

冈底斯印支期造山事件: 花岗岩类锆石 U Pb 年代学和岩石成因证据

张宏飞¹, 徐旺春¹, 郭建秋^{2,3}, 宗克清¹, 蔡宏明¹, 袁洪林⁴

1. 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室和地球科学学院, 湖北武汉 430074

2. 中国地质大学地质调查研究院, 湖北武汉 430074

3. 西藏地质矿产勘查开发局地热地质大队, 西藏拉萨 850000

4. 西北大学大陆动力学国家重点实验室, 陕西西安 710069

摘要: 对冈底斯中部地区二云母花岗岩和花岗闪长岩进行了 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年、主量元素、微量元素和锆石 Hf 同位素组成的测定。结果表明, 二云母花岗岩的岩浆结晶年龄为 $(205 \pm 1) \text{Ma}$, 岩石属于强过铝质花岗岩, $A/\text{CNK} = 1.16 \sim 1.20$, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} = 1.67 \sim 1.95$ 。岩石富 Rb、Th 和 U 等元素, $\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0.29 \sim 0.41$, $(\text{La}/\text{Yb})_N = 22.62 \sim 35.08$ 。锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t) = -12.4 \sim -1.8$ 。二云母花岗岩的岩浆产生于地壳中泥质岩类在无外来流体加入的情况下云母类矿物脱水反应所诱发的部分熔融作用, 其岩石形成机制类似于喜马拉雅新生代淡色花岗岩。花岗闪长岩的岩浆结晶年龄为 $(202 \pm 1) \text{Ma}$, 岩石属于准铝质 ($A/\text{CNK} = 0.96 \sim 0.98$), $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} = 1.42 \sim 1.77$, $\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0.54 \sim 0.65$, $(\text{La}/\text{Yb})_N = 6.76 \sim 13.35$ 。锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t) = -8.2 \sim -5.5$ 。根据花岗闪长岩的地球化学特征和锆石 Hf 同位素组成, 花岗闪长岩的岩浆来自于地壳中基性岩类的部分熔融。冈底斯印支晚期强过铝质花岗岩的确定, 表明了冈底斯在印支晚期以前曾发生地壳的缩短与加厚作用, 从而进一步明确了冈底斯印支早期的造山事件及冈底斯经历了多期造山作用的演化。

关键词: 印支期花岗岩类; 锆石 U-Pb 定年; 锆石 Hf 同位素; 地球化学; 构造意义; 冈底斯; 西藏。

中图分类号: P597

文章编号: 1000-2383(2007)02-0155-12

收稿日期: 2007-02-03

Indosinian Orogenesis of the Gangdise Terrane: Evidences from Zircon U Pb Dating and Petrogenesis of Granitoids

ZHANG Hong fei¹, XU Wang chun¹, GUO Jian qiu^{2,3}, ZONG Ke qing¹,
CAI Hong ming¹, YUAN Hong lin⁴

1. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, and Faculty of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. Academic of Geological Survey, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

3. Team of Geothermy and Geology, Tibet Bureau of Geology and Mineral Resource Exploration and Development, Lhasa 850000, China

4. State Key Laboratory of Continental Dynamics, Northwest University, Xi'an 710069, China

Abstract: This paper reports LA-ICP-MS zircon U-Pb ages, whole rock major and trace element and zircon Hf isotopic compositions from two mica granite and granodiorite plutons occurring in the middle part of the Gangdise terrane, Tibet. Magma zircons from the two mica granite yielded a weighted $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ mean age of $(205 \pm 1) \text{Ma}$ ($\text{MSWD} = 0.47$), which is interpreted as its magma crystallization age (Late Indosinian). The two mica granite is strongly peraluminous, with Al index (A/CNK) = $1.16 \sim 1.20$ and $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} = 1.67 \sim 1.95$. The two mica granite is characterized by enrichments of Rb, Th and U etc. Rare earth element (REE) data display $\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0.29 \sim 0.41$ and $(\text{La}/\text{Yb})_N = 22.62 \sim 35.08$. $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ (205Ma) values

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 40521001); 教育部长江学者和创新团队发展计划 (IRT0441); 中国地质调查局西藏冲江矿调项目。

作者简介: 张宏飞 (1962-), 男, 教授, 主要从事岩石圈地球化学的教学和科研工作。E-mail: hfzhang@cug.edu.cn

from the dated zircons range from -12.4 to -1.8 . It is suggested that the magma for the two mica granite was dominately derived from partial melting of argillaceous rocks in crust, induced by dehydration of mica minerals. The petrogenesis of the two mica granite is similar to that of the Himalayan Tertiary leucogranites. Magma zircons from the granodiorite yielded a weighted $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ age of (202 ± 1) Ma, representing its magma crystallization age. The granodiorite is metaluminous with Al index $(A/CNK) = 0.96 - 0.98$, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} = 1.42 - 1.77$. REE data show $\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0.54 - 0.65$ and $(\text{La}/\text{Yb})_N = 6.76 - 13.35$. Dated zircon Hf isotopic compositions exhibit $\epsilon_{\text{Hf}}(202 \text{ Ma})$ values ranging from -8.2 to -5.5 . The geochemical signatures and zircon Hf isotopic compositions suggest that the magma of granodiorite formed by partial melting of basaltic rocks in crust. The Late Indosinian strongly peraluminous granite is the first report in the Gangdise terrane. The occurring of the strongly peraluminous granite reveals Gangdise crustal thickening prior to Late Indosinian, and gives an impelling evidence that the Gangdise terrane took place an Early Indosinian orogenic event.

Key words: Indosinian granitoids; U-Pb zircon dating; Hf isotope; geochemistry; tectonic implication; Gangdise terrane; Tibet.

青藏高原冈底斯花岗岩类是研究新特提斯洋俯冲消减作用、印度板块和欧亚板块的碰撞作用及其后碰撞地球动力学过程的重要对象 (Chung *et al.*, 2003, 2005; Hou *et al.*, 2004; 莫宣学等, 2005; Mo *et al.*, 2007). 在过去的研究中, 人们主要集中在冈底斯晚中生代到中新世花岗岩类的研究, 而对冈底斯早中生代 (印支期) 花岗岩类缺乏深入的研究. 近年来, 在冈底斯中部的弧背断隆带上的洛扎南部地区 (李才等, 2003) 和门巴地区 (和钟铎等, 2006) 相继报道了存在有印支期花岗闪长岩, 前者作为冈底斯古造山作用的证据, 而后者作为晚三叠世新特提斯洋俯冲作用的证据. 另外, 在冈底斯南木林地区 (Chu *et al.*, 2006) 和念青唐古拉地区 (Kapp *et al.*, 2005) 的花岗岩中也相继发现了大量的印支期继承锆石年龄, 更进一步确认了冈底斯中部存在较为广泛的印支期构造-岩浆事件. 由于现有对冈底斯中部印支期花岗岩类的研究主要偏重于年代学的报道, 并且所研究的岩类较为单一, 特别是缺乏花岗岩类岩石成因及岩浆源区性质等方面的研究, 这使得目前关于冈底斯印支期花岗岩类在构造意义的解释上具有一定的不确定性. 本文在前人确定的冈底斯印支期构造-岩浆作用范围内, 开展了对洛扎南部地区二云母花岗岩和巨斑状花岗闪长岩的地球化学、LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年和锆石 Hf 同位素研究, 首次确定了冈底斯存在印支期强过铝质花岗岩, 讨论了冈底斯印支期花岗岩类的岩石成因及其构造意义.

1 地质背景

研究区位于冈底斯中部南木林县洛扎乡-仁堆乡一带, 在构造单元上, 相当于潘桂堂等 (2006) 划分

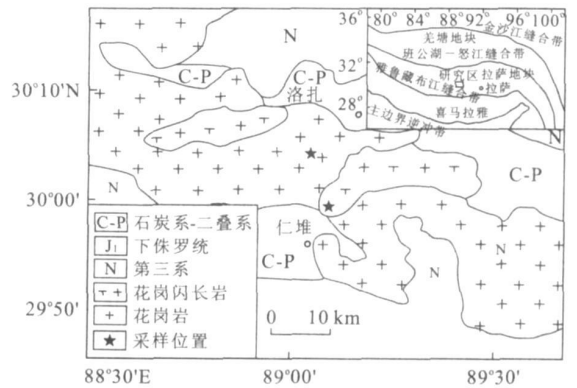


图 1 冈底斯中部洛扎-仁堆地区地质简图

Fig. 1 Simplified geological map of Loza Rende area in middle part of Gangdise terrane

的隆格尔-念青唐古拉断隆带上 (图 1). 该区花岗岩类岩体总体以东西向展布, 岩体主要以二云母花岗岩和巨斑状花岗闪长岩两个岩性单元组成的复合岩基产出. 李才等 (2003) 获得巨斑状花岗闪长岩 TIMS 锆石 U-Pb 年龄为 (217 ± 3) Ma (3 个锆石测定点), 首次报道了冈底斯存在印支期构造-岩浆事件; 翟庆国等 (2005) 获得二云母花岗岩 TIMS 锆石 U-Pb 年龄为 (134 ± 1) Ma (3 个锆石测定点). 为了进一步确证该区的印支期构造-岩浆事件, 并研究花岗岩类的成因, 笔者对上述两个岩性单元进行野外路线观察和样品采集. 岩体侵位于石炭纪-二叠纪的砂岩和片岩中. 该岩体的主要岩石类型是二云母花岗岩. 岩石为灰白色、中粒结构、块状构造. 主要矿物组成为石英 ($26\% \sim 30\%$)、钾长石 ($38\% \sim 44\%$)、斜长石 ($30\% \sim 35\%$)、白云母 ($2\% \sim 4\%$) 和黑云母 ($1\% \sim 2\%$). 副矿物包括锆石、磷灰石、独居石、榍石和 Fe-Ti 氧化物等. 巨斑状花岗闪长岩分布在二云母花岗岩体的内部. 岩石呈灰红色、似斑状结

构、块状构造。斑晶矿物为巨斑状钾长石(微斜长石), 含量为8%~15%不等, 大小一般为3 cm×5 cm以上, 基质主要矿物组成为石英(12%~16%)、钾长石(12%~15%)、斜长石(50%~55%)、角闪石(3%~5%)和黑云母(2%~3%)。副矿物包括锆石、磷灰石、榍石和Fe Ti氧化物等。

2 分析方法

用于主量元素和微量元素测定的样品, 无污染, 粉碎至200目以下。样品主量元素组成在西北大学大陆动力学国家重点实验室用XRF方法测定获得, 其分析的准确度优于5%。样品微量元素组成在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室用ICP MS方法测定获得, 其分析的准确度优于10%, 详见Zhang *et al.* (2002)。

用于锆石U Pb年代学测定的样品, 在廊坊地质服务有限公司利用标准技术对锆石进行了分选。锆石制靶后, 进行了锆石阴极发光照像, 以观察锆石的内部结构。锆石U Pb年龄在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室利用LA-ICP MS方法测定, 激光束斑直径为32 μm。实验中采用He作为剥蚀物质的载气, 锆石91500作为外标, NIST610作为内标, 分析方法及仪器参数类似于Yuan *et al.* (2004)。锆石测定点的同位素比值、U Pb表面年龄和U Th Pb含量计算采用GLITTER程序。采用Andersen *et al.* (2002)方法对普通Pb进行校正, 并采用ISOPLOT程序(Ludwig, 2001)进行锆石加权平均年龄计算及谐和图的绘制。

锆石原位Lu Hf同位素测定在西北大学大陆动力学国家重点实验室装有193 nm ArF激光器的Neptune MC ICP MS仪器上完成, 其分析方法类似于Wu *et al.* (2006)。激光束斑直径为44 μm, 剥蚀频率为10 Hz。用 $^{176}\text{Lu}/^{175}\text{Lu}=0.02669$ (DeBièvre and Taylor, 1993)和 $^{176}\text{Yb}/^{172}\text{Yb}=0.5886$ (Chu *et al.*, 2002)进行同量异位干扰校正计算测定样品的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 和 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值。在样品测定期间, 获得锆石91500的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}=0.2822952\pm0.0000056$ ($n=111, 2\sigma$)。ε_{Hf}的计算采用 ^{176}Lu 衰变常数为 $1.865\times 10^{-11}\text{ yr}^{-1}$ (Scherer *et al.*, 2001), 球粒陨石现今的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}=0.282772$ 和 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}=0.0332$ (Blichert Toft and Albaredo, 1997); Hf亏损地幔模式年龄(T_{DM1})的计算采用现

今的亏损地幔 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}=0.28325$ 和 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}=0.0384$ (Vervoort and Blichert Toft, 1999)。Hf同位素两个阶段模式年龄(T_{DM2})采用平均大陆壳的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}=0.015$ (Griffin *et al.*, 2002)。

3 结果

3.1 锆石U Pb年龄

二云母花岗岩样品T450(经度 $30^{\circ}5'7''$, 纬度 $89^{\circ}7'2.4''$)和巨斑状花岗闪长岩样品T457(经度 $29^{\circ}58'29.7''$, 纬度 $89^{\circ}12'25.2''$)分别用来进行锆石U Pb年代学测定。样品T450所分选的锆石绝大部分为无色透明, 有较好的自形程度, 在阴极发光图像上呈现密集的岩浆型锆石的振荡环带, 含有少量继承型锆石(图2a)。样品T457的锆石也主要为无色透明, 具有较好的自形程度, 同样含有少量继承型锆石(图2b)。

样品T450和样品T457具有振荡环带的岩浆型锆石和少量继承型锆石的LA-ICP MS U Pb同位素测定结果列于表1。

样品T450成功地测定了30颗锆石, 其中岩浆型锆石25颗, 继承型锆石5颗。岩浆型锆石的Th/U比值变化于0.07~1.01之间, 继承型锆石的Th/U比值变化于0.29~0.99之间。在U Pb谐和图上(图3a), 岩浆型锆石的测定点位于谐和线上或稍偏谐和线的右侧, 它们的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄变化于202~207 Ma之间, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄的加权平均年龄为 $(205\pm 1)\text{ Ma}$ (MSWD=0.47), 该年龄解释为二云母花岗岩的岩浆结晶年龄, 这一结果明显不同于翟庆

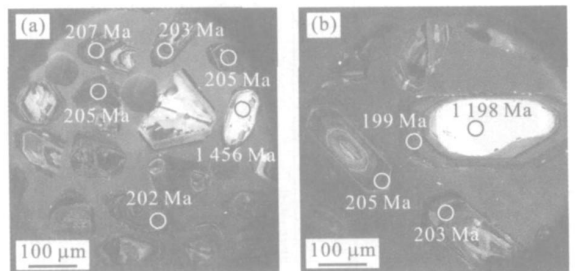


图2 代表性锆石阴极发光图像

Fig. 2 CL images of representative zircon of sample T450 and sample T457

a. 样品T450 b. 样品T457

表 1 样品 T450 和 T457 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素资料
Table 1 U-Pb zircon LA-ICP-MS chronological data of samples T450 and T457

分析点号	Pb ($\mu\text{g/g}$)	Th ($\mu\text{g/g}$)	U ($\mu\text{g/g}$)	Th/ U	$^{207}\text{Pb}^*/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}^*/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$			
					比值	1σ	比值	1σ	年龄	1σ	年龄	1σ	年龄	1σ		
样品 T450(二云母花岗岩)																
T450-01	324.55	1195.28	2528.10	0.47	0.05218	0.00085	0.24537	0.00567	0.03263	0.00028	293	37	223	5	207	2
T450-02	152.73	189.45	226.99	0.83	0.08899	0.00149	2.00719	0.05197	0.17074	0.00151	1404	36	1118	18	1016	8
T450-03	302.54	2391.72	2371.32	1.01	0.06066	0.00103	0.28194	0.00686	0.03232	0.00028	627	37	252	5	205	2
T450-04	145.91	129.14	196.42	0.66	0.07931	0.00141	1.98509	0.05587	0.18786	0.00169	1180	41	1110	19	1110	9
T450-05	160.52	1147.87	1246.57	0.92	0.05336	0.00112	0.2529	0.00724	0.03251	0.00030	344	48	229	6	206	2
T450-06	205.57	847.82	1588.89	0.53	0.05417	0.00098	0.24772	0.00666	0.03254	0.00029	378	44	225	5	206	2
T450-07	123.07	695.75	949.80	0.73	0.05961	0.00255	0.26561	0.01108	0.03232	0.00031	589	95	239	9	205	2
T450-08	277.74	1836.41	2153.69	0.85	0.05149	0.00090	0.23848	0.00654	0.03232	0.00029	263	46	217	5	205	2
T450-09	244.23	134.89	1902.03	0.07	0.05083	0.00182	0.22261	0.00769	0.03176	0.00029	233	84	204	6	202	2
T450-10	547.02	318.44	1100.77	0.29	0.07561	0.00149	1.32714	0.04256	0.12334	0.00115	1085	49	858	19	750	7
T450-11	75.39	159.65	160.84	0.99	0.08051	0.00168	1.22974	0.04196	0.11610	0.00111	1210	52	814	19	708	6
T450-12	190.61	414.37	1457.47	0.28	0.05194	0.00110	0.24382	0.00841	0.03233	0.00031	283	61	222	7	205	2
T450-13	118.92	480.25	897.97	0.53	0.05195	0.00112	0.24095	0.00855	0.03267	0.00031	283	64	219	7	207	2
T450-14	428.64	330.85	3227.04	0.10	0.05002	0.00112	0.23789	0.00892	0.03263	0.00032	196	69	217	7	207	2
T450-15	106.05	250.00	802.64	0.31	0.05359	0.00135	0.24716	0.00995	0.03239	0.00033	354	73	224	8	205	2
T450-16	114.15	733.51	858.59	0.85	0.05550	0.00139	0.25785	0.01053	0.03253	0.00033	432	73	233	9	206	2
T450-17	143.01	704.90	1073.85	0.66	0.05429	0.00319	0.24118	0.01392	0.03222	0.00035	383	136	219	11	204	2
T450-18	132.1	704.07	984.70	0.72	0.04963	0.00138	0.23084	0.01027	0.03268	0.00035	178	84	211	8	207	2
T450-19	281.36	301.97	2089.97	0.14	0.04997	0.00287	0.22044	0.01244	0.03200	0.00035	193	132	202	10	203	2
T450-20	547.24	1088.20	4082.96	0.26	0.05845	0.00167	0.27307	0.01340	0.03228	0.00036	547	88	245	11	205	2
T450-21	128.3	521.83	943.22	0.55	0.05818	0.00172	0.27247	0.01379	0.03269	0.00037	537	91	245	11	207	2
T450-22	272.36	250.73	2013.30	0.12	0.05079	0.00311	0.22393	0.01346	0.03198	0.00037	231	141	205	11	203	2
T450-23	657.18	1311.78	4794.96	0.27	0.07695	0.00258	0.35967	0.02083	0.03255	0.00040	1120	96	312	16	206	2
T450-24	111.82	305.01	816.74	0.37	0.05811	0.00209	0.26772	0.01672	0.03227	0.00041	534	115	241	13	205	3

续表 1

分析点号	Pb ($\mu\text{g/g}$)	Th ($\mu\text{g/g}$)	U ($\mu\text{g/g}$)	Th/ U	$^{207}\text{Pb}^*/^{206}\text{Pb}^*$		$^{207}\text{Pb}^*/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}^*/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	
					比值	1 σ	比值	1 σ	比值	1 σ	年龄	1 σ	年龄	1 σ	年龄	1 σ
T450-25	128.79	540.86	936.07	0.58	0.05107	0.00192	0.24283	0.01569	0.03235	0.00042	244	124	221	13	205	3
T450-26	438.49	1182.14	3144.15	0.38	0.05216	0.00202	0.24694	0.01664	0.03263	0.00043	292	131	224	14	207	3
T450-27	437.18	634.82	3126.50	0.20	0.06569	0.00493	0.29254	0.02157	0.0323	0.00045	797	162	261	17	205	3
T450-28	62.33	203.18	436.76	0.47	0.05531	0.00271	0.25224	0.02119	0.0326	0.00051	425	161	228	17	207	3
T450-29	347.76	882.81	2439.76	0.36	0.05594	0.00530	0.24875	0.02327	0.03225	0.0005	450	217	226	19	205	3
T450-30	59.27	51.36	62.94	0.82	0.09147	0.00498	2.54942	0.24502	0.21274	0.00364	1456	159	1286	70	1243	19
样品 T457(花岗岩长岩)																
T457-01	117.57	156.35	812.83	0.19	0.05801	0.00072	0.27899	0.00404	0.03201	0.00024	530	19	250	3	203	1
T457-02	224.03	440.60	1547.23	0.28	0.05621	0.00122	0.24685	0.00501	0.03185	0.00025	461	49	224	4	202	2
T457-03	130.77	766.20	902.96	0.85	0.06551	0.00223	0.28190	0.00931	0.03121	0.00027	791	73	252	7	198	2
T457-04	109.76	143.07	757.38	0.19	0.05400	0.00125	0.23841	0.00518	0.03202	0.00026	371	53	217	4	203	2
T457-05	174.56	542.80	1199.74	0.45	0.05784	0.00162	0.25418	0.00685	0.03187	0.00025	524	63	230	6	202	2
T457-06	241.58	415.15	1671.40	0.25	0.05558	0.00135	0.24443	0.00563	0.0319	0.00025	436	55	222	5	202	2
T457-07	203.25	586.49	1392.92	0.42	0.05176	0.00079	0.25675	0.00560	0.03225	0.00026	275	35	232	5	205	2
T457-08	176.78	455.97	1216.18	0.37	0.05702	0.00171	0.25126	0.00726	0.03196	0.00026	492	68	228	6	203	2
T457-09	123.07	121.74	849.64	0.14	0.05894	0.00241	0.25273	0.01017	0.03142	0.00028	543	92	229	8	199	2
T457-10	61.69	86.24	107.25	0.80	0.06558	0.00153	1.18407	0.04582	0.1271	0.00122	793	65	793	21	771	7
T457-11	167.33	209.34	203.06	1.03	0.08004	0.00206	1.92642	0.08561	0.1821	0.00187	1198	72	1090	30	1078	10
T457-12	130.94	206.35	898.45	0.23	0.06242	0.00157	0.31113	0.01293	0.03221	0.00032	689	72	275	10	204	2
T457-13	209.20	557.05	1444.13	0.39	0.05250	0.00340	0.22846	0.01458	0.03156	0.00035	307	150	209	12	200	2
T457-14	209.04	505.03	1442.77	0.35	0.05715	0.00385	0.24838	0.01651	0.03152	0.00036	497	153	225	13	200	2
T457-15	154.93	89.36	178.79	0.50	0.08073	0.00267	2.10292	0.12452	0.19184	0.00232	1215	98	1150	41	1131	13
T457-16	308.86	385.75	2136.76	0.18	0.05868	0.00422	0.25340	0.01800	0.03132	0.00036	555	162	229	15	199	2
T457-17	163.81	98.55	194	0.51	0.08001	0.00266	2.03538	0.12077	0.18706	0.00227	1197	99	1127	40	1105	12

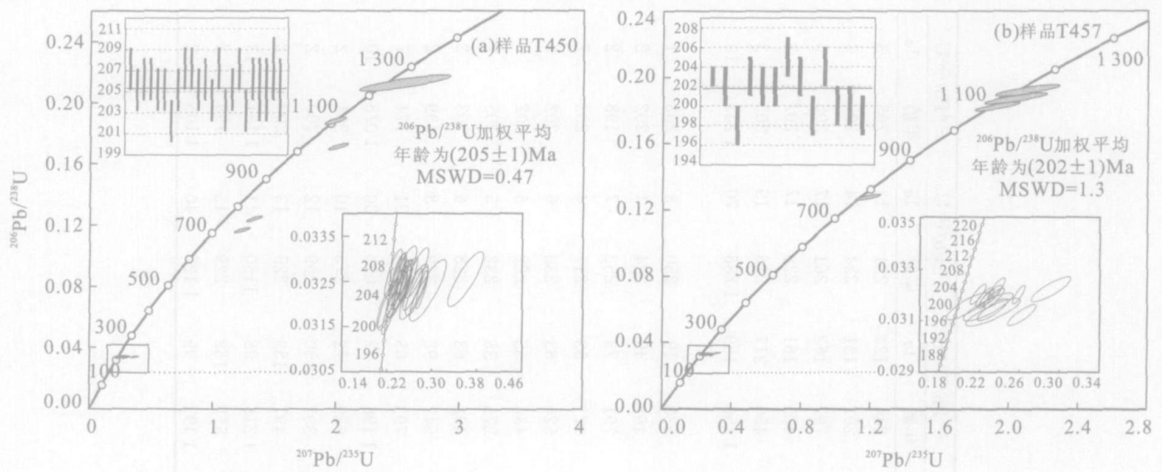


图 3 锆石 U-Pb 谐和图

Fig. 3 U-Pb zircon concordia diagram of sample T450 and sample T457

国等 (2005) 获得 TIMS 锆石 U-Pb 年龄结果 $(134 \pm 1) \text{ Ma}$ 。继承型锆石的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄变化于 $1\ 085 \sim 1\ 456 \text{ Ma}$ 之间, 反映岩浆源区中含有元古代的地壳组分。

样品 T457 成功地测定了 17 颗锆石, 其中岩浆型锆石 13 颗, 继承型锆石 4 颗。岩浆型锆石的 Th/U 比值变化于 $0.14 \sim 0.85$ 之间, 继承型锆石的 Th/U 比值变化于 $0.5 \sim 1.03$ 之间。在 U-Pb 谐和图上 (图 3b), 岩浆型锆石的测定点位于谐和线上, 它们的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄变化于 $198 \sim 205 \text{ Ma}$ 之间, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄的加权平均年龄为 $(202 \pm 1) \text{ Ma}$ (MSWD=1.3), 该年龄解释为花岗闪长岩的岩浆结晶年龄。继承型锆石的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄变化于 $793 \sim 1\ 215 \text{ Ma}$ 之间, 同样反映岩浆源区中含有元古代的地壳组分。

3.2 主量元素和微量元素

二云母花岗岩和花岗闪长岩的主量元素和微量元素测定结果列于表 2。

由表 2 可见, 二云母花岗岩 $\text{SiO}_2 = 72.27\% \sim 73.75\%$, $\text{Al}_2\text{O}_3 = 14.21\% \sim 14.59\%$, $\text{MgO} = 0.32\% \sim 0.47\%$, $\text{CaO} = 0.60\% \sim 1.02\%$, $\text{K}_2\text{O} = 5.14\% \sim 5.53\%$, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} = 1.67 \sim 1.95$, $A/\text{CNK} = 1.16 \sim 1.20$, 表明它们为强过铝质岩石。花岗闪长岩 $\text{SiO}_2 = 64.40\% \sim 66.03\%$, $\text{Al}_2\text{O}_3 = 15.42\% \sim 15.91\%$, $\text{MgO} = 1.72\% \sim 1.86\%$, $\text{CaO} = 3.20\% \sim 3.30\%$, $\text{K}_2\text{O} = 4.31\% \sim 5.37\%$, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} = 1.42 \sim 1.77$, $A/\text{CNK} = 0.96 \sim 0.98$, 表明它们为准铝质岩石。

在微量元素组成上, 二云母花岗岩类似于喜马拉雅

拉雅淡色花岗岩 (Zhang *et al.*, 2004; 张宏飞等, 2005), 岩石以明显富 Rb ($293 \sim 337 \mu\text{g/g}$)、U ($3.48 \sim 4.88 \mu\text{g/g}$) 和 Th ($27.0 \sim 43.8 \mu\text{g/g}$) 为特征, 贫 Sr ($59 \sim 127 \mu\text{g/g}$) 和 Ba ($231 \sim 309 \mu\text{g/g}$) 等元素。尽管花岗闪长岩与二云母花岗岩具有不同的岩性学, 但前者同样具有富 Rb ($223 \sim 274 \mu\text{g/g}$)、U ($3.93 \sim 4.91 \mu\text{g/g}$)、Th ($31.7 \sim 39.5 \mu\text{g/g}$) 和贫 Sr ($170 \sim 196 \mu\text{g/g}$) 的特征。在图 4 中, 二云母花岗岩和花岗闪长石具相似的元素分配型式, 它们均具有 Ba、Nb、Sr、P 和 Ti 的亏损。二云母花岗岩和花岗闪长岩均为轻稀土富集型的稀土元素组成模式 (图 5), 并存在中等程度的负 Eu 异常, 但它们的轻、重稀土的分离程度和负 Eu 异常程度有所差异, 其中二云母花岗岩 $\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0.29 \sim 0.41$, $(\text{La}/\text{Yb})_N = 22.62 \sim 35.08$; 花岗闪长岩 $\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0.54 \sim 0.65$, $(\text{La}/\text{Yb})_N = 6.76 \sim 13.35$ 。

3.3 锆石 Hf 同位素组成

样品 T450 和 T457 岩浆型锆石的 Lu-Hf 同位素组成列于表 3。根据样品 T450 锆石平均年龄 (205 Ma) 统一计算的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值变化于 $-12.4 \sim -1.8$, 加权平均值为 -5.7 ± 1.0 , Hf 同位素亏损地幔模式年龄 ($T_{\text{DM}2}$) 变化于 $1\ 351 \sim 2\ 023 \text{ Ma}$, 平均为 $1\ 600 \text{ Ma}$ 。根据样品 T457 锆石平均年龄 (202 Ma) 统一计算的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值变化于 $-8.2 \sim -5.5$, 加权平均值为 -7.1 ± 0.9 , $T_{\text{DM}2}$ 变化于 $1\ 587 \sim 1\ 757 \text{ Ma}$, 平均为 $1\ 687 \text{ Ma}$ 。上述结果表明, 二云母花岗岩和花岗闪长岩的岩浆均来自于地壳物质的部分熔融, 无明显幔源物质的加入。

表 2 冈底斯印支期花岗岩类主量元素(%) 和微量元素($\mu\text{g/g}$) 资料

Table 1 Major element (%) and trace element ($\mu\text{g/g}$) data of Gangdise Indosinian granitoid

样号	二云母花岗岩					花岗闪长岩		
	T450	T451	T452	T453	T454	T457	T458	T459
SiO ₂	72.27	73.75	72.31	72.29	73.16	66.03	64.4	65.84
TiO ₂	0.24	0.17	0.24	0.22	0.18	0.68	0.69	0.72
Al ₂ O ₃	14.55	14.21	14.55	14.59	14.4	15.5	15.91	15.42
TFeO	1.71	1.14	1.74	1.74	1.31	3.93	3.98	4.12
MnO	0.02	0.01	0.02	0.02	0.01	0.06	0.07	0.06
MgO	0.47	0.32	0.47	0.44	0.36	1.72	1.86	1.85
CaO	0.97	0.84	0.94	1.02	0.6	3.30	3.20	3.30
Na ₂ O	2.93	2.89	2.83	3.08	3.09	3.07	3.04	3.04
K ₂ O	5.53	5.26	5.52	5.14	5.42	4.39	5.37	4.31
P ₂ O ₅	0.19	0.13	0.21	0.21	0.2	0.19	0.19	0.19
烧失量	0.66	0.81	0.74	0.83	0.84	0.54	0.66	0.54
总量	99.54	99.53	99.57	99.58	99.57	99.41	99.37	99.39
K ₂ O/Na ₂ O	1.89	1.82	1.95	1.67	1.75	1.43	1.77	1.42
A/CNK	1.16	1.19	1.18	1.17	1.20	0.98	0.96	0.98
Sc	3.85	2.90	3.93	3.51	3.06	11.49	12.33	11.79
V	10.3	5.8	11.9	10.8	7.4	60.9	62.2	64.3
Cr	8.4	5.9	8.4	8.7	6.9	25.9	31.2	26.6
Ni	1.58	0.91	1.50	1.38	1.22	10.05	11.84	10.70
Cu	4.2	2.0	2.9	1.7	1.8	11.4	5.2	12.4
Zn	55	35	53	49	32	57	59	59
Ga	21.1	19.0	21.0	21.5	19.1	19.4	20.1	19.9
Rb	337	293	333	325	322	256	274	223
Sr	71	69	69	127	59	187	170	196
Y	12.7	7.8	13.8	14.6	10.0	26.1	48.9	28.3
Zr	126	82	135	124	101	271	286	300
Nb	12.1	8.1	12.7	13.0	12.2	12.5	15.2	13.4
Ba	306	231	309	294	276	582	845	650
La	48.99	29.36	46.94	44.40	28.18	52.09	43.94	43.58
Ce	101.52	64.65	104.47	98.01	64.72	108.97	92.15	88.74
Pr	12.10	7.57	12.31	11.68	7.02	12.00	10.40	10.01
Nd	42.63	27.81	44.58	41.92	25.85	42.54	37.70	35.69
Sm	8.73	5.41	8.65	7.91	5.07	7.44	8.25	7.08
Eu	0.81	0.62	0.79	0.64	0.62	1.27	1.41	1.38
Gd	5.24	3.36	5.45	5.00	3.22	5.66	7.43	5.52
Tb	0.67	0.41	0.72	0.64	0.44	0.89	1.43	0.92
Dy	2.84	1.55	2.98	3.01	1.93	4.99	9.07	5.35
Ho	0.41	0.25	0.46	0.44	0.33	1.04	1.82	1.00
Er	1.06	0.63	1.25	1.30	0.94	2.81	5.23	2.89
Tm	0.16	0.09	0.18	0.18	0.14	0.44	0.76	0.42
Yb	0.99	0.56	1.01	1.15	0.84	2.63	4.38	2.67
Lu	0.15	0.08	0.13	0.16	0.13	0.39	0.59	0.42
Hf	3.96	2.68	4.14	3.97	3.20	7.39	7.87	8.19
Ta	1.76	1.45	1.90	2.17	2.07	1.25	2.31	1.37
Pb	48.9	48.0	49.1	47.6	47.8	51.3	63.1	71.0
Th	41.3	27.0	43.8	42.3	31.7	39.5	31.9	31.7
U	4.31	3.48	4.78	4.88	4.26	4.91	4.62	3.93

4 讨论

4.1 岩石成因

对于强过铝质花岗岩, 其岩石成因一般被认为是地壳中富铝质沉积物部分熔融的产物(White and

Chappell, 1977; Sylvester, 1998; Patinø Douce and Harris, 1998). 二云母花岗岩 A/CNK = 1.16 ~ 1.20, 富 Rb、U 和 Th 等元素, 稀土元素组成模式存在明显的负 Eu 异常 ($\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0.29 \sim 0.41$) 及锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值 ($-12.4 \sim -1.8$), 一致于地壳中富铝质沉积物的部分熔融模式. 二云母花岗岩

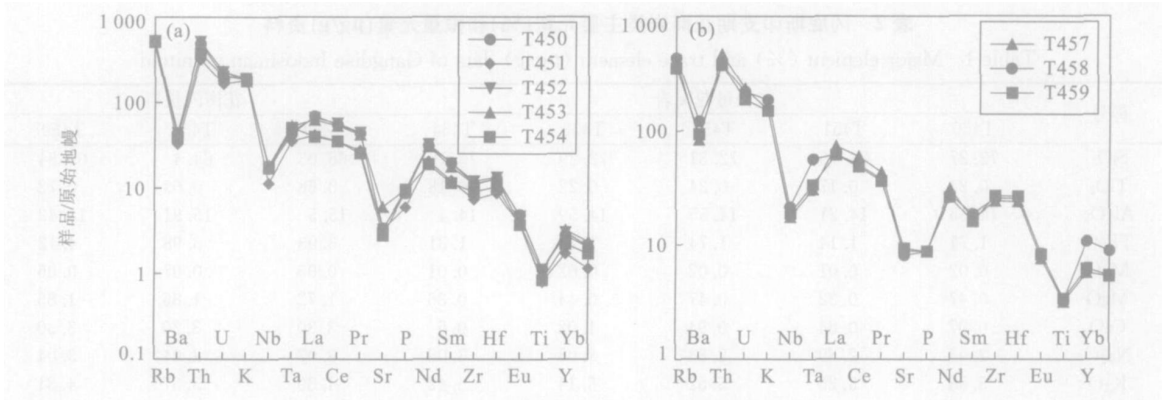


图 4 原始地幔标准化的元素组成模式

Fig. 4 Primitive mantle normalized elemental compositional patterns of two mica granite (a) and granodiorite (b) a. 二云母花岗岩; b. 花岗闪长岩; 原始地幔标准化值据 Sun and McDonough(1989)

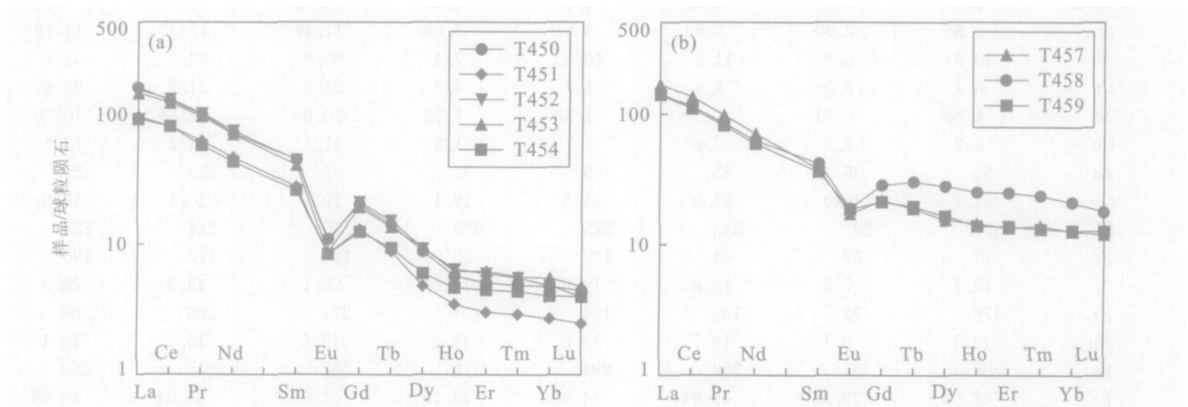


图 5 稀土元素组成模式

Fig. 5 Chondrite normalized REE patterns of two mica granite (a) and granodiorite (b) a. 二云母花岗岩; b. 花岗闪长岩; 球粒陨石标准化值据 Taylor and McLennan(1985)

Rb/Sr=2.6~5.5, Rb/Ba=1.1~1.3, 指示原岩物质主要为地壳中的泥质岩类(Sylvester, 1998). 二云母花岗岩无论在主元素组成上还是在微量元素组成上与喜马拉雅淡色花岗岩具有较好的可比性(Inger and Harris, 1993; Searle *et al.*, 1997; Visona and Lombardo, 2002; Zhang *et al.*, 2004; 张宏飞等, 2005), 因此, 它们有着类似的岩石成因机制. 在喜马拉雅淡色花岗岩的成因模式中, 淡色花岗岩归因于地壳中泥质岩系在无外来流体的条件下云母类矿物脱水反应所诱发部分熔融作用的产物(Harris and Inger, 1992; Inger and Harris, 1993; Harris *et al.*, 1995; Harrison *et al.*, 1997; Patino Douce and Harris, 1998; Zhang *et al.*, 2004; 张宏飞等, 2005). 这一岩石形成机制同样也能适用于本文所研究的冈底斯二云母花岗岩的岩石形成机制.

至于花岗闪长岩, 由于它们的化学成分属于中酸性(SiO₂=64.40%~66.03%), 并且岩石属于准铝质岩石(A/CNK<1), 但它们具有较高的K₂O/Na₂O比值(1.42~1.77)和Rb(223~274 μg/g)、U(3.93~4.91 μg/g)、Th(31.7~39.5 μg/g)含量, 以及较低的锆石ε_{Hf}(t)值(-8.2~-5.5), 因此, 花岗闪长岩的岩浆同样来自于地壳物质部分熔融产物, 其原岩物质应为存留于地壳中的富钾质基性岩类. 在稀土元素组成模式上, 花岗闪长岩存在中等程度的负Eu异常(Eu/Eu^{*}=0.54~0.65), 反映了下地壳变基性岩类由于角闪石脱水反应所诱发的部分熔融作用, 源区残留矿物包含有一定数量的斜长石和角闪石(Wolf and Wyllie, 1992; Beard and Lofgren, 1991; Rushmer, 1991; Tepper *et al.*, 1993), 而明显不同于变基性岩类在流体饱和条件下的部分熔融作用, 由此产生的熔体无明显的Eu异

表 3 样品 T450 和 T457 锆石 Lu Hf 同位素资料
Table 3 Zircon Lu Hf isotopic data of samples T450 and T457

点号	¹⁷⁶ Hf/ ¹⁷⁷ Hf	±2σ	¹⁷⁶ Lu/ ¹⁷⁷ Hf	±2σ	¹⁷⁶ Yb/ ¹⁷⁷ Hf	±2σ	ε _{Hf} (0)	ε _{Hf} (t)	±2σ	T _{DM2} (Ma)	±2σ
样品 T450(t=205 Ma)											
T450-01	0.282 551	0.000 016	0.001 890	0.000 18	0.068 574	0.007 40	- 7.8	- 3.6	0.6	1 466	73
T450-02	0.282 599	0.000 020	0.001 068	0.000 09	0.037 645	0.003 60	- 6.1	- 1.8	0.7	1 351	90
T450-03	0.282 486	0.000 016	0.000 837	0.000 05	0.031 239	0.001 56	- 10.1	- 5.7	0.6	1 602	72
T450-04	0.282 513	0.000 019	0.000 916	0.000 03	0.031 607	0.001 24	- 9.2	- 4.8	0.7	1 543	87
T450-05	0.282 511	0.000 024	0.001 365	0.000 04	0.048 213	0.001 54	- 9.2	- 4.9	0.8	1 551	107
T450-06	0.282 536	0.000 030	0.000 884	0.000 05	0.032 073	0.001 96	- 8.3	- 4.0	1.1	1 491	134
T450-07	0.282 418	0.000 038	0.001 949	0.000 28	0.072 476	0.011 60	- 12.5	- 8.3	1.3	1 764	170
T450-08	0.282 455	0.000 036	0.001 958	0.000 08	0.069 352	0.001 82	- 11.2	- 7.0	1.3	1 681	161
T450-09	0.282 518	0.000 017	0.002 466	0.000 10	0.089 015	0.003 80	- 9.0	- 4.8	0.6	1 544	75
T450-10	0.282 530	0.000 026	0.002 273	0.000 32	0.083 701	0.011 80	- 8.5	- 4.4	0.9	1 516	116
T450-11	0.282 303	0.000 038	0.002 386	0.000 09	0.093 901	0.003 40	- 16.6	- 12.4	1.3	2 023	169
T450-12	0.282 458	0.000 042	0.001 425	0.000 13	0.060 393	0.006 00	- 11.1	- 6.8	1.5	1 670	188
样品 T457(t=202 Ma)											
T457-01	0.282 457	0.000 019	0.000 548	0.000 04	0.019 387	0.001 28	- 11.1	- 6.8	0.7	1 668	86
T457-02	0.282 454	0.000 026	0.001 232	0.000 08	0.040 857	0.002 40	- 11.3	- 7.0	0.9	1 680	116
T457-03	0.282 419	0.000 020	0.001 065	0.000 01	0.038 593	0.000 32	- 12.5	- 8.2	0.7	1 757	89
T457-04	0.282 472	0.000 018	0.000 995	0.000 04	0.036 469	0.000 90	- 10.6	- 6.3	0.6	1 638	80
T457-05	0.282 426	0.000 024	0.000 571	0.000 04	0.019 897	0.001 26	- 12.2	- 7.9	0.8	1 737	107
T457-06	0.282 440	0.000 024	0.001 003	0.000 07	0.037 119	0.002 80	- 11.7	- 7.5	0.8	1 709	107
T457-07	0.282 425	0.000 018	0.000 900	0.000 03	0.032 700	0.000 74	- 12.3	- 8.0	0.6	1 742	79
T457-08	0.282 458	0.000 022	0.001 197	0.000 11	0.039 927	0.002 60	- 11.1	- 6.8	0.8	1 671	98
T457-09	0.282 463	0.000 038	0.000 687	0.000 08	0.022 585	0.002 20	- 10.9	- 6.6	1.3	1 655	170
T457-10	0.282 470	0.000 032	0.001 511	0.000 13	0.050 543	0.002 40	- 10.7	- 6.5	1.1	1 647	143
T457-11	0.282 420	0.000 024	0.000 728	0.000 02	0.026 306	0.000 92	- 12.5	- 8.1	0.8	1 752	107
T457-12	0.282 497	0.000 024	0.001 631	0.000 18	0.054 495	0.004 20	- 9.7	- 5.5	0.8	1 587	107

常(Tepper *et al.*, 1993), 源区残留矿物仅包含有少量的斜长石(Helz, 1976; Beard and Lofgren, 1991). 因此, 花岗闪长岩是下地壳变基性岩类由于角闪石脱水反应所诱发部分熔融作用的产物.

4.2 构造意义

锆石 U-Pb 年代学资料表明, 二云母花岗岩(205 Ma)和花岗闪长岩(202 Ma)形成时代相近, 两者均为冈底斯印支晚期构造-岩浆事件的产物. 其中, 二云母花岗岩的形成年龄是目前在冈底斯带强过铝质花岗岩中发现的最老年龄, 具有较为明确的构造意义.

根据 Sylvester(1998)研究, 世界上强过铝质花岗岩主要形成于后碰撞(post collision)构造环境, 它们形成于造山作用所导致地壳增厚之后的构造减压过程(decompression), 并可划分为两种强过铝质花岗岩的成因类型: (1)高压型——形成于先前增厚地壳的折返, 熔融热来自于地壳中 K、Th 和 U 同位素的衰变; (2)高温型——形成于造山作用后地幔软流圈的上涌, 地壳受地幔热的输入而诱发部分熔融.

冈底斯印支晚期强过铝质花岗岩的产出, 伴随有印支晚期准铝质花岗闪长岩的产出, 反映了先前的造山事件. 根据冈底斯中部晚三叠世诺利期沉积地层与下伏二叠系地层的不整合接触关系(潘桂棠等, 2006), 这次造山事件应发生于印支早期. 由此认为, 冈底斯印支早期造山作用将导致冈底斯地壳发生缩短和增厚, 印支晚期增厚的冈底斯地壳发生折返导致中、下地壳物质发生构造减压熔融作用(云母类矿物和角闪石脱水反应), 从而形成冈底斯印支晚期强过铝质花岗岩和准铝质花岗闪长岩. 由于冈底斯这些印支晚期花岗岩类具有较高的 K、Th 和 U 含量, 而区域上未见同时幔源基性岩浆的活动, 推测熔融热主要来自于增厚地壳放射性同位素的衰变.

在拉萨以东的冈底斯中部门巴地区, 和钟铎等(2006)获得花岗闪长岩的锆石 U-Pb 年龄为(208 ± 5) Ma, 并认为花岗闪长岩形成于岛弧环境, 与新特提斯洋的早期俯冲作用存在联系. 根据他们获得的花岗闪长岩主量元素和微量元素组成, 笔者认为花岗闪长岩的岩浆很可能来自地壳中基性岩类的部分

熔融作用. 这种源岩物质部分熔融形成的花岗岩类常具有岛弧型花岗岩的地球化学特征, 在构造环境的解释上具有多解性. 因此, 鉴别岩石形成的构造环境, 不能仅通过岩石地球化学特征作简单分析, 而需要包括岩浆源区性质等方面的综合分析. 结合本文的研究结果, 冈底斯中部门巴地区的印支晚期花岗闪长岩同样应是在冈底斯印支早期造山作用后, 构造减压作用所诱发中、下地壳物质的部分熔融作用的产物, 属后碰撞型花岗岩类.

印支早期是东亚地区一次广泛的造山事件, 起因于东古特提洋的封闭和随后的造山作用. 在我国的松潘—甘孜造山带和中央造山带的不同区段均有该期强烈造山事件的地质记录, 并发生多块体的拼合(张国伟等, 2004). 现有研究表明, 这一印支早期的造山事件已波及到冈底斯地区. 尽管目前对于冈底斯印支早期造山事件的强度和规模还了解甚少, 但冈底斯存在多期造山作用的叠加与复合是明显的, 除了本文所揭示的印支早期(古特提斯)造山作用外, 还叠加了中生代至新生代新特提斯的造山作用, 后者导致了印支板块与欧亚板块的强烈碰撞.

5 结论

冈底斯洛扎南部地区存在印支晚期二云母花岗岩和花岗闪长岩两类岩石, 其中二云母花岗岩为强过铝质花岗岩, 岩浆结晶年龄为 (205 ± 1) Ma, 地球化学和锆石 Hf 同位素组成揭示岩浆来自于地壳中泥质岩类的部分熔融; 而花岗闪长岩为准铝质岩石, 岩浆结晶年龄为 (202 ± 1) Ma, 地球化学和锆石 Hf 同位素组成揭示岩浆来自于地壳中基性岩类的部分熔融. 它们均属于后碰撞型花岗岩类. 冈底斯印支晚期强过铝质花岗岩的确定, 表明了冈底斯在印支晚期以前曾发生地壳的缩短与加厚作用, 从而进一步明确了冈底斯印支期早期的造山事件及冈底斯经历了多期造山作用的演化. 冈底斯印支早期造山事件与东古特提斯洋的封闭及随后的造山作用存在密切联系, 与中国大陆主要块体在印支期的拼合与造山事件相一致.

References

Andersen, T., 2002. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb . *Chem. Geol.*, 192: 59–79.

Beard, J. S., Lofgren, G. E., 1991. Dehydration melting and water saturated melting of basaltic and andesitic greenstones and amphibolites at 1.3 and 6.9 kbar. *Journal of Petrology*, 32: 365–402.

Blichert Toft, J., Albaredo, F., 1997. The Lu-Hf geochemistry of chondrites and the evolution of the mantle-crust system. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 148: 243–258.

Chu, M. F., Chung, S. L., Song, B., et al., 2006. Zircon U-Pb and Hf isotope constraints on the Mesozoic tectonics and crustal evolution of southern Tibet. *Geology*, 34: 745–748.

Chu, N. C., Taylor, R. N., Chavagnac, V., et al., 2002. Hf isotope ratio analysis using multi-collector inductively coupled plasma mass spectrometry: An evaluation of isobaric interference corrections. *J. Anal. Atom. Spectrom.*, 17: 1567–1574.

Chung, S. L., Chu, M. F., Zhang, Y. Q., et al., 2005. Tibetan tectonic evolution inferred from spatial and temporal variations in post collisional magmatism. *Earth Science Reviews*, 68: 173–196.

Chung, S. L., Duniy, L., Ji, J., et al., 2003. Adakites from continental collision zones: Melting of thickened lower crust beneath southern Tibet. *Geology*, 31: 1021–1024.

DeBievre, P., Taylor, P. D. P., 1993. Table of the isotopic composition of the elements. *Int. J. Mass. Spectrom. Ion Process* 123: 149.

Griffin, W. L., Wang, X., Jackson, S. E., et al., 2002. Zircon chemistry and magma mixing, SE China: In situ analysis of Hf isotopes. Tonglu and Pingtan igneous complexes. *Lithos* 61: 237–269.

Harris, N., Ayres, M., Massey, J., 1995. Geochemistry of granitic melts produced during the incongruent melting of muscovite; Implication for the extraction of Himalayan leucogranite masses. *Journal of Geophysical Research*, 100: 15767–15777.

Harris, N., Inger, S., 1992. Trace element modeling of pelite derived granites. *Contrib Mineral Petrol*, 110: 46–56.

Harrison, T. M., Lovera, O. M., Grove, M., 1997. New insights into the origin of two contrasting Himalayan granite belts. *Geology*, 25: 899–902.

He, Z. H., Yang, D. M., Zheng, C. Q., et al., 2006. Isotopic dating of the Mamba granitoid in the Gangdise tectonic belt and its constraint on the subduction time of the Neotethys. *Geological Review*, 52: 100–106 (in Chinese with English abstract).

Helz, R. T., 1976. Phase relations of basalts in their melting ranges at $p_{\text{H}_2\text{O}} = 5$ kbar, part II: Melt compositions.

- Journal of Petrology*, 17; 139 – 193.
- Hou Z. Q., Gao Y. F., Qu X. M., et al., 2004. Origin of adakitic intrusives generated during mid Miocene east west extension in southern Tibet. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 220; 139 – 155.
- Inger, S., Harris, N., 1993. Geochemical constrains on leucogranite magmatism in the Langtang Valley, Nepal Himalaya. *Journal of Petrology*, 34; 345 – 368.
- Kapp J., Harrison, T. M., Kapp, P., et al., 2005. Nyainqentanglha Shan: A window into the tectonic thermal and geochemical evolution of the Lhasa block southern Tibet. *Journal of Geophysical Research*, 110; B08413 (1 – 23).
- Li C., Wang T. W., Li H. M., et al., 2003. Discovery of Indosinian megaporphyritic granodiorite in the Gangdise area: Evidence for the existence of Paleo Gangdise. *Geological Bulletin of China*, 22; 364 – 366 (in Chinese with English abstract).
- Ludwig, K. R., 2001. Users manual for Isoplot/Ex (rev. 2.49): A geochronological toolkit for Microsoft Excel. Berkeley Geochronology Center, Special Publication No. 1a, 55.
- Mo X. X., Dong G. C., Zhao Z. D., et al., 2005. Spatial and temporal distribution and characteristics of granitoids in the Gangdise, Tibet and implication for crustal growth and evolution. *Geological Journal of China Universities*, 11; 281 – 290 (in Chinese with English abstract).
- Mo X. X., Hou Z. Q., Niu Y. L., et al., 2007. Mantle contributions to crustal thickening during continental collision: Evidence from Cenozoic igneous rocks in southern Tibet. *Lithos* (in press).
- Pan G. T., Mo X. X., Hou Z. Q., et al., 2006. Spatial temporal framework of the Gangdise orogenic belt and its evolution. *Acta Petrologica Sinica*, 22; 521 – 533 (in Chinese with English abstract).
- Patino Douce, A. E., Harris, N., 1998. Experimental constraints on Himalayan anatexis. *Journal of Petrology*, 39; 689 – 710.
- Rushmer, T., 1991. Partial melting of two amphibolites: Contrasting experimental results under fluid absent conditions. *Contrib Mineral Petrol*, 107; 41 – 59.
- Scherer, E., Munker, C., Mezger, K., 2001. Calibration of the lutetium hafnium clock. *Science*, 293; 683 – 687.
- Searle, M. P., Parrish, R. R., Hodges K. V., et al., 1997. Shisha pangma leucogranite, South Tibetan Himalaya: Field relations, geochemistry, age, origin and emplacement. *The Journal of Geology*, 105; 295 – 317.
- Sun, S. S., McDonough W. F., 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. In: Sunders, A. D., Norry, M. J., eds., *Magmatism in the ocean basins*. London: Special Publications, 42; 313 – 345.
- Sylvester, P. J., 1998. Post collisional strongly peraluminous granites. *Lithos* 45; 29 – 44.
- Taylor, S. R., McLennan, S. M., 1985. *The continental crust: Its composition and evolution*. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1 – 132.
- Tepper, J. H., Nelson, B. K., Bergantz G. W., 1993. Petrology of the chilliwack batholith, North Cascades, Washington: Generation of calc alkaline granitoids by melting of mafic lower crust with variable water fugacity. *Contrib Mineral Petrol*, 113; 333 – 351.
- Vervoort J. D., Blichert Toft, J., 1999. Evolution of the depleted mantle: Hf isotope evidence from juvenile rocks through time. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 63; 533 – 556.
- Visonà D., Lombardo, B., 2002. Two mica and tourmaline leucogranites from the Everest Makalu region (Nepal Tibet): Himalayan leucogranite genesis by isobaric heating. *Lithos*, 62; 125 – 150.
- White, A. J. R., Chappell, B. W., 1977. Ultrametamorphism and granitoid genesis. *Tectonophysics* 43; 7 – 22.
- Wolf, M. B., Wyllie, P. J., 1992. The formation of tonalitic liquids during the vapor absent partial melting of amphibolite at 10 kbar. *Eos* 70; 506 – 518.
- Wu, F. Y., Yang Y. H., Xie L. W., et al., 2006. Hf isotopic compositions of the standard zircons and baddeleyites used in U Pb geochronology. *Chem. Geol.*, 232; 105 – 126.
- Yuan H. L., Gao S., Liu X. M., et al., 2004. Accurate U Pb age and trace element determinations of zircon by laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry. *Geostand. Newsl.*, 28; 353 – 370.
- Zhai, Q. G., Li C., Li H. M., et al., 2005. U Pb zircon age of leucogranite in the central Gangdise, Tibet and its geological significance. *Geological Bulletin of China*, 24; 349 – 353 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, G. W., Guo A. L., Yao, A. P., 2004. Western Qinling Songpan continental tectonic node in China's continental tectonics. *Earth Science Frontiers*, 11; 23 – 32 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, H. F., Gao S., Zhong, Z. Q., et al., 2002. Geochemical and Sr Nd Pb isotopic compositions of Cretaceous granitoids: Constraints on tectonic framework and crustal structure of the Dabieshan ultrahigh pressure metamorphic belt, China. *Chem. Geol.*, 186; 281 – 299.

Zhang, H. F., Harris, N., Parrish, R., et al., 2004. Causes and consequences of protracted melting of the mid crust exposed in the North Himalayan antiform. *Earth Planetary Science Letters*, 228: 195 – 212.

Zhang, H. F., Harris, N., Parrish, R., et al., 2005. Geochemistry of North Himalayan leucogranites: Regional comparison, petrogenesis and tectonic implications. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 30(3): 275 – 288 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

和钟铨, 杨德明, 郑常青, 等, 2006. 冈底斯带门巴花岗岩同位素测年及其对新特提斯洋俯冲时代的约束. *地质论评*, 52: 100 – 106.

李才, 王天武, 李惠民, 等, 2003. 冈底斯地区发现印支期巨斑

花岗闪长岩: 古冈底斯造山的存在证据. *地质通报*, 22: 364 – 366.

莫宣学, 董国臣, 赵志丹, 等, 2005. 西藏冈底斯带花岗岩的时空分布特征及地壳生长演化信息. *高校地质学报*, 11: 281 – 290.

潘桂棠, 莫宣学, 侯增谦, 等, 2006. 冈底斯造山带的时空结构及演化. *岩石学报*, 22: 521 – 533.

翟庆国, 李才, 李惠民, 等, 2005. 西藏冈底斯中部淡色花岗岩锆石 U Pb 年龄及其地质意义. *地质通报*, 24: 349 – 353.

张国伟, 郭安林, 姚安平, 2004. 中国大陆构造中的西秦岭 – 松潘大陆构造结. *地学前缘*, 11: 23 – 32.

张宏飞, Harris, N., Parrish, R., 等, 2005. 北喜马拉雅淡色花岗岩地球化学: 区域对比、岩石成因及其构造意义. *地球科学——中国地质大学学报*, 30(3): 275 – 288.

《地球科学——中国地质大学学报》
2007 年 第 32 卷 第 3 期 要目预告

赤道西太平洋晚第四纪古生产力变化: ODP 807A 孔的记录 张江勇 等

早上新世非洲季风与地中海表层生产力变化的岁差节律 黄恩清 等

安徽巢湖平顶山西坡剖面印度阶与奥伦尼克阶界线层牙形石生物地层 赵来时 等

房山变质核杂岩基底拆离断层韧性剪切变形构造及环境分析 姚丽景 等

黔东北地区南华系大塘坡组冷泉碳酸盐岩及其意义 周琦 等

莺歌海盆地构造演化与强烈沉降机制的分析和模拟 孙珍 等

辽东湾地区孔隙演化的机理 蒋恕 等

原生透镜状砂岩油藏成藏过程一维数值模拟 解国军 等