

孟元库, 许志琴, 陈希节, 等. 冈底斯中段碱长花岗岩锆石 U-Pb-Hf 同位素特征及地质意义[J]. 中国地质, 2015, 42(5): 1202-1213.
Meng Yuanku, Xu Zhiqin, Chen Xijie, et al. Isotope study of alkali-feldspar granite zircon in the middle Gangdise batholith and its geological significance[J]. Geology in China, 2015, 42(5): 1202-1213(in Chinese with English abstract).

冈底斯中段碱长花岗岩锆石 U-Pb-Hf 同位素特征 及地质意义

孟元库 许志琴 陈希节 马绪宣 马士委

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

摘要: 本文对冈底斯岩浆带中段谢通门塔玛地区碱长花岗岩进行了原位 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年和 LA-MC-ICP-MS 锆石 Lu-Hf 同位素分析。研究表明, 采自该岩体不同部位的两件锆石 U-Pb 同位素加权平均年龄分别为 (40.02 ± 0.39) Ma 和 (40.65 ± 0.32) Ma, 具有几乎一致的地质年龄, 即碱长花岗岩侵位结晶年龄为 40 Ma 左右。LA-MC-ICP-MS 锆石 Lu-Hf 同位素研究显示, $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值在 0.282633~0.282878, 平均值为 0.282765, 计算所得的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值介于 -4.08~4.15, 平均值为 0.28, 峰值在 -1~+1 之间; T_{DMC} 模式年龄在 822~1373 Ma, 平均值为 1075 Ma, 峰值年龄为 1000~1200 Ma。其次, 样品的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值具有正负相间的特点, $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 也相对较小, 为典型的壳幔混染型, 岩浆源区主要以古老地壳的熔融为主。综合研究表明, 谢通门塔玛地区碱长花岗岩主要是由新特斯洋板片的断离, 致使软流圈地幔上涌, 引起拉萨地体地壳物质的熔融、再循环而形成的, 在这个过程中有部分幔源物质的加入。

关键词: 锆石 U-Pb 测年; Lu-Hf 同位素; 碱长花岗岩; 冈底斯岩浆带

中图分类号: P597^{+.1}; P597^{+.3} 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2015)05-1202-12

Isotope study of alkali-feldspar granite zircon in the middle Gangdise batholith and its geological significance

MENG Yuan-ku, XU Zhi-qin, CHEN Xi-jie, MA Xu-xuan, MA Shi-wei

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

Abstract: In this paper, the authors conducted zircon LA-ICP-MS U-Pb dating and Lu-Hf analysis of the alkali-feldspar granite in Tama of Xietongmen region along the middle Gangdise magmatic belt. The results suggest that the weighted mean ages of two samples are (40.02 ± 0.39) Ma and (40.65 ± 0.32) Ma for the pluton, respectively. In essence, the two ages are of the same geological significance in that they both represent the crystallization age or emplacement age of the alkali-feldspar granite. Zircon Lu-Hf analytical data reveal that values of $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ vary from 0.282633 to 0.282878 (averaging 0.282765), and the values of $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ range

收稿日期: 2015-06-15; 改回日期: 2015-06-25

基金项目: 国家自然科学基金创新群体(40921001)、国土资源公益性基金项目(201211093)、中国地质调查局项目(12120115026801)以及大陆构造与动力学国家重点实验室资助基金(Z1301-a12)联合资助。

作者简介: 孟元库, 男, 1986年生, 博士, 构造地质学专业, 主要从事韧性构造变形及岩石大地构造研究; E-mail: ykmen@foxmail.com。

from -4.08 to 4.15 (0.28 on average), with the peak values of $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ varying from -1 to 1. T_{DMC} model ages are from 822 Ma to 1373 Ma (averaging 1075 Ma) with peak model ages being ca.1000-1200 Ma. The obvious feature is that the values of the $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ show alternating positive and negative values, corresponding to a small value and indicating the crustal-mantle contamination process, which resulted from partial melting of the ancient crust. Combined with geological setting and study results, the authors consider that the alkali-feldspar granite might have generated from the slab break off of the Neo-Tethys oceanic crust, which led to upwelling of the asthenosphere and further induced the partial melting and recycling of the ancient crust. During the process, the mantle materials played a vital role in forming the alkali-feldspar granite in the study area.

Key words: zircon U-Pb dating; Lu-Hf isotopes; alkali-feldspar granite; Gangdise magmatic belt

About the first author: MENG Yuan-ku, male, born in 1986, doctor candidate, majors in structural geology, ductile deformation and petro-tectonics; E-mail: ykmeng@foxmail.com.

地球上新生代以来最为壮观的地质事件即印度-亚洲大陆的碰撞,两大洲的汇聚、碰撞形成了最新、最厚、最高的高原——青藏高原^[1-2]。对于高原的形成过程及岩石记录的研究始终是地学研究的焦点和热点^[3]。在高原的地学研究中,岩浆岩的研究占有非常重要的地位,主要因为岩浆来自于地球深部,蕴含着丰富的地质信息,是了解地球深部(岩石圈地幔)最为直接的手段和证据,因此岩浆岩及其相伴的包体常常被誉为是研究岩石圈地幔构造演化的“窗口”(window)和“探针”(Lithoprobe)^[4]。在板片俯冲及后期陆-陆碰撞的过程中,高原发生了强烈的岩浆活动,形成了广泛分布高原且种类繁多的岩浆岩,其中又以冈底斯岩浆弧(带)(Gangdese magmatic arc)的岩浆岩分布最为集中^[5-6]。西藏冈底斯岩浆岩带在大地构造上位于印度-雅鲁藏布江缝合带(IYSZ)和班公湖-怒江缝合带(BNSZ)之间,东西长度2500 km左右,南北宽100~300 km,是青藏高原最为重要的一条岩浆构造带^[2,5,7-8]。冈底斯岩浆岩带出露规模十分巨大,约占西藏岩浆岩出露面积的80%以上^[5]。传统上,拉萨地体也被称为冈底斯造山带^[8-9],或横跨印度-亚洲大陆喜马拉雅转换带^[10]。根据构造域内弧-弧、弧-陆碰撞结合带和夹持其间的陆块或不同性质的各类盆地和火山岩浆弧,潘桂棠等^[8]又将冈底斯造山带细分为班公湖-怒江缝合带、昂龙岗日-班戈-伯舒拉岭岩浆弧、狮泉河-拉果错-阿索-永珠-纳木错-嘉黎-波密弧-弧碰撞带、冈底斯-念青唐古拉复合火山岩浆弧、日喀则弧前盆地和雅鲁藏布江缝合带6个次级地质单元。除去冈底斯带南北的缝合带,结合冈底斯内部的洛巴堆-米拉山区域大断层和狮泉河-拉果错-永珠-纳木错-嘉黎蛇绿

混杂岩带,Zhu et al^[11]将冈底斯岩浆岩带从北到南划分为北冈底斯带,中冈底斯带和南冈底斯带。

狭义上的冈底斯岩浆带(弧)被定义为拉萨地体南部火山-岩浆作用特别发育的地带,即南冈底斯^[12-13](图1-a)。冈底斯岩浆弧的研究始于20世纪60年代,随后中科院青藏高原考察队(1973-1978年)、中法合作(1980-1982年)和中-英合作(1985年)对冈底斯岩浆带进行了较为详细的研究,获得了一大批年代学及同位素地球化学数据以及近15年来中国学者在冈底斯岩浆带的年代学、岩石成因方面也取得了突破性进展,将冈底斯岩浆演化研究推到了一个新的高度^[5,10,14-16]。

在板块的碰撞中,形成了一类钾长花岗岩或者碱长花岗岩,它们的出现和分布对大地构造的演化具有很好的指示意义,也是板块后碰撞(post-collision)过程中岩石学研究的一个热点问题^[17-23]。在前人工作的基础之上,本论文选择冈底斯中段谢通门塔玛地区研究程度较低的碱长花岗岩作为研究对象,主要通过LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年、Lu-Hf 同位素特征并结合区域构造背景,探讨碱长花岗岩形成的动力学背景和冈底斯造山带新生代的壳幔演化过程。

1 地质背景及岩相学特征

研究区位于冈底斯岩浆弧中段南缘,毗邻雅鲁藏布江缝合带(图1-a)。在地理位置上紧邻谢通门县塔玛乡,交通相对便利(图1-b)。区内主要以花岗岩复式岩体为主,花岗岩体中发育有一条脆-韧性剪切带,该剪切带是花岗岩体中的主要地质构造(图1-c)。在1:250000区域地质调查时,对研究区的花岗岩复式岩体进行了解体,厘定碱长花岗岩、

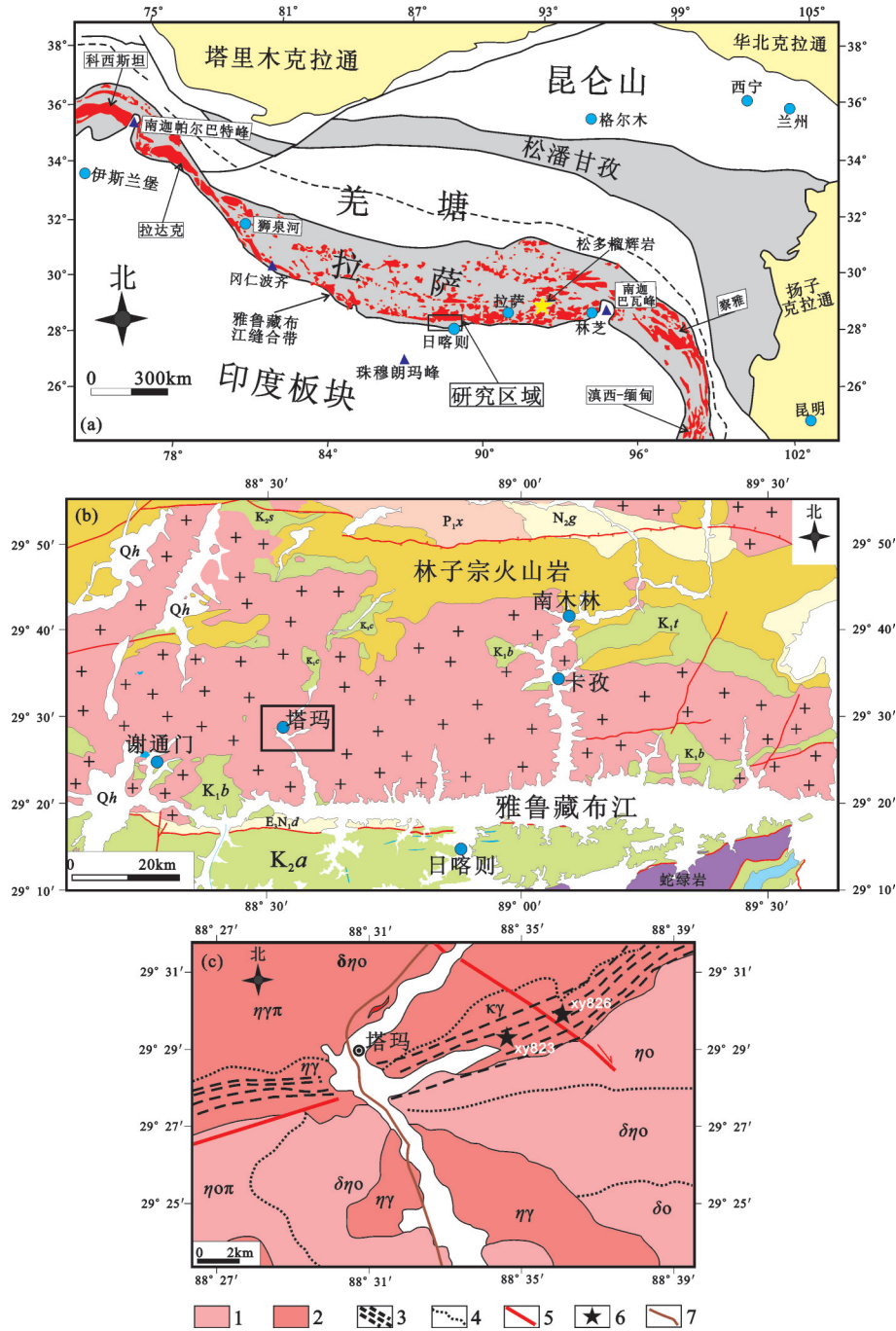


图1 青藏高原及邻区大地构造简图(a,据[15]改编)和研究区及邻区地质分布图(b)及研究区采样图(c)

1—白垩纪花岗岩;2—新生代花岗岩;3—韧性剪切带;4—岩体边界;5—断层;6—采样点;7—公路

P_{1x}—下拉组;K_{1b}—比马组;K_{1c}—楚木龙组;K_{1t}—塔克拉克组;K_{2a}—日喀则群昂仁组;K_{2s}—设兴组;E_{3N1d}—大竹卡组;N_{2g}—噶扎村组;ηγπ—黑云二长花岗岩;δηο—石英二长闪长岩;κγ—碱长花岗岩;ηοπ—黑云角闪石英二长岩;ηγ—二长花岗岩;δο—石英闪长岩;ηο—石英二长岩

Fig. 1 (a) Sketch geotectonic map of the Tibetan Plateau and adjacent regions (after reference [15]); (b) geological sketch map of the study area and adjacent areas; (c) locality map of Tama area of Xietongmen, southern Tibet

1—Cretaceous granites; 2—Cenozoic granites; 3—Ductile shear zone; 4—Boundary of granite plutons; 5—Faults; 6—Sampling site; 7—Road

P_{1x}—Xiala Formation; K_{1b}—Bima Formation; K_{1c}—Chumulong Formation; K_{1t}—Takela Formation; K_{2a}—Angren Formation of Xigaze Group; K_{2s}—Shexing Formation; E_{3N1d}—Dazhuka Formation; N_{2g}—Gazhacun Formation; ηγπ—Biotite adamellite; δηο—Quartz monzobiorite; κγ—Alkali-feldspar granite; ηοπ—Biotite hornblende quartz monzonite; ηγ—Monzonitic granite; δο—Quartz diorite; ηο—Quartz monzonite

花岗闪长岩、石英二长岩、二长花岗岩、石英闪长岩等。此外,区内岩体主要由白垩纪花岗岩和新生代花岗岩组成。白垩纪花岗岩具有正的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值,地球化学显示火山弧花岗岩的特征,并且前人认为白垩纪花岗岩的形成多与新特提斯洋向北的低角度俯冲有关^[15]。区内新生代花岗岩具有高度演化的特征,Hf同位素特征变化范围较小,具有正的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值,表现出一种壳幔混合的特征,该期岩浆的形成和新特提斯洋板片的断离有关^[15]。结合前人研究成果,选择区内研究程度较低的碱长花岗岩为研究对象。前人对其年代学研究主要基于K-Ar法获得。由于封闭温度的限制,云母族等矿物的Ar封闭温度远远低于碱长花岗岩的结晶温度,导致K-Ar法通常不能准确给出岩体的侵位、结晶年龄^[24-25]。基于以上,本文对该碱长花岗岩进行LA-ICP-MS锆石U-Pb定年和Lu-Hf同位素分析,对前人所做的工作进行了较大的修改,补充了碱长花岗岩的成因来源分析。对碱长花岗岩进行了详细的野外地质调查后,选取岩体不同的部位进行了样品采集(样品xy823和xy826)。

肉红色碱长花岗岩主要由石英(20%~25%)、碱性长石(条纹长石)(55%~60%)组成,含有少量斜长石(5%~10%)以及黑云母(5%~10%),副矿物主要有锆石、磷灰石、磁铁矿等(图2)。薄片,黑云母呈浅黄绿色到暗绿色,属于富铁黑云母。岩石整体上为块状构造,部分遭受糜棱岩化,形成初糜棱岩化花岗岩,在野外呈现为眼球状花岗岩(图2-a, b)。石英多为条带状,发育带状消光、变形纹、亚颗粒化甚至在颗粒边缘有动态重结晶现象(图2-d, f);碱性长石卡式双晶明显,并可见明显的微破裂(图2-c, e);酸性斜长石除微破裂外,还发育扭折、双晶弯曲等显微构造(图2-c)。整个岩体总体显示出糜棱岩化花岗岩到碎裂岩化花岗岩的变形构造特征,切过岩体核部变形较强。碱长花岗岩整体为中-粗粒花岗结构,块状构造,碱性长石呈斑状,肉红色,外貌特征十分明显(图2-b),是碱长花岗岩显著的特点。该岩体整体较为新鲜,除部分长石有高龄土化外,其余矿物没有发生明显的蚀变。

2 分析方法

样品是在廊坊科大岩石矿物分选技术服务有

限公司挑选完成的。具体步骤如下:将所测试的花岗岩样品首先物理粉碎,按照重力和磁选的方法进行初步筛选,然后在双目镜下进一步挑选,选出晶形较好、透明度和色泽度高的锆石,并且确保已选的锆石完整,没有微小裂隙或破裂。然后,把已经挑选好的锆石粘在环氧树脂上,经抛光后进行透射光、反射光和阴极发光扫描电镜照相(CL images)。阴极发光照相是在中国地质科学院地质研究所大陆构造与动力学国家重点实验室高分辨扫描电镜-阴极发光实验室完成(SEM-EDS-CL)。最后根据CL图像选择环带较为发育和自形程度高的锆石进行LA-ICP-MS定年。

锆石U-Pb定年在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室完成。所测试的仪器型号为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 。实验中,剥蚀物质的载气为He气,气体流速为270 mL/min,工作电压为27.1 kv,剥蚀激光的能量为29 J/ am^2 。实验中91500作为标样进行同位素分馏校正,每隔8个测点用两个91500标样校正;其次 ^{29}Si 和Nist610分别为内外标来校正元素含量,更加具体的实验操作方法见Liu YS et al^[26-27]。数据的处理采用ICPMSDataCal9.0软件进行样品的同位素比值和U-Pb表面年龄数据处理,并利用Andersen^[28]方法对所测的数据进行了普通铅校正。锆石谐和年龄和加权平均年龄图采用Isoplot3.0(Ludwig, 2003)宏加载在Excel2003中完成^[29]。

锆石的Lu-Hf同位素分析在南京大学内生金属矿床成矿机制国家重点实验室完成,实验是在Nu Plasma HR多接收电感耦合等离子质谱仪(MC-ICP-MS)上进行的。本次试验所测定的锆石标样91500的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 数值为0.282308 \pm 12,该值与溶液法获得的值0.282302 \pm 8在误差范围内相一致^[30]。Lu-Hf同位素分析详细的原理和操作步骤可见Wu et al^[31]、吴福元等^[32]及侯可军等^[33]。

3 分析结果

3.1 锆石U-Pb年代学

锆石特点:从阴极发光CL图像上可以看出,锆石大小从100 μm 到220 μm 不等,颗粒大小相对均匀,半自形到自形,短柱状到长柱状,长短轴之比

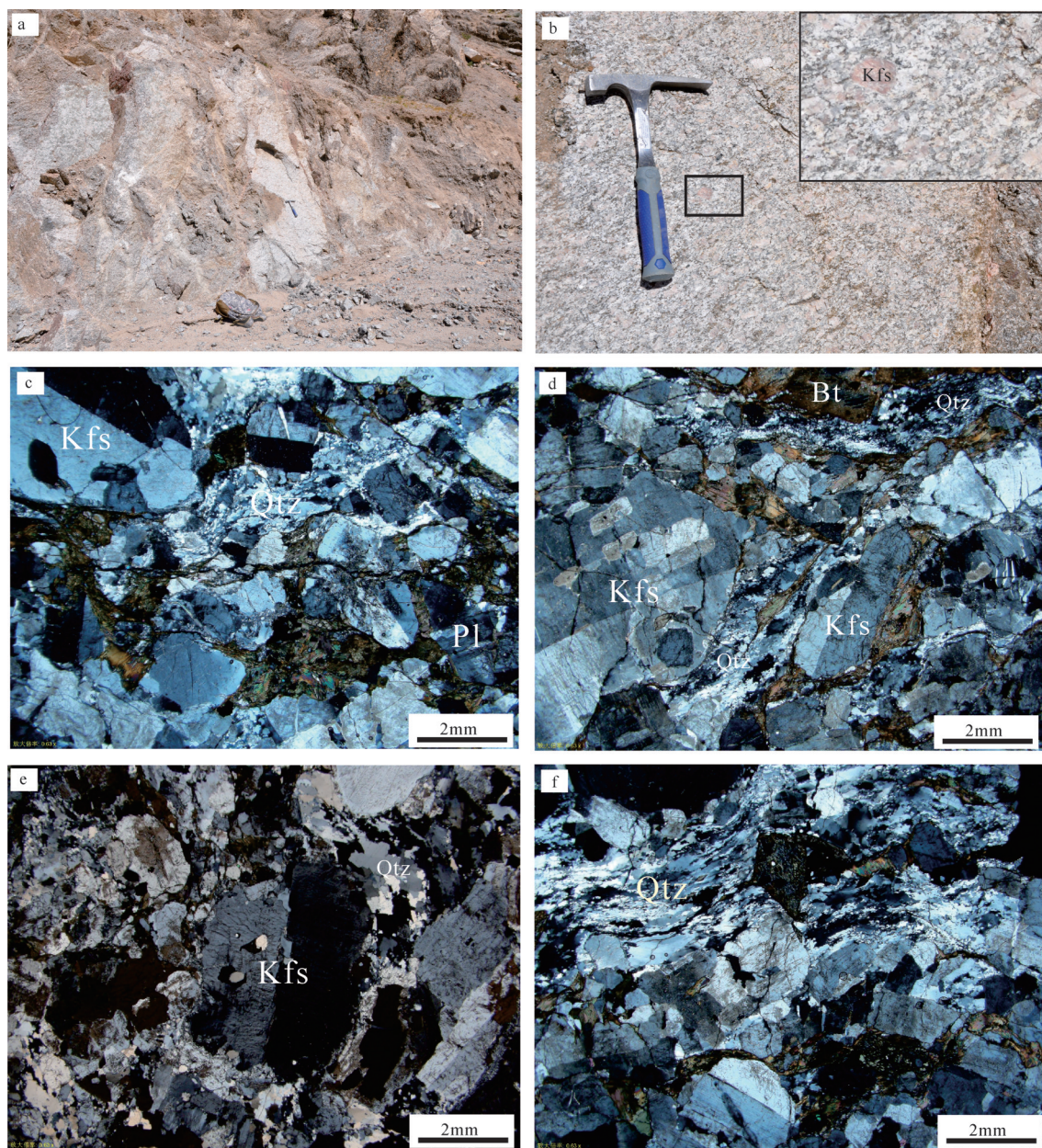


图2 碱长花岗岩野外露头及显微照片

Bt—黑云母; Kfs—钾长石; Pl—钾长石; Qtz—石英

Fig. 2 Field outcrop and microphotographic photographs of the alkali-feldspar granite

Bt—Biotite; Kfs—K-feldspar; Pl—Plagioclase; Qtz—Quartz

1:1~3:1, 部分锆石内部发育有暗色包体。CL 阴极发光图中可见明显的岩浆韵律环带(图3), 此外, 2件样品的 $^{232}\text{Th}/\text{U}^{238}$ 的比值均大于0.4(表1), 显示典型的酸性侵入岩锆石特征^[34]。在 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ — $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 谐和图上, 2件样品均落在谐和曲线上或者谐和曲线附近(图4), 表明锆石在形成后没有明显的普通 Pb 丢失。对两组样品进行年代学分析, 去除掉个别

年龄不谐和的测试点, 对剩下的测点进行加权平均计算, 获得的年龄分别为: xy823=(40.02±0.39)Ma (95%置信度, MSWD=1.6); xy826=(40.65±0.32)Ma (95%置信度, MSWD=1.09)。两件样品年龄在误差范围内几乎一致, 因此该年龄具有高的可信度, 可以很好地反映碱长花岗岩形成的年龄—侵位结晶年龄。测试结果见表1。

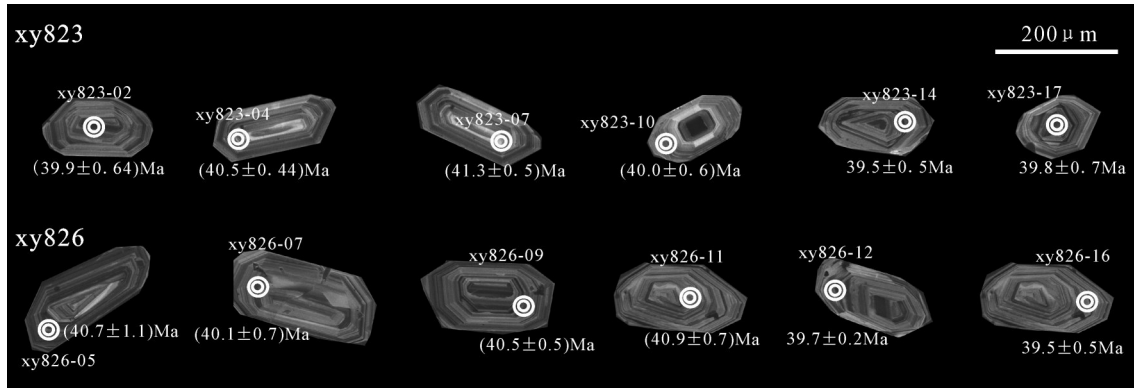


图3 代表性锆石阴极发光CL图像及 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄值
(大圈为测年位置,小圈为Lu-Hf测点位置)
Fig.3 CL images of representative zircons and ages of $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$
(large circle for U-Pb dating; small circle for Lu-Hf analysis)

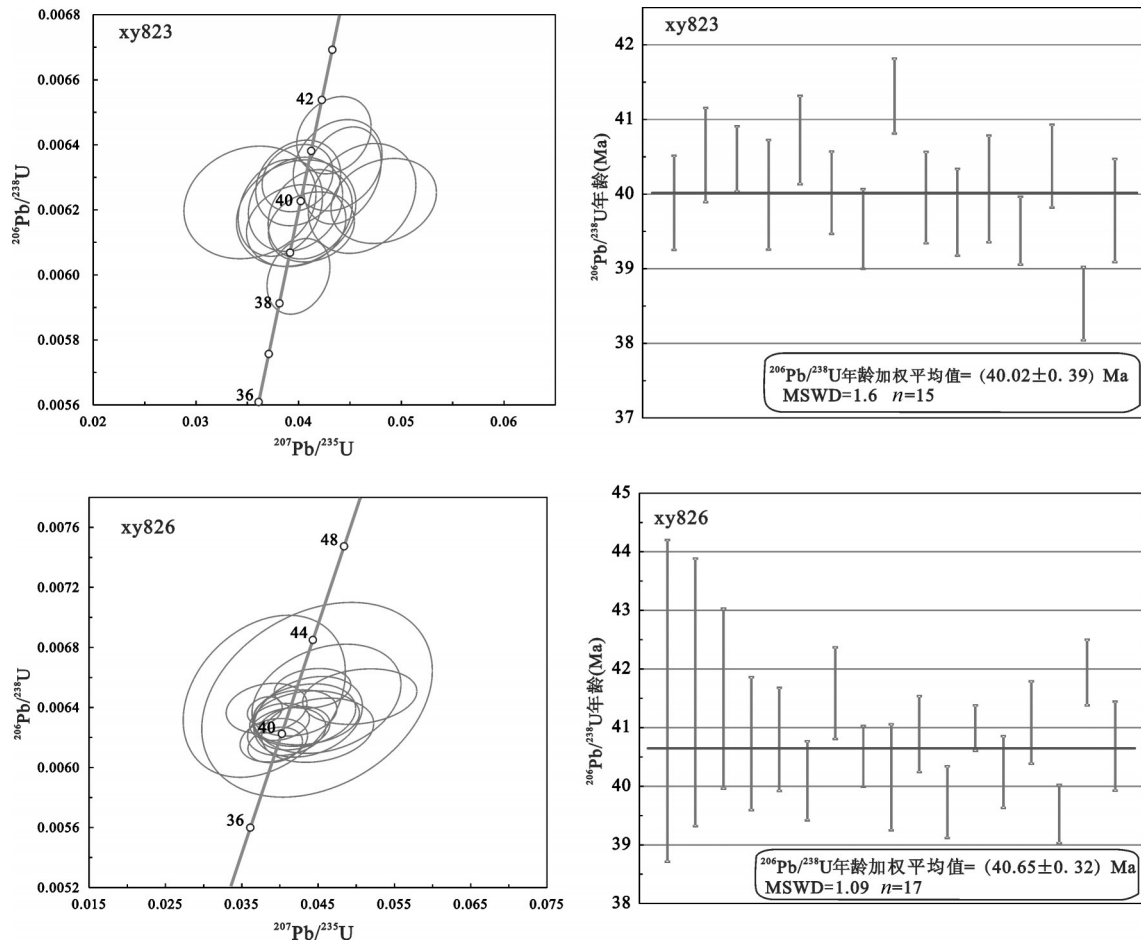


图4 碱长花岗岩锆石 U-Pb 谐和年龄和加权平均年龄图
Fig.4 Zircon U-Pb concordia diagram and average age of the alkali-feldspar granite

表1 碱长花岗岩锆石LA-ICP-MS U-Pb 测年结果
Table 1 Zircon LA-ICP-MS U-Pb isotopic data of the alkali-feldspar granite

测点号	含量/ 10^{-6}		同位素比值						表面年龄/Ma				
	Th	U	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$\pm 1 \delta$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$\pm 1 \delta$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm 1 \delta$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$\pm 1 \delta$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm 1 \delta$
xy823-01	825	871	0.95	0.05472	0.00490	0.05212	0.00457	0.00710	0.00012	52	4	46	0.8
xy823-02	968	969	1.00	0.04500	0.00337	0.03822	0.00271	0.00621	0.00010	38	3	40	0.6
xy823-03	1525	1307	1.17	0.05171	0.00306	0.04427	0.00249	0.00631	0.00010	44	2	41	0.6
xy823-04	1079	1830	0.59	0.04591	0.00267	0.03989	0.00228	0.00630	0.00007	40	2	40	0.4
xy823-05	828	564	1.47	0.04246	0.00534	0.03526	0.00425	0.00622	0.00011	35	4	40	0.7
xy823-06	976	1099	0.89	0.05161	0.00365	0.04380	0.00286	0.00634	0.00009	44	3	41	0.6
xy823-07	475	1103	0.43	0.05636	0.00402	0.04829	0.00339	0.00623	0.00009	48	3	40	0.6
xy823-08	924	988	0.94	0.04695	0.00374	0.03976	0.00320	0.00615	0.00008	40	3	40	0.5
xy823-09	1111	1288	0.86	0.04909	0.00279	0.04343	0.00239	0.00643	0.00008	43	2	41	0.5
xy823-10	765	985	0.78	0.04698	0.00364	0.03969	0.00303	0.00622	0.00010	40	3	40	0.6
xy823-11	880	1079	0.82	0.04815	0.00314	0.04112	0.00270	0.00619	0.00009	41	3	40	0.6
xy823-12	537	1006	0.53	0.05393	0.00412	0.04618	0.00346	0.00624	0.00011	46	3	40	0.7
xy823-13	626	819	0.77	0.06896	0.00816	0.05729	0.00638	0.00641	0.00014	57	6	41	0.9
xy823-14	1031	1391	0.74	0.04820	0.00324	0.04125	0.00276	0.00615	0.00007	41	3	40	0.5
xy823-15	711	1243	0.57	0.04568	0.00306	0.03996	0.00273	0.00628	0.00009	40	3	40	0.6
xy823-16	1031	1847	0.56	0.04852	0.00256	0.03999	0.00202	0.00600	0.00008	40	2	39	0.5
xy823-17	519	707	0.73	0.04632	0.00444	0.03976	0.00384	0.00619	0.00011	40	4	40	0.7
xy826-01	406	685	0.59	0.05279	0.01209	0.04486	0.00997	0.00645	0.00043	45	10	41	3
xy826-02	2395	1553	1.54	0.04281	0.00813	0.03795	0.00702	0.00647	0.00036	38	7	42	2
xy826-03	485	675	0.72	0.07508	0.01380	0.07001	0.01208	0.00705	0.00034	69	11	45	2
xy826-04	828	787	1.05	0.05207	0.00741	0.04610	0.00644	0.00646	0.00024	46	6	41	2
xy826-05	867	1274	0.68	0.05023	0.00546	0.04369	0.00470	0.00634	0.00018	43	5	41	1
xy826-06	469	685	0.69	0.04999	0.00517	0.04317	0.00446	0.00635	0.00014	43	4	41	0.9
xy826-07	1164	885	1.31	0.04908	0.00416	0.04088	0.00338	0.00624	0.00011	41	3	40	0.7
xy826-08	524	586	0.89	0.05867	0.00588	0.05046	0.00494	0.00647	0.00012	50	5	42	0.8
xy826-09	943	1295	0.73	0.04614	0.00299	0.03995	0.00258	0.00630	0.00008	40	3	41	0.5
xy826-10	679	632	1.07	0.05240	0.00587	0.04495	0.00485	0.00625	0.00014	45	5	40	0.9
xy826-11	1147	909	1.26	0.04807	0.00426	0.04200	0.00361	0.00636	0.00010	42	4	41	0.7
xy826-12	1266	1310	0.97	0.04728	0.00380	0.03920	0.00292	0.00618	0.00010	39	3	40	0.6
xy826-13	968	3095	0.31	0.04290	0.00172	0.03801	0.00151	0.00638	0.00006	38	1	41	0.4
xy826-14	569	976	0.58	0.04917	0.00373	0.04182	0.00312	0.00626	0.00010	42	3	40	0.6
xy826-15	666	746	0.89	0.04453	0.00424	0.03825	0.00350	0.00639	0.00011	38	3	41	0.7
xy826-16	780	1221	0.64	0.04672	0.00287	0.03938	0.00236	0.00615	0.00008	39	2	40	0.5
xy826-17	986	957	1.03	0.04930	0.00373	0.04428	0.00331	0.00653	0.00009	44	3	42	0.6
xy826-18	818	957	0.85	0.04976	0.00540	0.04344	0.00461	0.00633	0.00012	43	4	41	0.8

3.2 Lu-Hf 同位素

Lu-Hf 是近十年来快速发展起来的一种同位素定年和地球化学示踪技术,在鉴别岩浆来源和岩浆作用过程具有十分广泛的应用^[31-33]。由于锆石 Lu-Hf 体系具有很高的封闭温度,并且不易被后期流体、热事件所改造,即使是麻粒岩相的条件下,锆石仍然可以保留最原始的 Hf 同位素特征。这一特征使得锆石可以很好地记录岩浆岩源区不同性质的原岩特征,结合锆石 U-Pb 年龄,能为岩浆起源、地壳生长、演化及壳幔相互作用提供重要的信息^[35-36]。其次,锆石 Hf 是判断岩浆是否具有混染特征的最为有效的方法之一^[37],进而为花岗岩的物源和成因机制提供制约^[38]。此外,Lu-Hf 同位素体系适于锆石等矿物原位分析的特征,使其应用范围大大拓宽。锆石是三大岩类中常见的副矿物,而且具有高的 Hf 含量(0.5%~2%),因此是 Hf 同位素分析较为理想的矿物^[31-32]。

锆石中具有低的 Lu 含量和 Lu/Hf 比值,表明锆石在形成后没有明显的放射性成因 Hf 的积累,所测定的 ¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf 比值基本代表其形成时体系的 Hf 同位素组成^[36],从而为讨论岩石成因及大地构造演化提供了重要的地质信息^[31-32,39-41]。

锆石原位 Hf 同位素的测试在锆石 U-Pb 定年的相同或者相邻部位进行(图中小圈为 Hf 同位素分析测点位置,大圈为锆石 U-Pb 定年),其初始 ¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf 值通过相对应的锆石 U-Pb 年龄进行校正。所有测试的锆石均获得较好 Hf 同位素数据,¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf 的误差值(2σ)均在 0.00005 以内。样品 xy823:¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf 比值远小于 0.002;样品 xy826:¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf 也均小于 0.002。由 ¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf 可以得出,锆石形成后放射性成因的 Hf 积累很少,可以很好地反映锆石形成时岩浆的 Hf 同位素组成特征。其中碱长花岗岩两件样品 xy823 和 xy826 所测试的 21 个点 Hf 同

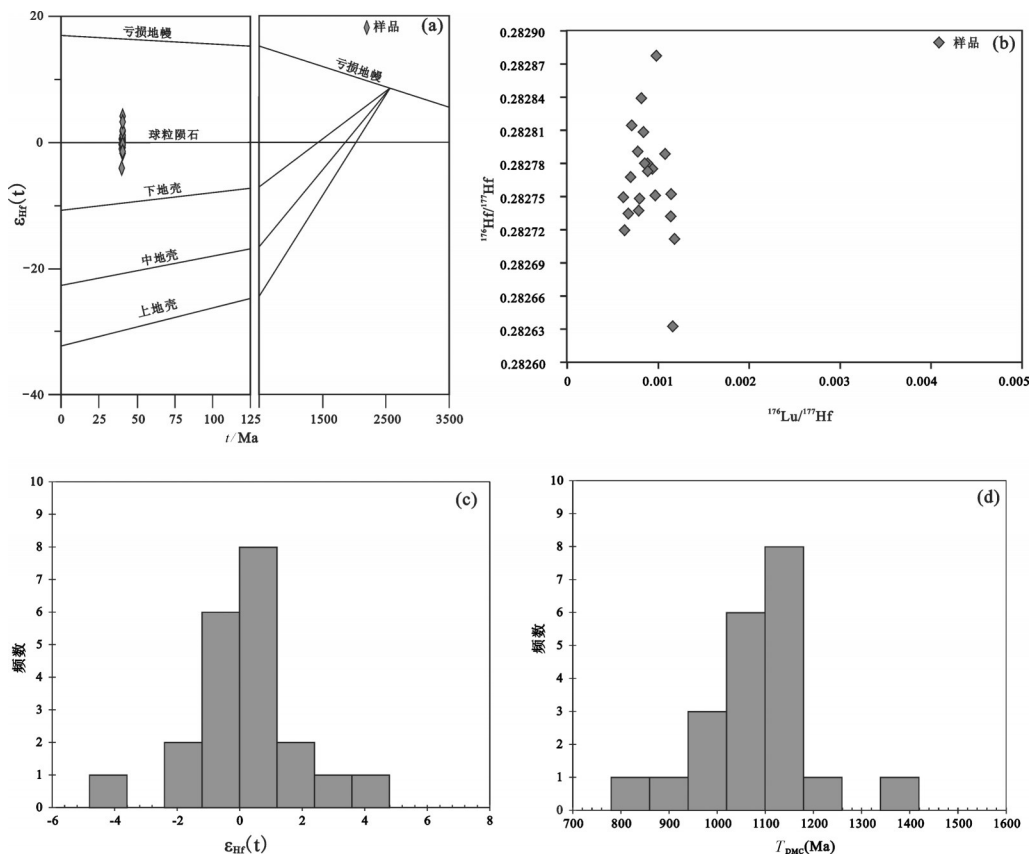


图5 (a)碱长花岗岩的 $\epsilon_{Hf}(t)$ 与锆石 U-Pb 年龄关系图; (b)锆石 ¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf-¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf 关系分布图; (c)和(d)碱长花岗岩锆石 $\epsilon_{Hf}(t)$ 值频率分布与模式年龄直方图

Fig.5 (a) Zircon $\epsilon_{Hf}(t)$ values versus U-Pb ages (Ma) diagram; (b) plot of ¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf versus ¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf; (c) and (d) histogram of $\epsilon_{Hf}(t)$ and Hf model ages of zircons

表2 碱长花岗岩锆石 Lu-Hf 分析结果

Table 2 Zircon Lu-Hf isotope data of the alkali-feldspar granites

测点号	Age/Ma	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	2σ	$f_{\text{Lu/Hf}}$	T_{DM1}	2σ	T_{DMC}	2σ	T_{DM2}
XY823-02	40.02	0.02644	0.00116	0.28263	0.00003	-4.08	1.18	-0.96503	881	47	1373	74	1372
XY823-03	40.02	0.02296	0.00094	0.28278	0.00002	0.52	0.62	-0.97178	674	25	1053	39	1051
XY823-04	40.02	0.02657	0.00114	0.28275	0.00002	-0.30	0.81	-0.96555	711	32	1105	51	1103
XY823-05	40.02	0.02808	0.00114	0.28273	0.00002	-1.01	0.60	-0.96570	739	24	1150	38	1149
XY823-06	40.02	0.01558	0.00062	0.28275	0.00002	-0.39	0.56	-0.98146	705	22	1110	36	1109
XY823-07	40.02	0.01642	0.00067	0.28273	0.00002	-0.45	0.67	-0.97979	727	26	1143	42	1142
XY823-08	40.02	0.02289	0.00098	0.28288	0.00002	4.15	0.60	-0.97047	530	24	822	38	820
XY823-09	40.02	0.01885	0.00084	0.28281	0.00002	1.71	0.53	-0.97475	626	21	978	34	976
XY823-10	40.02	0.03204	0.00118	0.28271	0.00001	-1.72	0.53	-0.96444	769	21	1196	33	1194
XY823-11	40.02	0.01592	0.00070	0.28277	0.00002	0.28	0.65	-0.97904	681	26	1069	41	1067
XY826-01	40.65	0.01951	0.00088	0.28278	0.00002	1.16	0.54	-0.97337	667	22	1041	34	1040
XY826-04	40.65	0.02226	0.00108	0.28279	0.00001	1.00	0.49	-0.96761	658	20	1023	31	1021
XY826-05	40.65	0.02178	0.00085	0.28278	0.00002	0.71	0.55	-0.97432	666	22	1041	35	1040
XY826-06	40.65	0.01830	0.00089	0.28277	0.00002	0.46	0.63	-0.97333	677	25	1057	40	1056
XY826-07	40.65	0.01689	0.00079	0.28274	0.00002	-0.80	0.64	-0.97634	725	26	1137	41	1136
XY826-08	40.65	0.01980	0.00079	0.28275	0.00002	0.03	0.69	-0.97607	710	27	1113	43	1111
XY826-09	40.65	0.01954	0.00077	0.28279	0.00002	1.09	0.69	-0.97666	650	27	1017	44	1015
XY826-10	40.65	0.01711	0.00071	0.28281	0.00002	1.93	0.67	-0.97867	615	27	964	42	962
XY826-11	40.65	0.02390	0.00097	0.28275	0.00002	-0.32	0.60	-0.97083	709	24	1107	38	1105
XY826-12	40.65	0.01599	0.00063	0.28272	0.00002	-1.43	0.58	-0.98102	747	23	1177	36	1176
XY826-13	40.65	0.01871	0.00081	0.28284	0.00002	3.25	0.56	-0.97546	582	22	908	36	907

位素较为一致, $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值在 0.282633~0.282878 之间, 平均值为 0.282765, 计算所得的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值介于 -4.08~4.15, 平均值为 0.28, 峰值在 -1~1 之间; T_{DMC} 模式年龄在 822~1373 Ma, 平均值为 1075 Ma, 峰值年龄为 1000~1200 Ma (图 5)。Hf 同位素的详细测试结果见表 2。

4 讨 论

4.1 年代学意义

冈底斯岩浆弧的岩浆成因和新特提斯洋的打开、俯冲、关闭以及最后印度-欧亚大陆的碰撞具有密切的关系^[15,42-43]。莫宣学^[4]根据岩浆活动的大地构造动力学背景, 将冈底斯中-新生代的岩浆活动划分为 3 个主要阶段: (1) 新特提斯洋板片的俯冲阶段 (>65 Ma); (2) 同碰撞阶段 (65~40 Ma), (3) 后碰撞阶段 (~40 Ma 以来)。其次, 纪伟强等^[15,46]和徐旺

春^[43]搜集了冈底斯岩浆岩的大量锆石 U-Pb 年代学数据, 通过对这些年代学数据进行统计分析, 将冈底斯带的岩浆活动划分为 205~152 Ma, 109~80 Ma, 65~41 Ma, 33~13 Ma 四个主要活动期。本次研究所获得的碱长花岗岩岩体年龄处于第三个活跃期, 在大地构造上, 属于主碰撞期到后碰撞期的转换阶段 (约 40 Ma)^[4]。目前, 在冈底斯关于碰撞到后碰撞转换期的火成岩的研究相对较少, 本文获得的 40 Ma 的碱长花岗岩的年龄补充了主碰撞期到后碰撞期岩浆活动的年代学数据, 从岩石学角度出发, 为板片碰撞的动力学过程及模式提供证据。

4.2 Lu-Hf 同位素

锆石的 Hf 同位素能有效地反映岩浆的来源^[31-32,36]。本文研究的两件样品的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 平均值为 0.28, 表现出一种古老地壳的熔融或再循环。2 件样品的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值明显的为正负相间, 为典型的壳幔混染

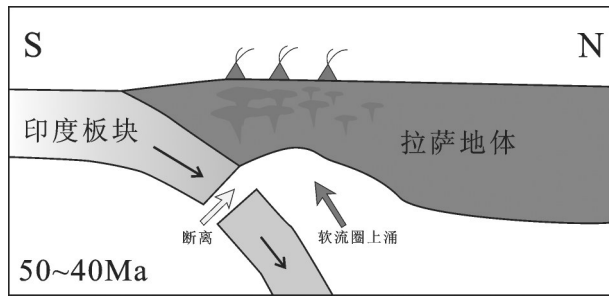


图6 研究区及邻区大地构造演化模式图(据[46]修改)
Fig.6 Tectonic sketch model of the study area and adjacent areas (after reference [46])

型,具有较小的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值,表明在大约40 Ma时幔源物质的底侵中有大量古老地壳物质的加入。其次,样品具有较老的模式年龄, T_{DMC} 在822~1373 Ma,平均值为1075 Ma,峰值年龄为1000~1200 Ma(图5),这有可能说明了拉萨地体中可能零星分布有古老的结晶基底或者中部拉萨地体古老的物质剥蚀进入了南边的冈底斯带,通过混染的方式进入到了古新世—始新世花岗岩中,使得冈底斯带中的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值显著降低,因此,部分地区的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值有可能为负,这也和朱弟成^[44]、董昕^[45]以及徐旺春^[43]等取得的认识相一致。

在冈底斯地区,40~50 Ma的花岗岩锆石 Hf 表现出富集特征, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 数值在0附近^[46],我们所获得的碱长花岗岩的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 均值(0.28)也处在0线附近(图5)。此外,这和曲水岩基中的基性包体的地质时代较为一致^[5],说明了这时在冈底斯地区存在有大规模的基性岩浆底侵,导致了地壳物质发生熔融,形成了始新世花岗质岩石。该时期基性岩浆的底侵很可能和新特斯洋板片的高角度俯冲有关,在40~50 Ma 时由于印度—欧亚板块进一步碰撞,板片在50 Ma 期间发生断离,引起了软流圈地幔的上涌,导致了该期花岗质岩浆的形成^[46-48](图6)。

5 结 论

通过对冈底斯中段谢通门塔玛地区的碱长花岗岩的研究,本文主要取得以下几点认识:

(1)通过 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年,获得了冈底斯中段谢通门塔玛地区碱长花岗岩的侵位年龄为40 Ma,属于印度—亚洲主碰撞期到后碰撞转

换时形成的花岗岩。

(2)碱长花岗岩锆石的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为: $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值在0.282633~0.282878,平均值为0.282765,计算所得的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值介于-4.08~4.15,平均值为0.28,峰值在-1~+1之间; T_{DMC} 模式年龄在822~1373 Ma,平均值为1075 Ma,峰值年龄为1000~1200 Ma。

(3)结合 Lu-Hf 同位素和研究区大地构造背景,区内碱长花岗岩可能是由始新世时新特斯洋板片的断离,导致软流圈上涌,使的具有中元古代到新元古代早期模式年龄的地壳发生部分熔融,在这期间具有幔源物质的加入。

致谢:行文过程中得到了董汉文博士的指导;审稿专家和编辑部老师为论文的最终定稿付出了大量心血,对他们的帮助一并表示衷心的感谢。

参考文献(References):

- [1] 许志琴,杨经绥,李海兵,等. 造山的高原——青藏高原的地体拼合、碰撞造山及隆升机制[M]. 北京:地质出版社,2007.
Xu Zhiqin, Yang Jingsui, Li Haibin, et al. Orogenic Plateau—Terrane Amalgamation, Collision and Uplift in the Qinghai-Tibet Plateau[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2007(in Chinese).
- [2] 许志琴,杨经绥,李海兵,等. 印度—亚洲碰撞大地构造[J]. 地质学报,2011,85(1):1-32.
Xu Zhiqin, Yang Jingsui, Li Haibin, et al. On the tectonics of the India-Asia collision[J]. Acta geologica sinica, 2011, 85(1):1-32(in Chinese with English abstract).
- [3] Xu Z, Wang Q, Pêcher A, et al. Orogen-parallel ductile extension and extrusion of the Greater Himalaya in the late Oligocene and Miocene[J]. Tectonics, 2013, 32(2):191-215.
- [4] 莫宣学. 岩浆作用与青藏高原演化[J]. 高校地质学报,2011,17(3):351-367.
Mo Xuanxue. Magmatism and evolution of the Tibetan plateau[J]. Geological Journal of China Universities, 2011, 17(3): 351-367(in Chinese with English abstract).
- [5] 莫宣学,赵志丹,喻学惠,等. 青藏高原新生代碰撞—后碰撞火成岩[M]. 北京:地质出版社,2009.
Mo Xuanxue, Zhao Zhidan, Yu Xuehui, et al. Cenozoic collisional-postcollisional igneous rocks in the Tibetan plateau[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2009(in Chinese).
- [6] Searle M P, Windley B F, Coward M P, et al. The closing of Tethys and the tectonics of the Himalaya [J]. Geol. Soc. of Am. Bull., 1987, 98(6): 678-701.
- [7] Yin A, Harrison T M. Geologic evolution of the Himalayan-Tibetan orogen[J]// Jeanloz R, Albee A L, Burke K C. Annual Reviews of Earth and Planet Science Letters, 2000, 28: 211-280.

- [8] 潘桂棠, 莫宣学, 侯增谦, 等. 冈底斯造山带的时空结构及演化[J]. 岩石学报, 2006, 22(3): 521–533.
Pan Guitang, Mo Xuanxue, Hou Zengqian, et al. Spatial-temporal framework of the Gangdese orogenic belt and its evolution[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2006, 22(3): 521–533(in Chinese with English abstract).
- [9] Mo Xuanxue, Niu Yaoling, Dong Guocheng, et al. Contribution of syncollisional felsic magmatism to continental crust growth: A case study of the Paleogene Linzizong volcanic succession in southern Tibet[J]. *Chemical Geology*, 2008, 250(1): 49–67.
- [10] Debon F, Le Fort P, Sheppard SMF, et al. The four plutonic belts of the trans-Himalaya: A chemical, mineralogical, isotopic and chronological synthesis along a Tibet–Nepal section[J]. *Journal of Petrology*, 1986, 27: 219–250.
- [11] Zhu D C, Pan G T, Chung S L, et al. SHRIMP zircon age and geochemical constraints on the origin of lower Jurassic volcanic rocks from the Yeba formation, southern Gangdese, south Tibet[J]. *International Geological Review*, 2008, 50: 442–471.
- [12] Tapponnier P, Xu Z, Roger F, et al. Oblique stepwise rise and growth of the Tibet Plateau[J]. *Science*, 2001, 294: 1671–1677.
- [13] 许志琴, 杨经绥, 李文昌, 等. 青藏高原南部与东南部重要成矿带的大地构造定格与找矿前景[J]. 地质学报, 2012, 86(12): 1857–1868.
Xu Zhiqin, Yang Jingsui, Li Wenchang, et al. Tectonic background of important metallogenic belts in the southern and southeastern Tibetan plateau and ore prospecting[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2012, 86(12): 1857–1868(in Chinese with English abstract).
- [14] Maluski G, Proust F, Xiao X C. $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ dating of the trans-Himalayan calcalkaline magmatism of southern Tibet[J]. *Nature*, 1982, 298: 152–154.
- [15] Ji W Q, Wu F Y, Chung S L, et al. Zircon U–Pb geochronology and Hf isotopic constraints on petrogenesis of the Gangdese batholith, southern Tibet[J]. *Chemical Geology*, 2009, 262: 229–245.
- [16] Harris NBW, Xu RH, Lewis CL, et al. Isotope geochemistry of the 1985 Tibet Geotraverse, Lhasa to Golmud[J]. *Phil. Trans. R. Soc. Lond.*, 1988, A327: 263–285.
- [17] 刘家远, 袁奎荣. 新疆乌论古富碱花岗岩带碱性花岗岩成因及其形成构造环境[J]. 高校地质学报, 1996, 2(3): 257–272.
Liu Jiayuan, Yuan Kuirong. A discussion on the genesis and tectonic setting of alkali granites in the Ulungur alkali-rich granite belt, Xinjiang[J]. *Geological Journal of China Universities*, 1996, 2(3): 257–272(in Chinese with English abstract).
- [18] 张玉清, 许立权, 康小龙, 等. 内蒙古东乌珠穆沁旗京格斯台碱性花岗岩年龄及意义[J]. 中国地质, 2009, 36(5): 988–995.
Zhang Yuqing, Xu Liqian, Kang Xiaolong, et al. Age dating of alkali granite in Jingsitai area of Dong Ujimqin Banner, Inner Mongolia, and its significance[J]. *Geology in China*, 2009, 36(5): 988–995(in Chinese with English abstract).
- [19] 祝新友, 王京彬, 王艳丽, 等. 南岭锡钨多金属矿区碱长花岗岩的厘定及其意义[J]. 中国地质, 2012, 39(2): 359–381.
Zhu Xinyou, Wang Jingbin, Wang Yanli, et al. Characteristics of alkali feldspar granite in tungsten(tin) deposits of Nanling region[J]. *Geology in China*, 2012, 39(2): 359–381(in Chinese with English abstract).
- [20] 周振华, 武新丽, 欧阳荷根. 内蒙古莲花山铜银矿斜长花岗斑岩 LA–MC–ICP–MS 锆石 U–Pb 测年、Hf 同位素研究及其地质意义[J]. 中国地质, 2012, 39(6): 1472–1485.
Zhou Zhenhua, Wu Xinli, OuYang Hegen. LA–ICP–MS zircon U–Pb dating and Hf isotope study of the plagioclase granite porphyry in the Lianhuashan Cu–Ag deposit of Inner Mongolia and its geological significance[J]. *Geology in China*, 2012, 39(6): 1472–1485(in Chinese with English abstract).
- [21] 魏然, 王建国, 王义天, 等. 河北省撒岱沟门斑岩型铝矿床二长花岗岩的锆石 U–Pb 年龄及其意义[J]. 中国地质, 2013, 40(6): 1736–1748.
Wei Ran, Wang Jianguo, Wang Yitian, et al. Zircon U–Pb dating of adamellite from the Sadaigoumen porphyry molybdenum deposit in Fengning, Hebei Province, and its significance[J]. *Geology in China*, 2013, 40(6): 1736–1748(in Chinese with English abstract).
- [22] Sun S S, Higgins N C. Neodymium and strontium isotope study of the Blue Tier Batholith, NE Tasmania, and its bearing on the origin of tin-bearing alkali feldspar granites[J]. *Ore Geology Reviews*, 1996(3–6): 339–265.
- [23] Lan T G, Fan H R, Yang K F, et al. Geochronology, mineralogy and geochemistry of alkali-feldspar granite and albite granite association from the Changyi area of Jiao–Liao–Ji Belt: Implications for Paleoproterozoic rifting of eastern North China Craton[J]. *Precambrian Research*, 2015, 266: 86–107.
- [24] Harrison T M, Armstrong, Naeser C, et al. Geochronology and thermal history of the coast plutonic complex, near Prince Rupert, British Columbia[J]. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 1979, 16(3): 400–410.
- [25] 李献华, 桂训唐. 花岗岩的定年方法学初论[J]. 地球化学, 1990, (4): 303–311.
Li Xianhua, Gui Xuntang. Dating of granitoid rocks—a brief methodological discussion[J]. *Geochimica*, 1990, (4): 303–311(in Chinese with English abstract).
- [26] Liu Y S, Gao S, Hu Z C, et al. 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[J]. *Journal of Petrology*, 2010, 51(1/2): 537–571.
- [27] 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.

- [28] Anderson T. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb [J]. *Chemical Geology*, 2002, 192:59-79.
- [29] Ludwig K R. ISOPLOT 3.00: a geochronology toolkit for Microsoft Excel[M]. Berkeley Geochronological Center Special Publication, Berkeley, 2003.
- [30] Goolaerts A, Mattielli N, de Jong J, et al. Hf and Lu isotopic reference values for the zircon standard 91500 by MC-ICP-MS[J]. *Chemical Geology*, 2004, 206(1-2): 1-9.
- [31] Wu F Y, Yang Y H, Xie L W, et al. Hf isotopic compositions of the standard zircons and baddeleyites used in U-Pb geochronology[J]. *Chemical Geology*, 2006, 234: 105-126.
- [32] 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.
Wu Fuyuan, Li Xianhua, Zheng Yongfei, et al. Lu-Hf isotopic systematics and their applications in petrology[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007, 23(2):185-220(in Chinese with English abstract).
- [33] 侯可军, 李延河, 邹天人, 等. LA-ICP-MS 锆石 Hf 同位素的分析方法及地质应用[J]. *岩石学报*, 2007, 23(10): 2595-2604.
Hou Kejun, Li Yanhe, Zou Tianren, et al. Laser ablation-MC-ICP-MS technique for Hf isotope microanalysis of zircon and its geological applications[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007, 23(10): 2595-2604(in Chinese with English abstract).
- [34] Hoskin P W, Black L P. Metamorphic Zircon Formation by Solid-State Recrystallization of Protolith Igneous Zircon[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 2000, 18(4): 423-439.
- [35] Amelin Y, Lee D C, Halliday A N, et al. Nature of Earth's earliest crust from hafnium isotopes in single detrital zircon[J]. *Nature*, 1999, 399(6733): 252-255.
- [36] Griffin W L, Wang X, Jackson S E, et al. Zircon chemistry and magma mixing, SE China: In-situ analysis of Hf isotopes, Tonglu and Pingtan igneous complexes[J]. *Lithos*, 2002, 61(3/4): 237-269.
- [37] Yang Jinhui, Wu Fuyuan, Wilde S A, et al. Tracing magma mixing in granite genesis: in situ U-Pb dating and Hf-isotope analysis of zircons[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2007, 153(2): 177-190.
- [38] 章荣清, 陆建军, 朱金初, 等. 湘南荷花坪花岗岩斑岩锆石 LA-MC-ICP-MS U-Pb 年龄、Hf 同位素制约及地质意义[J]. *高校地质学报*, 2010, 16(4):436-447.
Zhang Rongqing, Lu Jianjun, Zhu Jinchu, et al. Zircon U-Pb geochronology and Hf isotopic compositions of Hehuaping granite porphyry, southern Hunan province, and its geological significance[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2010, 16(4): 436-447(in Chinese with English abstract).
- [39] Patchett P J, Kouvo O, Hedge C E, et al. Evolution of continental crust and mantle heterogeneity: evidence from Hf isotopes[J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 1981, 78:279-297.
- [40] Knudsen T L, Griffin W L, Hartz E H, et al. In-situ hafnium and lead isotope analyses of detrital zircons from the Devonian sedimentary basin of NE Greenland: a record of repeated crustal reworking[J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 2001, 141:83-94.
- [41] Kinny P D, Maas R. Lu-Hf and Sm-Nd isotope system in zircon[C]/Hancher J M, Hoskin P W O(eds.). *Zircon. Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 2003, 53:327-341.
- [42] Zhu D C, Zhao Z D, Niu Y L, et al. The Lhasa terrane: record of microcontinent and its histories of drift and growth[J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2011, 301: 241-255.
- [43] 徐旺春. 西藏冈底斯花岗岩类锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素组成的空间变化及地质意义[D]. 武汉: 中国地质大学, 2010.
Xu Wangchun. Spatial Variation of Zircon U-Pb Ages and Hf Isotopic Compositions of the Gangdese Granitoids and Its Geologic Implications[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2010(in Chinese with English abstract).
- [44] 朱弟成, 赵志丹, 牛耀玲, 等. 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 Dicheng, Zhao Zhidan, Niu Yaoling, et al. Origin and Paleozoic tectonic evolution of the Lasa terrane[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2012, 18(1): 1-15(in Chinese with English abstract).
- [45] 董昕, 张泽明, 耿官升, 等. 青藏高原拉萨地体南部的泥盆纪花岗岩[J]. *岩石学报*, 2010, 26(7): 2226-2232.
Dong Xi, Zhang Zeming, Geng Guansheng, et al. Devonian magmatism from the southern Lhasa terrane, Tibetan Plateau[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2010, 26(7): 2226-2232(in Chinese with English abstract).
- [46] Ji W Q, Wu F Y, Chung S L, et al. Geochronology and petrogenesis of granitic rocks in Gangdese batholith, southern Tibet[J]. *Science in China (Series.D)*, 2009, 52(9): 1240-1261.
- [47] 李皓扬, 钟孙霖, 王彦斌, 等. 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(20): 493-500.
Lee Haoyang, Chung Sunlin, Wang Yanbin, et al. 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 Petrologica Sinica*, 2007, 23(20): 493-500(in Chinese with English abstract).
- [48] Wen D R, Liu D Y, Chung S L, et al. Zircon SHRIMP U-Pb ages of the Gangdese batholith and implications for Neotethyan subduction in southern Tibet[J]. *Chemical Geology*, 2008, 252: 191-201.