

doi:10.3799/dqkx.2014.109

# 冈底斯印支晚期后碰撞花岗岩: 锆石 U-Pb 年代学及岩石地球化学证据

王程, 魏启荣\*, 刘小念, 丁鹏飞, 卜涛, 孙骥, 张小强, 王敬元

中国地质大学资源学院, 湖北武汉 430074

**摘要:** 对出露在冈底斯中带的达布拉岩体进行了系统的岩石学研究、LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年、岩石地球化学分析、Sr-Nd-Pb 同位素组成的讨论。结果显示, 达布拉岩体的岩石类型为二长花岗岩, 由中细粒的边缘相和中粗粒的中央相组成, 成岩年龄为  $230.6 \pm 4.3$  Ma ~  $228.2 \pm 3.5$  Ma, 属晚三叠世。岩体具高 Si ( $w(\text{SiO}_2) = 71.79\% \sim 77.27\%$ )、高 K ( $w(\text{K}_2\text{O}) = 4.06\% \sim 5.26\%$ )、低 Ti ( $w(\text{TiO}_2) = 0.06\% \sim 0.40\%$ ) 含量特征, 铝饱和指数 (A/CNK) 为 1.16 ~ 1.19, 为强过铝质花岗岩, 负铕异常显著 ( $\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0.06 \sim 0.35$ ), 强烈富集 Rb、Th 和亏损 Ba、Nb、Sr、P、Ti。同位素组成上具高 ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ )<sub>i</sub> 值 (0.7127 ~ 0.7201)、低  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  值 (-10.6)、高放射成因 Pb 特征。达布拉岩体为澳大利亚大陆北缘与拉萨地块汇聚碰撞触发的班公湖—怒江洋壳岩石圈南向俯冲背景下, 在后碰撞伸展阶段由幔源岩浆底侵引发冈底斯成熟地壳物质部分熔融形成的。

**关键词:** 印支晚期花岗岩; 锆石 U-Pb 年龄; 地球化学; 后碰撞; 冈底斯。

中图分类号: P597

文章编号: 1000-2383(2014)09-1277-12

收稿日期: 2013-11-12

## Post-Collision Related Late Indosinian Granites of Gangdise Terrane: Evidences from Zircon U-Pb Geochronology and Petrogeochemistry

Wang Cheng, Wei Qirong\*, Liu Xiaonian, Ding Pengfei, Bu Tao, Sun Ji, Zhang Xiaoqiang, Wang Jingyuan

Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

**Abstract:** The lithology, LA-ICP-MS zircon U-Pb age, major and trace element geochemistry, Sr-Nd-Pb isotope compositions of Dabula pluton from the middle part of the Gangdise granitoid belt are systematically studied in the paper. Results suggest that the rock type is adamellite, and the pluton is composed of middle-fine grained border facies and middle-coarse grained central facies. The two facies yield weighted mean ages of  $230.6 \pm 4.3$  Ma ~  $228.2 \pm 3.5$  Ma, with the corresponding age of Late Triassic. The rocks are relatively rich in  $\text{SiO}_2$  and kalium, with  $\text{SiO}_2$  content between 71.79% ~ 77.27%; relatively high K ( $w(\text{K}_2\text{O}) = 4.06\% \sim 5.26\%$ ) and low Ti ( $w(\text{TiO}_2) = 0.06\% \sim 0.40\%$ ) contents; A/CNK varies from 1.16 ~ 1.19, displaying strong peraluminous characteristics and sharp negative Eu anomalies ( $\delta\text{Eu} = 0.06 \sim 0.35$ ). Trace element ratio spider diagram displays apparent enrichments of Rb, Th elements, and marked depletions of Ba, Nb, Sr, P and Ti. The Sr-Nd isotopes show the granite bodies have the high initial  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  ratios (0.7127 ~ 0.7201) and the negative  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  (-10.6) results. Pb isotope feature shows the enrichment of radiogenic Pb. It is concluded that the Dabula pluton was formed by partial melting of mature crustal materials from Gangdise resulted from the underplating of the subduction-related basaltic magmas during the post-collisional extension in the dynamic background associated with the southward Bangong-Nujiang Tethyan seafloor subduction triggered by the collision between the northern Australia and Lhasa terranes.

**Key words:** late Indosinian granite; zircon U-Pb age; geochemistry; post-collision; Gangdise.

基金项目: 中国地质调查局西藏则学地区矿产远景调查项目 (No. 1212011086040)。

作者简介: 王程 (1988-), 男, 硕士在读研究生, 主要从事岩浆岩与成矿研究。E-mail: wangcheng607@126.com

\* 通讯作者: 魏启荣, E-mail: weiqr1030@cug.edu.cn

冈底斯巨型构造—岩浆带,东西延伸约 2 000 km、南北宽约 100 km,西藏地区 80% 的岩浆岩均集中于该岩浆带内,其包含了丰富的关于青藏高原岩石圈组成和演化的信息,记录了青藏高原构造运动的历史(莫宣学等,2005).前人对该带燕山期、喜山期的岩浆作用进行了大量的研究(芮宗瑶等,2003;赵志丹等,2003,2006;李光明和芮宗瑶,2004;董国成等,2006;侯增谦等,2006;曲晓明等,2006;朱弟成等,2009a,2009b;陈炜等,2011),而关于印支期岩浆岩的研究鲜有报道.近年来,随着青藏高原大规模区域地质调查工作的开展,对冈底斯构造岩浆带的研究取得了一系列新进展,并陆续报道有印支期花岗岩类的存在(李才等,2003;和钟铎等,2006;张宏飞等,2007;李化启,2009),暗示了冈底斯构造—岩浆带不仅在燕山和喜山期存在大规模的岩浆活动,在印支期也有较大规模的活动,具有多阶段、多期次的复杂演化历史.然而现有的研究因缺少高质量的年代学和系统的岩石地球化学数据,使得目前对冈底斯印支期构造—岩浆演化的认知程度较低,从而直接限制了对整个冈底斯构造—岩浆带历史演化的研究.本文以达布拉岩体 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为切入点,以其岩石地球化学成分特征分析为基础,结合岩石学和岩相学研究,揭示冈底斯印支期岩浆事件,探讨印支期花岗岩体形成的动力学背景,并为重新认识冈底斯构造—岩浆演化提供新思路.

## 1 地质背景

冈底斯构造—岩浆带是夹持于班公湖—怒江蛇

绿岩带(BNSZ)与雅鲁藏布蛇绿岩带(YZSZ)之间的强烈挤压造山带.莫宣学等(2005)认为,冈底斯带从南往北可划分为南带、中带和北带 3 个亚带.潘桂棠等(2006)对冈底斯带从南往北进一步划分为:冈底斯—下察隅晚燕山—喜山期岩浆弧带(Ⅱ-1)、隆格尔—念青唐古拉复合古岛弧带(Ⅱ-2)、革吉—申扎弧后盆地带(Ⅱ-3)和它日错—班戈—那曲前陆盆地(Ⅱ-4).其中冈底斯中带大致包括隆格尔—念青唐古拉复合古岛弧带(Ⅱ-2)和革吉—措勤弧后盆地带(Ⅱ-3).冈底斯构造—岩浆带中带主要分布有早白垩世花岗岩类,伴有后碰撞期钾质—超钾质火山岩(<25 Ma)(莫宣学等,2005;Zhu *et al.*, 2011).在该带南部地区,沿着隆格尔—念青唐古拉复合古岛弧带南缘还陆续分布有一些中生代的花岗岩类,时代主要是从晚三叠至早白垩.

新近完成的 1:5 万西藏则学地区地质矿产调查成果显示,在谢通门县娘热乡达布拉地区分布有印支晚期的花岗岩体(以下简称为达布拉岩体),构造位置上大致位于冈底斯构造—岩浆带之中带、隆格尔—念青唐古拉复合古岛弧带(Ⅱ-2)之西段(图 1a).岩体呈岩株状产出(图 1b),出露面积约 80 km<sup>2</sup>,岩石类型为二长花岗岩.该岩体可划分出 2 个相带,即边缘相的中细粒二长花岗岩和中央相的中粗粒似斑状结构的二长花岗岩.岩体侵位于上石炭—下二叠统拉嘎组(C<sub>2</sub>-P<sub>1</sub>l)和下二叠统昂杰组(P<sub>1</sub>a)的碎屑沉积岩中,与围岩接触带部位发育热接触变质现象,边部常含有大小不等的围岩捕虏体.岩体西北部为后期始新统帕那组(E<sub>2</sub>p)火山岩、火山碎屑岩不整合覆盖.

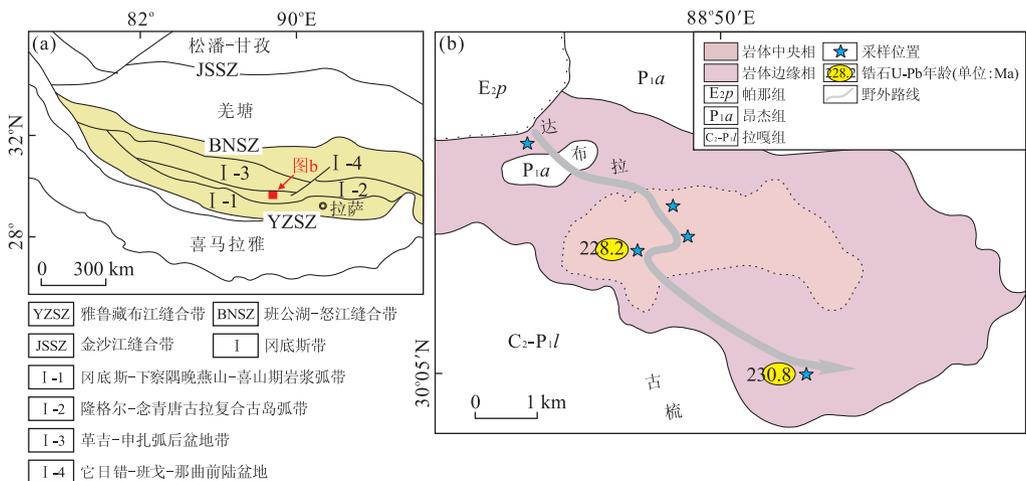


图 1 研究区地质略图

Fig. 1 Geological sketch of the study area

## 2 岩相学特征

达布拉岩体呈灰白、浅肉红色,具中细粒结构、中粗粒似斑状结构,块状构造,主要由石英(25%~27%)、斜长石(40%~45%)、钾长石(35%~47%)和黑云母(3%~4%)、白云母(2%~3%)及少量Fe-Ti氧化物、锆石、磷灰石等副矿物组成.岩石中斑晶含量约为10%~15%,斑晶以斜长石为主,粒径一般为1.5 cm×3 cm,个别斑晶巨大可达2 cm×4 cm(图2a, 2b);基质主要为石英、斜长石、钾长石等.石英呈他形粒状;斜长石为半自形—自形板状,发育细密聚片双晶(图2c, 2d),表面常绢云母化;钾长石为微斜长石、条纹长石(图2c),呈不规则板状,可见格子双晶(图2d),粘土化发育;黑云母、白云母呈细片状,黑云母绿泥石化强烈(图2c).

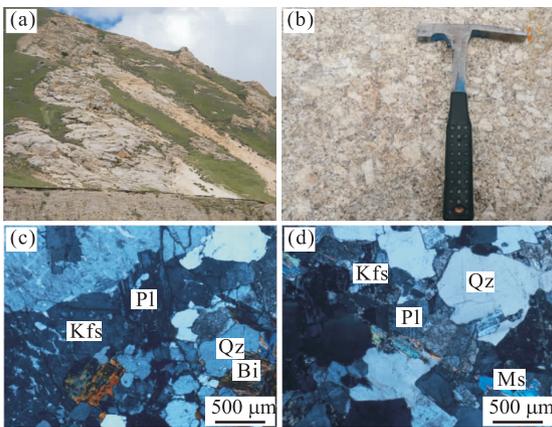


图2 二长花岗岩体野外特征和显微结构特征

Fig. 2 Field photos and photomicrograph features of adamellite pluton

Qz. 石英;Pl. 斜长石;Kfs. 钾长石;Bi. 黑云母;Ms. 白云母;a. 二长花岗岩体的野外露头;b. 二长花岗岩体的长石斑晶;c, d. 二长花岗岩显微结构特征(+)

## 3 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年

### 3.1 样品与分析方法

锆石测年的2件样品分别采自达布拉岩体东南部(B1282-2)及中部(B2186-1). 锆石挑选由河北省廊坊区域地质矿产调查研究所实验室完成,先将新鲜的样品粉碎至120目以下,用磁法和重力方法挑选,再在双目镜下挑选出用于定年的锆石. 采用环氧树脂固定待测试的锆石颗粒之后,将其抛磨至露出锆石的核部,然后对待测锆石进行透射光、反射光和阴极发光(CL)照相. 锆石制靶、阴极发光(CL)照相及

U-Pb 同位素测年均在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室完成. 锆石阴极发光(CL)检测在电子探针实验室 MonoCL3 系统上完成,检测时其电子束加速电压为10 kV. 锆石 U-Pb 同位素测年在 Agilent 7500a 电感耦合等离子体质谱仪与 GeoLas 2005 准分子激光剥蚀系统联机上完成.

LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素测年激光束斑直径为32 μm,用He作为剥蚀物质的载气,Ar为补偿气以调节灵敏度,锆石 U-Pb 同位素测定采用标准锆石91500作为外标标准矿物,以GJ-1作为内标标准矿物,用NISTSRM 610来校正微量元素的含量. 原始数据处理和年龄计算分别用ICPMSData-Cal8.0 (Liu *et al.*, 2008, 2010a, 2010b)和ISO-PLOT (Ludwing, 2012)完成,并采用Anderson (2002)方法对普通铅进行校正.

### 3.2 分析结果

光学显微镜及锆石阴极发光检测显示,锆石呈无色透明,自形、棱柱状,长度一般为100~200 μm,长宽比为2:1~3:1,颗粒核部常见浑圆状残留锆石. 阴极发光电子(CL)图像(图3)显示,锆石发育密集的振荡环带,为典型的岩浆锆石. 部分锆石有较宽的环带结构,暗示这些锆石结晶时岩浆温度较高(吴元保和郑永飞,2004). 本文选取环带清晰、自形、晶体完整的岩浆锆石作为测年对象,达布拉岩体两件样品的LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素测定结果列于表1中.

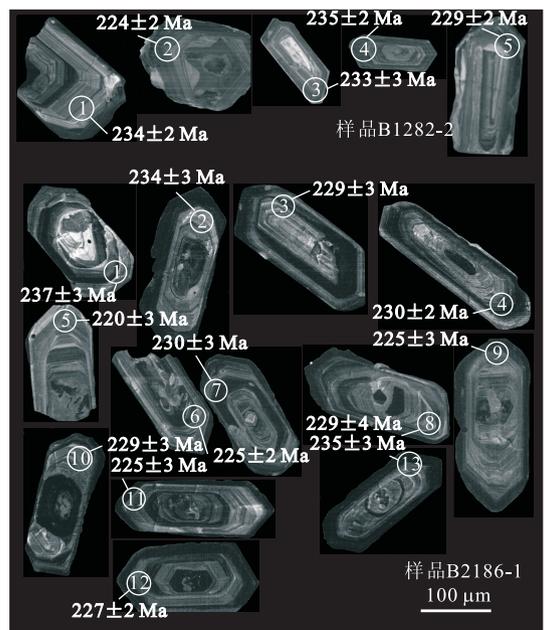


图3 达布拉岩体的锆石阴极发光电子图像  
Fig. 3 CL image of zircon of Dabula pluton

表 1 达布拉岩体 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素分析结果  
Table 1 LA-ICP-MS U-Pb data of zircon of Dabula pluton

分析点号	Pb( $\mu\text{g/g}$ )	Th( $\mu\text{g/g}$ )	Th/U	$^{207}\text{Pb}^*/^{206}\text{Pb}^*$		$^{207}\text{Pb}^*/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}^*/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		
				1 $\sigma$	1 $\sigma$	1 $\sigma$	1 $\sigma$	1 $\sigma$	1 $\sigma$	1 $\sigma$	1 $\sigma$	1 $\sigma$	1 $\sigma$	1 $\sigma$	1 $\sigma$	1 $\sigma$
样品 B1282-2(中细粒二长花岗岩)																
B1282-2-01	34.95	412.95	798.49	0.52	0.05122	0.00132	0.26077	0.00646	0.03689	0.00031	251	41	235	5	234	2
B1282-2-02	93.99	620.34	2413.16	0.26	0.05097	0.00099	0.24951	0.00493	0.03543	0.00032	239	29	226	4	224	2
B1282-2-03	89.37	711.69	2228.76	0.32	0.05007	0.00098	0.25426	0.00565	0.03675	0.00046	198	29	230	5	233	3
B1282-2-04	143.54	1112.59	3494.02	0.32	0.05198	0.00089	0.26612	0.00446	0.03706	0.00024	284	26	240	4	235	2
B1282-2-05	83.35	370.63	2184.34	0.17	0.05058	0.00086	0.25185	0.00431	0.03609	0.00038	222	21	228	3	229	2
样品 B2186-1(中粗粒似斑状二长花岗岩)																
B2186-1-01	481.26	2109.27	7966.48	0.26	0.05193	0.00204	0.26996	0.01117	0.03741	0.00053	283	89	243	9	237	3
B2186-1-02	236.43	1051.40	3939.86	0.27	0.05193	0.00153	0.26510	0.00802	0.03696	0.00052	283	69	239	6	234	3
B2186-1-03	172.48	1260.05	2170.51	0.58	0.05338	0.00160	0.26530	0.00798	0.03609	0.00047	346	69	239	6	229	3
B2186-1-04	590.06	3301.29	10916.94	0.30	0.05864	0.00090	0.29394	0.00477	0.03633	0.00038	554	33	262	4	230	2
B2186-1-05	172.52	1107.07	1923.99	0.58	0.05461	0.00237	0.26479	0.01354	0.03464	0.00055	394	103	239	11	220	3
B2186-1-06	316.93	2910.98	2925.26	1.00	0.05950	0.00221	0.29375	0.01109	0.03544	0.00036	587	81	262	9	225	2
B2186-1-07	478.72	2400.03	9842.31	0.24	0.05451	0.00159	0.27505	0.00831	0.03628	0.00052	391	67	247	7	230	3
B2186-1-08	185.99	954.72	2564.58	0.37	0.04915	0.00209	0.24478	0.00962	0.03620	0.00057	154	98	222	8	229	4
B2186-1-09	161.54	937.70	2041.27	0.46	0.04994	0.00213	0.24635	0.01022	0.03551	0.00045	191	94	224	8	225	3
B2186-1-10	159.22	962.46	1822.36	0.53	0.04976	0.00189	0.24829	0.00904	0.03617	0.00046	183	117	225	7	229	3
B2186-1-11	247.26	1053.51	3015.08	0.35	0.05389	0.00192	0.26612	0.00927	0.03553	0.00043	365	86	240	7	225	3
B2186-1-12	333.23	2580.36	4027.10	0.64	0.06550	0.00187	0.32710	0.00999	0.03580	0.00035	791	60	287	8	227	2
B2186-1-13	452.05	1920.20	4614.38	0.42	0.05445	0.00138	0.28000	0.00743	0.03709	0.00047	391	62	251	6	235	3

注: Pb\* 代表放射性铅。

表 2 达布拉岩体主量元素分析结果(%)

Table 2 Major elements result of Dabula pluton

样号	岩石名称	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	H <sub>2</sub> O <sup>+</sup>	CO <sub>2</sub>	总量
B2186-1	中粗粒似斑状二长花岗岩	72.02	0.29	13.83	0.27	2.00	0.05	0.64	0.90	2.85	5.13	0.08	1.08	0.63	99.77
B2190-1	中粗粒似斑状二长花岗岩	71.89	0.40	12.99	0.98	3.01	0.10	0.86	1.18	2.85	4.06	0.11	1.05	0.21	99.69
B2190-2	中粗粒似斑状二长花岗岩	71.79	0.36	13.62	0.41	2.57	0.06	0.76	1.11	2.89	4.79	0.10	0.83	0.35	99.64
B1080-1	中细粒二长花岗岩	77.27	0.06	12.91	0.29	0.10	0.01	0.15	0.13	3.09	5.22	0.02	0.57	0.06	99.88
B1282-2	中细粒二长花岗岩	75.73	0.07	13.74	0.27	0.25	0.05	0.16	0.25	3.26	5.26	0.06	0.68	0.08	99.86

注: 分析测试单位为西南冶金地质测试所, 下同。

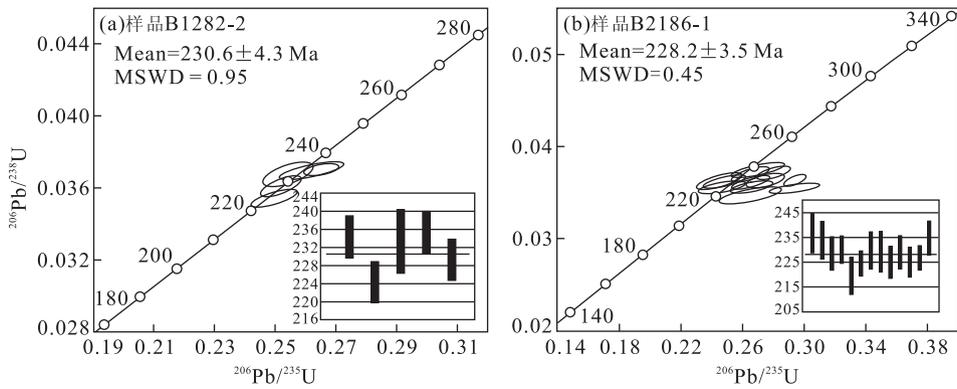


图 4 达布拉岩体的锆石 U-Pb 年龄谐和图

Fig. 4 Zircon U-Pb concordia diagram of Dabula pluton

样品 B1282-2 成功测定了 5 颗锆石, 锆石 Th/U 比值变化于 0.17~0.52 之间, 样品 B2186-1 成功测定了 13 颗锆石, 锆石 Th/U 比值变化于 0.26~1.00 之间. 样品 B1282-2 的 5 个锆石测点和样品 B2186-1 的 13 个锆石测点均在 U-Pb 谐和图上形成集中的聚集束,  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  加权平均年龄分别为  $230.6 \pm 4.3 \text{ Ma}$  ( $\text{MSWD}=0.95$ ) 和  $228.2 \pm 3.5 \text{ Ma}$  ( $\text{MSWD}=0.45$ ) (图 4a, 4b). 虽然样品 B1282-2 的数据较少, 但 5 个测点仍然给出了与样品 B2186-1 近似的  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  加权平均年龄. 样品的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄在误差范围内可信, 2 个年龄均解释为(似斑状)二长花岗岩的岩浆结晶年龄. 上述年龄测定结果表明达布拉岩体形成时代为晚三叠世, 属于印支晚期构造—岩浆活动的产物.

#### 4 岩石地球化学特征

达布拉岩体的主量—稀土—微量元素的配套分析由西南冶金地质测试所完成. 所挑选的样品新鲜、基本无蚀变. 主量元素采用 X 射线荧光熔片法 (XRF) 测定, 分析精度小于 1%, 其中  $\text{FeO}$ 、 $\text{H}_2\text{O}^+$  和  $\text{CO}_2$  采用湿化学分析法测定. 稀土元素和微量元素分别采用阳离子交换分离—电感耦合等离子体原子发射光谱法 (ICP-AES) 和电感耦合等离子质谱仪 (ICP-MS) 完成, 分析精度优于 6%. Sr-Nd-Pb 样品的化学制备在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室超净化室完成, 测试采用德国 Finnigan 公司 MAT-261 表面热电离同位素比值质谱仪测定, 全流程本底为:  $\text{Rb}=1.5 \times 10^{-10} \text{ g}$ ,  $\text{Sr}=1.1 \times 10^{-11} \text{ g}$ ;  $\text{Sm}=3.0 \times 10^{-11} \text{ g}$ ,  $\text{Nd}=1.2 \times 10^{-10} \text{ g}$ ;  $\text{Pb}=1.0 \times 10^{-9} \text{ g}$ . Sr、Nd 同位素比值的质

谱分馏校正分别采用  $^{88}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}=8.375209$  和  $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}=0.7219$ . 标准样及溶液的测定值分别为: GBW04411  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}=0.75985 \pm 14(2\sigma)$ , NBS987  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}=0.71029 \pm 6(2\sigma)$ ; GBW04419  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}=0.512725 \pm 7(2\sigma)$ ; LaJolla  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}=0.511860 \pm 7(2\sigma)$ ; NBS981  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=36.731 \pm 7(2\sigma)$ ,  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=15.445 \pm 3(2\sigma)$ ,  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=16.923 \pm 3(2\sigma)$ . 主量、稀土和微量元素分析结果分别见表 2、3 和 4. Sr-Nd-Pb 同位素分析结果分别见表 5 和表 6.

#### 4.1 主量元素

表 2 显示, 达布拉岩体的  $\text{SiO}_2$  为 71.79%~77.27%. 全碱含量为 6.91%~8.52%,  $\text{K}_2\text{O}$  含量 (4.06%~5.26%) 比  $\text{Na}_2\text{O}$  (2.85%~3.26%) 高,  $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$  比值为 1.42~1.80. 在岩体分类图解(图 5a)中, 其成分点均落入花岗岩区, 且岩体属亚碱性系列. 达布拉岩体的  $\text{CaO}$ 、 $\text{TiO}_2$  含量较低, 分别为 0.13%~1.18% 和 0.06%~0.40%.  $\text{FeOT}$  和  $\text{Mg}$  含量较低, 分别为 0.36%~3.90% 和 0.15%~0.86%, 其  $\text{FeO}_T/\text{MgO}$  为 2.41~3.87. 而图 5b 表明, 岩体还属高钾钙碱性系列的岩石. 岩体的  $\text{A}/\text{CNK}$  为 1.16~1.19 (平均值为 1.17), 刚玉标准分子为 1.92%~2.39%, 显示了达布拉岩体为强过铝质岩石.

#### 4.2 稀土元素

表 3 显示, 达布拉岩体的稀土总量变化范围较大, 其  $\Sigma\text{REE}$  为  $87.25 \times 10^{-6} \sim 268.19 \times 10^{-6}$ . 稀土元素发生了不同程度的分馏. 经球粒陨石标准化的稀土元素配分模式为轻稀土富集程度不同的右倾斜型(图 6a), 其  $(\text{La}/\text{Yb})_N=18.49 \sim 1.64$ . 岩体具有明显的负铕异常 ( $\delta\text{Eu}=0.06 \sim 0.35$ ).

#### 4.3 微量元素

表 4 显示, 达布拉岩体的大离子亲石元素 (LILE)

表 3 达布拉岩体稀土元素分析结果( $10^{-6}$ )

Table 3 Rare earth elements result of Dabula pluton

样号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y	$\Sigma$ REE	(La/Yb) <sub>N</sub>	$\delta$ Eu
B2186-1	53.34	67.48	11.62	45.41	8.97	1.08	9.65	1.27	7.60	1.47	4.48	0.64	2.07	0.61	30.53	215.68	18.49	0.35
B2190-1	66.92	75.64	15.17	60.19	12.17	0.95	12.74	1.66	10.18	1.87	5.87	0.81	3.31	0.71	40.16	268.19	14.52	0.23
B2190-2	53.72	73.85	11.47	43.26	8.84	1.01	9.67	1.17	7.30	1.25	3.90	0.52	3.53	0.52	32.86	220.00	10.92	0.33
B1080-1	12.62	29.22	3.66	13.13	4.22	0.09	4.35	0.91	6.42	1.32	4.22	0.76	5.51	0.80	43.46	87.25	1.64	0.06
B1282-2	15.44	32.87	3.73	13.14	3.68	0.26	4.08	0.86	6.42	1.33	4.13	0.70	4.86	0.69	43.97	92.18	2.28	0.21

表 4 达布拉岩体微量元素分析结果( $10^{-6}$ )

Table 4 Trace elements result of Dabula pluton

样号	Rb	Sr	Ba	U	Th	Nb	Ta	Zr	Hf	Sc	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Pb
B2186-1	396.00	107.70	297.50	3.86	41.99	12.44	4.05	130.89	8.18	6.07	23.91	180.60	4.62	5.93	54.16	149.10	189.30
B2190-1	315.30	100.80	264.20	14.50	76.19	12.23	4.33	212.56	13.16	9.10	34.13	310.80	6.96	6.88	75.00	277.10	405.00
B2190-2	356.00	109.80	285.10	9.62	57.65	10.96	3.35	176.48	10.78	7.55	30.07	211.70	5.04	7.55	42.23	74.12	220.30
B1080-1	733.40	13.64	69.20	5.97	10.80	0.73	1.75	33.95	2.21	2.20	1.35	12.90	0.65	1.11	1.38	5.37	83.02
B1282-2	539.40	34.97	105.60	5.24	17.95	5.32	2.89	43.75	2.17	1.97	2.93	15.56	0.48	1.10	1.62	148.40	89.98

表 5 达布拉岩体全岩 Sr-Nd 同位素组成

Table 5 Sr-Nd isotopic data of Dabula pluton

样号	Rb( $10^{-6}$ )	Sr( $10^{-6}$ )	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$	$\epsilon_{\text{Sr}}(t)$
B2186-1	396.0	107.7	10.687 134	0.754 802 $\pm$ 7	0.720 1	225.5
B2190-1	315.3	100.8	9.082 641	0.744 567 $\pm$ 9	0.715 1	154.2
B2190-2	356.0	109.8	9.413 236	0.743 210 $\pm$ 5	0.712 7	119.6

样号	Sm( $10^{-6}$ )	Nd( $10^{-6}$ )	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	$(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_i$	$\epsilon_{\text{Nd}}(t)$
B2186-1	8.97	45.41	0.119 426	0.511 977 $\pm$ 10	0.511 8	-10.6
B2190-1	12.17	60.19	0.122 193	0.511 982 $\pm$ 7	0.511 8	-10.6
B2190-2	8.84	43.26	0.123 587	0.511 984 $\pm$ 7	0.511 8	-10.6

注:分析测试单位为中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室,下同; $t=228.2$  Ma.

表 6 达布拉岩体全岩 Pb 同位素组成

Table 6 Pb isotopic data of Dabula pluton

样号	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$
B2186-1	18.801 4 $\pm$ 0.000 4	15.753 6 $\pm$ 0.000 4	39.413 5 $\pm$ 0.001 0
B2190-1	19.216 3 $\pm$ 0.000 3	15.781 9 $\pm$ 0.000 3	39.896 4 $\pm$ 0.000 7
B2190-2	19.035 6 $\pm$ 0.000 4	15.772 5 $\pm$ 0.000 3	39.737 6 $\pm$ 0.001 0

中 Rb、Sr、Ba 的含量分别为  $315.30 \times 10^{-6} \sim 733.40 \times 10^{-6}$ 、 $13.64 \times 10^{-6} \sim 109.80 \times 10^{-6}$  和  $69.20 \times 10^{-6} \sim 297.50 \times 10^{-6}$ , 其 Rb/Sr 比值变化范围较大,为 3.13~53.77. 放射性生热元素(RPH)中 U、Th 的含量分别为  $3.86 \times 10^{-6} \sim 14.50 \times 10^{-6}$  和  $10.80 \times 10^{-6} \sim 76.19 \times 10^{-6}$ . 高场强元素(HFSE)中 Nb、Ta、Zr、Hf 的含量分别为  $0.73 \times 10^{-6} \sim 12.44 \times 10^{-6}$ 、 $1.75 \times 10^{-6} \sim 4.33 \times 10^{-6}$ 、 $33.95 \times 10^{-6} \sim 212.56 \times 10^{-6}$  和  $2.17 \times 10^{-6} \sim 13.16 \times 10^{-6}$ . 在经原始地幔标准化的微量元素比值蛛网图(图 6b)上,达布拉岩体强烈低表现出 Rb、Th

的富集和 Ba、Nb、Sr、P、Ti 元素的亏损.

#### 4.4 Sr-Nd 同位素

达布拉岩体 Sr-Nd 同位素(表 5)表现出较高的  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  初始比值和较低的  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  初始比值,其  $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$  为 0.712 7~0.720 1,  $\epsilon_{\text{Sr}}(t)$  值为 119.6~225.5,  $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_i$  为 0.511 8,  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  为 -10.6. 钐同位素亏损地幔模式年龄( $T_{\text{DM}}$ )古老,为 1 894~1 970 Ma, 远远早于岩浆的结晶年龄(228.2 Ma). 在  $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ - $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  图解中(图 7a), Sr-Nd 同位素组成点明显向右偏离了地幔趋势线,位于莫宣学等(2005)识别出的冈底斯两类地壳中的成熟地壳(主要分布于冈底斯中带)范围;在  $\epsilon_{\text{Sr}}(t)$ - $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  图解中(图 7b), Sr-Nd 同位素分布特征与西藏地区过铝质花岗岩(廖忠礼等, 2006)十分相似,均具近水平的相关关系. 上述 Sr-Nd 同位素特征揭示达布拉岩体源区来自冈底斯成熟地壳.

#### 4.5 Pb 同位素

达布拉岩体全岩 Pb 同位素组成(表 6)中

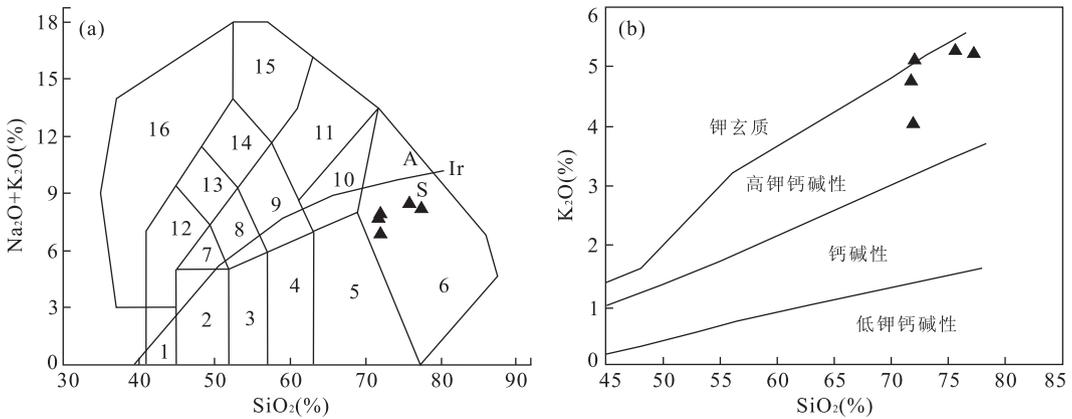


图 5 达布拉岩体的 SiO<sub>2</sub>-(Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O)分类(a)和 SiO<sub>2</sub>-K<sub>2</sub>O 关系(b)

Fig. 5 SiO<sub>2</sub>-(Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O) classification (a) and relation of SiO<sub>2</sub>-K<sub>2</sub>O (b) of Dabula pluton

a 图据 Cox *et al.*, 1979; b 图据 Peccerillo and Taylor, 1976; 1. 橄辉岩; 2. 辉岩; 3. 辉长闪长岩; 4. 闪长岩; 5. 花岗闪长岩; 6. 花岗岩; 7. 二长辉岩; 8. 二长闪长岩; 9. 二长岩; 10. 石英二长岩; 11. 正长岩; 12. 似长辉岩; 13. 似长二长闪长岩; 14. 似长正长闪长岩; 15. 似长正长岩; 16. 似长岩; Ir-Irvine 分界线、岩石系列划分据 Irvine and Baragar(1971); A. 碱性系列; S. 亚碱性系列

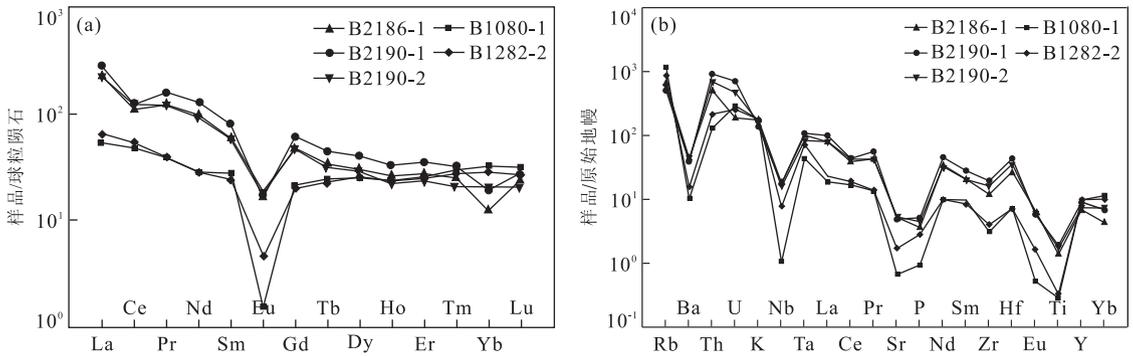


图 6 达布拉岩体稀土元素和微量元素蛛网图

Fig. 6 REE and trace element spidergram of Dabula pluton

球粒陨石标准化值 a 图据 Sun and McDonough(1989); 原始地幔标准化值 b 图据 Sun and McDonough(1989)

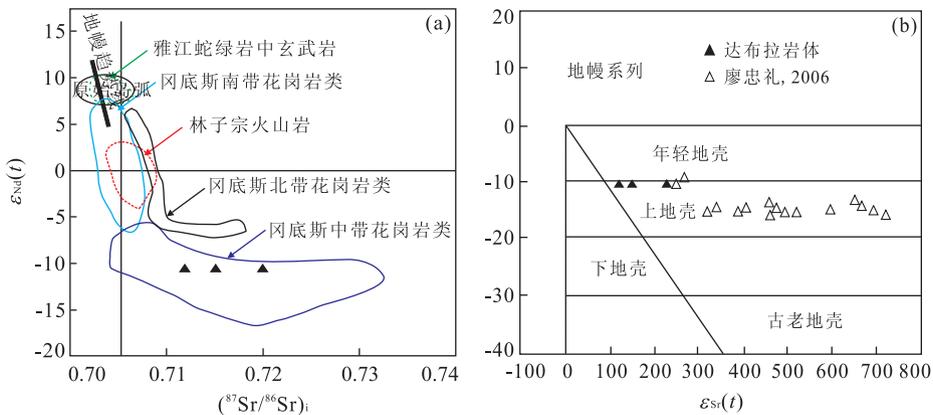


图 7 达布拉岩体的 Sr-Nd 同位素关系

Fig. 7 Isotopic relation of Sr-Nd of Dabula pluton

a. 据莫宜学等(2005); b. 据 DePaolo and Wasserburg(1979)

<sup>206</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb、<sup>207</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb、<sup>208</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb 的比值均较高, 分别为 18.801~19.216, 15.754~15.782 和

39.412~39.896, 明显具有高放射成因铅同位素组成的特点, 显示了富集的铅同位素组成特征. 以 t=

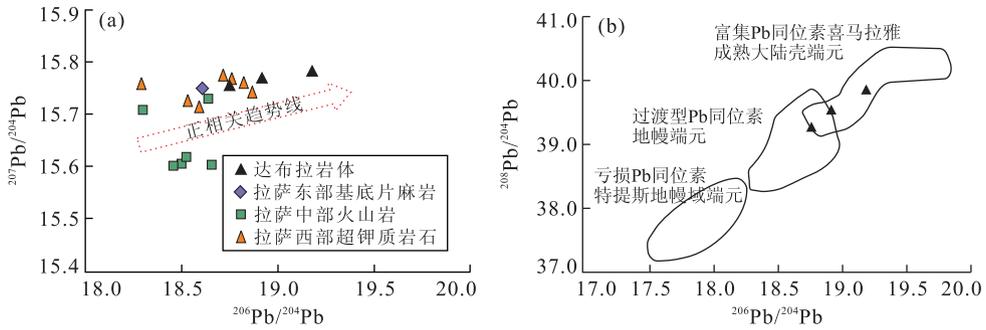


图 8 达布拉岩体的 Pb 同位素协变

Fig. 8  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  (a) and  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  (b) covariant plot of Dabula pluton

图 a 中拉萨东部基底片麻岩, 中部火山岩, 西部超钾质岩石数据引自赵志丹等(2007); 图 b 中 3 个 Pb 同位素地球化学端元的划分引自赵志丹等(2007)

228.2 Ma 进行时间校正, 计算的初始铅同位素比值为  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 18.747 \sim 19.188$ ,  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15.751 \sim 15.781$ ,  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 39.225 \sim 39.850$ . 在  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  同位素相关图(图 8a)上, 达布拉岩体的铅同位素组成位于正相关趋势线的右上端, 高于幔源火山岩及下地壳深变质岩的铅同位素组成, 显示了达布拉岩体的上地壳硅铝质岩石的高  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  比值特征. 在  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  同位素相关图(图 8b)上, 达布拉岩体的铅同位素组成位于富集 Pb 同位素喜马拉雅成熟大陆地壳端元(赵志丹等, 2007), 在 Pb 同位素组成上与喜马拉雅成熟大陆地壳类似, 反映了富集 Pb 的古老基底特征, 这与 Sr-Nd 同位素结果一致.

## 5 讨论

### 5.1 构造环境分析

花岗岩与大地构造环境之间存在着密切的联

系, 花岗岩产出的构造环境对其岩石成因具有指导意义(张旗等, 2007). 研究表明, 利用花岗岩的岩石地球化学成分可以反演其形成的构造环境. Sylvester(1998)指出, 在不同造山带中的强过铝质花岗岩多数是由后碰撞所形成的. 因此, 达布拉岩体的强过铝质特征, 可以作为其后碰撞环境的指示. 达布拉岩体的成分投点在 Pearce *et al.* (1984) 的构造环境判别图(图 9)中分别位于板内(图 9a)和同碰撞(图 9b)的两者界限附近, 显示了达布拉岩体的形成环境介于同碰撞环境和板内环境之间. Liegeois(1998)认为, 花岗岩的同碰撞环境与板内环境两者之间的界限并不是截然的, 它们之间存在着连续的、发展的谱系, 也就是后碰撞构造环境, 总体来说, 后碰撞表示了一种构造松弛的伸展环境. 在 Batchelor and Bowden(1985)的  $R_1$ - $R_2$  构造环境判别图(图 10)中, 达布拉岩体的成分投点落在同碰撞花岗岩和造山后花岗岩之间, 更多地表现出造山后花岗岩的特征. 同时, 微量元素特征显示, 达布拉岩体富集

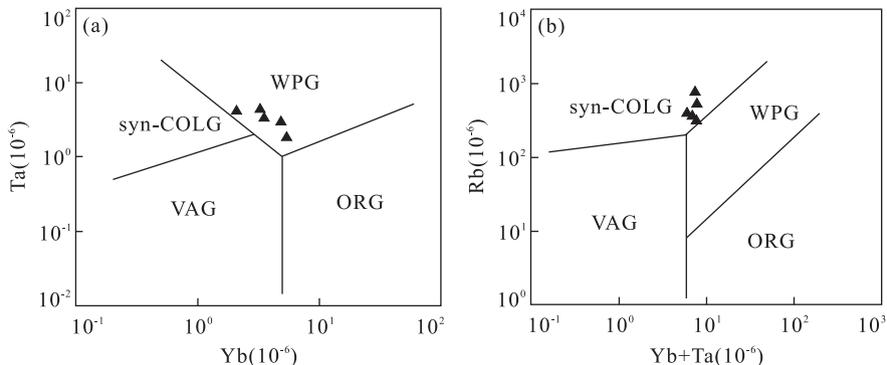
图 9 达布拉岩体的 Yb-Ta 和 Yb+Ta-Rb 构造环境判别(据 Pearce *et al.*, 1984)

Fig. 9 Yb-Ta and Yb+Ta-Rb tectonic setting discrimination of Dabula pluton  
syn-COLG. 同碰撞花岗岩; WPG. 板内花岗岩; ORG. 洋脊花岗岩; VAG. 岛弧花岗岩

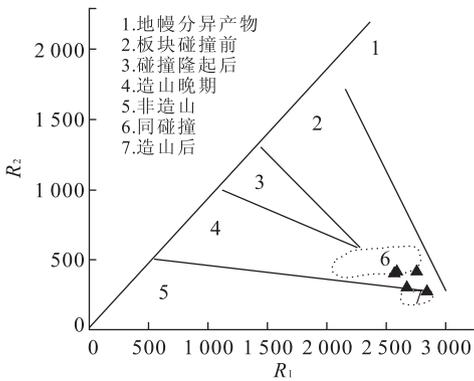


图 10 达布拉岩体的  $R_1$ - $R_2$  构造环境判别(据 Batchelor and Bowden, 1985)

Fig. 10  $R_1$ - $R_2$  tectonic setting discrimination of Dabula pluton

Rb、Th、K 和亏损 Ba、Nb、Sr、P、Ti, 类似于造山后花岗岩的微量元素特征. 因此, 达布拉岩体形成于后碰撞构造环境.

### 5.2 岩石成因讨论

达布拉岩体 Sr-Nd-Pb 同位素特征研究表明, 岩浆源区来自于冈底斯成熟地壳, 与壳内物质的再循环有关. 在 Rb/Ba-Rb/Sr 图解(图 11)中, 达布拉岩体的成分投影点均落在富粘土源岩区, 指示源岩主要为富粘土、贫长石的泥质岩. 研究表明强过铝质花岗岩是由地壳中富铝质沉积物部分熔融所形成的 (Sylvester, 1998; Patino-Douce and Harris, 1998), 达布拉岩体母岩浆应是来自于成熟地壳中富铝质的粘土岩的部分熔融.

达布拉岩体的主量和微量元素地球化学特征显示, 岩体富硅、明显亏损 Ba、Nb、Ta、Sr、P、Ti、Eu 等元素, Eu 的亏损与斜长石和(或)钾长石的分离结晶有关, Ba 和 Sr 的强烈亏损则进一步支持了斜长石

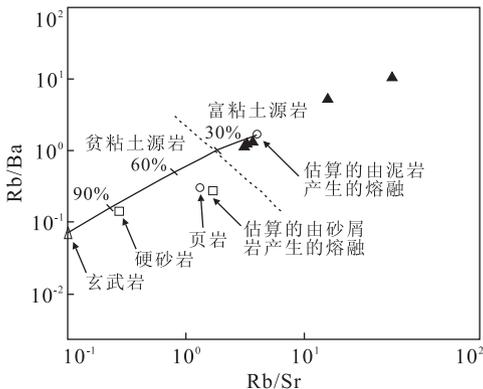


图 11 达布拉岩体的 Rb/Sr-Rb/Ba 关系(据 Sylvester, 1998)

Fig. 11 Relation of Rb/Sr-Rb/Ba of Dabula pluton

和钾长石的分离结晶作用, 指示其母岩浆经历了分离结晶作用.

采用锆石饱和温度计算方法(Watson and Harrison, 1983)估算出岩体母岩浆的温度为 711~866 °C, 明显高于由放射性同位素衰变生热形成的北喜马拉雅中新世淡色花岗岩(667~769 °C) (Zhang *et al.*, 2004). 同时, 在本文邻区东部的晚三叠世罗扎岩体中获得的锆石 Hf 同位素指示, 岩石成因中被认为存在幔源物质的贡献(Zhu *et al.*, 2011). 因此幔源岩浆很可能在达布拉岩体的形成过程中提供热量诱发冈底斯成熟地壳物质的部分熔融, 而放射性生热元素衰变热能的贡献有限.

### 5.3 冈底斯印支构造一岩浆事件

冈底斯带印支晚期后碰撞强过铝质花岗岩的存在, 揭示了在冈底斯带存在印支运动这一构造一岩浆事件. 其年代学和岩石地球化学证据, 为冈底斯印支期构造一岩浆事件提供了新的佐证和时间约束. 在冈底斯带, 印支构造一岩浆事件存在有较多的地质事实依据: (1)南木林扛波乌日地区和下波一带发现的印支期巨斑花岗闪长岩, 是冈底斯印支期造山的证据(李才等, 2003); (2)波密地区帕隆藏布残留蛇绿混杂岩带以北的花岗岩, 侵位时间为晚三叠世一早侏罗世(郑来林等, 2003); (3)松多一门巴地区报道有印支期花岗闪长岩和二长花岗岩的出露(和钟铎等, 2006); (4)冈底斯中部早侏罗世的宁中 S 型白云母二长花岗岩是冈底斯构造带印支造山旋回晚期碰撞阶段的岩浆产物(刘琦胜等, 2006); (5)南木林洛扎一仁堆一带发现的印支晚期强过铝质二云母花岗岩, 是受冈底斯印支早期造山作用影响形成的(张宏飞等, 2007); (6)冈底斯弧背断隆带中松多一加兴段早侏罗世黑云母二长花岗岩, 认为是印支造山事件晚期的岩浆活动(李化启, 2009). 上述已报道的以及本文的花岗岩类在空间分布上, 从东往西沿着波密一工布江达一当雄一南木林一线形成一条重要的印支期花岗岩带. 本区印支期构造一岩浆事件的发现为重新认识冈底斯带构造一岩浆演化提供了新的信息, 也为研究青藏高原印支期构造一岩浆旋回的形成和演化提供了新的内容.

### 5.4 地球动力学背景探讨

冈底斯晚古生代至早中生代的构造一岩浆活动与其北部的古特提斯大洋壳向南俯冲的动力学系统密切相关, 而与南部的雅鲁藏布江缝合带所代表的新特提斯洋洋壳向北俯冲关联较少(耿全如等, 2005; 潘桂棠等, 2006; 王立全等, 2008; 朱弟成等,

2009a, 2009b). 区域沉积特征和岩浆活动证明二叠纪时期冈底斯地区曾经发生过碰撞造山事件(Zhu *et al.*, 2009), 朱弟成等(2009b)将其归因于同属古特提斯南部的澳大利亚大陆北缘与拉萨地块(即冈底斯带)南缘的碰撞, 初始碰撞时间大概在 263 Ma 左右, 并由此推断出拉萨地块南部在中晚三叠世(大约 230 Ma)处于与二叠纪碰撞造山有关的后碰撞伸展环境. 由于碰撞被认为是引发洋壳岩石圈俯冲最有效机制, 而此次二叠纪碰撞事件很可能触发了冈底斯北部的班公湖—怒江洋壳岩石圈南向俯冲(Niu *et al.*, 2003). 结合冈底斯南带也分布有印支期花岗岩类(Zhu *et al.*, 2011), 冈底斯印支期构造—岩浆事件的动力学背景很可能与班公湖—怒江洋壳南向俯冲有关的幔源岩浆活动底侵到冈底斯地区引起的弧后地壳重熔有关.

## 6 结论

(1) 冈底斯中段达布拉岩体的岩石类型为二长花岗岩, 可划分为中细粒的边缘相和中粗粒似斑状结构的中央相. 岩体形成于晚三叠世( $T_3$ ), 其 LA-ICP-MS 原位微区锆石 U-Pb 年龄为  $230.6 \pm 4.3$  Ma ~  $228.2 \pm 3.5$  Ma, 是冈底斯带印支晚期构造—岩浆活动的产物.

(2) 达布拉岩体具高硅( $SiO_2 = 71.79\% \sim 77.27\%$ )、高钾( $K_2O = 4.06\% \sim 5.26\%$ )、低钛( $TiO_2 = 0.06\% \sim 0.40\%$ )的主量元素地球化学成分特征, 属高钾钙碱性系列、强过铝质花岗岩( $A/CNK = 1.16 \sim 1.19$ ); 稀土元素配分模式为轻稀土富集的右倾斜型, 具明显的负铕异常; 微量元素上富集 K、Rb、Th 元素和明显亏损 Ba、Nb、Sr、P、Ti 元素. 岩体具高 ( $^{87}Sr/^{86}Sr$ )<sub>i</sub> 比值 ( $0.7127 \sim 0.7201$ )、低  $\epsilon_{Nd}(t)$  值 ( $-10.6$ ) 以及高放射成因 Pb 的同位素地球化学特征.

(3) 冈底斯印支构造—岩浆事件的动力学背景与澳大利亚大陆与拉萨地块汇聚碰撞触发的班公湖—怒江洋壳岩石圈南向俯冲作用有关. 达布拉岩体即形成于这一碰撞挤压造山作用之后进入到由挤压向伸展转变的后碰撞阶段, 由班公湖—怒江洋壳南向俯冲相关的幔源岩浆上涌提供热量诱发冈底斯成熟地壳中的富铝质泥质岩部分熔融形成的, 并经历了高程度分离结晶作用.

致谢: 野外工作得到郝伟、梁云汉、高满新的帮助和指导, 评审专家提出建设性意见, 在此表

示感谢!

## References

- Anderson, T., 2002. Correction of Common Lead in U-Pb Analyses that do not Report  $^{204}Pb$ . *Chemical Geology*, 192(1-2): 59-79. doi: 10.1016/S0009-2541(02)00195-X
- Batchelor, R. A., Bowden, P., 1985. Petrogenetic Interpretation of Granitoid Rock Series Using Multicationic Parameters. *Chemical Geology*, 48(1-4): 43-55. doi: 10.1016/0009-2541(85)90034-8
- Chen, W., Ma, C. Q., Song, Z. Q., et al., 2011. Subduction-Related Early Jurassic Granodiorite in Xiaodasongdu, the South of Middle Gangdise in Tibet: Evidences from Zircon U-Pb Geochronology and Geochemistry. *Geological Science and Technology Information*, 30(6): 1-12 (in Chinese with English abstract).
- Cox, K. G., Bell, J. D., Pankhurst, R. J., 1979. The Interpretation of Igneous Rocks. Unwin Hyman, London.
- Dong, G. C., Mo, X. X., Zhao, Z. D., et al., 2006. Magma Mixing in Middle Part of Gangdise Magma Belt: Evidences from Granitoid Complex. *Acta Petrologica Sinica*, 22(4): 835-844 (in Chinese with English abstract).
- DePaolo, D. J., Wasserburg, G. J., 1979. Petrogenetic Mixing Models and Nd-Sr Isotopic Patterns. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 43(4): 615-627. doi: 10.1016/0016-7037(79)90169-8
- Geng, Q. R., Pan, G. T., Jin, Z. M., et al., 2005. Geochemistry and Genesis of the Yeba Volcanic Rocks in the Gangdise Magmatic Arc, Tibet. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 30(6): 747-760 (in Chinese with English abstract).
- 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(1): 100-106 (in Chinese with English abstract).
- Hou, Z. Q., Mo, X. X., Gao, Y. F., et al., 2006. Early Processes and Tectonic Model for the Indian-Asian Continental Collision: Evidence from the Cenozoic Gangdise Igneous Rocks in Tibet. *Acta Geologica Sinica*, 80(9): 1233-1248 (in Chinese with English abstract).
- Irvine, T. N., Baragar, W. R. A., 1971. A Guide to the Chemical Classification of the Highgrade Common Volcanic Rocks. *Can. J. Earth Sci.*, 8(5): 523-548. doi: 10.1139/e71-055

- 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(5): 364—366 (in Chinese with English abstract).
- Li, G. M., Rui, Z. Y., 2004. Diagenetic and Mineralization Ages for the Porphyry Copper Deposits in the Gangdise Metallogenic Belt, Southern Xizang. *Geotectonica et Metallogenia*, 28(2): 165—170 (in Chinese with English abstract).
- Li, H. Q., 2009. The Geological Significance of Indosinian Orogenesis Occurred in Lhasa Terrane (Dissertation). Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Liao, Z. L., Mo, X. X., Pan, G. T., et al., 2006. On Peraluminous Granites in Tibet, China. *Geological Bulletin of China*, 25(7): 812—821 (in Chinese with English abstract).
- Liegeois, N. P., Naves, J., Hertogen, J., et al., 1998. Contrasting Origin of Post-Collisional High-K Calc-Alkaline and Shoshonitic versus Alkaline and Peralkaline Granitoids; The Use of Sliding Normalization. *Lithos*, 45: 1—28. doi:10.1016/S0024-4937(98)00023-1
- Liu, Q. S., Jiang, W., Jian, P., et al., 2006. Zircon SHRIMP U-Pb Age and Petrochemical and Geochemical Features of Mesozoic Muscovite Monzonitic Granite at Ningzhong, Tibet. *Acta Petrologica Sinica*, 22(3): 643—652 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Y. S., Hu, Z. C., Gao, S., et al., 2008. In Situ Analysis of Major and Trace Elements of Anhydrous Minerals by LA-ICP-MS without Applying an Internal Standard. *Chemical Geology*, 257(1—2): 34—43. doi:10.1016/j.chemgeo.2008.08.004
- Liu, Y. S., Gao, S., Hu, Z. C., et al., 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 of Mantle Xenoliths. *Journal of Petrology*, 51(1—2): 537—571. doi:10.1093/petrology/egp082
- Liu, Y. S., Hu, Z. C., Zong, K., et al., 2010b. Reappraisal and Refinement of Zircon U-Pb Isotope and Trace Element Analyses by LA-ICP-MS. *Chinese Science Bulletin*, 55(15): 1535—1546. doi:10.1007/s11434-010-3052-4
- Ludwig, K. R., 2012. User Manual for Isoplot 3. 75: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. Berkeley Geochronology Center, Special Publication No. 5.
- 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(3): 281—290 (in Chinese with English abstract).
- Niu, Y. L., O'Hara, M. J., Pearce, J. A., 2003. Initiation of Subduction Zones as a Consequence of Lateral Compositional Buoyancy Contrast within the Lithosphere: A Petrologic Perspective. *Journal of Petrology*, 44(5): 851—866. doi:10.1093/petrology/44.5.851
- 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(3): 521—533 (in Chinese with English abstract).
- Patino-Douce, A. E., Harris, N., 1998. Experimental Constraints on Himalayan Anatexis. *Journal of Petrology*, 39(4): 689—710. doi:10.1093/ptro/39.4.689
- Pearce, J. A., Harris, N. B. W., Tindle, A. G., 1984. Trace Element Discrimination Diagrams for the Tectonic Interpretation of Granitic Rocks. *Journal of Petrology*, 25(4): 956—983. doi:10.1093/petrology/25.4.956
- Peccerillo, A., Taylor, S. R., 1976. Geochemistry of Eocene Calcalkaline Volcanic Rocks from the Kastamou Area, Northern Turkey. *Contrib. Miner. Petrol.*, 58(1): 63—81. doi:10.1007/BF00384745
- Qu, X. M., Hou, Z. Q., Xin, H. B., 2006. Zircon SHRIMP Ages and Geochemical Characteristics of Two Generations of Adakite from Gangdese Collisional Orogenic Belt, Tibet. *Mineral Deposits*, 25(Suppl.): 418—422 (in Chinese).
- Rui, Z. Y., Hou, Z. Q., Qu, X. M., et al., 2003. Metallogenic Epoch of Gangdese Porphyry Copper Belt and Uplift of Qinghai-Tibet Plateau. *Mineral Deposits*, 22(3): 217—225 (in Chinese with English abstract).
- Sun, S. S., McDonough, W. F., 1989. Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts; Implications for Mantle Composition and Processes. In: Saunders, A. D., Norry, M. J., eds., *Magmatism in the Ocean Basins. Geological Society, London, Special Publication*, 42(1): 313—345. doi:10.1144/GSL.sp.1989.042.01.19
- Sylvester, P., 1998. Post-Collisional Strongly Aluminous Granites. *Lithos*, 45(1—2): 29—44. doi:10.1016/S0024-4937(98)00024-3
- Wang, L. Q., Pan, G. T., Zhu, D. C., et al., 2008. Carboniferous-Permian Island Arc Orogenesis in the Gangdise Belt, Tibet, China; Evidence from Volcanic Rocks and Geochemistry. *Geological Bulletin of China*, 27(9): 1509—1534 (in Chinese with English abstract).

- Watson, E. B., Harrison, T. M., 1983. Zircon Saturation Revisited: Temperature and Composition Effects in a Variety of Crustal Magma Types. *Earth and Planetary Science Letters*, 64(2): 295—304. doi: 10. 1016/0012—821X(83)90211—X
- Wu, Y. B., Zheng, Y. F., 2004. Genesis of Zircon and Its Constraints on Interpretation of U-Pb Age. *Chinese Science Bulletin*, 49(16): 1589—1602 (in Chinese).
- 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 and Planetary Science Letters*, 228(1—2): 195—212. doi: 10. 1016/j. epsl. 2004. 09. 031
- Zhang, H. F., Xu, W. C., Guo, J. Q., et al., 2007. Indosinian Orogenesis of the Gangdise Terrane; Evidence from Zircon U-Pb Dating and Petrogenesis of Granitoids. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 32(2): 155—166 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Q., Pan, G. Q., Li, C. D., et al., 2007. Are Discrimination Diagrams always Indicative of Correct Tectonic Settings of Granites? Some Crucial Questions on Granite Study (3). *Acta Petrologica Sinica*, 23(11): 2683—2698 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, Z. D., Mo, X. X., Dong, G. C., et al., 2007. Pb Isotopic Geochemistry of Tibetan Plateau and Its Implications. *Geoscience*, 21(2): 265—274 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, Z. D., Mo, X. X., Luo, Z. H., et al., 2003. Subduction of India beneath Tibet; Magmatism Evidence. *Earth Science Frontiers*, 10(3): 149—157 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, Z. D., Mo, X. X., Nomade, S., et al., 2006. Post-Collisional Ultrapotassic Rocks in Lhasa Block, Tibetan Plateau; Spatial and Temporal Distribution and Its Implications. *Acta Petrologica Sinica*, 22(4): 787—794 (in Chinese with English abstract).
- Zheng, L. L., Geng, Q. R., Dong, H., et al., 2003. The Discovery and Significance of the Relicts of Ophiolitic Mélanges along the Parlung Zangbo in the Bomni Region, Eastern Xizang. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 23(1): 27—30 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, D. C., Mo, X. X., Niu, Y. L., et al., 2009. Zircon U-Pb Dating and In-Situ Hf Isotopic Analysis of Permian Per-aluminous Granite in the Lasna Terrane, Southern Tibet; Implications for Permian Collisional Orogeny and Paleogeography. *Tectonophysics*, 469(1—4): 48—60. doi: 10. 1016/j. tecto. 2009. 01. 017
- Zhu, D. C., Mo, X. X., Wang, L. Q., et al., 2009a. Petrogenesis of Highly Fractionated I-Type Granites in the Chayu Area of Eastern Gangdise, Tibet; Constraints from Zircon U-Pb Geochronology, Geochemistry and Sr-Nd-Hf Isotopes. *Science in China (Ser. D)*, 39(7): 833—848 (in Chinese).
- Zhu, D. C., Mo, X. X., Zhao, Z. D., et al., 2009b. Permian and Early Cretaceous Tectonomagmatism in Southern Tibet and Tethyan Evolution; New Perspective. *Earth Science Frontiers*, 16(2): 1—20 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, D. C., Zhao, Z. D., Niu, Y. L., et al., 2011. The Lhasa Terrane; Record of a Microcontinent and Its Histories of Drift and Growth. *Earth and Planetary Science Letters*, 301(1—2): 241—255. doi: 10. 1016/j. epsl. 2010. 11. 005

### 附中文参考文献

- 陈炜, 马昌前, 宋志前, 等, 2011. 西藏冈底斯带中南部与俯冲有关的早侏罗世花岗岩闪长岩: 锆石 U-Pb 年代学及地球化学证据. *地质科技情报*, 30(6): 1—12.
- 董国臣, 莫宣学, 赵志丹, 等, 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.
- 耿全如, 潘桂棠, 金振民, 等, 2005. 西藏冈底斯带叶巴组火山岩地球化学及成因. *地球科学——中国地质大学学报*, 30(6): 747—760.
- 和钟铎, 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俯冲时代的约束. *地质论评*, 52(1): 100—106.
- 侯增谦, 莫宣学, 高永丰, 等, 2006. 印度大陆与亚洲大陆早期碰撞过程与动力学模型——来自西藏冈底斯新生代火成岩证据. *地质学报*, 80(9): 1235—1248.
- 李才, 王天武, 李惠民, 等, 2003. 冈底斯地区发现印支期巨斑花岗岩闪长岩: 古冈底斯造山的存在证据. *地质通报*, 22(5): 364—366.
- 李光明, 芮宗瑶, 2004. 西藏冈底斯成矿带斑岩铜矿的成岩成矿年龄. *大地构造与成矿学*, 28(2): 165—170.
- 李化启, 2009. 拉萨地体中的印支期造山作用及其地质意义 (博士学位论文). 北京: 中国地质科学院.
- 廖忠礼, 莫宣学, 潘桂棠, 等, 2006. 初论西藏过铝质花岗岩. *地质通报*, 25(7): 813—821.
- 刘琦胜, 江万, 简平, 等, 2006. 宁中白云母二长花岗岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及岩石地球化学特征. *岩石学报*, 22(3): 643—652.
- 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(3): 281—290.