

古特提斯洋俯冲碰撞在南羌塘的岩浆岩证据:西藏荣玛乡冈塘错花岗岩*

李静超¹ 赵中宝¹ 郑艺龙¹ 袁国礼^{1**} 梁晓¹ 王根厚¹ 刘曦²

LI JingChao¹, ZHAO ZhongBao¹, ZHENG YiLong¹, YUAN GuoLi^{1**}, LIANG Xiao¹, WANG GenHou¹ and LIU Xi²

1. 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083

2. 北京大学造山带与地壳演化教育部重点实验室, 北京 100871

1. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

2. Key Laboratory of Orogenic Belts and Crustal Evolution, Ministry of Education of China, Peking University, Beijing 100871, China

2014-09-16 收稿, 2014-12-26 改回.

Li JC, Zhao ZB, Zheng YL, Yuan GL, Liang X, Wang GH and Liu X. 2015. The magmatite evidences in southern Qiangtang for paleo-Tethys ocean subducting collision: Gangtang-co granites in Rongma, Tibet. *Acta Petrologica Sinica*, 31 (7): 2078 – 2088

Abstract Gangtang-co granite rocks are located in Rongma of southern Qiangtang in Tibet. The rocks are composed of coarse-medium porphyritic biotite monzogranite and medium-fine tourmaline two-mica monzogranite. Dating of zircon was 214.4 ± 4.0 Ma for the former granite, and 222.2 ± 6.6 Ma for the latter. Both of them were at Late Triassic. The coarse-medium grained granite is muscovite peraluminous granite with following characteristics: $1.00 \sim 1.09$ of A/CNK, $> 1\%$ ($1.84 \sim 3.04\%$) of calibrated corundum, and $> 14\%$ of Al_2O_3 . The fine-medium grained granite is peraluminous S-type granite with following characteristics: > 1.1 of A/CNK, $> 1\%$ ($2.40 \sim 3.42\%$) of calibrated corundum, and $> 14\%$ of Al_2O_3 . Although being similar in major elements, the characteristics of trace elements in two granites were significantly different. According to the zircon saturation thermometer, the former should be high-temperature type granite while the latter being low-temperature type granite. Based on the geological background in central Qiangtang, the formation of fine-medium grained granite was proposed to be associated with the subducting collision in Triassic. After it, the coarse-medium grained granite was formed through magmatic underplating delamination. In Gangtang-co rocks, the ages of two types of granites provided time constraints for the evolution of paleo-Tethys and the formation of accretionary complexes in the suture.

Key words Paleo-Tethys Ocean; Southern Qiangtang; Subducting collision; Gangtang-co granites; Late Triassic; Tibet

摘要 西藏荣玛乡冈塘错花岗岩岩体分布于南羌塘地块中, 由中粗粒巨斑状黑云母二长花岗岩和中细粒含电气石二云母二长花岗岩组成。中粗粒花岗岩的锆石测年结果为 214.4 ± 4.0 Ma, 中细粒花岗岩锆石测年结果为 222.2 ± 6.6 Ma, 均为晚三叠世。中粗粒花岗岩 A/CNK 为 $1.00 \sim 1.09$, 刚玉标准分子的百分含量均大于 1% ($1.84 \sim 3.04\%$), Al_2O_3 的含量均大于 14% , 属于含白云母过铝质花岗岩。中细粒花岗岩的 A/CNK > 1.1 , 刚玉标准分子的百分含量均大于 1% ($2.40 \sim 3.42\%$), Al_2O_3 的含量均大于 14% , 属于强过铝质 S 型花岗岩。虽主量元素特征相近, 但两类花岗岩的微量元素特征差异较大。根据锆石饱和温度计得出中粗粒花岗岩为高温类型的花岗岩, 中细粒花岗岩为低温类型的花岗岩。结合区域地质背景推断中细粒花岗岩形成可能与三叠纪俯冲碰撞作用有关, 而中粗粒花岗岩为碰撞后拆沉岩浆底侵的结果。冈塘错岩体中两种成因类型不同的花岗岩的形成时代对古特提斯洋的演化以及缝合带增生杂岩的形成具有时代约束意义。

关键词 古特提斯洋; 南羌塘; 俯冲碰撞; 冈塘错花岗岩; 晚三叠世; 西藏

中图法分类号 P588.121; P597.3

* 本文受中国地质调查局项目 (1212011086062、1212011221081、1212011221115) 和国家自然科学基金项目 (41090371、41372212) 联合资助。

第一作者简介: 李静超, 男, 1988 年生, 硕士生, 地球化学专业

** 通讯作者: 袁国礼, 男, 1971 年生, 博士生导师, 地球化学专业, E-mail: yuangle@cugb.edu.cn

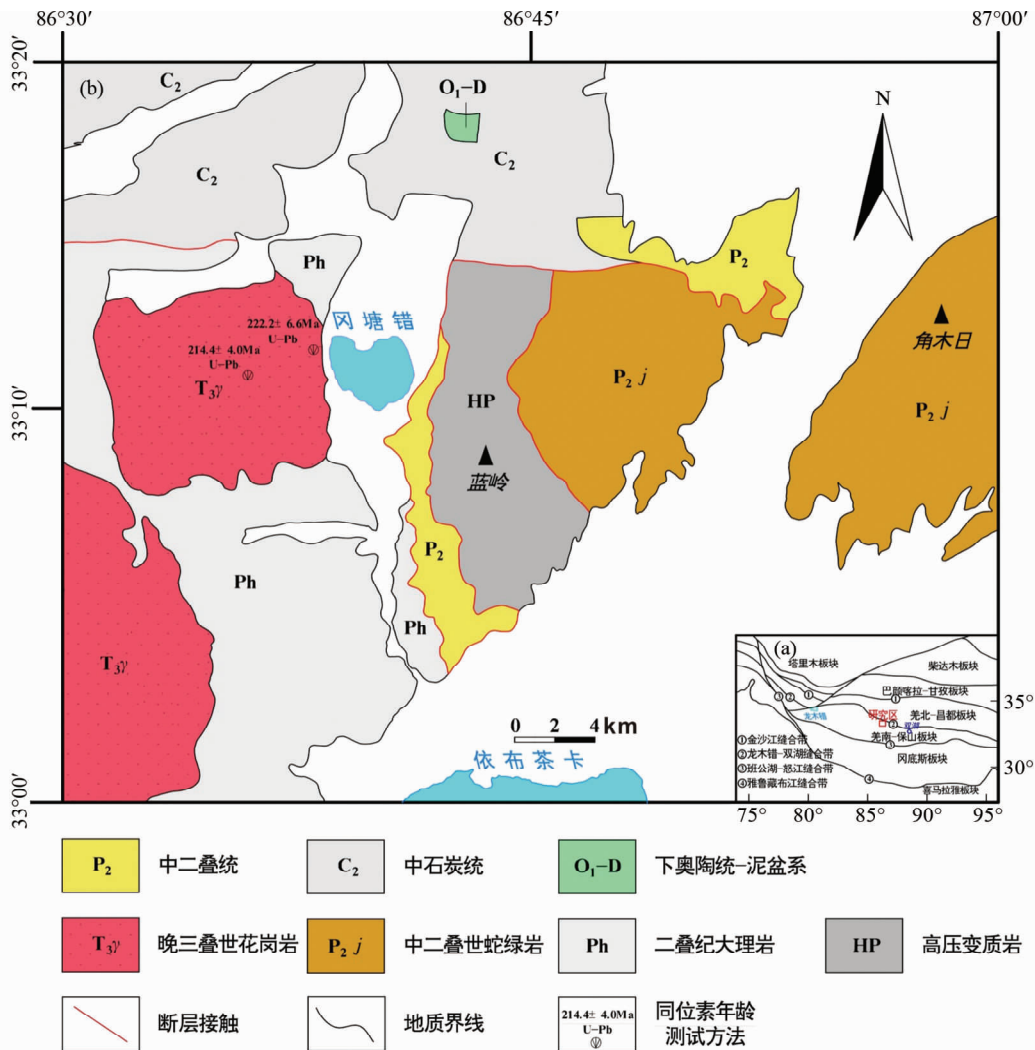


图1 研究区大地构造位置及地质简图

(a) 青藏高原大地构造背景示意图(据吉林大学地质调查研究院,2005 修改^①);(b) 研究区地质简图(据中国地质大学(北京)地质调查研究院,2012^②修改)

Fig. 1 The tectonic setting (a) and geological sketch map (b) of the study area

青藏高原是由从冈瓦纳大陆裂解出来的微陆块依次拼接到欧亚大陆南缘形成的(Metcalf, 2013; Yin and Harrison, 2000; Zhao *et al.*, 2014)。从南至北,喜马拉雅板块与冈底斯板块由雅鲁藏布江缝合带分隔,冈底斯板块与羌塘板块由班公湖-怒江缝合带分隔,羌塘板块与巴颜喀拉-甘孜板块则由金沙江缝合带分隔(图 1a)。

羌塘板块位于青藏高原中部,是研究古特提斯构造演化及青藏高原早期形成问题的关键地区(李才, 1987, 2003; 李才等, 2005; 王根厚等, 2007; 万天丰, 2003)。李才(1987)提出了“龙木错-双湖-澜沧江板块缝合带与石炭纪-二叠纪冈瓦纳北界”的观点,该观点把羌塘分为了南北羌塘两个部分。

其主要依据是南北羌塘在晚古生代古生物面目不同,南羌塘属于冷水动物群,而北羌塘属于暖水动物区系(Zhai *et al.*, 2011)。同时,广泛分布于羌塘中部的俯冲杂岩和高压变质岩为南北羌塘之间的龙木-错双湖缝合带的存在提供了重要的证据(Liu *et al.*, 2011; Zhang *et al.*, 2006)。另一些学者则认为,羌塘中部高压变质带是金沙江带向南低角度长距离俯冲到羌塘底部,上地壳伸展导致的蓝片岩折返所致(Kapp *et al.*, 2000, 2003),羌塘中部不存在缝合带。他们还进一步认为南北羌塘古地理区系的区别源于二叠纪全球的冰期事件(Pullen and Kapp, 2014)。

尽管北羌塘的基底属性尚不清楚,但前人研究表明南羌

① 吉林大学地质调查研究院. 2005. 1:25 万玛依岗日幅地质图

② 中国地质大学(北京)地质调查研究院. 2012. 1:5 万角木日幅地质图

塘存在寒武纪的冈瓦纳基底(Lu *et al.*, 2013; Zhao *et al.*, 2014; 杨耀等, 2014)。羌塘中部广泛存在的俯冲杂岩被认为是在古特提洋闭合晚期仰冲到南羌塘基底之上的增生杂岩(Zhao *et al.*, 2014)。侵入到羌塘杂岩中部的晚三叠世(Kapp *et al.*, 2003)的花岗岩基, 则被认为是俯冲板片拆沉的结果(胡培远等, 2012)。

研究区位于龙木错-双湖缝合带的南侧, 具有空间分布的独特性, 即分布于俯冲-造山带中, 形成过程具有明显的“集成性”(王根厚等, 2009; Liang *et al.*, 2012)。其中分布有晚三叠世冈塘错花岗岩, 本文拟通过对该岩体的研究以指示古特提斯洋的俯冲所致龙木错-双湖缝合带的存在, 且为理解俯冲后的碰撞及伸展作用提供重要信息。

1 区域地质背景及岩体特征

1.1 区域地质背景

冈塘错花岗岩体位于西藏自治区尼玛县荣玛乡北部, 侵入于寒武纪基底和石炭-二叠纪的增生杂岩带中(Zhao *et al.*, 2014)。东邻蓝岭蓝闪石片岩高压变质带, 东侧发育有角木日蛇绿岩带(Zhai *et al.*, 2007)(图 1b)。李才等(1995)将这类构造混杂岩称为“构造掺合体”, 认为其与龙木错-双湖缝合带闭合的俯冲作用有关。蓝片岩高压变质带很早就 在高原腹地被发现, 为古特提斯洋壳的俯冲作用产物(李才, 1987; 姚宗富, 1988; 胡克等, 1995; 鲍佩声等, 1999; 邓希光等, 2000)。

1.2 岩体特征

冈塘错花岗岩体主要分布在研究区内的冈塘错以西、黑石山以北的冈塘山(图 1b)。岩体总体上呈东西向延伸, 研究区内出露面积约 260km²。岩体与上覆晚古生代雪水河岩群杂岩(C₂-Ph)呈侵入接触关系, 雪水河岩群与岩体的接触带发生热接触变质作用且有变质晕现象。岩体主要由中粗粒巨斑状黑云母二长花岗岩和含电气石中细粒斑状二云母二长花岗岩两种岩石类型组成。中粗粒为母体, 中细粒为包体, 包体大小不一, 从数厘米到数十厘米。两种类型的花岗岩接触界面比较清晰, 并非侵入接触(图 2a, b)。

1.3 矿物学特征

中粗粒巨斑状黑云母二长花岗岩, 斑晶主要有石英

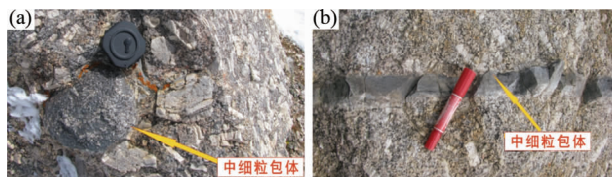


图 2 冈塘错花岗岩体露头照片

Fig. 2 Photographs of Gangtang-co granite outcrop

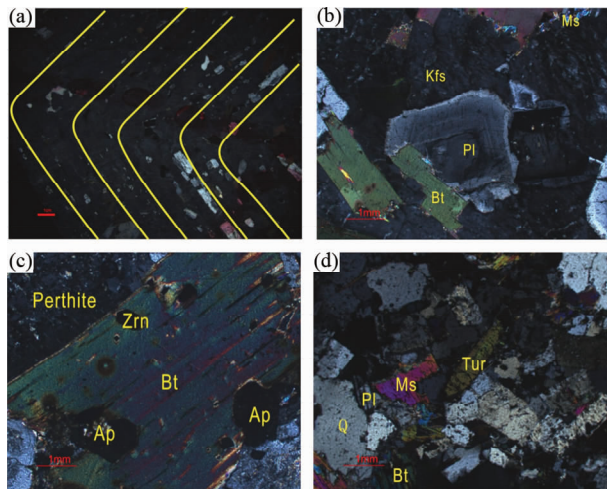


图 3 冈塘错花岗岩薄片显微照片

(a) 钾长石巨斑晶; (b) 中粗粒巨斑状黑云母二长花岗岩的基质; (c) 包裹在黑云母中的副矿物; (d) 含电气石中细粒二云母二长花岗岩。Ms-白云母; Kfs-钾长石; Pl-斜长石; Bt-黑云母; Perthite-条纹长石; Zrn-锆石; Ap-磷灰石; Q-石英; Tur-电气石

Fig. 3 Micro-photographs of Gangtang-co granite slices

(25%), 斜长石(30%), 钾长石(35%), 白云母和黑云母(10%); 副矿物主要为磷灰石和锆石(图 3a-c)。巨斑晶主要由条纹长石组成, 呈他形粒状-自形板状, 大小 2~50mm, 杂乱分布, 有轻微高岭土化, 顺着环带平行镶嵌有板条状斜长石、片状黑云母, 局部交代斜长石。基质主要由斜长石、钾长石(条纹长石、微斜长石)、石英、黑云母构成, 杂乱分布, 矿物颗粒平均粒径大小约 0.2~2mm。斜长石呈半自形板状, 环带构造及聚片双晶发育, 核部有时可见绢云母化, 局部被钾长石呈蠕虫、净边交代; 石英呈他形粒状, 可见波状消光; 黑云母呈叶片状, 局部被白云母交代, 局部出现绿泥石化。此类花岗岩中的基质中黑云母边缘不齐整, 多有溶蚀结构、港湾构造、波状消光, 可见其击像和压像, 推测为继承黑云母。

含电气石中细粒二云母二长花岗岩, 主要斑晶矿物有石英(35%)、斜长石(30%)、钾长石(20%)、白云母(10%)、副矿物有电气石(5%)、磷灰石和锆石(图 3d)。石英颗粒小于 0.1mm; 斜长石轻微蚀变, 可见聚片双晶; 钾长石以条纹长石为主, 颗粒较小, 呈他形分布于矿物颗粒之间; 电气石为自形针柱状; 白云母和黑云母呈片状, 黑云母多为自形, 波状消光, 击像和压像可见, 表明其受到应力且快速的变形。

2 LA-ICP-MS 定年

选取样品中粗粒花岗岩(GANG-1)和中细粒花岗岩(GANG-2)作为锆石激光探针年龄分析对象, 通过 CL 和 BSE 图像分析, 选择测点位置, 然后采用激光剥蚀等离子体分析技术(LA-ICP-MS)对锆石进行微区原位单点 U-Pb 同位素定年。锆石 U-Pb 年龄测定和微量元素分析在中国地质大学

表1 中粗粒花岗岩(GANG-1)和中细粒花岗岩(GANG-2)中的锆石 LA-ICP-MS U-Pb 分析数据

Table 1 LA-ICP-MS U-Pb dating data of the coarse-medium grained granite (GANG-1) and the fine-medium grained granite(GANG-2)

测点号	含量($\times 10^{-6}$)		Th/U	同位素比值				年龄(Ma)			
	^{232}Th	^{238}U		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	
				比值	1 σ	比值	1 σ	Age	1 σ	Age	1 σ
中粗粒花岗岩 GANG-1											
GANG-1-04	930	1039	0.896	0.2414	0.0073	0.0342	0.0004	220	6	217	2
GANG-1-05	501	2164	0.231	0.2453	0.0074	0.0332	0.0004	223	6	211	2
GANG-1-11	1179	1768	0.667	0.2326	0.0083	0.0336	0.0004	212	7	213	3
GANG-1-12	703	3766	0.187	0.2369	0.0057	0.0341	0.0005	216	5	216	3
GANG-1-13	11482	3247	3.536	0.2345	0.0134	0.0326	0.0004	214	11	207	2
GANG-1-15	1566	1140	1.374	0.2483	0.0077	0.0348	0.0004	225	6	221	3
GANG-1-16	1298	1786	0.727	0.2516	0.0063	0.0355	0.0004	228	5	225	2
GANG-1-19	2057	3259	0.631	0.2625	0.0076	0.0347	0.0006	237	6	220	4
GANG-1-20	419	2011	0.208	0.2677	0.0063	0.0326	0.0004	241	5	207	2
GANG-1-24	239	2261	0.106	0.2643	0.0074	0.0334	0.0006	238	6	212	3
GANG-1-25	582	985	0.590	0.2548	0.0195	0.0330	0.0005	230	16	210	3
GANG-1-27	1208	693	1.743	0.2664	0.0105	0.0348	0.0006	240	8	220	3
GANG-1-01	1052	892	1.178	0.2754	0.0118	0.0360	0.0006	247	9	228	4
GANG-1-02	513	2147	0.239	0.3194	0.0087	0.0383	0.0004	281	7	242	3
GANG-1-03	475	2842	0.167	0.2355	0.0099	0.0296	0.0003	215	8	188	2
GANG-1-06	486	2767	0.176	0.2037	0.0087	0.0305	0.0003	188	7	194	2
GANG-1-07	4733	1855	2.552	0.2315	0.0217	0.0330	0.0004	211	18	209	2
GANG-1-08	1643	1744	0.942	0.1968	0.0060	0.0286	0.0004	182	5	182	2
GANG-1-09	2428	1193	2.035	0.2566	0.0075	0.0365	0.0005	232	6	231	3
GANG-1-10	722	1994	0.362	0.2311	0.0118	0.0281	0.0004	211	10	179	3
GANG-1-14	333	1528	0.218	0.3047	0.0080	0.0392	0.0006	270	6	248	4
GANG-1-17	1915	1718	1.115	0.2757	0.0488	0.0319	0.0006	247	39	203	4
GANG-1-18	886	2929	0.303	0.2281	0.0212	0.0286	0.0004	209	18	182	2
GANG-1-21	538	590	0.912	0.2901	0.0131	0.0347	0.0005	259	10	220	3
GANG-1-22	715	2002	0.357	0.2446	0.0061	0.0331	0.0004	222	5	210	3
GANG-1-23	885	4793	0.185	0.1089	0.0182	0.0187	0.0003	105	16.69	119	1.708
GANG-1-26	234	2551	0.092	0.2778	0.0097	0.0348	0.0006	249	8	220	4
GANG-1-28	1160	2532	0.458	0.2456	0.0077	0.0314	0.0005	223	6	199	3
中细粒花岗岩 GANG-2											
GANG-2-01	537	2251	0.239	0.2808	0.0338	0.0344	0.0005	251	27	218	3
GANG-2-03	1214	2579	0.471	0.2325	0.0645	0.0356	0.0006	212	53	225	4
GANG-2-04	1697	2535	0.669	0.2398	0.0796	0.0359	0.0007	218	65	227	4
GANG-2-07	1426	2121	0.672	0.2090	0.0300	0.0331	0.0005	193	25	210	3
GANG-2-08	1585	2196	0.722	0.2446	0.0304	0.0358	0.0004	222	25	227	3
GANG-2-10	541	1444	0.375	0.3261	0.0748	0.0382	0.0008	287	57	242	5
GANG-2-17	906	850	1.065	0.2810	0.0087	0.0346	0.0004	251	7	219	3
GANG-2-19	733	687	1.068	0.2439	0.0610	0.0352	0.0007	222	50	223	4
GANG-2-02	107	446	0.240	1.1644	0.0313	0.1278	0.0019	784	15	775	11
GANG-2-05	91.6	520	0.176	1.0763	0.0290	0.1124	0.0015	742	14	687	9
GANG-2-15	94.7	388	0.244	0.6507	0.0228	0.0828	0.0011	509	14	513	6
GANG-2-16	120	359	0.335	1.0770	0.0330	0.1251	0.0026	742	16	760	15
GANG-2-06	1603	3064	0.523	0.3456	0.0762	0.0350	0.0011	301	57.53	222	6.86
GANG-2-11	772	1525	0.506	0.1401	0.0260	0.0325	0.0004	133	23	206	3
GANG-2-12	4018	7044	0.570	0.1945	0.0642	0.0202	0.0005	180	55	129	3
GANG-2-14	3821	6459	0.592	0.4451	0.0605	0.0374	0.0013	374	43	236	8
GANG-2-18	756	2538	0.298	0.2216	0.1826	0.0374	0.0019	203	153	236	12
GANG-2-09	2334	2799	0.834	0.0000	0.0000	0.0287	0.0008	0.0000	0	183	5
GANG-2-13	1699	4156	0.409	0.0000	0.0000	0.0245	0.0019	0.0000	0.0	156	12

表2 冈塘错花岗岩体的主量元素(wt%)和微量元素($\times 10^{-6}$)分析结果Table 2 Analysis result of major element (wt%) and trace element ($\times 10^{-6}$) data of Gangtang-co granite

样品号	HGX- GS2	gang2	gang1 -2	GHX- WL1	GHX- WL3	Ghx- WL1	gang1	HGX- GS3	GHX- WL2	Gh- GS1	GS4181 -1	gang -bu	HG- WL1	HGX- GS1
岩性	中细粒花岗岩							中粗粒花岗岩						
SiO ₂	74.60	73.83	73.30	73.64	73.30	65.96	69.82	69.50	73.48	68.86	67.09	65.94	67.88	68.14
Al ₂ O ₃	14.20	14.53	14.84	14.98	14.96	15.34	14.12	14.50	14.65	14.66	14.56	15.08	14.85	15.06
Fe ₂ O ₃	0.47	0.86	0.52	0.38	0.50	0.65	0.86	0.68	0.48	0.55	1.30	0.99	0.95	0.62
FeO%	0.24	0.19	0.41	0.43	0.43	3.70	2.50	1.90	0.48	2.70	2.60	4.00	2.00	2.90
CaO	0.53	0.80	0.60	0.57	0.50	2.80	2.20	1.60	0.76	2.30	3.10	3.30	2.30	3.10
MgO	0.19	0.22	0.20	0.18	0.18	2.00	1.30	0.94	0.27	1.30	1.70	2.00	1.30	1.40
K ₂ O	4.86	3.49	4.06	4.45	4.58	4.39	4.24	5.37	4.39	3.85	4.13	2.29	5.12	2.01
Na ₂ O	3.49	4.53	4.13	3.79	3.79	2.71	2.70	2.90	3.66	2.99	2.63	3.33	2.77	3.91
MnO	0.01	0.01	0.04	0.07	0.07	0.08	0.08	0.05	0.06	0.07	0.07	0.10	0.06	0.07
TiO ₂	0.02	0.08	0.08	0.02	0.04	0.68	0.53	0.41	0.04	0.52	0.60	0.71	0.47	0.51
P ₂ O ₅	0.24	0.25	0.31	0.23	0.23	0.62	0.40	0.42	0.24	0.47	0.39	0.51	0.39	0.50
LOI	0.45	0.52	0.85	0.82	0.81	1.34	1.00	1.09	1.12	1.05	1.06	1.28	1.19	1.28
Total	99.29	99.31	99.33	99.55	99.38	100.2	99.78	99.38	99.64	99.36	99.30	99.57	99.37	99.56
C(A)	2.76	2.40	3.26	3.42	3.39	2.40	2.05	1.91	3.04	2.30	0.89	2.24	1.36	1.84
NK/A	0.78	0.77	0.75	0.74	0.75	0.60	0.64	0.73	0.74	0.62	0.60	0.53	0.68	0.57
A/CNK	1.19	1.15	1.21	1.24	1.24	1.07	1.09	1.07	1.21	1.09	1.00	1.08	1.04	1.05
CaO/Na ₂ O	0.15	0.18	0.15	0.15	0.13	1.0	0.80	0.55	0.21	0.79	1.2	0.99	0.84	0.80
K ₂ O + Na ₂ O	8.35	8.02	8.19	8.24	8.37	7.10	6.94	8.27	8.05	6.84	6.76	5.62	7.89	5.93
K ₂ O/Na ₂ O	1.39	0.77	0.98	1.17	1.21	1.62	1.57	1.85	1.20	1.29	1.57	0.69	1.85	0.52
Al ₂ O ₃ /TiO ₂	929	182	186	749	374	22.6	26.6	35.7	366	28.1	24.3	21.2	31.6	29.6
σ	2.21	2.09	2.21	2.22	2.31	2.20	1.80	2.58	2.13	1.81	1.90	1.38	2.50	1.40
Rb	424	299	487	554	585	583	376	518	446	336	277	369	335	314
Ba	102	149	84.1	50.8	61.3	40.4	537	373	911	474	843	358	879	227
Th	6.10	3.00	2.60	6.70	4.50	3.20	33.5	28.8	40.4	29.2	34.3	31.9	28.5	42.1
U	2.30	1.79	1.96	2.90	2.90	2.80	4.41	11.2	11.0	3.90	5.78	3.94	11.0	6.50
Nb	7.30	12.0	14.9	14.9	16.4	15.3	15.2	19.7	25.2	24.2	19.2	31.0	17.8	31.7
Ta	3.80	4.32	6.36	5.60	5.90	5.50	1.77	2.10	2.60	2.80	2.24	3.43	2.50	4.70
Pb	29.8	25.3	21.8	22.0	20.6	20.5	40.0	38.4	40.1	33.2	45.8	21.6	48.6	22.6
Sr	30.8	73.4	40.1	25.4	25.3	25.5	211	157	257	266	357	150	312	219
Zr	44.8	39.6	39.6	54.4	56.5	58.8	153	164	220	177	180	214	159	181
Hf	1.9	1.5	1.5	2.3	2.4	2.4	4.2	4.5	6.0	4.8	5.0	5.5	4.3	4.9
Li	7.700	7.500	98.20	185.0	227.8	205.6	163.2	144.7	169.0	119.4	47.00	253.2	88.90	160.5
Sc	3.60	1.70	2.00	3.90	4.80	4.50	10.6	7.70	13.2	10.6	10.9	15.3	9.30	11.4
V	8.00	11.7	8.50	7.20	3.90	8.00	61.4	38.8	98.7	70.0	73.7	111	58.9	88.0
Co	0.40	1.3	0.50	0.20	0.30	0.30	6.5	5.2	11	6.5	9.2	11	5.7	7.1
La	3.90	7.10	6.30	3.80	4.60	4.20	51.3	46.8	71.4	66.7	68.0	63.2	48.2	80.0
Ce	7.600	14.10	11.90	7.800	9.400	8.600	103.1	93.80	149.6	132.9	129.8	121.5	96.7	156.2
Pr	0.900	1.70	1.40	0.900	1.10	1.10	12.0	11.1	17.7	15.5	14.9	14.2	11.5	17.8
Nd	3.00	6.10	4.80	3.30	4.00	3.70	43.7	38.9	65.0	56.1	54.0	52.5	40.7	63.7
Sm	0.800	1.40	1.10	1.00	1.10	1.00	8.30	8.10	12.2	10.4	9.70	10.7	7.60	11.6
Eu	0.10	0.28	0.19	0.10	0.10	0.10	1.1	0.80	1.6	1.4	1.6	1.1	1.3	1.3
Gd	0.80	1.2	1.1	1.0	1.1	1.1	6.4	6.4	9.3	8.1	7.6	8.8	6.2	9.3
Tb	0.20	0.23	0.21	0.20	0.30	0.30	0.90	1.0	1.4	1.2	1.1	1.4	1.0	1.4
Dy	1.40	1.50	1.42	1.70	1.90	1.70	4.33	4.60	6.60	5.50	5.19	6.99	4.70	6.70
Ho	0.30	0.26	0.26	0.30	0.40	0.30	0.68	0.70	1.1	0.90	0.83	1.1	0.70	1.1
Er	0.80	0.79	0.74	1.0	1.1	1.0	1.8	1.8	2.9	2.2	2.2	3.0	1.9	2.9
Tm	0.10	0.14	0.13	0.20	0.20	0.20	0.27	0.30	0.40	0.30	0.29	0.45	0.30	0.50
Yb	1.10	1.02	0.880	1.50	1.60	1.40	1.68	1.70	2.60	2.00	1.59	2.72	1.70	2.70
Lu	0.10	0.16	0.13	0.20	0.20	0.20	0.27	0.20	0.40	0.30	0.25	0.41	0.30	0.40
Y	8.90	8.60	8.80	10.5	12.4	10.9	20.5	22.7	32.5	26.0	23.6	32.1	23.1	33.4
Σ REE	30.08	44.55	39.20	33.67	39.65	35.79	256.3	238.9	374.7	329.5	320.5	320.1	245.8	388.9
LREE	16.34	30.67	25.62	17.03	20.35	18.81	219.4	199.5	317.5	283.0	277.8	263.2	205.8	330.6
HREE	4.820	5.320	4.820	6.140	6.880	6.130	16.39	16.70	24.62	20.50	19.03	24.80	16.82	24.95
LREE/HREE	3.39	5.77	5.32	2.77	2.96	3.07	13.39	11.94	12.89	13.8	14.6	10.61	12.24	13.25
(La/Yb) _N	2.39	4.49	4.65	1.71	1.86	1.91	19.77	17.79	17.94	21.95	27.66	15.03	17.88	19.16
δ Eu	0.45	0.67	0.55	0.34	0.34	0.38	0.45	0.36	0.45	0.47	0.56	0.35	0.57	0.37

注:常量元素测试由廊坊地质实验中心完成,微量和稀土测试由核工业部北京地质研究院分析测试中心 ICP-MS 测定

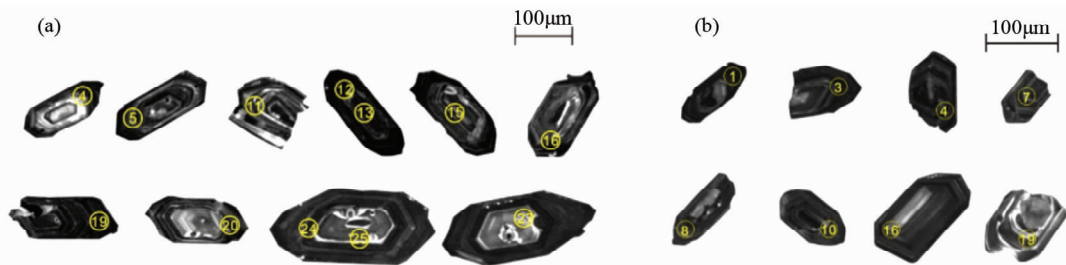


图4 中粗粒花岗岩(GANG-1)(a)和中细粒花岗岩(GANG-2)(b)锆石阴极发光照片和 LA-ICP-MS 测点位置图

Fig.4 Cathode luminescence photos and dating spots of zircons in the coarse-medium grained granite (GANG-1) (a) and in the fine-medium granite (GANG-2) (b)

(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室进行。激光束斑直径为 $32\mu\text{m}$ 。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 (2002) 的方法对普通 Pb 进行校正, 并采用 ISOPLOT 程序进行锆石加权平均年龄计算及谐和图的绘制。同位素比值和年龄误差为 1σ (表 1)。

本次实验中粗粒花岗岩共选取 24 个锆石, 共有 28 个测点; 中细粒花岗岩总共选了 19 个锆石, 共有 19 个测点。所测锆石均为透明、柱状, 晶形较好, 发育良好的岩浆型韵律环带结构的岩浆成因锆石(图 4a, b)。边部和核部均有打点, 分析结果见表 1。

将实验测定的 $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 比值和 Th/U 比值作图, 如实验点偏离线性, 则说明 U、Th 的封闭体系不成立(陈道公等, 2001)。中粗粒花岗岩 GANG-1-01, 02, 17, 26 打点时打到细小包体, GANG-1-09, 10, 14, 21 的信号波动较大, 不予采用。GANG-1-03, 06, 07, 08, 18, 22, 23, 28 的普通铅含量过高, 大于 10×10^{-6} , 也不予采用, 普通铅含量过高是导致锆石 CL 图像过黑的主要原因。中细粒花岗岩 GANG-2-02, 05, 15, 16 的值是协和的, 但锆石 CL 图像过白, 且 $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 比值和 Th/U 比值作图偏离线性, 可能是源于 Th 的丢失, 也不予采用。而 GANG-2-06, 09, 11, 12, 13, 14, 18 则同样是因为普通铅过高, 远大于 10×10^{-6} , 而使测试结果不准, 不予采用。其余锆石 Th/U 比值均大于 0.1, Th 与 U 成正相关性, 该特征表示为岩浆类型的锆石(Belousova *et al.*, 2002; Claesson *et al.*, 2000)。通过对协和线上最集中的数据点进行 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均计算, 中粗粒花岗岩锆石测年结果为 $214.4 \pm 4.0\text{Ma}$ (MSWD = 5.4, 2σ)(图 5b), 中细粒花岗岩锆石测年结果为 $222.2 \pm 6.6\text{Ma}$ (MSWD = 5.5, 2σ)(图 5c), 结果均代表岩体的结晶年龄。

3 地球化学特征

3.1 主量元素特征

冈塘错花岗岩体的主量元素分析结果列于表 2。中粗粒

表 3 两类花岗岩的微量元素对比

Table 3 The contrast of trace element between two granites

类型	中粗粒花岗岩	中细粒花岗岩	世界花岗岩平均
$\Sigma\text{REE} (\times 10^{-6})$	238.9 ~ 388.9	30.1 ~ 44.6	250
LREE/HREE	10.6 ~ 14.6	2.8 ~ 5.8	
$(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$	15.0 ~ 27.7	1.7 ~ 4.7	
δEu	0.35 ~ 0.57	0.34 ~ 0.67	
Th/U	5.5	1.7	2.8
Nb/Ta	9.5	2.4	11
Y/Ho	30.1	33.9	28

花岗岩和中细粒花岗岩的主量元素特征差别不大。SiO₂ 含量均在 65.96% ~ 74.60%, Al₂O₃ 含量在 14.12% ~ 15.34%, A/CNK = 1.00 ~ 1.24(图 6), 具过铝质花岗岩的特征; Na₂O + K₂O = 5.62% ~ 8.37%, 含量中等, K₂O/Na₂O = 0.52 ~ 1.85; NK/A = 0.53 ~ 0.78, 里特曼指数 $\sigma = 1.40 \sim 2.58$, 均小于 3.3, 为钙碱性。从主量元素的特征分析, 冈塘错两类花岗岩均具有过铝质钙碱性花岗岩的特征。

3.2 稀土与微量元素特征

冈塘错岩体中粗粒和中细粒花岗岩在微量元素方面有较大的差异。

由表 2、表 3 可以看出冈塘错中粗粒花岗岩体的稀土元素总量相对较高, ΣREE 为 $238.9 \times 10^{-6} \sim 388.9 \times 10^{-6}$ 。在稀土元素球粒陨石标准化配分模式图上(图 7a), 富集轻稀土元素(LREE), 轻重稀土元素(LREE/HREE)分馏很明显。因此具有相对较高的 $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 比值(15.0 ~ 27.7), Eu 具有很明显的负异常, $\delta\text{Eu} = 0.35 \sim 0.57$ 。稀土元素球粒陨石标准化配分模式整体呈右倾海鸥型。在微量元素原始地幔标准化蛛网图上(图 7b), Nb、Ba、Sr、Ti 出现较大的亏损, Rb、Th、K、P 具有明显的正异常。

由表 2、表 3 可以看出冈塘错中细粒花岗岩体的稀土元素总量相对较低, ΣREE 为 $30.1 \times 10^{-6} \sim 44.6 \times 10^{-6}$, 在稀土元素球粒陨石标准化配分模式图上(图 7a), 富集轻稀土元素(LREE), 轻重稀土元素(LREE/HREE)分馏不太明显。具有相对较低的 $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 比值(1.7 ~ 4.7), Eu 具有很明显

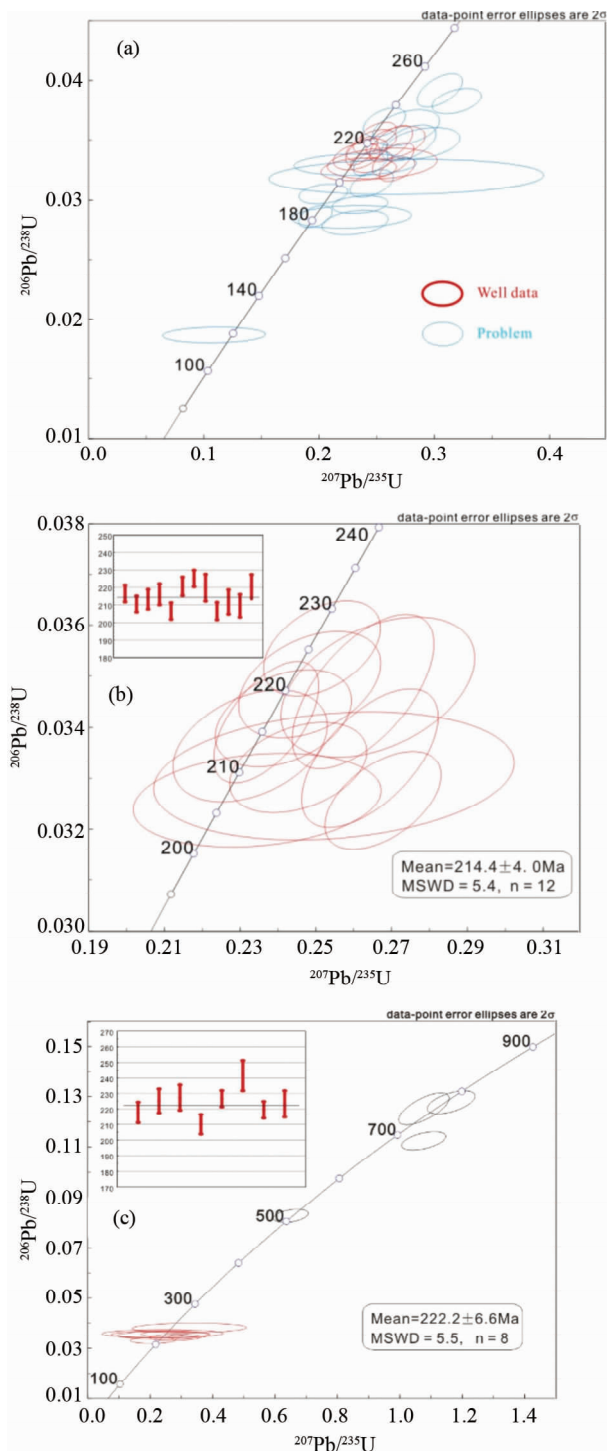


图5 中粗粒花岗岩 (GANG-1) (a, b) 与中细粒花岗岩 (GANG-2) (c) LA-ICP-MS U-Pb 同位素协和图

Fig. 5 Zircon LA-ICP-MS U-Pb isotopic concordia plots for zircons from the coarse-medium grained granite (GANG-1) (a, b) and the fine-medium grained granite (GANG-2) (c)

的负异常, $\delta\text{Eu} = 0.34 \sim 0.67$, 在微量元素原始地幔标准化蛛网图上 (图 7b), Nb, Ba, Sr, Ti 出现较大的亏损, Rb, U, K, P, Hf 具有明显的正异常。

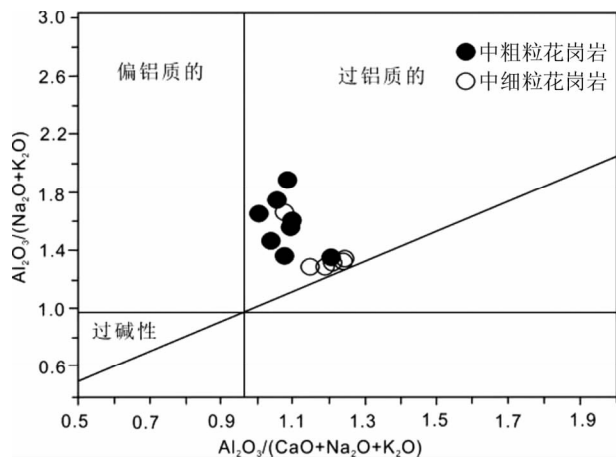


图6 A/NK-A/CNK 图解 (据 Maniar and Piccoli, 1989)

Fig. 6 A/NK-A/CNK diagram (after Maniar and Piccoli, 1989)

4 讨论

4.1 构造背景

Sylvester (1998) 对强过铝质 S 型花岗岩做了系统阐述, 指出典型 S 型花岗岩是指含白云母、堇青石、石榴子石等矿物的强过铝质花岗岩类岩石, 其 $A/CNK > 1.1$, 刚玉标准分子大于 1%。强过铝质 S 型花岗岩的形成与大陆碰撞造山作用密切相关, 因此近年来 S 型花岗岩的研究引起了越来越多学者的重视。过铝质花岗岩的形成环境较复杂 (林广春和马昌前, 2003; 宋子新和钱祥麟, 1996), 既可形成于挤压体制下 (陆陆碰撞的峰期), 也可形成于伸展环境 (紧跟着同碰撞峰期后的后碰撞环境) (邓晋福等, 1994)。S 型花岗岩具有明确的构造意义, 是造山作用由汇聚向伸展过渡的标志 (邓晋福等, 2004)。肖庆辉等 (2002) 也指出过铝质花岗岩不仅产于同碰撞阶段, 也可出现在后碰撞的走滑和伸展垮塌阶段。

冈塘错中细粒花岗岩含有大量的电气石, $A/CNK > 1.2$, 刚玉标准分子为 2.40% ~ 3.42%, 该花岗岩为典型的强过铝质 S 型花岗岩。在 Pearce (1996) 的 Rb-Y + Nb 构造判别图解 (图 8a) 和 Rb/30-Hf-Ta $\times 3$ 图解 (图 8b) 中, 中细粒花岗岩落入同碰撞区域。该花岗岩体位于龙木错-双湖缝合带南缘, 而龙木错-双湖带是三叠纪末期一条重要的缝合带 (李才等, 2008), 在岩体东部蓝岭出露有高压蓝片岩, 表明该地区可能是俯冲碰撞造山带的一部分 (Kapp *et al.*, 2003; 邓希光等, 2000; 李才等, 2006)。结合区域地质背景, 可以推断出中细粒花岗岩形成于同碰撞时的挤压剪切环境或伴随的逆掩构造所影响的造山带, 它应该是龙木错-双湖错缝合带在碰撞阶段的岩浆岩记录。

中粗粒花岗岩的矿物组成中含有白云母、黑云母等过铝质矿物, 且含碱性长石、斜长石, CIPW 标准矿物计算结果刚

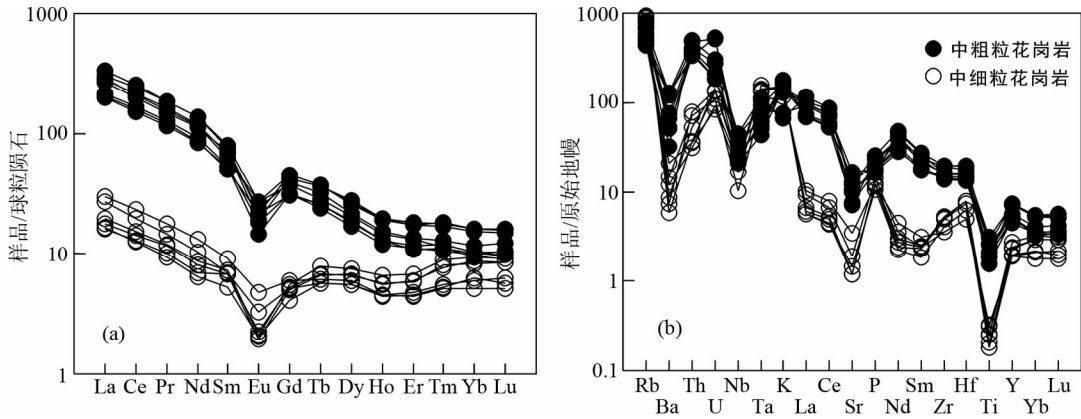


图7 球粒陨石标准化稀土元素配分图(a)与原始地幔标准化微量元素蛛网图(b) (标准化值据 Sun and McDonough, 1989)
Fig.7 Chondrite-normalized REE patterns (a) and trace element spider diagrams (b) (normalized values after Sun and McDonough, 1989)

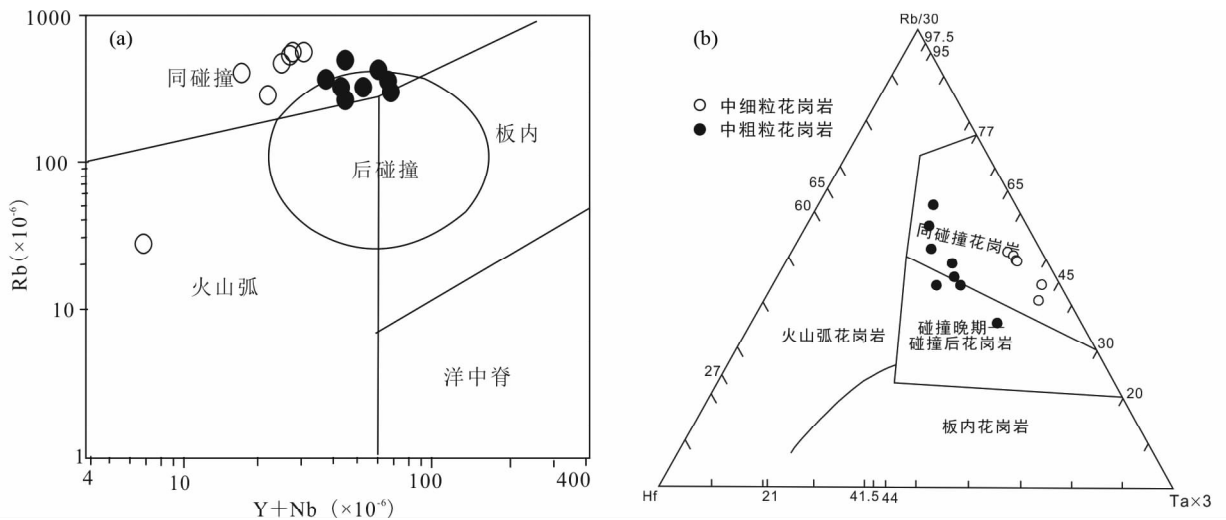


图8 花岗岩的 Rb-Y + Nb 构造判别图解(a, 据 Pearce, 1996) 和 Rb/30-Hf-Ta $\times 3$ 构造判别图解(b, 据 Harris *et al.*, 1986)
Fig.8 Rb-Y + Nb diagrams (a, after Pearce, 1996) and Rb/30-Hf-Ta $\times 3$ diagrams (b, after Harris *et al.*, 1986) for the tectonic interpretation of granitic rocks

玉含量达 1.84% ~ 3.04%, 大于 1%; $A/CNK = 1.00 \sim 1.09$, 为过铝质, 属于含白云母过铝质花岗岩。近年来研究表明, 含白云母过铝质花岗岩形成于加厚地壳的环境中, 属壳幔混源 (Liegeois, 1998; Eby, 1990; 林广春和马昌前, 2003; Barbarin, 1999)。在 Pearce (1996) 的环境判别图解 (图 8a) 和 Rb/30-Hf-Ta $\times 3$ 图解 (图 8b) 中, 中粗粒花岗岩同时落入同碰撞和后碰撞的区域。曲永贵等 (2003) 指出该区在晚三叠世之后又有新一轮的地壳伸展, Fu *et al.* (2010) 发现羌塘地体在晚三叠世有裂谷作用形成的火山岩。结合区域地质背景, 中粗粒花岗岩可能形成于碰撞后期的地壳伸展作用。

4.2 岩石成因

Nb 元素亏损反映花岗岩源区为大陆壳性质 (李昌年, 1992), 所有样品的稀土配分图和微量元素蛛网图基本平行,

显示了同源演化的特征。两种岩石样品均具有较为明显的 Eu 负异常, 可能与斜长石在源区的残余有关。

一般认为 Al_2O_3/TiO_2 大于 100 且 CaO/Na_2O 小于 0.3 时表明其源区为泥质沉积岩, 并且形成的初始熔融温度在 $875^\circ C$ 以下 (Sylvester, 1998; 肖庆辉等, 2002; 汪洋和邓晋福, 2002)。冈塘错中细粒花岗岩除 Ghx-WL1 一个样品外 Al_2O_3/TiO_2 为 181.6 ~ 929.2 远大于 100, 而 CaO/Na_2O 为 0.13 ~ 0.18, 表明中细粒花岗岩源于泥质源区且形成的初始熔融温度小于 $850^\circ C$ 。用锆石饱和温度计 (Watson and Harrison, 1983), 计算其形成的温度约 $684 \sim 717^\circ C$ 。

中粗粒花岗岩除一个样品 GHX-WL2 外 Al_2O_3/TiO_2 比值为 21.2 ~ 31.6 < 100 , CaO/Na_2O 的值为 0.6 ~ 1.2 > 0.3 , 说明了中粗粒花岗岩和中细粒花岗岩的成因有较大的差别。张锋等 (2009) 对该中粗粒巨斑状花岗岩的斑晶进行二长石

温度计测温得出核部为 954℃, 边部为 774℃。用锆石饱和温度计 (Watson and Harrison, 1983) 计算得其形成的温度约 775 ~ 830℃, 属较高温的花岗岩, 单靠剪切生热及放射性热已不大可能 (Sylvester, 1998)。

综上, 中细粒花岗岩形成于初始熔融温度较低的泥质源区, 而中粗粒花岗岩的初始熔融温度较高。中细粒花岗岩比中粗粒花岗岩明显的亏损 LREE、Ba、Th、Sr、Zr、Ti 等大离子亲石元素, 根据他们的包裹关系推测可能是中粗粒花岗岩对中细粒花岗岩再熔融的萃取作用所致。

4.3 对区域构造的指示意义

中细粒花岗岩为典型的强过铝质 S 型花岗岩, 而 S 型花岗岩代表成熟地壳的重熔, 说明南羌塘在晚三叠世已有较成熟的陆壳存在, 预示了古特提斯洋俯冲的结束。

冈塘错花岗岩侵入于南羌塘基底和石炭-二叠纪的杂岩中, 杂岩系所涉及的整体时空范畴往往是“单向有限”的, 类似数学上的“半序空间”, 也就是说, 杂岩系通常有比较确切的年代上限 (王根厚等, 2009)。因此, 岩体的侵位时间限定了研究区杂岩形成的时代上限, 为晚三叠世 (~215Ma), 其中中粗粒花岗岩锆石测年结果为 214.4 ± 4.0Ma, 中细粒花岗岩锆石测年结果为 222.2 ± 6.6Ma。该时限约束了古特提斯洋演化的结束年代。李才等 (2007) 通过高压变质矿物的定年结果和果干加年山蛇绿混杂岩上覆岩层时代的确定认为古特提斯演化至 220Ma 左右结束, 宋春彦等 (2012) 通过对羌塘晚三叠世古地磁数据的研究亦确定了羌塘盆地南、北坳陷在晚三叠世诺利期已经是一个统一的地块。

Kapp *et al.* (2003) 测得的冈塘错花岗岩体年龄约为 210 ± 5Ma, 胡培远等 (2010) 在果干加年山东测得一处 210.3 ± 2.6Ma 的花岗岩体, 其在本松错北测得蜈蚣山花岗岩体的结晶年龄为印支期 (胡培远等, 2012), Zhai *et al.* (2013) 在羌北发现了 223 ~ 219Ma 的闪长岩体, 胡培远等 (2014) 在果干加年山测得一处花岗闪长岩体的年龄为 225.1 ± 2.4Ma, 张修政等 (2014) 修正了红脊山地区香桃湖岩体形成于晚三叠世 (210.9 ~ 212.6Ma)。对比以上前人对本区域侵入岩年龄数据的研究, 冈塘错花岗岩体的形成亦属于晚三叠世羌塘中部大规模岩浆活动。

综上, 中细粒花岗岩形成于晚三叠世龙木错-双湖缝合带的俯冲挤压剪切环境或伴随的逆掩构造所影响的造山带环境; 而中粗粒花岗岩形成于紧随其后的拉张松弛环境, 来自玄武岩浆的底侵注入对形成造山带“高温”强过铝质花岗岩岩浆起着重要的作用 (Barbarin, 1999; Williamson *et al.*, 1996)。在相差约 10Ma 的时间里, 几乎相同的源区, 形成了高压到高温两种不同成因类型的花岗岩, 指示了该区在晚三叠世经历了由强烈挤压环境向伸展底侵环境的快速转换, 在区域上指示了古特提斯洋俯冲后的碰撞及拆沉过程 (Soesoo *et al.*, 1997; Shi *et al.*, 2004; Lu *et al.*, 2013), 同时也合理的解释了南羌塘增生杂岩中花岗岩的存在。

5 结论

(1) 冈塘错中粗粒花岗岩和中细粒花岗岩锆石 LA-ICP-MS 年龄分别为 214.4 ± 4.0Ma 和 222.2 ± 6.6Ma, 它们侵入于基底及二叠纪杂岩中, 岩体的侵位时间限定了杂岩形成和岩体就位的时间上限为晚三叠世。

(2) 冈塘错花岗岩体由中粗粒花岗岩和中细粒花岗岩两部分组成, 中细粒花岗岩以包体形式赋存在中粗粒花岗岩中。中细粒花岗岩为含电气石-二云母-二长花岗岩, 为强过铝质 S 型花岗岩其形成于同碰撞环境并具有较低的形成温度, 推测中细粒花岗岩形成于龙木错-双湖缝合带的同碰撞时的挤压剪切过程中。中粗粒花岗岩为巨斑状黑云母-二长花岗岩, 同时为含白云母过铝质花岗岩。其形成于紧随的后碰撞环境且具有较高的形成温度, 推测中粗粒花岗岩则形成于碰撞后紧随的岩石圈拆沉伸展环境。

(3) 冈塘错两种成因类型不同的花岗岩指示了该地区的构造环境在晚三叠经历了由强烈挤压向伸张底侵的快速转换, 而这种转换可以解释为俯冲晚期的碰撞与拆沉。

致谢 野外调查和采样过程中得到冈玛日项目组成员的大力帮助, 在此表示诚挚的感谢。

References

- Andersen T. 2002. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report ²⁰⁴Pb. *Chem. Geol.*, 192(1-2): 59-79
- Bao PS, Xiao XH, Wang J *et al.* 1999. The blueschist belt in the Shuanghu region, central-northern Tibet and its tectonic implications. *Acta Geologica Sinica*, 73(4): 302-314 (in Chinese with English abstract)
- Barbarin B. 1999. A review of the relationships between granitoid types, their origins and their geodynamic environments. *Lithos*, 46(3): 605-626
- Belousova EA, Griffin WL, O'Reilly SY and Fisher N. 2002. Igneous zircon: Trace element composition as an indicator of source rock type. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 143(5): 602-622
- Chen DG, Li BX, Xia QK *et al.* 2001. An evaluation of zircon U-Pb dating for metamorphic rocks and comments on zircon ages of Dabie orogen. *Acta Petrologica Sinica*, 17(1): 129-138 (in Chinese with English abstract)
- Claesson S, Vetrin V, Bayanova T *et al.* 2000. U-Pb zircon ages from a Devonian carbonatite dyke, Kola peninsula, Russia: A record of geological evolution from the Archaean to the Palaeozoic. *Lithos*, 51(1-2): 95-108
- Deng JF, Zhao HL, Lai SC *et al.* 1994. Generation of muscovite/two-mica granite and intracontinental subduction. *Earth Science*, 19(2): 139-147 (in Chinese with English abstract)
- Deng JF, Luo ZH, Su SG *et al.* 2004. *Petrogenesis, Tectonic Environment and Mineralization*. Beijing: Geological Publishing House, 85-122 (in Chinese)
- Deng XG, Ding L, Liu XH *et al.* 2000. The glaucophane schist and its ⁴⁰Ar/³⁹Ar dating of Gangmari area in the central Qiangtang, Tibet Plateau. *Chinese Science Bulletin*, 45(21): 2322-2326 (in Chinese)

- Eby GN. 1990. The A-type granitoids: A review of their occurrence and chemical characteristics and speculations on their petrogenesis. *Lithos*, 26(1-2): 115-134
- Fu XG, Wang J, Tan FW *et al.* 2010. The Late Triassic rift-related volcanic rocks from eastern Qiangtang, northern Tibet (China): Age and tectonic implications. *Gondwana Research*, 17(1): 135-144
- Harris NBW, Pearce JA and Tindle AG. 1986. Geochemical characteristic of collision-zone magmatism. Geological Society of London, Special Publications, 19: 67-81
- Hu K, Li C, Cheng LR *et al.* 1995. Gangmaco-Shuanghu blueschist belt in central Qiangtang area of Tibet and its geologic significance. *Journal of Changchun University of Earth Science*, 25(3): 268-274 (in Chinese with English abstract)
- Hu PY, Li C, Yang HT *et al.* 2010. Characteristic, zircon dating and tectonic significance of Late Triassic granite in the Guoganjianshan area, central Qiangtang, Qinghai-Tibet Plateau, China. *Geological Bulletin of China*, 29(12): 1825-1832 (in Chinese with English abstract)
- Hu PY, Li C, Su L *et al.* 2012. Geochemical and ^{40}Ar - ^{39}Ar isotope chronological characteristics of Wugongshan Indo-Chinese granites in central Qiangtang, Tibetan Plateau. *Geological Bulletin of China*, 31(6): 843-851 (in Chinese with English abstract)
- Hu PY, Li C, Xie CM *et al.* 2014. Zircon U-Pb dating and Hf-isotope compositions of granodiorite from the Guoganjian mountain area, central Qiangtang, northern Tibet, China. *Northwest Geology*, 47(1): 52-59 (in Chinese with English abstract)
- Kapp P, Yin A, Manning CE *et al.* 2000. Blueschist-bearing metamorphic core complexes in the Qiangtang block reveal deep crustal structure of northern Tibet. *Geology*, 28(1): 19-23
- Kapp P, Yin A, Manning CE *et al.* 2003. Tectonic evolution of the Early Mesozoic blueschist-bearing Qiangtang metamorphic belt, central Tibet. *Tectonics*, 22(4), doi: 10.1029/2002TC001383
- Li C. 1987. The Longmucuo-Shuanghu-Lancangjiang plate suture and the north boundary of distribution of Gondwana facies Permian-Carboniferous System in northern Xizang, China. *Journal of Changchun College of Geology*, 17(2): 155-166 (in Chinese with English abstract)
- Li C, Cheng LR, Hu K *et al.* 1995. The Study on Longmucuo-Shuanghu Paleo-Tethys Suture. Beijing: Geological Publishing House, 1-95 (in Chinese)
- Li C. 2003. Question about the basement of the Qiangtang micro-plate. *Geological Review*, 49(1): 5-9 (in Chinese with English abstract)
- Li C, Zhai QG, Cheng LR *et al.* 2005. Thought on some key geological problems in the Qiangtang area, Qinghai-Tibet Plateau. *Geological Bulletin of China*, 24(4): 295-301 (in Chinese with English abstract)
- Li C, Huang XP, Zhai QG *et al.* 2006. The Longmu Co-Shuanghu-Jitang plate suture and the northern boundary of Gondwanaland in the Qinghai-Tibet Plateau. *Earth Science Frontiers*, 13(4): 136-147 (in Chinese with English abstract)
- Li C, Zhai QG, Dong YS *et al.* 2007. Lungmu Co-Shanghu plate suture in the Qinghai-Tibet Plateau and records of the evolution of the Paleo-Tethys Ocean in the Qiangtang area, Tibet, China. *Geological Bulletin of China*, 26(1): 13-21 (in Chinese with English abstract)
- Li C, Zhai QG, Dong YS *et al.* 2008. High-pressure metamorphic belt in Qiangtang, Qinghai-Tibet Plateau, and its tectonic significance. *Geological Bulletin of China*, 27(1): 27-35 (in Chinese with English abstract)
- Li CN. 1992. A geochemical method for tectonomagmatic discrimination. *Geological Science and Technology Information*, 11(3): 73-78 (in Chinese with English abstract)
- Liang X, Wang GH, Yuan GL *et al.* 2012. Structural sequence and geochronology of the Qomo Ri accretionary complex, Central Qiangtang, Tibet: Implications for the Late Triassic subduction of the Paleo-Tethys Ocean. *Gondwana Research*, 22: 470-481
- Liegeois J. 1998. Preface-Some words on the post-collisional magmatism. *Lithos*, 45(1-4): xv-xvii
- Lin GC and Ma CQ. 2003. Genesis of peraluminous granitoids and their tectonic settings. *Geology and Mineral Resources of South China*, (1): 65-70 (in Chinese with English abstract)
- Liu Y, Santosh M, Zhao ZB *et al.* 2011. Evidence for palaeo-Tethyan oceanic subduction within central Qiangtang, northern Tibet. *Lithos*, 127(1-2): 39-53
- Lu ZW, Gao R, Li YT *et al.* 2013. The upper crustal structure of the Qiangtang Basin revealed by seismic reflection data. *Tectonophysics*, 606: 171-177
- Metcalfe I. 2013. Gondwana dispersion and Asian accretion: Tectonic and palaeogeographic evolution of eastern Tethys. *Journal of Asian Earth Sciences*, 66: 1-33
- Maniar PD and Piccoli PM. 1989. Tectonic discrimination of granitoids. *Geological Society of America Bulletin*, 101(5): 635-643
- Pearce JA. 1996. Sources and settings of granitic rocks. *Episodes*, 19(4): 120-125
- Pullen A and Kapp P. 2014. Mesozoic tectonic history and lithospheric structure of the Qiangtang terrane: Insights from the Qiangtang metamorphic belt, central Tibet. *Geological Society of America Special Papers*, 507: 71-87
- Qu YG, Wang YS, Zhang SQ *et al.* 2003. An inspiration from the section of the Late Triassic Duoburi Formation in the Xainza area: Stratigraphic constraints on the Indosinian Movement in Gangdise. *Geological Bulletin of China*, 22(7): 470-473 (in Chinese with English abstract)
- Shi DN, Zhao WJ, Brown L *et al.* 2004. Detection of southward intracontinental subduction of Tibetan lithosphere along the Bangong-Nujiang suture by P-to-S converted waves. *Geology*, 32(3): 209-212
- Soesoo A, Bons PD, Gray DR *et al.* 1997. Divergent double subduction: Tectonic and petrologic consequences. *Geology*, 25(8): 755-758
- Song CY, Wang J, Fu XG *et al.* 2012. Late Triassic paleomagnetic data from the Qiangtang terrane of Tibetan Plateau and their tectonic significances. *Journal of Jilin University*, 42(2): 526-535 (in Chinese with English abstract)
- Song ZX and Qian XL. 1996. On the formation mechanism of granite: A review. *Geological Science and Technology Information*, 15(3): 19-25 (in Chinese with English abstract)
- Sun SS and McDonough WF. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. In: Saunders AD and Norry MJ (eds.). *Magmatism in the Ocean Basins*. Geological Society, London, Special Publications, 42(1): 313-345
- Sylvester PJ. 1998. Post-collisional strongly peraluminous granites. *Lithos*, 45(1-4): 29-44
- Wan TF. 2003. Outline of China Geotectonics. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese with English abstract)
- Wang GH, Liang DY, Zhang WJ *et al.* 2007. Tectono-paleogeographic characteristics in northeastern Tibet, China and spatial-temporal transition of the northern boundary of Gondwana. *Geological Bulletin of China*, 26(8): 921-928 (in Chinese with English abstract)
- Wang GH, Han FL, Yang YJ *et al.* 2009. Discovery and geologic significance of late Paleozoic accretionary complexes in central Qiangtang, northern Tibet, China. *Geological Bulletin of China*, 28(9): 1181-1187 (in Chinese with English abstract)
- Wang Y and Deng JF. 2002. Petrochemical characteristics and geodynamic significance of the Yanshanian strongly peraluminous intrusive rocks in the Hebei-Shanxi-Liaoning area. *Geological Bulletin of China*, 21(4-5): 270-276 (in Chinese with English abstract)
- Watson EB and Harrison MT. 1983. Zircon saturation revisited: Temperature and composition effects in a variety of crustal magma types. *Earth and Planetary Science Letters*, 64(2): 295-304
- Williamson BJ, Shaw A, Downes H *et al.* 1996. Geochemical constraints on the genesis of Hercynian two-mica leucogranites from the Massif Central, France. *Chemical Geology*, 127(1-3): 25-42
- Xiao QH, Deng JF, Ma DS *et al.* 2002. The Thought and Method in the Study of Granite. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese with English abstract)

- Yang Y, Zhao ZB, Yuan TY *et al.* 2014. Ordovician parallel unconformity in Qiangtang terrane, northern Tibet: Implications to Early Paleozoic evolution of northern Tibetan regions. *Acta Petrologica Sinica*, 30(8): 2381–2392 (in Chinese with English abstract)
- Yao ZF. 1988. Blueschist found in northern Tibet. *Regional Geology of China*, (2): 190–193 (in Chinese with English abstract)
- Yin A and Harrison TM. 2000. Geologic evolution of the Himalayan-Tibetan orogen. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 28: 211–280
- Yuan HL, Gao S, Liu XM *et al.* 2004. Accurate U-Pb age and trace element determinations of zircon by laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 28(3): 353–370
- Zhai QG, Li C, Cheng LR *et al.* 2004. Geological features of Permian ophiolite in the Jiaomuri area, Qiangtang, Tibet, and its tectonic significance. *Geological Bulletin of China*, 23(12): 1228–1230 (in Chinese with English abstract)
- Zhai QG, Li C and Huang XP. 2007. The fragment of Paleo-Tethys ophiolite from central Qiangtang, Tibet: Geochemical evidence of metabasites in Guoganzhanian. *Science in China (Series D)*, 50(9): 1302–1309
- Zhai QG, Jahn BM, Zhang RY *et al.* 2011. Triassic Subduction of the Paleo-Tethys in northern Tibet, China: Evidence from the geochemical and isotopic characteristics of eclogites and blueschists of the Qiangtang Block. *Journal of Asian Earth Sciences*, 42(6): 1356–1370
- Zhai QG, Jahn BM, Su L *et al.* 2013. Triassic arc magmatism in the Qiangtang area, northern Tibet: Zircon U-Pb ages, geochemical and Sr-Nd-Hf isotopic characteristics, and tectonic implications. *Journal of Asian Earth Sciences*, 63: 162–178
- Zhang F, Wang GH and An R. 2009. Characteristics of giant annulus stripe K-feldspar phenocryst of Gangtancuo granitic pluton in central Qiangtang, northern Tibet, China. *Geological Bulletin of China*, 28(9): 1309–1318 (in Chinese with English abstract)
- Zhang KJ, Zhang YX, Li B *et al.* 2006. The blueschist-bearing Qiangtang metamorphic belt (northern Tibet, China) as an in situ suture zone: Evidence from geochemical comparison with the Jinsa suture. *Geology*, 34(6): 493–497
- Zhang XZ, Dong YS, Li C *et al.* 2014. Tectonic setting and petrogenesis mechanism of Late Triassic magmatism in Central Qiangtang, Tibetan Plateau: Take the Xiangtaohu pluton in the Hongjishan region as an example. *Acta Petrologica Sinica*, 30(2): 547–564 (in Chinese with English abstract)
- Zhao ZB, Bons PD, Wang GH *et al.* 2014. Origin and pre-Cenozoic evolution of the south Qiangtang basement, Central Tibet. *Tectonophysics*, 623: 52–66
- 胡培远, 李才, 苏犁等. 2012. 青藏高原羌塘中部蜈蚣山印支期花岗岩的地球化学特征和黑云母⁴⁰Ar-³⁹Ar 年龄. *地质通报*, 31(6): 843–851
- 胡培远, 李才, 解超明等. 2014. 藏北羌塘果干加年山花岗岩长石的锆石 U-Pb 定年和 Hf 同位素特征. *西北地质*, 47(1): 52–59
- 李才. 1987. 龙木错-双湖-澜沧江板块缝合带与石炭二叠纪冈瓦纳北界. *长春地质学院学报*, 17(2): 155–166
- 李才, 程立人, 胡克等. 1995. 西藏龙木错-双湖古特提斯缝合带研究. 北京: 地质出版社, 1–95
- 李才. 2003. 羌塘基底质疑. *地质论评*, 49(1): 5–9
- 李才, 翟庆国, 程立人等. 2005. 青藏高原羌塘地区几个关键地质问题的思考. *地质通报*, 24(4): 295–301
- 李才, 黄小鹏, 翟庆国等. 2006. 龙木错-双湖-吉塘板块缝合带与青藏高原冈瓦纳北界. *地学前缘*, 13(4): 136–147
- 李才, 翟庆国, 董永胜等. 2007. 青藏高原龙木错-双湖板块缝合带与羌塘古特提斯洋演化记录. *地质通报*, 26(1): 13–21
- 李才, 董永胜, 翟庆国等. 2008. 青藏高原羌塘高压变质带的特征及其构造意义. *地质通报*, 27(1): 27–35
- 李昌年. 1992. 构造岩浆判别的地球化学方法及其讨论. *地质科技情报*, 11(3): 73–78
- 林广春, 马昌前. 2003. 过铝花岗岩的成因类型与构造环境研究综述. *华南地质与矿产*, (1): 65–70
- 曲永贵, 王永胜, 张树歧等. 2003. 西藏申扎地区晚三叠世多布日组地层剖面的启示——对冈底斯印支运动的地层学制约. *地质通报*, 22(7): 470–473
- 宋春彦, 王剑, 付修根等. 2012. 青藏高原羌塘盆地晚三叠世古地磁数据及其构造意义. *吉林大学学报(地球科学版)*, 42(2): 526–535
- 宋子新, 钱祥麟. 1996. 花岗岩成因机制研究综述. *地质科技情报*, 15(3): 19–25
- 万天丰. 2003. 中国大地构造学纲要. 北京: 地质出版社
- 王根厚, 梁定益, 张维杰等. 2007. 藏东北构造古地理特征及冈瓦纳北界的时空转换. *地质通报*, 26(8): 921–928
- 王根厚, 韩芳林, 杨运军等. 2009. 藏北羌塘中部晚古生代增生杂岩的发现及其地质意义. *地质通报*, 28(9): 1181–1187
- 汪洋, 邓晋福. 2002. 冀晋辽地区燕山期强过铝质侵入岩岩石化学特征及其动力学意义. *地质通报*, 21(4–5): 270–276
- 肖庆辉, 邓晋福, 马大铨等. 2002. 花岗岩研究思维与方法. 北京: 地质出版社
- 杨耀, 赵中宝, 苑婷媛等. 2014. 藏北羌塘奥陶纪平行不整合面的厘定及其构造意义. *岩石学报*, 30(8): 2381–2392
- 姚宗富. 1988. 西藏北部发现含兰闪石类岩石. *中国区域地质*, (2): 190–193
- 翟庆国, 李才, 程立人等. 2004. 西藏羌塘角木日地区二叠纪蛇绿岩的地质特征及意义. *地质通报*, 23(12): 1228–1230
- 张锋, 王根厚, 安然. 2009. 藏北羌塘中部冈塘错花岗岩体中环带条纹钾长石巨斑晶的特征. *地质通报*, 28(9): 1309–1318
- 张修政, 董永胜, 李才等. 2014. 羌塘中部晚三叠世岩浆活动的构造背景及成因机制——以红脊山地区香桃湖花岗岩为例. *岩石学报*, 30(2): 547–564

附中文参考文献

- 鲍佩声, 肖序常, 王军等. 1999. 西藏中北部双湖地区蓝片岩带及其构造涵义. *地质学报*, 73(4): 302–314
- 陈道公, 李彬贤, 夏群科等. 2001. 变质岩中锆石 U-Pb 计时问题评述——兼论大别造山带锆石定年. *岩石学报*, 17(1): 129–138
- 邓晋福, 赵海玲, 赖绍聪等. 1994. 白云母/二云母花岗岩形成与陆内俯冲作用. *地球科学*, 19(2): 139–147
- 邓晋福, 罗照华, 苏尚国等. 2004. 岩石成因、构造环境与成矿作用. 北京: 地质出版社, 85–122
- 邓希光, 丁林, 刘小汉等. 2000. 青藏高原羌塘中部冈玛日地区蓝闪石片岩及其⁴⁰Ar/³⁹Ar 年代学. *科学通报*, 45(21): 2322–2326
- 胡克, 李才, 程立人等. 1995. 西藏羌塘中部冈玛错-双湖蓝片岩带及其构造意义. *长春科技大学学报*, 23(3): 268–274
- 胡培远, 李才, 杨韩涛等. 2010. 青藏高原羌塘中部果干加年山一带晚三叠世花岗岩的特征、锆石定年及其构造意义. *地质通报*, 29