

藏东吉塘复式花岗岩成因 ——来自锆石U-Pb年龄和地球化学的证据

樊炳良¹, 张鑫利^{2,3}, 于涛⁴, 白涛⁵, 冯德新¹

FAN Bingliang¹, ZHANG Xinli^{2,3}, YU Tao⁴, BAI Tao⁵, FENG Dexin¹

1. 西藏自治区地质矿产勘查开发局地热地质大队, 西藏 拉萨 850000;

2. 青海省青藏高原北部地质过程与矿产资源重点实验室, 青海 西宁 810012;

3. 青海省地质调查院, 青海 西宁 810012;

4. 西藏大学理学院, 西藏 拉萨 850000;

5. 成都理工大学地球科学学院, 四川 成都 610059

1. Geothermal Geological Survey Party, Tibet Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development, Lhasa 850000, Tibet, China;

2. Northern Qinghai-Tibet Plateau Geological Processes and Mineral Resources Laboratory, Qinghai, Xining 810012, Qinghai, China;

3. Qinghai Geological Survey Institute, Xining 810012, Qinghai, China;

4. College of Science, Tibet University, Lhasa 850000, Tibet, China;

5. Department of Geology College of Earth Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China

摘要:吉塘复式花岗岩位于澜沧江岩浆岩带北段,是研究澜沧江结合带演化过程的重要窗口。对澜沧江北段卡贡地区吉塘复式花岗岩中的黑云母二长花岗岩和花岗闪长岩开展了LA-ICP-MS锆石U-Pb年代学、岩石地球化学研究。研究表明,所选锆石样品均具有明显的生长环带, Th/U值普遍大于0.4,为典型的岩浆锆石,分别获得锆石²⁰⁶Pb/²³⁸U年龄加权平均值为 222.8 ± 1.5 Ma (MSWD=1.60, $n=16$)、 213.6 ± 1.1 Ma (MSWD=0.98, $n=20$)和 221.1 ± 1.5 Ma (MSWD=1.30, $n=15$),时代均属于晚三叠世。岩石地球化学特征表明,吉塘黑云母二长花岗岩和花岗闪长岩具有较一致的主量、微量元素含量,其变化特征也具有一致性,反映这2类岩石可能为同一期岩浆演化而来;吉塘复式花岗岩属于过铝质S型花岗岩,与临沧花岗岩、纽多花岗岩具有一致的岩石地球化学性质,为澜沧江花岗岩带的重要组成部分,具有统一的构造岩浆活动模式;吉塘复式花岗岩的成因与碰撞造山导致地壳加厚增温及与岩石圈剪切、伸展期有关的深熔作用有关,澜沧江洋的闭合时间可能为273 Ma左右。

关键词:吉塘复式花岗岩;岩石地球化学特征;LA-ICP-MS锆石U-Pb年龄;岩石成因

中图分类号:P588.12⁺1;P597⁺.3

文献标志码:A

文章编号:1671-2552(2019)08-1274-13

Fan B L, Zhang X L, Yu T, Bai T, Feng D X. The genesis of Jitang duplex granites in east Tibet: Evidence from the zircon U-Pb age and rock geochemistry. *Geological Bulletin of China*, 2019, 38(8):1274-1286

Abstract: Jitang duplex granites are located in the northern section of the Lancang River magma belt, and serve as an important window for studying the evolution process of Lancang River juncture zone. In this paper, the LA-ICP-MS zircon U-Pb chronology and rock geochemistry of biotite monzonitic granite and granitic diorite in Jitang duplex granites of Kakagong area along northern Lancang River were studied. The results show that the selected zircon samples exhibit obvious growth ring zone, the Th/U ratio is generally higher than 0.4, and the typical magma zircon has average weighted ²⁰⁶Pb/²³⁸U age of 222.8 ± 1.5 Ma (MSWD=1.60, $n=16$), 213.6 ± 1.1 Ma (MSWD=0.98, $n=20$) and 221.1 ± 1.5 Ma (MSWD=1.30, $n=15$), suggesting Late Triassic. The geochemical characteristics of rocks show that the Jitang biotite monzonitic granite and granitic diorite have relatively consistent content of main

收稿日期:2018-12-19;修订日期:2019-03-22

资助项目:中国地质调查局项目《西藏卡贡地区1:5万四幅区域地质调查》(编号:DD20160016-21)

作者简介:樊炳良(1988-),男,助理工程师,从事固体矿产勘查及区域地质调查工作。E-mail:373705243@qq.com

通讯作者:张鑫利(1987-),男,工程师,从事地质矿产勘查工作。E-mail:317558467@qq.com

and trace elements, and their changing characteristics are also consistent. It is shown that these two kinds of rocks might have been derived from the same magma, and the Jitang duplex granites belong to the aluminum S-type granite, which has the same petrogeochemical properties as Lincang granite and Newcastle granite, and has a unified tectonic magmatic activity mode along the Lancang River granite belt. The formation of Jitang duplex granites was related to the thickening and warming of the crust and the deep melting effect related to the shearing and stretching period of lithosphere, with the closure time of Lancang Jiang Ocean was probably at about 273Ma.

Key words: Jitang duplex granites; rock geochemical characteristics; LA-ICP-MS zircon U-Pb age; rock genesis

龙木错-双湖-澜沧江碰撞结合带的存在与否一直存在争议^[1-4],李才^[1]认为,龙木错-双湖-澜沧江结合带是南羌塘地块与北羌塘-昌都地块之间的一条重要的碰撞结合带,但对该结合带形成时代的认识有较大的差异^[1,4-7]。澜沧江岩浆岩带沿澜沧江结合带呈带状分布,如临沧花岗岩、东达山花岗岩、纽多花岗岩和吉塘复式花岗岩。研究区大地构造位置处于羌北-昌都地块、双湖-澜沧江结合带和羌塘左贡地块的交会部位(图1-a),区域大地构造位置独特,构造演化复杂。吉塘复式花岗岩体分布于昌都芒康盆地与类乌齐-左贡陆缘山盆之间,南东角与俄让-竹卡岩浆弧相邻,为北澜沧江结合带的重要组成部分(图1-b)。北澜沧江结合带出露新元古界吉塘岩群(Pt₃J)、下古生界西西群(Pz₁Y)、下石炭统卡贡组(C₁kg)和卡贡岩组(C₁k),被中一晚三叠

世中酸性岩浆岩破坏严重,吉塘岩群多以残留体形式出现,两侧以上三叠统一侏罗系碎屑岩为主。吉塘复式花岗岩具有弱糜棱岩化、碎裂岩化,研究其成因及年代学,有助于解秘澜沧江花岗岩带的形成时代,分析澜沧江结合带的闭合时限。基于此,本文在对出露于澜沧江岩浆岩带北段的吉塘复式花岗岩进行野外地质调查的基础上,开展了吉塘复式花岗岩中黑云母二长花岗岩和花岗闪长岩的全岩组成、锆石U-Pb年龄研究,进而分析吉塘复式花岗岩的形成时代,为进一步研究澜沧江岩浆岩带和澜沧江结合带提供重要依据。

1 岩相学特征

吉塘复式花岗岩位于藏东察雅县吉塘镇以西约3km处,总体呈北西—南东向展布,侵位于新元

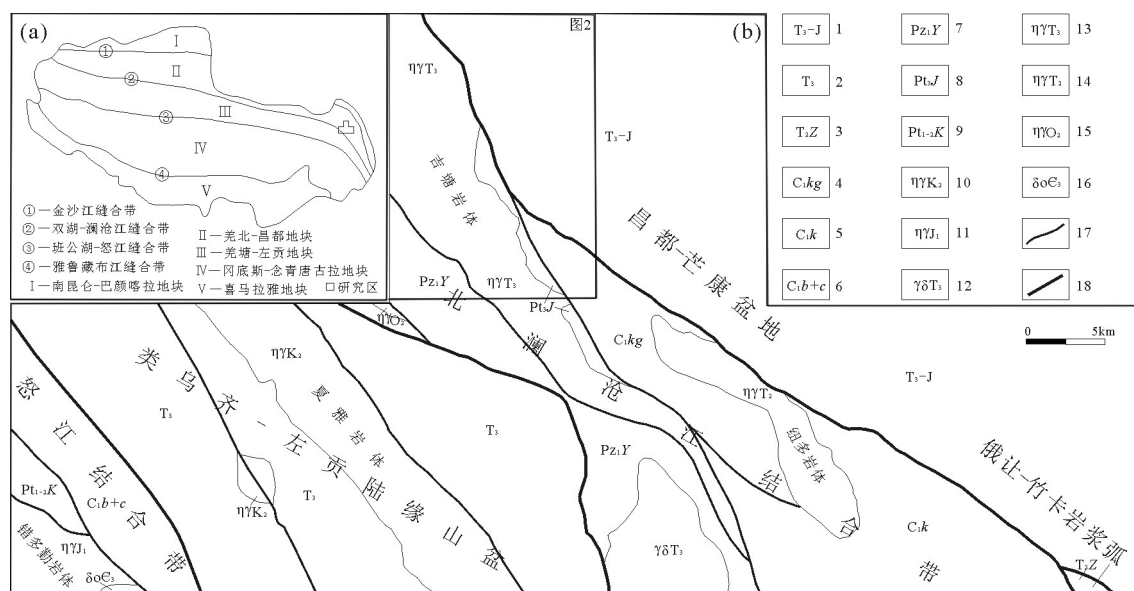


图1 图1 研究区大地构造位置图(a)和区域地质简图(b)

Fig. 1 Tectonic location of study area(a) and regional geological sketch map(b)

- 1—上三叠统一侏罗系碎屑岩;2—上三叠统碎屑岩;3—上三叠统竹卡组安山岩、岩屑凝灰岩;4—下石炭统卡贡组变质砂岩、千枚岩;
5—下石炭统卡贡组变质砂岩、千枚岩夹大理岩、玄武岩岩块;6—下石炭统邦达岩组+错绒沟口岩组变质砂岩、千枚岩;
7—下古生界西西群;8—新元古界吉塘岩群;9—古—中元古界卡穷岩群;10—晚白垩世二长花岗岩、似斑状二长花岗岩;
11—早侏罗世二长花岗岩、似斑状钾长花岗岩;12—晚三叠世花岗闪长岩;13—晚三叠世二长花岗岩;14—中三叠世二长花岗岩;
15—中奥陶世二长花岗岩;16—晚寒武世石英闪长岩;17—区域次级断裂;18—区域分区断裂

古界吉塘岩群(Pt_3J)变质岩系中,长约70km,宽2~10km,出露面积约340km²,该岩体为一复式岩体^[7-8],主要由黑云母二长花岗岩和花岗闪长岩组成,在岩体边部,由于受到区域构造活动的影响,局部见碎裂岩化和糜棱岩化(图2)。

黑云母二长花岗岩:灰白色,具细-中粒半自形粒状结构,花岗结构,块状构造。矿物组成为石英(25%~35%)、斜长石(30%~40%)、碱性长石(20%~35%)、黑云母(10%~15%),以及少量锆石、榍石、绿泥石、磁铁矿、磷灰石等。斜长石呈无色,略浑浊,半自形长板状产出,粒径集中在2~5mm,次为0.5~2mm,发育聚片双晶,具明显的绢云母化。碱性长石呈半自形-他形板状,粒径多为2~4mm,次为0.5~2mm,具弱粘土化,发育条纹构造及格子状双晶。石英呈他形粒状,粒径0.3~

2.2mm,少量为0.05~0.1mm,呈彼此镶嵌状分布于裂隙中。黑云母呈黄绿色,粒径0.5~2.5mm,多发育绿泥石或完全交代呈假象产出,偶见解理缝中未蚀变完全的棕色黑云母残余。锆石、榍石、磷灰石等呈自形柱状产出,总含量约2%。

花岗闪长岩:灰白色,具细-中粒半自形粒状结构,块状构造。主要由石英(20%~25%)、斜长石(35%~45%)、碱性长石(10%~20%)、黑云母(10%~15%),以及少量锆石、榍石、绿泥石、磷灰石等组成。斜长石为更-中长石,粒径0.5~2mm;碱性长石主要为条纹长石,并出溶密集而狭窄的钠长石条带;黑云母呈棕色,绿泥石化,包含较多的副矿物包裹体。

区内断裂构造发育,靠近断裂带附近,部分矿物发生破碎,但相对位移较小,可完整拼接,裂隙中主要充填了绢云母、黑云母及小颗粒石英,具有较明显的碎裂结构,形成了碎裂岩化二长花岗岩或碎裂岩化花岗闪长岩;更靠近断裂带一侧,由于受到的区域动力作用加强,部分区域形成了碎斑和碎基,矿物也有了一定的定向排列,形成了糜棱岩化二长花岗岩和糜棱岩化花岗闪长岩。

2 分析方法

吉塘复式花岗岩样品的主量、微量元素测试在川西北地质队检测中心完成。选取新鲜的具有代表性的岩石样品经薄片鉴定后送样,采用Optima 5300V等离子体发射光谱仪分析^[9],分析精度优于5%,分析结果见表1。

锆石单矿物挑选、阴极发光图像拍摄均由武汉上谱分析科技有限责任公司完成。本文所测锆石具有明显的生长环带,在确定打点位置后送至武汉上谱分析科技有限责任公司进行测试。测试仪器为Agilent 7700e, GeolasPro激光剥蚀系统由COMPexPro 102 ArF 193nm准分子激光器和MicroLas光学系统组成,激光束斑直径和频率分别为32μm和5Hz。采用锆石标准91500和玻璃标准物质NIST610为外标分别进行同位素和微量元素分馏校正。对分析数据的离线处理采用软件ICPMSDataCal完成^[10]。锆石U-Pb年龄谱和图绘制和年龄加权平均计算采用Isoplot/Ex_ver3完成^[11]。锆石定年数据见表2。

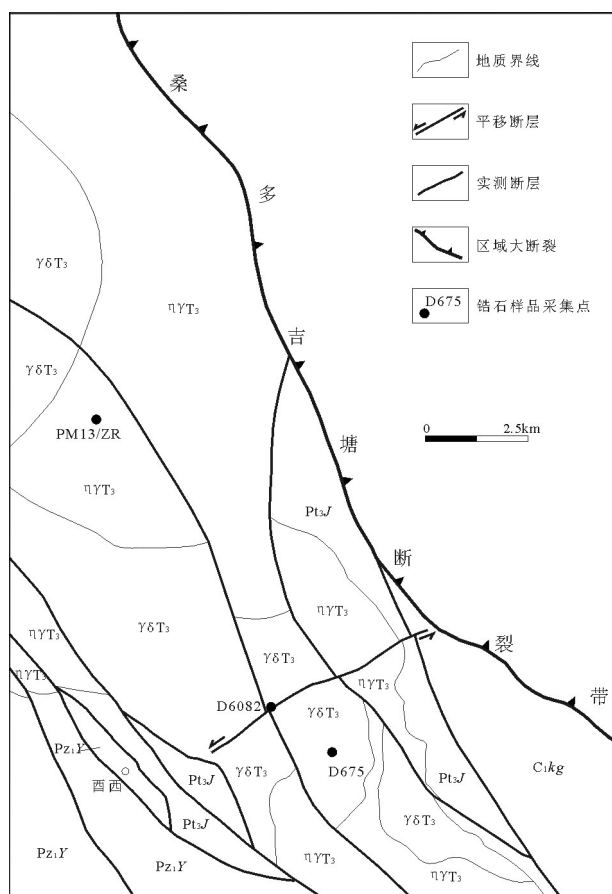


图2 吉塘复式花岗岩地质简图

Fig. 2 Simplified geological map of Jitang duplex granites
C₁kg—下石炭统卡贡组;P_{z1}Y—下古生界西群;Pt₃J—新元古界吉塘岩群;YδT₃—晚三叠世花岗闪长岩;ηYT₃—晚三叠世二长花岗岩

表 1 吉塘复式花岗岩主量、微量和稀土元素分析结果

Table 1 Whole-rock major, trace and rare earth element data of the Jitang duplex granites

元素	JT-1	JT-2	JT-3	JT-4	JT-5	JT-6	JT-7	JT-8	JT-9	JT-10	JT-11	JT-12	JT-13	JT-14	JT-15	JT-16	JT-17	JT-18	JT-19	JT-20
	花岗岩闪长岩				糜棱岩化 花岗岩闪长岩				碎裂岩化 花岗岩闪长岩				黑云母二长花岗岩				糜棱岩化 黑云母二长花岗岩			
SiO ₂	65.92	64.74	69.06	67.28	67.66	69.50	67.60	66.40	68.00	68.76	69.38	68.98	70.16	71.08	72.70	70.74	69.50	72.60	71.12	75.16
Al ₂ O ₃	15.23	15.98	14.14	14.02	13.46	13.37	14.87	14.89	13.51	14.33	14.53	13.52	13.24	12.97	13.52	13.04	13.21	13.20	12.69	12.26
TF ₂ O ₃	4.69	4.71	4.03	4.51	4.48	4.88	5.07	4.77	5.09	3.84	2.96	4.01	2.93	4.27	3.70	4.52	4.98	3.39	3.73	2.37
Na ₂ O	3.04	2.75	4.15	2.69	2.44	3.14	1.82	2.57	2.64	2.84	3.25	2.92	3.16	1.90	2.39	2.36	1.96	2.39	2.24	2.68
K ₂ O	3.11	3.48	2.40	3.49	3.52	2.14	3.76	3.35	3.09	4.02	4.58	4.26	2.49	3.29	2.60	2.67	3.09	2.85	4.16	4.15
CaO	3.36	0.86	2.38	2.16	2.45	1.47	0.89	2.58	2.02	2.69	1.84	1.59	2.48	1.16	1.08	1.01	1.65	1.36	1.04	0.67
MgO	2.07	2.49	1.61	2.09	2.57	2.57	2.58	2.58	2.76	1.70	1.26	1.98	2.06	2.51	2.07	1.81	1.87	1.70	1.70	0.95
MnO	0.066	0.033	0.042	0.061	0.065	0.064	0.051	0.100	0.046	0.051	0.047	0.069	0.029	0.064	0.044	0.046	0.065	0.054	0.059	0.040
P ₂ O ₅	0.28	0.51	0.20	0.21	0.19	0.14	0.25	0.27	0.17	0.11	0.19	0.12	0.11	0.10	0.10	0.19	0.10	0.082	0.093	0.10
TiO ₂	0.76	0.62	0.55	0.70	0.75	0.75	0.70	0.73	0.80	0.64	0.46	0.71	0.92	0.61	0.52	0.64	0.59	0.42	0.51	0.41
烧失量	1.78	3.15	1.98	3.15	2.34	2.56	2.38	1.78	2.35	1.97	1.89	2.45	2.89	2.18	1.89	3.56	3.09	2.01	2.98	1.69
H ₂ O ⁺	1.62	3.06	1.86	2.96	2.22	2.38	2.28	1.54	2.10	1.78	1.76	2.28	2.64	2.08	1.78	3.46	2.80	1.80	2.66	1.66
Na ₂ O+K ₂ O	6.15	6.23	6.55	6.18	5.96	5.28	5.58	5.92	5.73	6.86	7.84	7.18	5.65	5.18	5.00	5.03	5.04	5.24	6.41	6.83
Na ₂ O/K ₂ O	0.98	0.79	1.73	0.77	0.69	1.47	0.48	0.77	0.85	0.71	0.71	0.69	1.27	0.58	0.92	0.89	0.63	0.84	0.54	0.65
A/NK	1.82	1.93	1.50	1.71	1.72	1.79	2.10	1.89	1.75	1.59	1.41	1.43	1.67	1.94	2.00	1.92	2.01	1.88	1.55	1.38
A/CNK	1.05	1.62	1.03	1.15	1.10	1.32	1.71	1.19	1.19	1.03	1.06	1.10	1.07	1.47	1.55	1.51	1.38	1.39	1.26	1.21
AR	1.99	2.17	2.31	2.23	2.20	2.10	2.10	2.03	2.17	2.35	2.84	2.81	2.12	2.16	2.04	2.12	2.03	2.12	2.75	3.24
Li	22.6	19.5	20.9	22.7	25.1	21.1	33.2	31.7	29.9	17.3	13.6	20.8	11.7	17.7	13.9	15.3	12.7	13.7	17.6	9.7
Be	0.96	2.15	3.56	3.21	3.94	5.22	4.20	3.36	2.02	3.02	3.49	2.69	2.56	3.23	8.13	2.37	4.15	5.14	8.42	2.11
Sc	10.3	11.0	9.3	10.8	11.5	10.7	14.9	17.8	13.8	11.0	9.2	12.0	14.4	14.4	10.1	11.6	12.8	12.1	9.7	5.8
V	86.5	89.0	58.5	72.1	78.1	86.7	94.4	96.7	94.8	70.1	43.6	72.1	79.5	71.5	55.6	63.0	71.6	55.9	62.5	19.4
Cr	37.7	36.4	26.6	43.2	82.3	69.6	80.9	52.6	90.3	33.0	24.5	53.2	61.6	75.8	50.0	61.6	73.7	48.5	49.0	11.3
Co	10.3	11.8	7.9	11.7	12.1	9.2	18.4	13.4	14.1	10.1	7.8	11.5	6.6	12.4	11.7	11.1	15.0	8.8	8.6	4.9
Ni	15.5	22.7	9.9	20.4	33.8	23.6	39.0	18.2	43.7	11.9	9.5	18.5	20.6	30.2	22.6	24.0	31.4	20.8	18.5	7.3
Cu	8.8	4.7	4.4	8.1	12.2	12.2	32.4	10.2	10.1	3.45	7.9	9.7	3.2	2.7	13.2	21.7	31.4	7.5	20.4	10.3
Zn	89.9	62.2	71.7	74.7	69.5	85.0	46.2	68.9	179	61.8	41.0	75.9	18.7	59.6	52.1	60.9	94.4	51.6	66.0	48.6
Ga	20.5	24.1	20.1	21.2	19.1	19.7	22.7	22.8	19.6	18.1	21.8	17.8	21.8	18.8	17.7	17.5	17.5	17.2	17.5	15.0
Rb	180	188	121	199	219	112	213	248	151	181	255	212	32	169	119	139	159	149	195	167

续表1

元素	JT-1	JT-2	JT-3	JT-4	JT-5	JT-6	JT-7	JT-8	JT-9	JT-10	JT-11	JT-12	JT-13	JT-14	JT-15	JT-16	JT-17	JT-18	JT-19	JT-20
	花岗岩长岩				糜棱岩化 花岗岩长岩				碎裂岩化 花岗岩长岩				黑云母二长花岗岩				糜棱岩化 黑云母二长花岗岩			
Sr	170	85	124	173	130	149	71	164	118	162	104	125	284	85	93	95	109	87	105	55
Zr	13.20	12.70	11.30	21.90	5.77	17.30	25.90	3.00	2.84	8.95	46.40	22.10	14.30	2.96	5.57	4.35	6.22	14.50	15.90	10.70
Nb	14.7	17.0	17.1	15.7	17.1	15.1	16.8	12.6	17.4	14.7	24.6	14.9	20.4	15.5	9.7	13.3	12.4	11.0	12.7	9.4
Mo	0.40	0.16	0.26	0.29	0.27	0.64	1.39	0.23	0.31	0.21	1.68	0.28	0.69	0.25	1.00	0.61	0.98	0.50	1.28	0.81
Ba	405	416	290	810	804	412	914	674	749	1136	509	821	76.4	664	524	577	698	543	912	430
Hf	0.57	0.17	0.51	1.07	0.53	0.50	0.59	0.13	0.12	0.23	1.02	0.83	0.37	0.12	0.14	0.12	0.20	0.15	0.62	0.18
Ta	2.14	2.02	1.57	1.80	1.16	1.10	1.39	1.44	1.23	0.78	1.86	0.84	1.12	0.82	0.86	0.98	0.74	0.93	1.01	0.68
Pb	47.7	19.8	41.5	56.2	22.4	29.4	18.1	30.8	76.2	17.2	27.6	39.5	9.13	14.3	22.8	22.7	11.1	28.5	32.6	31.2
Bi	0.40	0.62	0.20	0.15	0.27	0.33	0.46	0.35	2.04	0.03	0.47	0.20	0.08	0.16	0.67	0.16	0.13	0.29	0.29	0.02
Th	2.6	3.5	23.7	22.0	24.3	11.7	20.7	11.4	15.5	10.0	26.7	29.3	24.2	10.0	16.9	16.8	14.1	16.3	18.4	17.1
U	3.55	2.76	2.23	4.05	4.42	2.87	4.07	2.34	2.28	1.41	4.79	2.38	2.25	1.59	3.49	3.34	2.70	2.05	4.46	2.05
Y	32.5	44.3	33.2	85.9	46.1	17.5	21.2	20.6	17.6	37.8	72.2	40.5	56.3	30.8	17.6	19.7	51.6	20.3	36.0	27.7
La	46.4	53.8	46.4	106.0	54.1	37.8	41.6	41.3	38.2	48.6	101.0	50.8	66.8	44.8	38.3	40.9	56.7	41.1	48.0	43.4
Ce	78.2	106.0	85.5	188.0	101.0	75.6	79.3	81.1	75.7	90.2	140.0	100.0	117.0	83.0	72.4	76.4	115	79.3	89.3	83.3
Pr	2.57	3.74	8.83	11.00	11.10	8.78	9.32	6.21	9.36	8.77	9.85	13.40	15.20	5.73	8.16	9.06	8.96	8.88	9.94	6.20
Nd	11.2	15.9	34.4	43.1	45.2	34.7	38.9	25.1	34.0	34.6	40.9	50.1	56.6	22.6	32.9	35.8	34.9	33.9	35.4	22.5
Sm	2.63	4.33	6.46	11.00	7.95	6.35	6.60	3.83	6.73	6.24	8.33	8.99	10.20	4.18	5.80	6.25	6.42	6.16	6.59	4.81
Eu	1.11	0.71	1.01	1.42	1.31	1.39	1.26	1.02	1.51	1.29	0.76	1.12	2.11	0.83	0.90	1.09	1.23	0.83	1.06	0.57
Gd	2.54	4.55	6.14	11.90	7.10	5.23	5.50	3.37	5.54	5.53	8.24	7.00	9.11	3.58	4.54	4.83	5.61	4.78	5.74	4.25
Tb	0.56	1.14	1.10	2.43	1.18	0.80	0.77	0.56	0.84	0.97	1.71	1.14	1.53	0.66	0.64	0.76	1.09	0.61	1.01	0.86
Dy	4.53	8.98	7.28	17.00	7.93	6.33	4.44	3.46	4.54	6.69	11.30	6.96	10.70	4.33	3.21	5.47	7.80	3.52	6.72	5.82
Ho	0.90	1.67	1.27	3.12	1.43	0.65	0.76	0.58	0.71	1.16	2.03	1.28	1.97	0.83	0.51	0.71	1.53	0.62	1.15	1.03
Er	2.45	4.68	3.67	8.41	4.73	2.06	1.80	1.26	1.73	3.59	5.41	4.25	6.65	2.92	1.27	2.21	5.17	1.73	3.54	2.77
Tm	0.39	0.71	0.49	1.00	0.56	0.22	0.23	0.14	0.22	0.49	0.56	0.69	0.87	0.29	0.15	0.44	0.76	0.23	0.50	0.35
Yb	2.82	4.28	2.52	5.25	3.06	1.56	1.88	1.82	1.17	2.40	4.74	3.93	4.73	2.50	1.11	1.52	3.98	2.02	2.39	1.73
Lu	0.36	0.63	0.38	0.74	0.48	0.18	0.35	0.39	0.20	0.41	0.69	0.65	0.78	0.38	0.14	0.24	0.73	0.41	0.41	0.28
ΣREE	156.66	210.89	205.45	409.89	247.36	181.73	192.68	170.20	180.46	210.88	335.62	250.67	303.73	176.64	170.10	185.68	249.74	184.07	211.78	177.89
LREE	142.09	184.26	182.60	360.05	220.88	164.71	176.95	158.63	165.49	189.64	300.94	224.77	267.42	161.14	158.53	169.50	223.07	170.16	190.33	160.80
HREE	14.57	26.63	22.85	49.84	26.48	17.02	15.73	11.57	14.96	21.24	34.68	25.89	36.32	15.50	11.58	16.18	26.67	13.91	21.45	17.09
LREE/HREE	9.75	6.92	7.99	7.22	8.34	9.68	11.25	13.71	11.06	8.93	8.68	8.68	7.36	10.40	13.69	10.48	8.36	12.23	8.87	9.41
La _N /Yb _N	11.79	9.01	13.19	14.46	12.67	17.44	15.87	16.30	23.32	14.52	15.26	9.28	10.13	12.83	24.81	19.27	10.21	14.56	14.39	18.02
δEu	1.29	0.48	0.48	0.38	0.52	0.72	0.62	0.85	0.73	0.66	0.28	0.42	0.65	0.64	0.52	0.58	0.61	0.45	0.52	0.37
δCe	1.15	1.30	0.97	1.09	0.96	0.98	0.95	1.11	0.95	0.99	0.87	0.92	0.86	1.09	0.96	0.93	1.13	0.97	0.95	1.10

注: 主量元素含量单位为%, 微量和稀土元素含量单位为 10^{-6} 。

3 分析结果

3.1 全岩地球化学特征

本次分析了20件吉塘岩体样品的全岩主量和微量元素组成,分析结果见表1。晚三叠世黑云母二长花岗岩地球化学特征显示:① SiO_2 含量为68.98%~75.16%,平均为71.14%,属于酸性岩类;② Na_2O 为1.90%~3.25%,平均为2.53%, K_2O 为2.49%~2.58%,平均为3.41%,全碱($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$)为5.00%~7.84%,平均为5.94%, $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 值介于0.54~1.27之间,平均为0.77,属钙碱性-高钾钙碱性系列,在 SiO_2 - K_2O 图解(图3-a)中,样品投影点大部分落入高钾钙碱性系列范围,少数落在钙碱性系列与高钾钙碱性系列界线附近,总体体现高钾的特点;③ Al_2O_3 含量为12.26%~14.53%,平均为13.22%, A/CNK (铝饱和指数)值为1.06~1.55,平均为1.30,为过铝质花岗岩(图3-b);④ MgO 含量为0.95%~2.51%,平均1.79%,显示较低的Mg含量;⑤含有较低的 P_2O_5 含量,为0.08%~0.19%,平均为0.12%, TiO_2 含量为0.41%~0.92%,平均为0.58%。

晚三叠世花岗闪长岩地球化学特征显示:① SiO_2 含量为64.74%~69.50%,平均为67.49%,属于酸性岩类;② Na_2O 含量为1.82%~4.15%,平均为2.81%, K_2O 为2.14%~4.02%,平均为3.24%,全碱($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$)为5.28%~6.86%,平均为6.04%, $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 值为0.48~1.73,平均为0.92,属钙碱性-高钾钙碱性系列,在 SiO_2 - K_2O 图解(图3-a)中,样品投影点大部分落入高钾钙碱性系列范围内,少数

落在钙碱性系列与高钾钙碱性系列界线附近,总体体现高钾的特点,与黑云母二长花岗岩相比,花岗闪长岩相对富钠;③ Al_2O_3 为13.37%~15.98%,平均为14.38%, A/CNK (铝饱和指数)值为1.03~1.71,平均为1.24,为过铝质花岗岩(图3-b);④ MgO 含量为1.61%~2.76%,平均为2.30%,Mg含量较低;⑤较低的 P_2O_5 含量,为0.11%~0.51%,平均为0.23%, TiO_2 含量为0.55%~0.80%,平均为0.70%。

根据上述2种岩石的地球化学特征可以得出,吉塘黑云母二长花岗岩和花岗闪长岩具有较一致的主量元素含量,其变化特征也具有一致性,间接反映这2类岩石可能为同一岩浆演化而来。

吉塘复式花岗岩样品微量元素测试结果表明(表1),晚三叠世黑云母二长花岗岩稀土元素总量 $\sum \text{REE}$ (不含Y)= 170.10×10^{-6} ~ 335.62×10^{-6} ,平均为 224.59×10^{-6} ;轻稀土元素(LREE)为 158.53×10^{-6} ~ 300.94×10^{-6} ,重稀土元素(HREE)为 11.58×10^{-6} ~ 36.32×10^{-6} ,LREE/HREE值为7.36~13.69,具有较高的 $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 值,为9.28~24.81,平均为14.88。晚三叠世花岗闪长岩 $\sum \text{REE}$ (不含Y)= 156.66×10^{-6} ~ 409.89×10^{-6} ,平均 216.62×10^{-6} ;LREE为 142.09×10^{-6} ~ 360.05×10^{-6} ,HREE为 11.57×10^{-6} ~ 49.84×10^{-6} ,LREE/HREE值为6.92~13.71,具有较高的 $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 值,为9.01~23.32,平均为14.86。上述2类岩石微量元素特征显示,轻、重稀土元素分异明显,球粒陨石标准化稀土元素配分曲线(图4-a、c)基本一致,表现为重稀土元素相对亏损、轻稀土元素强富集的右倾型,2类岩石样品均呈弱负Ce异常和强

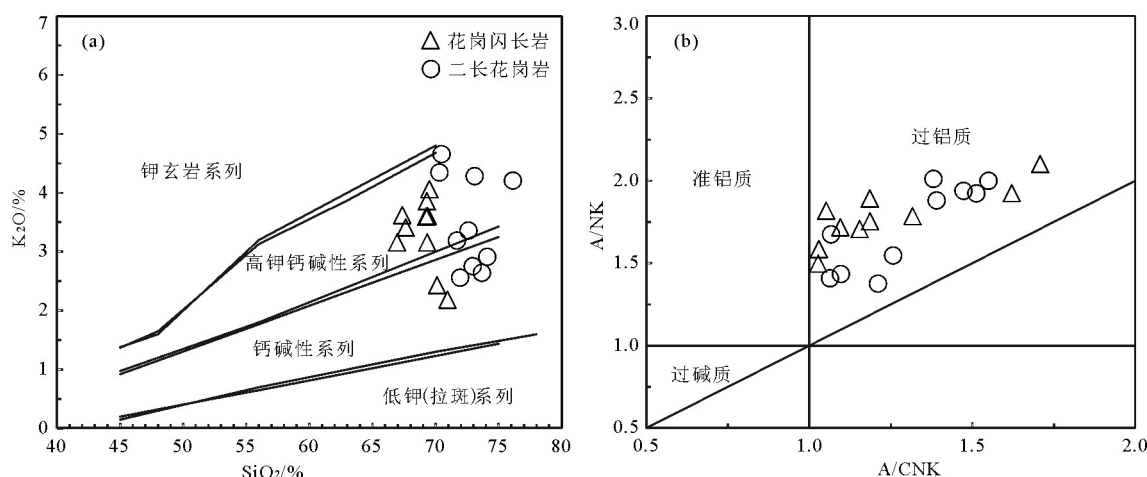


图3 吉塘复式花岗岩 SiO_2 - K_2O (a)和 A/CNK - A/NK 图解(b)

Fig. 3 SiO_2 - K_2O (a) and A/CNK - A/NK (b) plots of the Jitang duplex granites

表2 吉塘复式花岗岩LA-ICP-MS 锆石U-Th-Pb分析结果

Table 2 LA-ICP-MS zircon U-Th-Pb analytical data of the Jitang duplex granites

测点号	Pb	Th	U	Th/U	同位素比值					年龄/Ma					Ti	T			
	10 ⁻⁶				²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	/10 ⁻⁶	/°C	
D675 花岗闪长岩																			
D675-01	22.01	724.2	593	0.29	0.0514	0.0018	0.2360	0.0079	0.0333	0.0003	257	84.2	215	6.5	211	2.1	4.74	724.2	
D675-04	20.26	742.0	560	0.26	0.0503	0.0018	0.2304	0.0081	0.0333	0.0004	209	81.5	211	6.7	211	2.7	5.76	742.0	
D675-07	28.39	733.0	724	0.41	0.0504	0.0015	0.2367	0.0073	0.0340	0.0004	213	70.4	216	6.0	215	2.5	5.22	733.0	
D675-10	21.70	689.2	582	0.29	0.0505	0.0015	0.2331	0.0073	0.0333	0.0004	220	70.4	213	6.0	211	2.4	3.16	689.2	
D675-17	12.06	784.6	314	0.36	0.0503	0.0024	0.2382	0.0114	0.0341	0.0004	209	114	217	9.4	216	2.8	8.92	784.6	
D675-22	15.53	785.5	405	0.43	0.0504	0.0020	0.2351	0.0099	0.0337	0.0006	213	92.6	214	8.1	214	3.7	9.00	785.5	
D675-24	19.96	738.1	559	0.17	0.0497	0.0017	0.2283	0.0078	0.0332	0.0004	189	79.6	209	6.5	211	2.4	5.51	738.1	
D675-26	27.73	710.9	701	0.40	0.0494	0.0021	0.2334	0.0080	0.0338	0.0004	165	98.1	213	6.6	214	2.5	4.08	710.9	
D675-02	12.34	797.8	329	0.28	0.0514	0.0021	0.2358	0.0094	0.0333	0.0004	257	94.4	215	7.7	211	2.3	10.15	797.8	
D675-03	17.55	646.5	461	0.31	0.0519	0.0019	0.2446	0.0091	0.0341	0.0004	280	83.3	222	7.4	216	2.5	1.86	646.5	
D675-05	6.57	804.0	166	0.55	0.0528	0.0036	0.2420	0.0150	0.0338	0.0005	320	158.3	220	12.3	214	3.3	10.77	804.0	
D675-11	11.06	688.6	295	0.25	0.0491	0.0020	0.2294	0.0092	0.0339	0.0005	154	101.0	210	7.6	215	2.8	3.14	688.6	
D675-21	22.66	701.0	622	0.18	0.0486	0.0015	0.2282	0.0070	0.0339	0.0004	128	72.2	209	5.8	215	2.6	3.64	701.0	
D675-13	11.99	881.1	300	0.40	0.0521	0.0028	0.2462	0.0115	0.0340	0.0004	300	122.2	224	9.4	215	2.6	21.38	881.1	
D675-09	14.84	790.2	382	0.41	0.0530	0.0020	0.2474	0.0091	0.0338	0.0004	332	85.2	224	7.4	214	2.6	9.42	790.2	
D675-12	25.88	744.3	683	0.32	0.0528	0.0015	0.2451	0.0067	0.0335	0.0003	320	63.0	223	5.5	212	2.0	5.90	744.3	
D675-08	9.06	786.2	232	0.48	0.0470	0.0024	0.2161	0.0107	0.0332	0.0004	50.1	115.0	199	9.0	211	2.5	9.06	786.2	
D675-18	55.40	640.2	1407	0.45	0.0534	0.0015	0.2522	0.0064	0.0340	0.0003	346	61.1	228	5.2	215	2.2	1.71	640.2	
D675-23	16.19	734.9	425	0.37	0.0530	0.0018	0.2455	0.0080	0.0334	0.0004	328	106.0	223	6.5	212	2.3	5.33	734.9	
D675-06	38.06	689.2	985	0.28	0.0542	0.0015	0.2573	0.0068	0.0344	0.0003	389	60.2	233	5.5	218	1.8	3.16	689.2	
D675-16	30.72	645.2	776	0.23	0.0534	0.0015	0.2826	0.0100	0.0378	0.0007	346	63.0	253	7.9	239	4.4	1.82	645.2	
D675-25	79.37	731.7	454	0.08	0.1015	0.0020	2.5175	0.1379	0.1734	0.0080	1654	37.0	1277	39.8	1031	44.0	5.15	731.7	
D675-19	27.44	786.9	615	0.35	0.0741	0.0021	0.3709	0.0108	0.0360	0.0004	1043	58.2	320	8.0	228	2.3	9.13	786.9	
D675-20	47.28	744.9	423	0.09	0.1304	0.0042	2.0534	0.1418	0.1023	0.0051	2103	51.1	1133	47.2	628	30.1	5.93	744.9	
D675-15	20.08	766.3	273	0.22	0.1096	0.0065	1.3013	0.1321	0.0668	0.0041	1792	108.0	846	58.3	417	24.8	7.42	766.3	
PM13/ZR 黑云母二长花岗岩																			
PM13/ZR-09	33.15	792.8	768	0.54	0.0511	0.0015	0.2531	0.0072	0.0361	0.0004	256	66.7	229	5.9	229	2.4	9.67	792.8	
PM13/ZR-14	24.97	709.9	640	0.30	0.0512	0.0016	0.2436	0.0080	0.0349	0.0004	250	74.1	221	6.5	221	2.4	4.03	709.9	
PM13/ZR-17	33.01	753.4	791	0.57	0.0505	0.0015	0.2407	0.0069	0.0347	0.0004	217	66.7	219	5.7	220	2.3	6.49	753.4	
PM13/ZR-18	47.62	710.2	1200	0.25	0.0501	0.0021	0.2437	0.0099	0.0352	0.0003	198	99.1	221	8.1	223	2.1	4.04	710.2	
PM13/ZR-20	30.56	761.3	731	0.47	0.0504	0.0015	0.2432	0.0072	0.0349	0.0004	213	68.5	221	5.9	221	2.5	7.05	761.3	
PM13/ZR-21	76.22	685.5	1975	0.15	0.0499	0.0010	0.2434	0.0052	0.0351	0.0003	191	48.1	221	4.2	223	1.8	3.03	685.5	
PM13/ZR-08	24.04	702.9	592	0.43	0.0497	0.0016	0.2424	0.0082	0.0354	0.0004	183	77.8	220	6.7	224	2.4	3.72	702.9	
PM13/ZR-15	38.15	742.8	973	0.30	0.0499	0.0014	0.2366	0.0067	0.0346	0.0003	191	64.8	216	5.5	219	2.1	5.80	742.8	
PM13/ZR-19	52.40	766.6	1158	0.72	0.0494	0.0014	0.2459	0.0071	0.0359	0.0003	165	68.5	223	5.8	228	2.2	7.44	766.6	
PM13/ZR-23	37.16	708.0	932	0.20	0.0497	0.0014	0.2411	0.0067	0.0351	0.0003	189	66.7	219	5.5	222	1.8	3.94	708.0	
PM13/ZR-02	52.72	616.0	1363	0.25	0.0490	0.0012	0.2380	0.0062	0.0352	0.0004	146	59.3	217	5.1	223	2.2	1.23	616.0	
PM13/ZR-11	17.18	808.6	405	0.59	0.0538	0.0021	0.2553	0.0099	0.0348	0.0003	361	91.7	231	8.0	221	2.1	11.25	808.6	
PM13/ZR-25	43.13	758.0	1044	0.46	0.0528	0.0016	0.2551	0.0082	0.0348	0.0004	317	65.7	231	6.6	221	2.3	6.82	758.0	
PM13/ZR-24	68.40	759.3	1429	0.84	0.0538	0.0015	0.2643	0.0066	0.0356	0.0004	361	65.7	238	5.3	225	2.3	6.90	759.3	
PM13/ZR-10	40.40	634.0	973	0.36	0.0550	0.0016	0.2701	0.0074	0.0360	0.0004	413	64.8	243	6.0	228	2.5	1.57	634.0	
PM13/ZR-13	22.65	745.5	558	0.30	0.0568	0.0021	0.2730	0.0097	0.0356	0.0005	483	47.2	245	7.8	225	3.0	5.97	745.5	

续表 2

测点号	Pb	Th	U	Th/U	同位素比值						年龄/Ma						Ti	T
	10 ⁻⁶				²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	/10 ⁻⁶	/°C
PM13/ZR-04	28.76	777.0	720	0.51	0.0494	0.0015	0.2295	0.0070	0.0337	0.0003	165	70.4	210	5.8	214	2.1	8.27	777.0
PM13/ZR-06	256.00	727.9	787	0.63	0.0959	0.0016	3.4074	0.0769	0.2565	0.0040	1546	31.5	1506	17.7	1472	20.6	4.93	727.9
PM13/ZR-12	67.68	781.2	365	0.29	0.0749	0.0020	1.6247	0.0419	0.1600	0.0017	1066	54.8	980	16.2	957	9.4	8.63	781.2
PM13/ZR-03	45.30	827.1	879	0.96	0.1507	0.0072	0.8650	0.0525	0.0392	0.0007	2353	81.0	633	28.6	248	4.3	13.36	827.1
D6082糜棱岩化花岗闪长岩																		
D6082-01	33.23	707.7	856	0.28	0.0517	0.0015	0.2423	0.0069	0.0331	0.0004	272	63.9	220	5.7	210	2.3	3.93	707.7
D6082-17	144.90	785.7	3701	0.22	0.0525	0.0011	0.2489	0.0057	0.0343	0.0004	309	54.6	226	4.7	217	2.3	9.02	785.7
D6082-02	39.78	866.5	952	0.40	0.0489	0.0014	0.2357	0.0065	0.0349	0.0004	143	66.7	215	5.4	221	2.4	18.90	866.5
D6082-03	18.55	777.5	439	0.44	0.0527	0.0018	0.2556	0.0084	0.0351	0.0004	322	75.9	231	6.8	222	2.4	8.32	777.5
D6082-04	29.18	743.2	764	0.15	0.0521	0.0016	0.2525	0.0086	0.0349	0.0006	300	72.2	229	7.0	221	3.5	5.83	743.2
D6082-05	28.36	745.7	716	0.29	0.0519	0.0017	0.2502	0.0083	0.0348	0.0004	280	71.3	227	6.7	221	2.7	5.99	745.7
D6082-06	39.50	772.1	937	0.58	0.0529	0.0016	0.2551	0.0082	0.0348	0.0005	324	68.5	231	6.6	220	2.9	7.88	772.1
D6082-07	17.73	806.0	414	0.50	0.0506	0.0021	0.2467	0.0093	0.0355	0.0004	233	96.3	224	7.6	225	2.5	10.98	806.0
D6082-09	44.09	693.3	1095	0.35	0.0504	0.0014	0.2445	0.0070	0.0351	0.0004	213	66.7	222	5.8	222	2.3	3.32	693.3
D6082-10	44.26	711.7	1058	0.47	0.0518	0.0012	0.2511	0.0060	0.0351	0.0004	276	53.7	227	4.9	222	2.2	4.12	711.7
D6082-11	38.78	730.6	960	0.37	0.0489	0.0015	0.2319	0.0068	0.0343	0.0003	146	70.4	212	5.6	217	2.1	5.09	730.6
D6082-15	53.90	791.3	1293	0.48	0.0507	0.0012	0.2401	0.0057	0.0344	0.0003	228	57.4	218	4.7	218	1.8	9.53	791.3
D6082-16	46.31	669.7	1085	0.40	0.0530	0.0013	0.2611	0.0067	0.0356	0.0003	332	57.4	236	5.4	226	2.2	2.50	669.7
D6082-18	25.29	780.3	574	0.61	0.0519	0.0016	0.2533	0.0084	0.0353	0.0004	280	72.2	229	6.8	223	2.7	8.55	780.3
D6082-19	49.99	666.9	1274	0.32	0.0509	0.0025	0.2438	0.0110	0.0350	0.0005	239	113.0	222	9.0	222	2.8	2.41	666.9
D6082-20	20.81	688.5	560	0.04	0.0510	0.0014	0.2456	0.0081	0.0349	0.0007	239	64.8	223	6.6	221	4.3	3.14	688.5
D6082-12	47.80	607.4	993	0.53	0.0511	0.0014	0.2788	0.0076	0.0395	0.0004	256	58.3	250	6.0	250	2.4	1.09	607.4
D6082-08	54.50	640.0	659	0.35	0.0584	0.0013	0.5767	0.0173	0.0714	0.0016	543	48.1	462	11.2	445	9.4	1.70	640.0
D6082-14	52.82	747.3	396	0.24	0.0741	0.0016	1.4245	0.0580	0.1378	0.0046	1043	43.7	899	24.3	832	26.0	6.09	747.3
D6082-13	48.80	682.9	204	0.96	0.0738	0.0018	1.8201	0.0458	0.1787	0.0017	1035	50.8	1053	16.5	1060	9.3	2.94	682.9

负 Eu 异常特征。微量元素原始地幔标准化蛛网图(图 4-b、d)显示,花岗闪长岩和黑云母二长花岗岩也具有明显的一致性,表现出相似的分布曲线,可能反映了同源岩浆的特点。总体上,Nb、Ta、Zr、Hf 等高场强元素相对亏损,Rb、K、Th、U 等元素明显富集,Ba、Sr 元素明显呈负异常,表明花岗岩岩浆部分熔融或结晶分异过程中有斜长石的分离。

3.2 锆石 U-Pb 年龄

本文选取具有代表性的样品对吉塘复式岩体中的黑云母二长花岗岩、花岗闪长岩和糜棱岩化黑云母二长花岗岩进行 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年。用于分析测试的锆石颗粒自形程度高,形态多为长柱状,少量为短柱状,长轴 150~300 μm,长宽比为 1.5:1~2.5:1。在阴极发光(CL)图像上,锆石颜色多数呈黑色或灰黑色,具有明显的生长环带,属于岩浆成因锆石。

3 件样品锆石 U-Pb 测年数据见表 2。PM13/ZR 样品锆石的 U 含量为 $365 \times 10^{-6} \sim 1975 \times 10^{-6}$, Pb 含量为 $17.18 \times 10^{-6} \sim 255.97 \times 10^{-6}$, Th 含量为 $107 \times 10^{-6} \sim 1244 \times 10^{-6}$, Th/U 值为 0.15~1.40; D675 样品锆石的 U 含量为 $166 \times 10^{-6} \sim 1407 \times 10^{-6}$, Pb 含量为 $6.57 \times 10^{-6} \sim 79.37 \times 10^{-6}$, Th 含量为 $38 \times 10^{-6} \sim 632 \times 10^{-6}$, Th/U 值为 0.08~0.55; D6082 样品锆石的 U 含量为 $160 \times 10^{-6} \sim 3701 \times 10^{-6}$, Pb 含量为 $17.73 \times 10^{-6} \sim 144.87 \times 10^{-6}$, Th 含量为 $20 \times 10^{-6} \sim 828 \times 10^{-6}$, Th/U 值为 0.12~0.96。3 件样品除个别锆石外, Th、U 含量及 Th/U 值均显示为岩浆成因锆石^[13]。按照 Hoskin^[14]提出的锆石类型投图方法显示,所选锆石为岩浆锆石。

本次对 PM13/ZR(黑云母二长花岗岩)样品的 24 颗锆石进行了 24 个测试点的 LA-ICP-MS 分析,分析结果见表 2。其中 2 个测点为继承锆石,分别与区域上吉塘岩群和西西岩群中的碎屑锆石年龄一

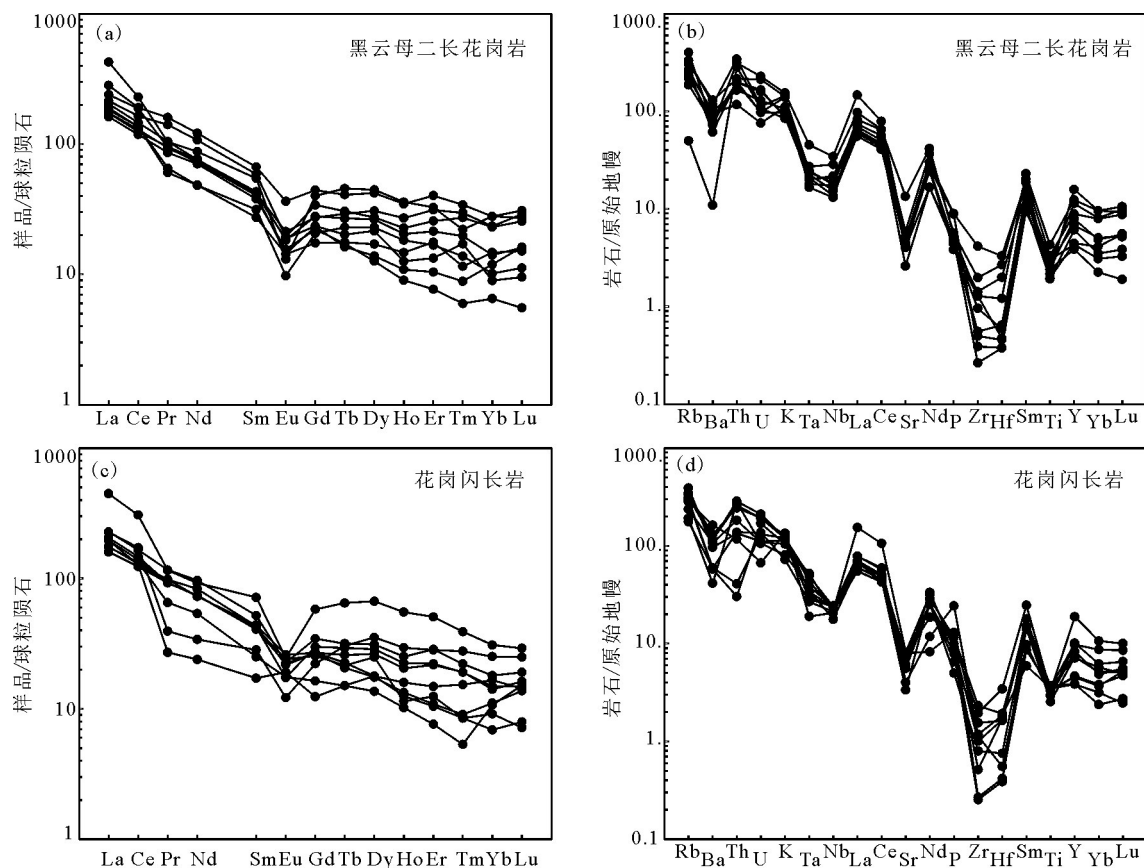


图4 吉塘复式花岗岩稀土元素球粒陨石标准化配分图(a、c)和微量元素原始地幔标准化蛛网图(b、d)
(标准化值据参考文献[12])

Fig. 4 Chondrite-normalized REE patterns (a, c) and primitive mantle-normalized trace element patterns (b, d) of the Jitang duplex granites

致;6个测点的普通Pb含量较高,置信度降低,故舍去;有16个测试点获得较一致的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄。 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄在219~229Ma之间(表2),在锆石U-Pb年龄谐和图(图5)中,数据点分布较集中,反映了良好的谐和性,可以代表样品的结晶成岩年龄。16个测点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值为 $222.8\pm 1.5\text{Ma}$ (MSWD=1.60, $n=16$),说明吉塘复式花岗岩中黑云母二长花岗岩的结晶年龄为 $222.8\pm 1.5\text{Ma}$,属晚三叠世。

D675(花岗闪长岩)样品共分析了25个年龄测试点(表2)。其中3个测点为继承锆石,分别与区域上吉塘岩群和西西岩群中的碎屑锆石年龄一致;2个测试点的普通Pb含量较高且为高值点,故舍去;有20个测试点获得较一致的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄在211~218Ma之间(表2),在锆石U-Pb年龄谐和图(图5)中,数据点分布较集中,反映了良好的

谐和性,可以代表样品的结晶年龄。20个测点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄值为 $213.6\pm 1.1\text{Ma}$ (MSWD=0.98, $n=20$),说明吉塘复式花岗岩中花岗闪长岩的结晶年龄为 $213.6\pm 1.1\text{Ma}$,属于晚三叠世。

D6082(糜棱岩化花岗闪长岩)样品共分析了20个年龄测试点(表2)。其中3个测点为继承锆石,分别为 $1060\pm 9.3\text{Ma}$ 、 $832\pm 26.0\text{Ma}$ 和 $445\pm 9.4\text{Ma}$,与区域上吉塘岩群和西西岩群中的碎屑锆石年龄一致;有15个测试点获得较一致的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄在217~226Ma之间(表2),在锆石U-Pb年龄谐和图(图5)中,数据点分布较集中,反映了良好的谐和性,可以代表样品的结晶年龄。15个测点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值为 $221.1\pm 1.5\text{Ma}$ (MSWD=1.30, $n=15$),说明吉塘复式花岗岩中糜棱岩化花岗闪长岩的结晶年龄为 $221.1\pm 1.5\text{Ma}$,属于晚三叠世。

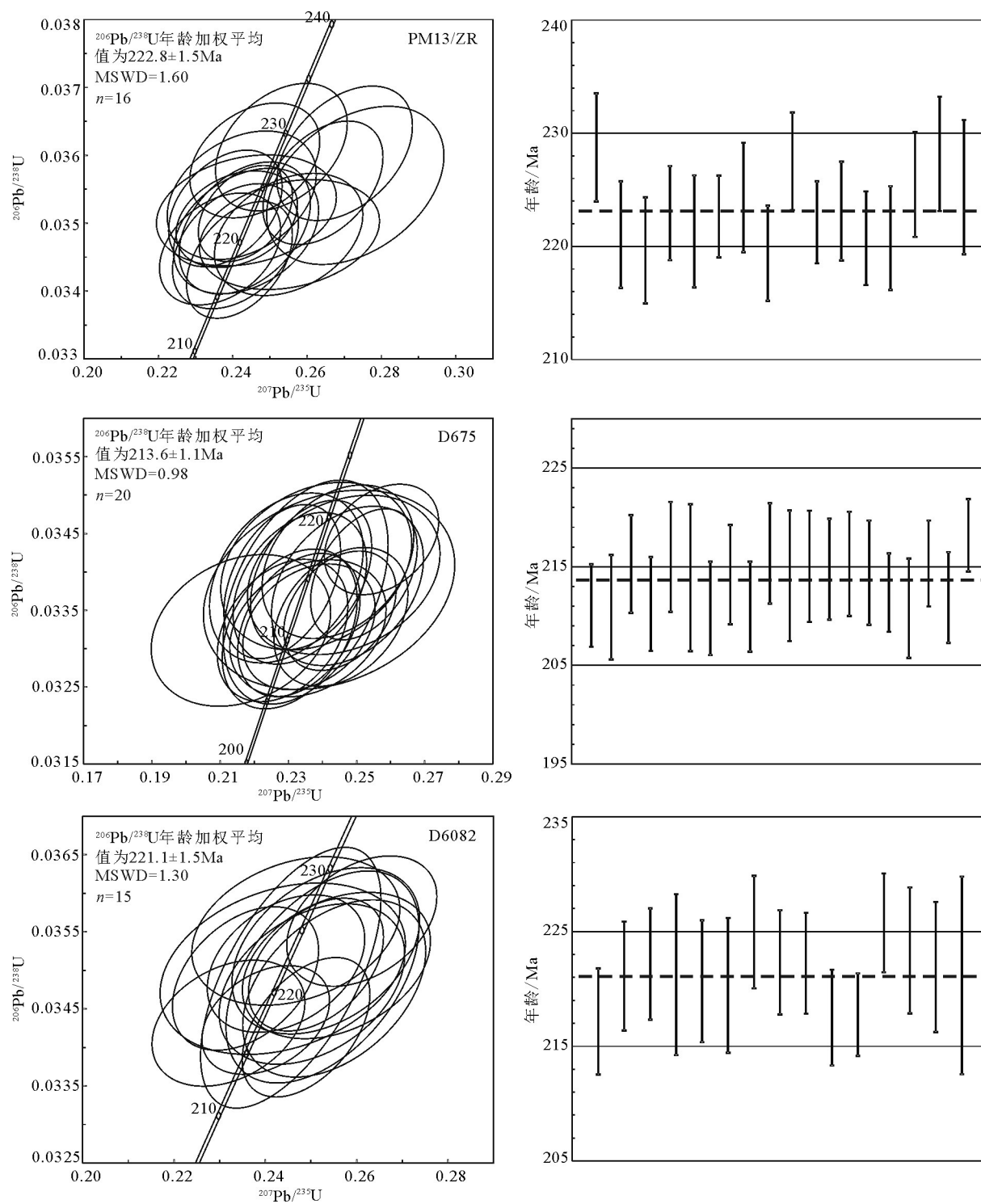


图5 吉塘复式花岗岩锆石U-Pb谐和图

Fig. 5 The zircon U-Pb concordia diagrams of the Jitang duplex granites

4 讨论

4.1 岩体形成时代

本文对吉塘复式花岗岩的3件样品进行了LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年。阴极发光图像显示锆石以自形晶为主,具有明显的生长环带,含有较高的 Th/U 值,可以代表所测样品的结晶年龄。锆石 U-Pb 测年结果显示,吉塘复式花岗岩形成于 $213.6 \pm 1.1 \sim 222.8 \pm 1.5$ Ma 之间,即形成于晚三叠世。结合前人对澜沧江北段相邻区域纽多岩体、东达山岩体、吉塘岩体的测年成果,如樊炳良等^[9]在纽多岩体中获得黑云母二长花岗岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 243.6 ± 1.4 Ma,陈福忠等^[8]使用全岩 Rb-Sr 等时线测年法分别在东达山岩体、吉塘复式岩体中获得 219.6 Ma 和 220 Ma 年龄值,澜沧江南部测年数据集中于 210 ~ 245 Ma 之间,发现澜沧江南北两侧具有较一致的岩浆结晶年龄,可能暗示其具有相近的大地构造演化过程。

4.2 岩体结晶温度

Watson 等^[15]提出利用锆石中 Ti 含量估算锆石结晶时的岩浆温度,认为可以近似代表岩浆的最高温度,其精度可达 10℃ 左右,称之为“锆石 Ti 温度计”。锆石 Ti 温度计的准确度受控于岩浆体系中 SiO₂ 和 TiO₂ 的活度,对于压力的变化并不灵敏^[16]。锆石的化学式为 ZrSiO₄,Ti 可以进入锆石替换 Si 形成独立变化相 ZrTiO₄ 和 TiZrO₄^[17],在一定的压力下具有如下的变化形式:

$$[\lg(\text{Ti-in-Zircon}) + \lg\alpha\text{SiO}_2 - \lg\alpha\text{TiO}_2] = A + B/T$$

Ferry 等^[16]计算出常数 A、B 的值,并确定其计算公式为:

$$\lg(\text{Ti-in-Zircon}) + \lg\alpha\text{SiO}_2 - \lg\alpha\text{TiO}_2 = (5.711 \pm 0.072) - (4800 \pm 86)/T(\text{K})$$

Ti 和 Si 发生置换反应会导致晶体体积的变化,进而引起温度的变化,导致对锆石 Ti 温度计也有影响。Ferry 等^[16]认为,在中下地壳以上范围(压力小于 1000 MPa)内形成锆石时对其影响不大,可以忽略不计。本次研究测试样品为黑云母二长花岗岩和花岗闪长岩,均可明显见到石英存在,故取 $\alpha\text{SiO}_2 \approx 1$,典型的硅酸盐熔体中 αTiO_2 活度一般为 0.6,整理上述公式得出:

$$T(^{\circ}\text{C}) = \{ (4800 \pm 86) / [(5.711 \pm 0.072) - \lg(\text{Ti-in-Zircon}) - \lg\alpha\text{SiO}_2 \lg\alpha\text{TiO}_2] \} - 273$$

吉塘复式花岗岩中黑云母二长花岗岩、花岗闪长岩和糜棱岩化花岗闪长岩均出现继承锆石,说明岩浆处于锆饱和状态,岩浆温度开始降低时就伴随着锆石的结晶,因此由上述公式计算出的温度可以代表岩浆的最高温度。吉塘复式花岗岩中黑云母二长花岗岩、花岗闪长岩和糜棱岩化花岗闪长岩的锆石 Ti 温度计计算结果见表 2。黑云母二长花岗岩中 16 颗锆石结晶温度在 616.0 ~ 808.6℃ 之间,平均温度为 742.9℃;花岗闪长岩中 20 颗锆石结晶温度在 640.2 ~ 881.1℃ 之间,平均温度为 755℃;糜棱岩化花岗闪长岩中 15 颗锆石结晶温度在 666.9 ~ 866.5℃ 之间,平均温度为 748.6℃。三者平均温度相差不大,可忽略不计,表明 2 类岩石具有相同或相近的熔融机制。

4.3 岩石成因及源区

吉塘复式花岗岩中黑云母二长花岗岩和花岗闪长岩的铝饱和指数较高,分别为 1.06 ~ 1.55 和 1.03 ~ 1.71,总体大于 1.05;Na₂O/K₂O 值较低,平均值分别为 0.77 和 0.92,Rb/Sr 值较高,平均值分别为 1.71 和 1.48,CaO 平均含量分别为 1.39% 和 2.09%,均小于 3.7%;CIPW 标准矿物含刚玉,平均值分别为 3.14% 和 3.04%,均大于 1%;根据 20 件样品主量和微量元素数据分析,均具有 S 型花岗岩的特征。在 A-C-F 判别图(图 6)中,20 件样品投影点均落入 S 型花岗岩区域。因此,吉塘复式花岗岩为过铝质高钾钙碱性 S 型花岗岩。

花岗岩中的部分微量元素在不同的矿物中含量存在较大的差异,Rb、Sr、Ba 等微量元素多赋存于花岗岩类岩石的黑云母和长石中,因此,可以采用 Rb-Sr-Ba 系统判别岩石的源区成分^[19]。在 Al₂O₃/TiO₂-CaO/Na₂O 图解(图 7-a)中,吉塘复式花岗岩体中黑云母二长花岗岩和花岗闪长岩样品投点绝大多数落入变质杂砂岩熔融区;在 Rb/Sr-Rb/Ba 图解(图 7-b)中,吉塘复式花岗岩中黑云母二长花岗岩和花岗闪长岩样品投点均落入杂砂岩熔融区域,均暗示吉塘复式花岗岩的源岩可能变质杂砂岩。吉塘复式岩体中黑云母二长花岗岩和花岗闪长岩均强烈亏损 Sr、Eu 等元素,亏损 Ba 元素,指示岩体中斜长石、钾长石为熔融残留相矿物。此外,黑云母二长花岗岩和花岗闪长岩的 Rb/Sr 值分别为 1.29 ~ 3.04 (平均 1.88) 和 0.75 ~ 3.00 (平均 1.48),Rb/Ba 值分别为 0.21 ~ 0.50 (平均 0.30) 和 0.16 ~ 0.45

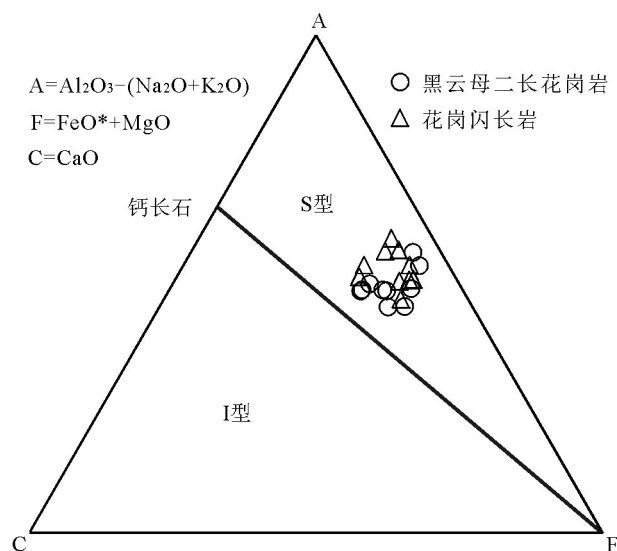


图6 吉塘复式花岗岩 ACF 成因类型判别图
(底图据参考文献[18])

Fig. 6 Plots of the Jitang duplex granites in ACF diagram for division of I- and S-type granites

(平均 0.31), 指示吉塘复式岩体的源区为富斜长石的变质杂砂岩成分。

Sylvester^[19]认为, 源区岩石的部分熔融与 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 值关系密切, 认为 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2 > 100$ 时源区部分重熔温度小于 875°C ; 当岩石中 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2 < 100$ 时, 源区部分重熔温度大于 875°C ; 且存在两者比值与温度呈负相关的特征。吉塘复式花岗岩中黑云母二长花岗岩和花岗闪长岩的 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 值分别为 $14.39 \sim 31.63$ 和 $16.97 \sim 25.83$, 均小于 100, 说明源区

部分重熔的温度应大于 875°C , 这与吉塘复式花岗岩中不同岩石类型的锆石结晶温度介于 $616.0 \sim 881.1^\circ\text{C}$ 之间的结论吻合(表 2)。在推覆作用下, 地壳加厚均衡后的最高温度仅为 750°C 左右^[17,20], 因此仅靠地壳加厚增温无法使源岩重熔, 还需其他深部异常热流的作用才能发生部分重熔。结合区域构造演化过程, 认为吉塘复式花岗岩的形成与碰撞造山导致地壳加厚增温有关, 也与岩石圈剪切、伸展期有关的深熔作用相关。

4.4 构造意义

吉塘复式花岗岩中黑云母二长花岗岩和花岗闪长岩的岩石地球化学特征显示, 吉塘复式花岗岩的形成与碰撞造山导致地壳加厚增温及与岩石圈剪切、伸展期有关的深熔作用有关, 而与北澜沧江结合带的俯冲碰撞关系不大。在 $(\text{Y}+\text{Nb})-\text{Rb}$ 图解(图 8-a)和 $\text{Hf}-3\text{Ta}-\text{Rb}/30$ 图解(图 8-b)中, 黑云母二长花岗岩和花岗闪长岩样品投影点落入碰撞后—同碰撞或板内花岗岩环境, 可能与元古宇吉塘岩群片麻岩有关^[21]。England 等^[20]认为, 地壳俯冲碰撞至地壳加厚直至部分熔融的演化过程持续时间较长, 可以推测北澜沧江洋的闭合时间应早于 $211 \sim 229\text{Ma}$ 。本文在吉塘复式花岗岩中获得的岩浆结晶年龄和岩石地球化学特征与临沧花岗岩特征基本一致, 推测具有相近的大地构造演化过程, 即存在统一的构造岩浆活动模式。王保弟等^[4]明确指出, 存在龙木错—双湖—澜沧江碰撞结合带, 并以吉塘岩群中变质花岗岩为依据, 获得 $246.3 \pm 0.8\text{Ma}$ 的年龄, 认为是北澜沧江结合带碰撞造山的产物, 且在

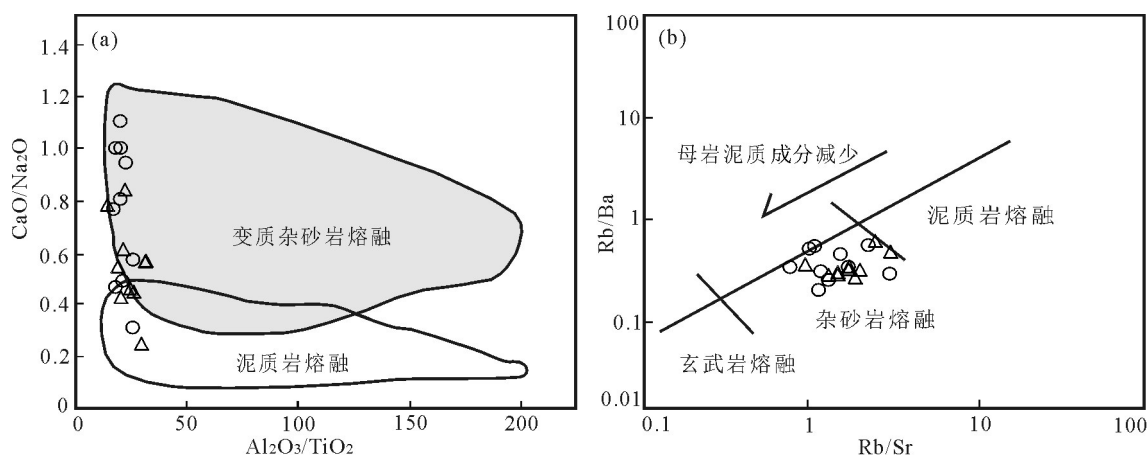


图7 吉塘复式花岗岩 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2-\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$ (a)和 $\text{Rb}/\text{Sr}-\text{Rb}/\text{Ba}$ (b)图解(底图据参考文献[19])

Fig. 7 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2-\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$ (a) and $\text{Rb}/\text{Sr}-\text{Rb}/\text{Ba}$ (b) diagrams of the Jitang duplex granites

246Ma之前该带已经进入陆-陆碰撞阶段。陶琰等^[7]在研究吉塘花岗岩的基础上提出澜沧江洋的闭合时间早于220Ma,可能为280Ma左右;祁生胜等^[6]在吉塘岩群石榴子石白云母石英片岩中获得白云母 Ar-Ar 年龄为 251.5 ± 2.6 Ma;笔者在吉塘岩群糜棱岩化片麻岩中获得一组 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄介于 252~273Ma 之间(另文专述),认为与区域构造岩浆-变质变形事件有关。因此,笔者认为,北澜沧江洋的闭合时间可能在 273Ma 左右。此外,吉塘复式花岗岩侵位于吉塘岩群中,在吉塘岩群与吉塘复式花岗岩的接触部分发育大量的混染现象,指示吉塘复式花岗岩的源岩可能为吉塘岩群,且暗示其侵位深度较深。

5 结 论

(1)吉塘复式花岗岩属于过铝质 S 型花岗岩,与临沧花岗岩、纽多花岗岩具有一致的岩石地球化学特征,为澜沧江花岗岩带的重要组成部分,具有统一的构造岩浆活动模式。吉塘复式花岗岩的源岩为变质杂砂岩,指示其源岩可能为吉塘岩群。

(2)吉塘复式花岗岩的形成年龄介于 $213.6 \pm 1.1 \sim 222.8 \pm 1.5$ Ma 之间,为晚三叠世,与临沧花岗岩的主体形成时代一致,暗示具有统一的大地构造演化过程。

(3)吉塘复式花岗岩的成因与碰撞造山导致的地壳加厚增温及与岩石圈剪切、伸展期有关的深熔作用有关,澜沧江洋的闭合时间可能为 273Ma 左右。

参考文献

- [1]李才. 龙木错-双湖-澜沧江板块缝合带与石炭二叠纪冈瓦纳北界[J]. 长春地质学院学报, 1987, (2):155-166.
- [2]邓万明,郑锡澜,松本征夫. 青海可可西里地区新生代火山岩的岩石特征与时代[J]. 岩石矿物学杂志, 1996, (4):2-11.
- [3]Kapp P, Murphy M A, Yin A. Mesozoic and Cenozoic tectonic evolution of the Shiquanhe area of western Tibet[J]. Tectonics, 2003, 22(4):1029.
- [4]王保弟,王立全,强巴扎西,等. 早三叠世北澜沧江结合带碰撞作用:类乌齐花岗质片麻岩年代学、地球化学及 Hf 同位素证据[J]. 岩石学报, 2011, 27(9):2752-2762.
- [5]和钟铎,王天武,李才,等. 对藏北羌塘地体阿木岗群的新认识[J]. 世界地质, 2000, (1):1-7.
- [6]祁生胜,王毅智,何世豪,等. 唐古拉地区尕羊晚二叠世碰撞型花岗岩的确定和构造意义[J]. 西北地质, 2009, 42(3):26-35.
- [7]陶琰,毕献武,李金高,等. 西藏吉塘花岗岩地球化学特征及成因[J]. 岩石学报, 2011, 27(9):2763-2774.
- [8]陈福忠,刘朝基,雍永源. 藏东花岗岩类及铜锡金成矿作用[M]. 北京:地质出版社, 1994:1-197.
- [9]樊炳良,白涛,冯德新,等. 藏东组多黑云母二长花岗岩锆石 U-Pb 年龄及成因[J]. 地质通报, 2018, 37(7):1226-1235.
- [10]Liu Y S, Hu Z C, Gao S, et al. In situ analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard[J]. Chemical Geology, 2008, 257: 34-43.
- [11]Liu Y S, Gao S, Hu Z C, et al. Continental and oceanic crust recycling-induced melt-peridotite interactions in the Trans-North China Orogen: U-Pb dating, Hf isotopes and trace elements in zircons of mantle xenoliths[J]. Journal of Petrology, 2010, 51:537-571.
- [12]Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics in ocean basalt: Implication for mantle composition and processes[C]//Saunders A D, Norry M J. Magmatism in the Ocean Basins. Geological Society of London Special Publications, 1989, 42:313-345.
- [13]吴元保,郑永飞. 锆石成因矿物学研究及其对 U-Pb 年龄解释的制约[J]. 科学通报, 2007, 8(16):1589-1604.
- [14]Hoskin P W O. Trace-element composition of hydrothermal zircon and the alteration of Hadean zircon from the Jack Hills[J]. Australia. Geochim. Cosmochim. Acta, 2005, 69(3):637-648.
- [15]Watson E B, Harrison T M. Zircon thermometer reveals minimum melting conditions on earliest Earth[J]. Science, 2005, 308(5723): 841-844.
- [16]Ferry J M, Waston E B. New thermodynamic models and revised calibrations for the Ti-in-rutile thermometers Contrib[J]. Mineral. Petrol., 2007, 154(4):429-437.
- [17]Harrison T M, Watson E B, Aikman A B. Temperature spectra of zircon crystallization in plutonic rocks[J]. Geology, 2007, 35(7): 635-638.
- [18]Chappell B, White A J R. I- and S-type granites in the Lachlan Fold Belt. Transactions of the Royal Society of Edinburgh[J]. Earth Sciences, 1992, 83:1-26.
- [19]Sylvester P J. Post-collisional alkaline granites[J]. Journal of Geology, 1998, 97(3): 261-280.
- [20]England P C, Thompson A B. Pressure-temperature-time paths of regional metamorphism, Part I: Heat transfer during the evolution of regions of thickened continental crust[J]. Petrology, 1984, 25: 894-928.
- [21]蒋光武,谢尧武,白珍平,等. 青藏高原班公湖-怒江缝合带丁青-碧土段大地构造演化[J]. 地质通报, 2009, 28(9):1259-1266.