.89	0.47	0.54	0.91
Tm	0.05	0.14	0.08	0.07	0.13
Yb	0.36	0.71	0.55	0.5	0.79
Lu	0.06	0.12	0.09	0.09	0.14
REE	98.68	104.35	53.58	116.33	117.23
La/Yb	70.28	34.08	23.45	59.00	36.33
δEu	0.78	0.97	1.09	0.87	0.83
(La/Yb) _N	50.41	24.45	16.82	42.32	26.06
(La/Dy) _N	24.65	14.25	13.55	31.30	17.48
(Ho/Yb) _N	1.42	1.40	0.93	1.02	1.14
T _z (°C)	767	787	746	791	777

注: A/CNK = Al₂O₃ / (CaO + Na₂O + K₂O) 分子个数比, A/NK = Al₂O₃ / (Na₂O + K₂O) 分子个数比, Mg[#] = 100 × Mg²⁺ / (Mg²⁺ + Fe²⁺); (La/Yb)_N、(La/Dy)_N、(Ho/Yb)_N 为球粒陨石标准化后的比值

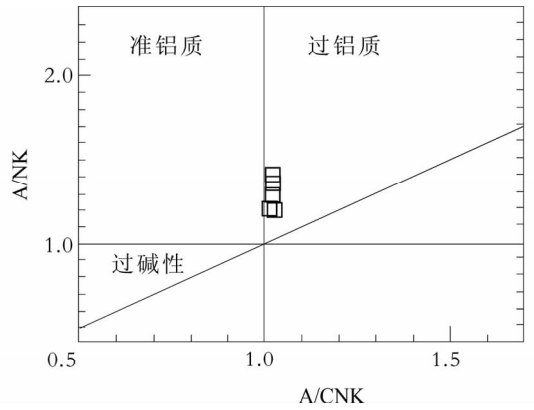


图5 A/NK-A/CNK 图解(据 Maniar and Piccoli, 1989)
Fig. 5 Plot of A/NK vs A/CNK (after Maniar and Piccoli, 1989)

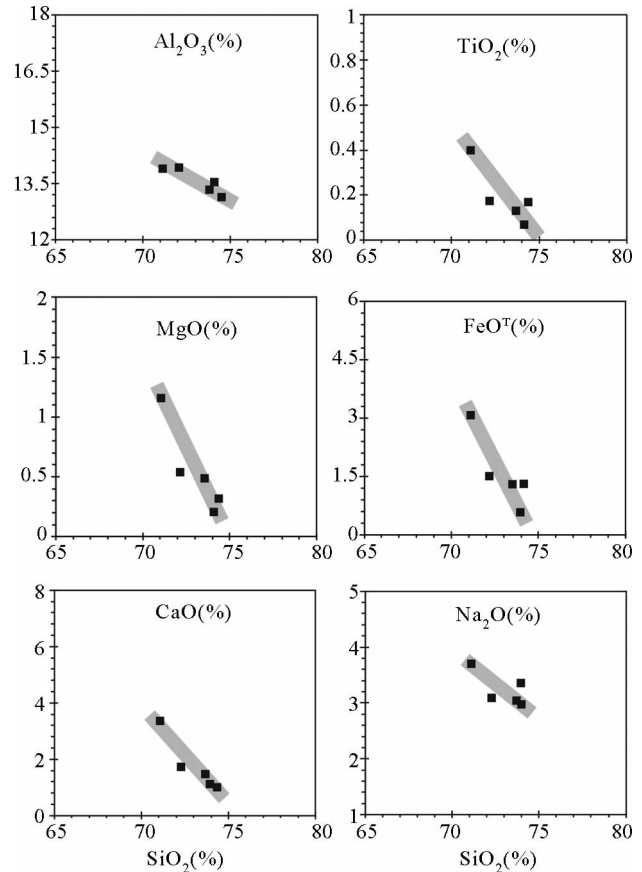


图6 主量元素图解
Fig. 6 Plots of selected major element oxides vs. SiO₂

图解中,样品显示出强烈的轻、重稀土分异((La/Yb)_N = 16.82 ~ 50.41),轻稀土元素富集((La/Dy)_N = 13.55 ~ 31.30),重稀土元素亏损,但从Ho到Lu稀土元素分布样式平坦((Ho/Yb)_N = 0.93 ~ 1.42),δEu 主要介于0.78 ~ 1.09,总体上具有正-微弱负异常(表2、图7a)。

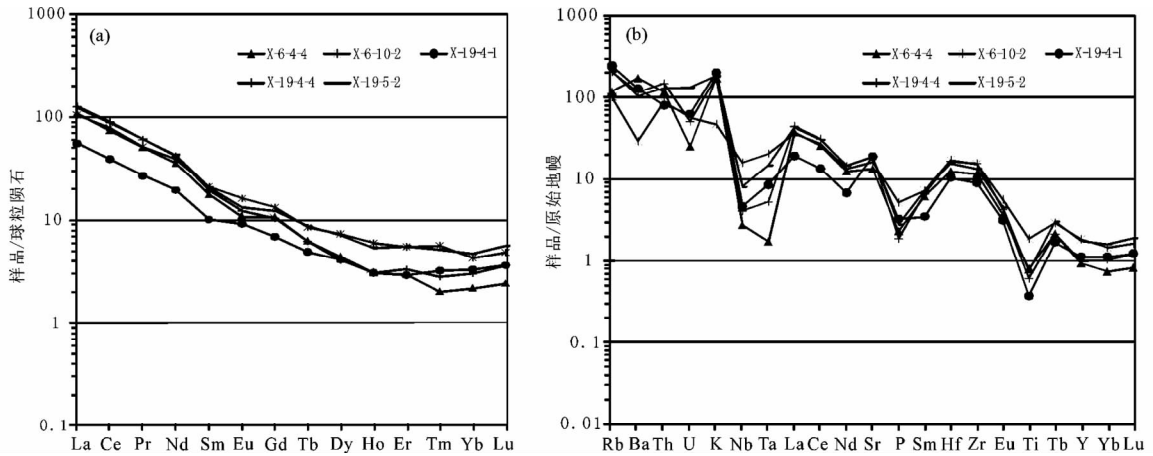


图7 稀土球粒陨石标准化配分曲线图(a)和微量元素原始地幔标准化配分曲线图(b) (标准化值据 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 7 Chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive mantle-normalized trace element patterns (b) (normalization values after Sun and McDonough, 1989)

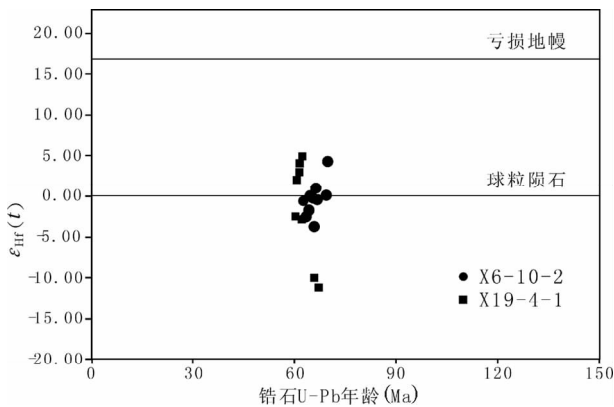


图8 $\epsilon_{Hf}(t)$ -年龄图解

Fig. 8 Plot of $\epsilon_{Hf}(t)$ vs. ages

4.3 锆石 Hf 同位素

在上述两样品(X-10-2和X19-4-1)定年的锆石中,18颗锆石进行锆石 Hf 同位素测定(表3)。它们的 $^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$ 和 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 值分别为0.043157~0.151218和0.000854~0.003849。背崩花岗岩体和达木花岗岩体均具有不均一的 Hf 同位素组成,其 $\epsilon_{Hf}(t)$ 值变化范围较大,为-11.22~4.87(图8),模式年龄变化范围为552~1179Ma,平均地壳模式年龄为823~1852Ma。

5 讨论

5.1 岩石地球化学类型

从矿物组成来看,墨脱地区背崩花岗岩体和达木花岗岩体主要由石英、斜长石、钾长石、黑云母及少量白云母等组成。从地球化学特征来看,两岩体均属于高钾钙碱性系列岩

石,其主量元素具有高 SiO_2 (71.09% ~ 74.37%), 富 K_2O (1.38% ~ 5.93%), $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 比值多数大于1, 低铁 ($\text{TFeO} < 3.1\%$)、镁 ($\text{MgO} < 1.2\%$), $\text{A}/\text{CNK} = 1.01 \sim 1.02$, 属过铝质花岗岩(图5)。稀土元素表现为富集 LREE, 亏损 HREE, 从 Ho 至 Lu 含量变化不大, 近乎平坦分布(图7a), 说明石榴石和角闪石以残留相存在 (Rollison, 1993; Halyard *et al.*, 2000); Eu 具有正-微弱负异常 ($\delta\text{Eu} = 0.78 \sim 1.09$) (图7a), 表明岩浆上升的过程中未发生明显的斜长石分离结晶作用。微量元素表现为高 Ba、Sr/Y, La/Yb, 低 Y, $\text{Mg}^\# (< 45)$ 、Rb/Sr, 亏损 HFSE 元素 (Nb, Ti, Zr), 并且在 Sr/Y-Y 和 La/Yb-Yb 图解中(图9), 墨脱花岗岩所有样品均落在埃达克质岩石的区域内。

一般认为埃达克质岩石具有以下地球化学特征: SiO_2 含量 $\geq 56\%$, $\text{Al}_2\text{O}_3 \geq 15\%$, 亏损 Y ($\leq 18 \times 10^{-6}$) 和重稀土元素 (HREE) (如 $\text{Yb} \leq 1.9 \times 10^{-6}$), 高 Sr (很少 $< 400 \times 10^{-6}$), 无或正 Eu 异常, 贫高场强元素 (HFSE) (王强等, 2008)。墨脱地区花岗岩虽然具有类似埃达克岩的地球化学特征, 但与典型的埃达克岩不完全一致: $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 比值较高, 但是 $\text{Sr} = 274 \times 10^{-6} \sim 391 \times 10^{-6}$, $\text{Al}_2\text{O}_3 = 13.2\% \sim 14.09\%$ (均 $< 15\%$), 均低于典型埃达克岩 (高 Sr 很少 $< 400 \times 10^{-6}$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3 \geq 15\%$); $\text{Mg}^\#$ 介于 31.5 ~ 42.5, 明显低于埃达克岩的均值 $\text{Mg}^\# (51)$ 。

综上, 墨脱地区背崩花岗岩体和达木花岗岩体具有类埃达克岩的地球化学特征, 但并非典型的埃达克岩。岩体高硅、富钾, 属于过铝质、高钾钙碱性系列, 具有高 Sr/Y 花岗岩岩石地球化学特征。

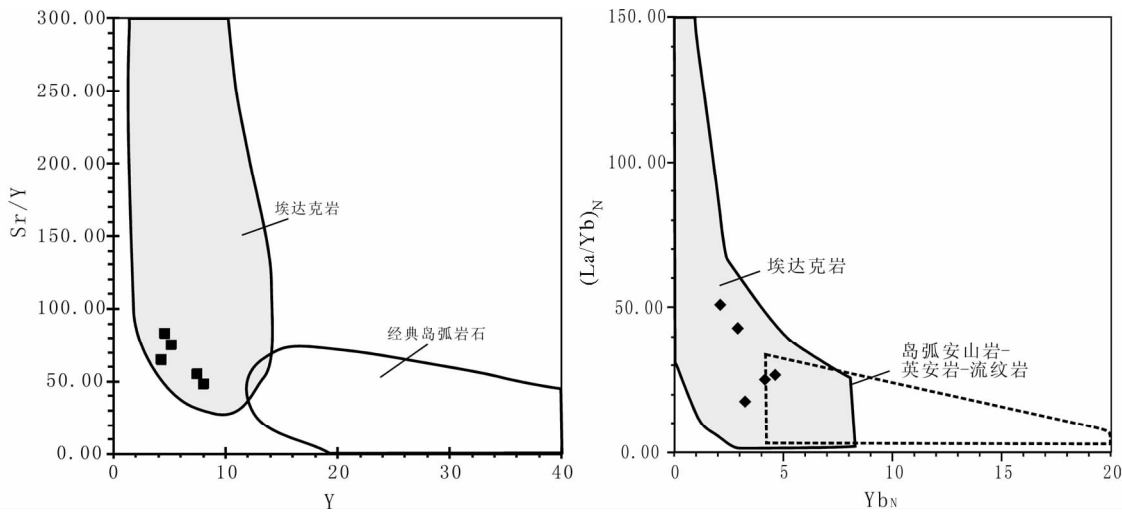
5.2 岩浆源区及地球动力学背景

墨脱高 Sr/Y 花岗岩的锆石 Hf 同位素组成有较大的变

表3 背崩花岗岩体(样品 X6-10-2)和达木花岗岩体(样品 X19-4-1)锆石 Hf 年龄数据

Table 3 Hf analytical results for zircons from Beibeng granite (sample X6-10-2) and Damu granite (sample X19-4-1)

测点号	Age (Ma)	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$\varepsilon_{\text{Hf}}(0)$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	2σ	$t_{\text{DM}}(\text{Ma})$	$t_{\text{DM}}^{\text{C}}(\text{Ma})$
背崩花岗岩体(X6-10-2)										
2	62.3	0.129579	0.003004	0.282719	0.000028	-1.88	-0.63	1.0	798	1174
3	62.8	0.100455	0.002131	0.282671	0.000027	-3.58	-2.33	0.9	849	1282
4	63.7	0.101926	0.002246	0.282676	0.000030	-3.39	-2.00	1.1	844	1266
6	64.4	0.069667	0.001499	0.282732	0.000029	-1.43	-0.11	1.0	747	1142
7	64.5	0.106114	0.002022	0.282731	0.000029	-1.45	-0.16	1.0	759	1145
8	65.5	0.092324	0.001922	0.282624	0.000028	-5.25	-3.78	1.0	912	1382
9	66	0.110192	0.002127	0.282757	0.000028	-0.53	0.79	1.0	723	1085
10	66.5	0.097980	0.001993	0.282718	0.000029	-1.90	-0.48	1.0	777	1170
12	68.2	0.083920	0.001597	0.282729	0.000031	-1.51	-0.08	1.1	752	1144
14	68.9	0.151218	0.003849	0.282858	0.000029	3.05	4.38	1.0	604	859
达木花岗岩体(X19-4-1)										
1	60.4	0.099431	0.001997	0.282793	0.000022	0.74	2.01	0.8	669	1006
2	60.4	0.089224	0.002149	0.282666	0.000022	-3.73	-2.47	0.8	855	1291
3	61.0	0.111262	0.002216	0.282821	0.000020	1.72	2.97	0.7	632	944
4	61.5	0.120466	0.002825	0.282844	0.000029	2.56	3.79	1.0	607	891
5	61.9	0.106196	0.002093	0.282874	0.000021	3.60	4.87	0.7	552	823
6	62.5	0.128039	0.003003	0.282662	0.000036	-3.89	-2.65	1.3	883	1303
8	65.6	0.086450	0.002035	0.282453	0.000032	-11.28	-10.00	1.15	1161	1770
9	66.7	0.043157	0.000854	0.282414	0.000021	-12.65	-11.22	0.76	1179	1852

图9 Sr/Y-Y 图解(据 Defant and Drummond, 1990)和 $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ - Yb_{N} 图解(据 Martin, 1986)Fig. 9 Sr/Y vs. Y diagram (after Defant and Drummond, 1990) and $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ vs. Yb_{N} diagram (after Martin, 1986)

化范围, $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值得变化范围为 $-11.22 \sim 4.87$ (变化范围达 16 个 ε 单位), 单阶段 Hf 模式年龄变化范围为 $552 \sim 1179\text{Ma}$, 显示了该区花岗岩锆石颗粒 Hf 同位素组成的不均一性, 由于锆石 Hf 同位素比值不会随部分熔融或分离结晶作用变化, 因此锆石 Hf 同位素的不均一性很可能指示了更具放射成因 Hf 的幔源和有较少放射成因 Hf 的壳源这两种端元之间的混合作用 (Bolhar *et al.*, 2008; 朱弟成等, 2009)。在主要元素图解 (图 6) 中, 墨脱高 Sr/Y 花岗岩的 SiO_2 与 Al_2O_3 、 TiO_2 、 MgO 、 FeO 、 CaO 及 Na_2O 等呈良好的线性关系,

这是岩浆混合作用区别于岩浆分离结晶作用的一个重要特征。

锆石饱和温度 (Miller *et al.*, 2003) 计算表明, 形成墨脱高 Sr/Y 花岗岩的母岩浆具有较高温度 ($746 \sim 791^\circ\text{C}$) (表 2), 明显高于北喜马拉雅中新世淡色花岗岩 (Zhang *et al.*, 2004), 与有幔源物质参与的华南佛冈花岗岩具有较为一致的特征 (Li *et al.*, 2007), 结合上述锆石 Hf 同位素数据表明, 幔源物质很可能在墨脱高 Sr/Y 花岗岩的形成过程中起到重要作用。已有资料表明, 在冈底斯岩浆岩带中分布大面积

与墨脱高 Sr/Y 花岗岩同期的碰撞-后碰撞岩浆岩,即新生代林子宗火山岩与过铝质花岗岩,其形成时代为 40.84 ~ 64.47Ma(其中典中组火山岩形成于 60.60 ~ 64.47Ma),并且全岩 ϵ_{Nd} 介于 3 ~ -5 之间(莫宣学等,2003),Nd-Sr-Pb 同位素均指示地幔与地壳、海洋地幔与大陆地幔相互作用的信息,暗示着从新特提斯洋俯冲体制向大陆碰撞体制转变的地球动力学环境。由此可见,墨脱花岗岩与林子宗火山岩具有很好的可比性,即在新特提斯洋板块俯冲过程产生的基性岩浆,不断上升聚集在 Moho 附近陆壳底部,到俯冲结束、大陆开始碰撞时,底侵基性岩浆已达到相当规模,所积聚的热量已足以使陆壳发生熔融,从而产生大面积的酸性岩浆,可以较好地解释墨脱高 Sr/Y 花岗岩所显示的壳幔物质混合信息。

6 结论

通过对墨脱高 Sr/Y 花岗岩的岩石地球化学、锆石 U-Pb 年代学及 Hf 同位素研究,本文得出以下几点认识:

(1) 南迦巴瓦构造结墨脱地区广泛发育新生代岩浆作用,锆石 U-Pb 定年结果显示其背崩花岗岩体和达木花岗岩体的侵位时代分别为 $64.5 \pm 1.3\text{Ma}$ 和 $62.0 \pm 1.4\text{Ma}$;

(2) 墨脱高 Sr/Y 花岗岩具有高 SiO_2 、富 K_2O 和低 FeO 、 MgO 特征,属于过铝质、高钾钙碱性系列岩石,富集 LREE,亏损 HREE,正-微弱负 Eu 异常,具较高 Ba、Sr/Y, La/Yb 和低 Y, $\text{Mg}^\# (<45)$ 、Rb/Sr, 亏损 HFSE 元素 (Nb、Ti、Zr), 锆石 Hf 同位素组成的不均一性 ($\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 介于 -11.22 ~ 4.87 之间) 反映了其形成时的物源特征较为复杂;

(3) 墨脱高 Sr/Y 花岗岩可能是在印度-亚洲大陆碰撞阶段,由新特提斯洋俯冲过程中产生的基性岩浆底侵作用使陆壳熔融并发生壳幔岩浆混合作用所形成。

致谢 锆石 U-Pb 定年测试在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室完成,测试和分析过程中得到胡兆初教授的帮助;全岩地球化学测试由国家地质实验测试中心完成;锆石 Hf 同位素测试在中国地质科学院矿产资源研究所国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室完成,得到郭春丽和侯可军的帮助;承蒙吴才来研究员和戚学祥研究员对本文的细致审阅并提出富有建设性的意见和建议;在此一并表示衷心的感谢。

References

Andersen T. 2002. Correction of common Pb in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb . *Chemical Geology*, 192(1-2): 59-79

Bolhar R, Weaver SD, Whitehouse MJ, Palin JM, Woodhead JD and Cole JW. 2008. Sources and evolution of arc magmas inferred from coupled O and Hf isotope systematic of plutonic zircons from the Cretaceous Separation Point Suite (New Zealand). *Earth and Planet*

Science Letters, 268(3-4): 312-324

Booth AL, Zeitler PK, Kidd WSF, Wooden J, Liu YP, Idleman B, Hren M and Chamberlain CP. 2004. U-Pb zircon constraints on the tectonic evolution of southeastern Tibet, Namche Barwa area. *American Journal of Science*, 304(10): 889-929

Chiu HY, Chung SL, Wu FY, Liu DY, Liang YH, Lin IJ, Iizuka Y, Xie LW, Wang YB and Chu MF. 2009. Zircon U-Pb and Hf isotope constraints from eastern Transhimalayan batholiths on the precollisional magmatic and tectonic evolution in southern Tibet. *Tectonophysics*, 477(1-2): 3-19

Chu MF, Chung SL, Song B, Liu DY, O'Reilly SY, Pearson NJ, Ji JQ and Wen DR. 2006. Zircon U-Pb and Hf isotope constraints on the Mesozoic tectonics and crustal evolution of southern Tibet. *Geology*, 34(9): 745-748

Chung SL, Chu MF, Zhang YQ, Xie YW, Lo CH, Lee HY, Lan CY, Li XH, Zhang Q and Wang YZ. 2005. Tibetan tectonic evolution inferred from spatial and temporal variations in post-collisional magmatism. *Earth Science Reviews*, 68(3-4): 173-196

Defant MJ and Drummond MS. 1990. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere. *Nature*, 347(6294): 662-665

Ding L, Zhong DL, Yin A, Kapp P and Harrison TM. 2001. Cenozoic structural and metamorphic evolution of the eastern Himalayan syntaxis (Namche Barwa). *Earth and Planet Science Letters*, 192(3): 423-438

Ding L, Kapp P and Wan XQ. 2005. Paleocene-Eocene record of ophiolite obduction and initial India-Asia collision, south central Tibet. *Tectonic*, 24(3), doi: 10.1029/2004TC001729

Dong GC, Mo XX, Zhao ZD, Guo TY, Wang LL and Chen T. 2005. Geochronologic constraints on the magmatic underplating of the Gangdisê Belt in the India-Eurasia collision: Evidence of SHRIMP II zircon U-Pb dating. *Acta Geologica Sinica*, 79(6): 787-794

Dong GC, Mo XX, Zhao ZD, Zhu DC, Wang LL, Chen T and Li B. 2006. Magma mixing in middle part of Gangdisê magma belt: Evidences from granitoid complex. *Acta Petrologica Sinica*, 22(4): 835-844 (in Chinese with English abstract)

Guan Q, Zhu DC, Zhao ZD, Zhang LL, Liu M, Li XW, Yu F and Mo XX. 2010. Late Cretaceous adakites in the eastern segment of the Gangdisê Belt, southern Tibet: Products of Neo-Tethyan ridge subduction?. *Acta Petrologica Sinica*, 26(7): 2165-2179 (in Chinese with English abstract)

Halyard M, Nielsen RL, Beard JS, Patinõ-Douce A and Blencoe J. 2000. Experimental determination of the partitioning behavior of rare earth and high field strength elements between pargasitic amphibole and natural silicate melts. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64(6): 1103-1120

Hoskin PWO and Schaltegger U. 2003. The composition of zircon and igneous and metamorphic petrogenesis. In: Manchar JM and Hoskin PWO (eds.). *Zircon. Reviews of Mineralogy and Geochemistry*, 53(1): 27-62

Hou KJ, Li YH, Zou TR, Qu XM, Shi YR and Xie GQ. 2007. Laser ablation-MC-ICP-MS technique for Hf isotope microanalysis of zircon and its geological applications. *Acta Petrologica Sinica*, 23(10): 2595-2604 (in Chinese with English abstract)

Irvine TN and Baragar WRA. 1971. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 8(5): 523-548

Ji WQ, Wu FY, Chung SL, Li JX and Liu CZ. 2009. Zircon U-Pb geochronology and Hf isotopic constraints on petrogenesis of the Gangdisê batholiths, southern Tibet. *Chemical Geology*, 262(3-4): 229-245

Jiang W, Mo XX, Zhao CH, Guo TY and Zhang SQ. 1999. Geochemistry of granitoid and its mafic microgranular enclave in Gangdisê belt, Qinghai-Xizang Plateau. *Acta Petrologica Sinica*, 15(1): 89-97 (in Chinese with English abstract)

Lee HY, Chung SL, Wang YB, Zhu DC, Yang JY, Song B, Liu DY and Wu FY. 2007. 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. *Acta Petrologica Sinica*, 23(2): 493–500 (in Chinese with English abstract)
- Li XH, Li ZX, Li WX, Liu Y, Yuan C, Wei GJ and Qi CS. 2007. U-Pb zircon geochemical and Sr-Nd-Hf isotopic constraints on age and origin of Jurassic I- and A-type granites from central Guangdong, SE China: A major igneous event in response to foundering of a subducted flat slab? *Lithos*, 96(1–2): 186–204
- Liang YH, Chung SL, Liu DY, Xu YG, Wu FY, Yang JH, Wang YB and Lo TH. 2008. Detrital zircon evidence from Burma for reorganization of the eastern Himalayan river system. *American Journal of Science*, 308(4): 618–638
- Liu YS, Gao S, Hu ZC, Gao CG, Zong KQ and Wang DB. 2010a. Continental and oceanic crust recycling-induced melt-peridotite interactions in the Trans-North China Orogen; U-Pb dating, Hf isotopes and trace elements in zircons from mantle xenoliths. *Journal of Petrology*, 51(1–2): 537–571
- Liu YS, Hu ZC, Zong KQ, Gao CG, Gao S, Xu J and Chen HH. 2010b. Reappraisal and refinement of zircon U-Pb isotope and trace element analyses by LA-ICP-MS. *Chinese Science Bulletin*, 55(15): 1535–1546
- Ludwig KR. 2003. ISOPLOT 3.00: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. Berkeley Geochronology Center Special Publication
- Maniar PD and Piccoli PM. 1989. Tectonic discrimination of granulitoids. *Geological Society of America Bulletin*, 101(5): 635–643
- Matin H. 1986. Effect of steeper Archean geothermal gradient on geochemistry of subduction-zone magmas. *Geology*, 14: 753–756
- Miller CF, McDowell SM and Mapes RW. 2003. Hot and cold granites? Implications of zircon saturation temperatures and preservation of inheritance. *Geology*, 31(6): 529–532
- Mo XX, Zhao ZD, Deng JF, Dong GC, Zhou S, Guo TY, Zhang SQ and Wang LL. 2003. Response of volcanism to the India-Asia collision. *Earth Science Frontiers*, 10(3): 135–148 (in Chinese with English abstract)
- Mo XX, Dong GC, Zhao ZD, Guo TY, Wang LL and Chen T. 2005. Timing of magma mixing in the Gangdisê magmatic belt during the India-Asia collision; Zircon SHRIMP U-Pb dating. *Acta Geologica Sinica*, 79(1): 66–76
- Mo XX, Hou ZQ, Niu YL, Dong GC, Qu XM, Zhao ZD and Yang ZM. 2007. Mantle contributions to crustal thickening during continental collision: Evidence from Cenozoic igneous rocks in southern Tibet. *Lithos*, 96(1–2): 225–242
- Mo XX, Zhao ZD, Zhu DC, Yu XH, Dong GC and Zhou X. 2009. On the lithosphere of Indo-Asia collision zone in southern Tibet: Petrological and geochemical constraints. *Earth Science*, 34(1): 17–27 (in Chinese with English abstract)
- Pan GT, Ding J and Wang LQ. 2004. Geological Map (1:1500000) of Qinghai-Xizang (Tibetan) Plateau and Adjacent Areas. Chengdu: Chengdu Cartographic Publishing House (in Chinese)
- Pan GT, Mo XX, Hou ZQ, Zhu DC, Wang LQ, Li GM, Zhao ZD, Geng QR and Liao ZL. 2006. Spatial-temporal framework of the Gangdese Orogenic Belt and its evolution. *Acta Petrologica Sinica*, 22(3): 521–533 (in Chinese with English abstract)
- Qi XX, Li TF, Li HQ, Cai ZH and Yu CL. 2010. Zircon SHRIMP U-Pb dating for garnet-rich granite veins in high-pressure granulites from the Namche Barwa complex, eastern syntaxis of the Himalaya, and the relationship with exhumation. *Acta Petrologica Sinica*, 26(3): 75–984 (in Chinese with English abstract)
- Ravikant V, Wu FY and Ji WQ. 2009. Zircon U-Pb and Hf isotopic constraints on petrogenesis of the Cretaceous-Tertiary granites in eastern Karakoram and Ladakh, India. *Lithos*, 110(1–4): 153–166
- Rickwood PC. 1989. Boundary lines within petrologic diagrams which use oxides of major and minor elements. *Lithos*, 22(4): 247–263
- Rollison HR. 1993. Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation, Interpretation. New York: Longman Scientific & Technical Limited, 113–121
- Schärer U, Xu RH and Allègre CJ. 1984. U-Pb geochronology of Gangdese (Transhimalaya) plutonism in the Lhasa-Xigaze region, Tibet. *Earth and Planetary Science Letters*, 69(2): 311–320
- Seward D and Burg JP. 2008. Growth of the Namche Barwa Syntaxis and associated evolution of the Tsangpo Gorge: Constraints from structural and thermochronological data. *Tectonophysics*, 451(1–4): 282–289
- Sun SS and McDonough WF. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. In: Saunders AD and Norry MJ (eds.). *Magmatism in Oceanic Basins*. Geological Society, London, Special Publications, 42(1): 313–345
- Wang Q, Xu JF, Zhao ZH, Zi F, Tang GJ, Jia XH and Jiang ZQ. 2008. Tectonic setting and associated rock suites of adakitic rocks. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 27(4): 344–350 (in Chinese with English abstract)
- Wen DR, Chung SL, Song B, Iizuka Y, Yang HJ, Ji JQ, Liu DY and Gallet S. 2008. Late cretaceous Gangdese intrusions of adakitic geochemical characteristics, SE Tibet: Petrogenesis and tectonic implications. *Lithos*, 105(1–2): 1–11
- Xu RH, Schärer U and Allègre CJ. 1985. Magmatism and metamorphism in the Lhasa Block (Tibet): A geochronological study. *Journal of Petrology*, 93(1): 41–57
- Xu ZQ, Cai ZH, Zhang ZM, Li HQ, Chen FY and Tang ZM. 2008. Tectonics and fabric kinematics of the Namche Barwa terrane, Eastern Himalayan Syntaxis. *Acta Petrologica Sinica*, 24(7): 1463–1476 (in Chinese with English abstract)
- Xu ZQ, Ji SC, Cai ZH, Zeng LS, Geng QR and Cao H. 2012. Kinematics and dynamics of the Namche Barwa Syntaxis, eastern Himalaya: Constraints from deformation, fabrics and geochronology. *Gondwana Research*, 21(1): 19–36
- Yin A and Harrison TM. 2000. Geologic evolution of the Himalayan-Tibetan Orogen. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 28(1): 211–280
- Zhang HF, Harris N, Parrish R, Kelley S, Zhang L, Rogers N, Argles T and King J. 2004. Causes and consequences of protracted melting of the mid-crust exposed in the North Himalayan antiform. *Earth and Planetary Science Letters*, 228(1–2): 195–212
- Zhang ZM, Wang JL, Dong X, Zhao GC, Yu F, Wang W, Liu F and Geng GS. 2009. Petrology and geochronology of the charnockite from the southern Gangdese belt, Tibet: Evidence for the Andean-type orogen. *Acta Petrologica Sinica*, 25(7): 1707–1720 (in Chinese with English abstract)
- Zhang ZM, Zhao GC, Santosh M, Wang JL, Dong X and Shen K. 2010. Late Cretaceous charnockite with adakitic affinities from the Gangdese batholith, southeastern Tibet: Evidence for Neo-Tethyan mid-ocean ridge subduction? *Gondwana Research*, 17(4): 615–631
- Zheng LL, Jin ZM, Pan GT, Geng QR and Sun ZM. 2004. Geological features and tectonic evolution in the Namjagbarwa area, Eastern Himalayas. *Acta Geologica Sinica*, 78(6): 744–751 (in Chinese with English abstract)
- Zhu DC, Pan GT, Mo XX, Wang LQ, Liao ZL, Zhao ZD, Dong GC and Zhou CY. 2006. Late Jurassic-Early Cretaceous geodynamic setting in middle-northern Gangdese: New insights from volcanic rocks. *Acta Petrologica Sinica*, 22(3) 534–546 (in Chinese with English abstract)
- Zhu DC, Pan GT, Wang LQ, Mo XX, Zhao ZD, Zhou CY, Liao ZL, Dong GC and Yuan SH. 2008. Tempo-spatial variations of Mesozoic magmatic rocks in the Gangdise belt, Tibet, China, with a discussion of geodynamic setting-related issues. *Geological Bulletin of China*, 27(9): 1535–1550 (in Chinese with English abstract)
- Zhu DC, Mo XX, Wang LQ, Zhao ZD, Niu YL, Zhou CY and Yang YH. 2009. Petrogenesis of highly fractionated I-type granites in the Zayu area of eastern Gangdese, Tibet: Constraints from zircon U-Pb geochronology, geochemistry and Sr-Nd-Hf isotopes. *Science in China (Series D)*, 52(9): 1223–1239

附中文参考文献

董国臣, 莫宣学, 赵志丹, 朱弟成, 王亮亮, 陈涛, 李冰. 2006. 冈底

- 斯岩浆带中段岩浆混合作用: 来自花岗杂岩的证据. 岩石学报, 22(4): 835-844
- 管琪, 朱弟成, 赵志丹, 张亮亮, 刘敏, 李小伟, 于枫, 莫宣学. 2010. 西藏南部冈底斯带东段晚白垩世埃达克岩: 新特提斯洋脊俯冲的产物. 岩石学报, 26(7): 2165-2179
- 侯可军, 李延河, 邹天人, 曲晓明, 石玉若, 谢桂青. 2007. LA-MC-ICP-MS 锆石 Hf 同位素的分析方法及地质应用. 岩石学报, 23(10): 2595-2604
- 江万, 莫宣学, 赵崇贺, 郭铁鹰, 张双全. 1999. 青藏高原冈底斯带中段花岗岩类及其中铁镁质微粒包体地球化学特征. 岩石学报, 15(1): 89-97
- 李皓扬, 钟孙霖, 王彦斌, 朱弟成, 杨进辉, 宋彪, 刘敦一, 吴福元. 2007. 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. 岩石学报, 23(2): 493-500
- 莫宣学, 赵志丹, 邓晋福, 董国臣, 周肃, 郭铁鹰, 张双全, 王亮亮. 2003. 印度-亚洲大陆主碰撞过程的火山作用响应. 地学前缘, 10(2): 135-148
- 莫宣学, 赵志丹, 朱弟成, 喻学惠, 董国臣, 周肃. 2009. 西藏南部印度-亚洲碰撞带岩石圈: 岩石学-地球化学约束. 地球科学, 34(1): 17-27
- 潘桂棠, 丁俊, 王立全. 2004. 1:1500000 青藏高原及邻区地质图及说明书. 成都: 成都地图出版社
- 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. 2006. 冈底斯造山带的时空结构及演化. 岩石学报, 22(3): 521-533
- 戚学祥, 李天福, 李化启, 蔡志慧, 于春林. 2010. 东喜马拉雅构造结南迦巴瓦群高压麻粒岩中含石榴石花岗岩脉锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其与折返作用. 岩石学报, 26(3): 975-984
- 王强, 许继峰, 赵振华, 资锋, 唐功建, 贾小辉, 姜子琦. 2008. 埃达克质岩的构造背景与岩石组合. 矿物岩石地球化学通报, 27(4): 344-350
- 许志琴, 蔡志慧, 张泽明, 李化启, 陈方远, 唐哲民. 2008. 喜马拉雅东构造结-南迦巴瓦构造及组构运动学. 岩石学报, 24(7): 1463-1476
- 张泽明, 王金丽, 董昕, 赵国春, 于飞, 王伟, 刘峰, 耿官升. 2009. 青藏高原冈底斯带南部的紫苏花岗岩: 安第斯型造山作用的证据. 岩石学报, 25(7): 1707-1720
- 郑来林, 金振民, 潘桂棠, 耿全如, 孙志明. 2004. 东喜马拉雅南迦巴瓦地区区域地质特征及构造演化. 地质学报, 78(6): 744-751
- 朱弟成, 潘桂棠, 莫宣学, 王立全, 廖忠礼, 赵志丹, 董国臣, 周长勇. 2006. 冈底斯中北部晚侏罗世-早白垩世地球动力学环境火山岩约束. 岩石学报, 22(3): 534-546
- 朱弟成, 潘桂棠, 王立全, 莫宣学, 赵志丹, 周长勇, 廖忠礼, 董国臣, 袁四化. 2008. 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. 地质通报, 27(9): 1535-1550
- 朱弟成, 莫宣学, 王立全, 赵志丹, 牛耀龄, 周长勇, 杨岳衡. 2009. 西藏冈底斯东部察隅高分异 I 型花岗岩的成因: 锆石 U-Pb 年代学、地球化学和 Sr-Nd-Hf 同位素约束. 中国科学(D 辑), 39(7): 833-848