# 羌塘中部白措花岗岩岩石地球化学特征、锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素组成及其构造意义

李学仁<sup>1,2)</sup>.万友利<sup>1,2)</sup>.王剑<sup>3)</sup>

1) 中国地质调查局成都地质调查中心,成都,610081;

2) 自然资源部沉积盆地与油气资源重点实验室,成都,610081;

3) 西南石油大学羌塘盆地研究院,成都,610500

内容提要:本文对羌塘中部白措花岗岩的研究表明,岩体是由花岗闪长岩和二长花岗岩同时侵位的复合岩基, 锆石 U-Pb 年龄分别为 213.8±1.3 Ma、210.0±1.1 Ma 和 208.1±1.4 Ma。白措花岗岩为硅过饱和的准铝质—弱过铝 质岩石,Eu 负异常明显,富集大离子亲石元素,亏损高场强元素,显示典型的壳源特征。*e*<sub>H</sub>(*t*)为负值,主要集中于 -10 ~-15,对应的 Hf 同位素二阶段模式年龄峰值为 1.78 Ga,显示源区为古元古代古老地壳;同时,花岗岩中含有大 量闪长质暗色包体,表明有壳幔岩浆混合作用,推测为同时期玄武质岩浆的底侵作用,在地壳深部诱发富硅质基底 岩石重熔,快速喷发形成玄武岩—流纹岩双峰式组合,而花岗岩则是由玄武质岩浆在地壳充分熔融后,岩浆沿羌塘 中部已有的构造破碎带侵入形成,并且在熔融过程中有镁铁质岩浆注入少量结晶的长英质岩浆中形成暗色包体。 因此,花岗岩与双峰式火山岩是同一裂陷动力机制的产物。花岗岩的侵入预示了晚三叠世羌塘盆地构造岩浆活动 的结束,之上开始了羌塘侏罗纪海相盆地的沉积。

关键词:锆石 U-Pb 年龄;地球化学;Hf 同位素;花岗岩;羌塘

羌塘中部西段分布的酸性侵入岩复合岩基,以 其侵位的时代节点、局限的分布空间以及与沉积地 层的复杂穿插关系,往往被认为与龙木措---双湖缝 合带的演化密切相关(Zhang Kaijun et al., 2011; Zhai Qingguo et al., 2013)。近年来, 随着对羌塘盆 地晚三叠世——早侏罗世的构造转换研究的深入,尤 其是对该时期所涉及的变质岩带、火山作用及沉积 响应,以及东特提斯构造演化的综合研究后,发现该 时期的岩浆侵入作用可能与羌塘盆地晚三叠世构造 转换的整体演化相关,而非单纯受龙木措—双湖缝 合带的影响(Fu Xiugen et al., 2010, 2016; 王剑等, 2018; Wang Zhongwei et al., 2019)。羌塘中部西段 的龙木措---双湖缝合带之上,分布有蛇绿岩、超高 压--高压变质岩、低级变质沉积岩和酸性侵入岩,是 一条较为典型的构造混杂岩带(Kapp et al., 2000; Zhang Kaijun et al., 2006;李才, 2008; Zhai Qingguo et al., 2011, 2013; 李才等, 2016)。关于该构造混杂 岩带的性质、演化以及其在羌塘中生代构造演化中 所处的位置,一直都备受争议。由于对该时期构造

属性认识的不同,造成对酸性侵入岩的成因亦各不 相同。早期认为羌塘中部酸性侵入岩是金沙江洋向 南俯冲在羌塘中部局部形成的构造混杂岩的侵位产 物(Kaap et al., 2003; Pullen et al., 2008), 持缝合带 观点的学者认为其是南北羌塘碰撞及俯冲过程中的 产物,又存在侵位于南、北羌塘甚至与班公湖—怒江 缝合带相关联等认识,整体倾向于后碰撞阶段伸展 构造背景下形成的观点(Zhai Qingguo et al., 2013; 张修政等, 2014; Li Guangming et al., 2015; Peng Touping et al., 2015)。基于沉积与大地构造学,从 羌塘盆地演化的观点认为羌塘在晚三叠世之前已经 与北部欧亚大陆拼合,一次小型的地幔岩浆热柱首 先使羌塘盆地南侧的班公湖—怒江一带地壳破裂, 产生裂谷作用,并迅速扩张成为洋盆,羌塘盆地受其 牵引拉张作用爆发了类大陆裂谷的双峰式火山作 用,羌塘中部的酸性侵入岩可能受此次构造岩浆活 动产生(王剑等,2004,2009,2018;付修根等,2015; 谭富文等,2016)。

本文在综合区域内时空演化格架以及大量相关

注:本文为国家自然科学基金资助项目(编号:41902138)的成果。

收稿日期:2020-07-09;改回日期:2020-08-21;责任编辑:黄道袤。Doi:10.16509/j.georeview.2020.05.007

作者简介:李学仁,男,1986 生,工程师,主要从事沉积大地构造学研究; Email: xueren. li@ foxmail. com。

地质事实基础上,以白措花岗岩为研究对象,运用岩 相学、岩石地球化学、锆石年代学及 Hf 同位素等手 段,重点对其源区特征、岩浆演化及其成因构造背景 进行深入分析。

# 1 地质背景及样品描述

### 1.1 地质背景

青藏高原是新生代印度板块与欧亚板块碰撞的 产物,其由一系列近东西向的构造地块拼贴而成 (图 1a)。羌塘地块北部与金沙江—可可西里缝合 带相接,南部与班公湖—怒江缝合带相邻,中部被中 央隆起带分隔,总体上具有两坳—隆的构造格局,即 北羌塘坳陷、中央隆起带和南羌塘坳陷(冯兴雷等, 2018;李忠雄等,2019)。中央隆起带西段,双湖以西 又被称为龙木措—双湖缝合带,是研究古特提斯洋 俯冲消减和南北羌塘陆陆碰撞造山过程的关键地 区。龙木措—双湖缝合带是一条构造混杂岩带,包 括蓝片岩、榴辉岩、蛇绿混杂岩、基性岩墙和遭受低 级变质作用改造的碎屑岩—碳酸盐岩沉积建造。花 岗岩岩体主要沿该缝合带侵位,向西断断续续分布, 集中出露于双湖以西的嘎措和白措,绒玛附近的冈 塘错,以及蜈蚣山、戈木日、香桃湖等地,呈岩株状或 岩基状产出(图 1b)。

## 1.2 岩体特征及样品采集

双湖地区的花岗岩主要集中分布于白措—嘎措 一带,本文研究区位于白措,岩体长约15~30 km,呈 近东西向展布,由大小不等的岩株构成一个较大的 复合岩基。岩体岩性主要以深侵位的花岗闪长岩和 二长花岗岩为主体,二者在空间分布上密切伴生,二 者应属大致同时上侵、定位的岩浆冷凝而成,总分布 面积约450 km<sup>2</sup>。花岗岩具斑状—似斑状结构,斑 晶主要为石英和长石(图2a和2b),其中石英斑晶 粒度1~5 mm 左右,呈他形晶,局部可见熔蚀港湾, 长石斑晶发生绢云母蚀变,较难识别斑晶形态;岩石 新鲜面为灰白色,暗色矿物主要为黑云母、角闪石, 已发生绿泥石化。矿物成分主要为石英(20%~



图 1 羌塘中部花岗岩分布简图(图据张修政等,2014;数据见胡培远等,2010;张修政等 2014;

李静超等,2014;Li Guangming et al., 2015;Peng Touping et al., 2015)

Fig. 1 The simplified distribution map of granites in central Qiangtang (modified after Zhang Xiuzheng et al., 2014&; Data from Hu Peiyuan et al., 2010&; Zhang Xiuzheng et al., 2014&; Li Jingchao et al., 2014&; Li Guangming et al., 2015; Peng Touping et al., 2015)



图 2 羌塘中部白措花岗岩及其中暗色包体镜下、和野外露头特征 Fig. 2 Photomicrographs and field outcrop of Baicuo granites and its dark enclaves in central Qiangtang

25%)、长石(40%~60%)、黑云母和角闪石(5%~ 10%)及少量磷灰石和金属矿物(<5%)。局部岩体 粒度较粗,可见巨大石英斑晶,已由斑状向似斑状过 渡,表明靠近岩体的中心相,再加上岩体侵位于中央 隆起带上,说明其后期剥蚀程度很深。岩体中偶见 暗色包体,暗色包体呈圆球状(图 2c),大小1 cm 左 右,经鉴定为淬冷包体,区域上同时期酸性岩体中亦 有淬冷包体分布(Li Guangming et al., 2015),本文 不做赘述。

本文对岩基进行纵向追索,在白措北部三角坪 见到两处人工挖掘露头(图 2d),得以采集到新鲜样 品。在野外详细观察和室内薄片鉴定的基础上采集 6件花岗岩样品用于主微量元素测试,又分别采集 花岗岩 16R2-2(33°20',87°44')、16R2-3(33°22', 87°43')和花岗闪长岩 16R2-4(33°21',87°41')三件 样品用于 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年和原位 Lu-Hf 同位素测试。

# 2 分析方法

#### 2.1 锆石 U-Pb 年龄测试

样品破碎和锆石挑选在河北省廊坊区域地质调 查研究院地质实验室采用常规浮选和电磁选方法完 成,然后在双目镜下仔细挑选不同晶形锆石制靶,并 对其进行打磨和抛光。在北京锆年领航科技有限公 司进行阴极发光(CL)照像。LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年分析在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产 资源国家重点实验室完成,采用 Agilent 7900 型 ICP-MS 仪器与装配有 193 nm 气体激光的 GeoLas 2005 激光剥蚀系统联机进行,激光束斑直径 32 μm。U-Pb 同位素定年中采用锆石标准 91500 作外 标进行同位素分馏校正,每分析 8 个样品点,分析 2 次 91500,GJ-1 锆石标样作为盲样来监控测试过程 的稳定性,NIST610 作为外标计算锆石样品的 Pb、 U、Th 含量,保证了测试过程的精确可靠(Liu Yongsheng et al., 2008)。采用 ICPMSDataCal 软件 对数据进行处理,年龄谐和图绘制采用 Isoplot 3.75 程序(Ludwig, 2012)。

#### 2.2 锆石 Hf 同位素测试

锆石原位 Hf 同位素分析同样在中国地质大学 (武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室完成。 采用 LA-MC-ICP-MS 系统对通过锆石 U-Pb 定年分 析的同一测点位置或相近位置进行 Hf 同位素测试。 测试时激光束斑为 44 μm,激光脉冲频率为 8 HZ。 仪器分析条件和数据获取方法见 Liu Yongsheng 等 (2010)。实验获得的数据采用 ICPMSDataCal 软件 进行处理。

#### 2.3 主微量元素测试

样品主量元素分析在自然资源部沉积重点实验 室采用 XRF(RigakuRIX 2100 型)玻璃熔饼法完成, 分析的相对误差优于 4%。微量元素分析在核工业 北京地质研究院分析测试研究中心采用酸溶法利用 Agi-lent 7500a 型 ICP-MS 完成,分析的相对误差一 般优于 5%。测试结果见表 1。

# 3 分析结果

#### 3.1 锆石 U-Pb 年龄

3件花岗岩样品所测锆石均为无色透明,锆石 颗粒晶型呈棱柱状,完全自形,粒径100~300 μm, 长宽比1.5:1~3:1。在 CL 图像上,显示锆石具 有明显的岩浆震荡环带和生长韵律(图 3),为典型 的岩浆锆石。

样品 16R2-2 锆石的 Th 和 U 含量分别为 390× 10<sup>-6</sup>~1918×10<sup>-6</sup>和 721×10<sup>-6</sup>~2476×10<sup>-6</sup>, Th/U 值 为 0.48~0.87(表 2),均大于 0.4,表明为岩浆成因 的锆石。测试选点都位于环带清晰部位,且避开了 可见的裂隙和包体,对 18颗锆石共测试 18个点位, 18个谐和年龄得出一个<sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U 加权平均值 213.8±1.3 Ma(MSWD=1.30)(图 3b)。

样品 16R2-3 锆石的 Th 和 U 含量分别为 368× 10<sup>-6</sup>~2276×10<sup>-6</sup> 和 1061×10<sup>-6</sup>~2762×10<sup>-6</sup>, Th/U 值 为 0. 30~0. 90(表 2), 均大于 0. 3。对 19 颗锆石共 测试 19 个点位, 19 个谐和年龄得出一个<sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U 加权平均值 210. 0±1. 1 Ma(MSWD=4. 90)(图 3d)。

样品 16R2-4 锆石的 Th 和 U 含量分别为 354× 10<sup>-6</sup>~1538×10<sup>-6</sup>和 777×10<sup>-6</sup>~2365×10<sup>-6</sup>, Th/U 值 为 0.44~1.07(表 2),均大于 0.4,表明为岩浆成因的锆石。对 22 颗锆石共测试 22 个点位, 22 个谐和 年龄得出一个<sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U 加权平均值 208.1±1.4 Ma

#### 表 1 羌塘盆地白措花岗岩主量元素(%)、微量元素 (×10<sup>-6</sup>)和稀土元素(×10<sup>-6</sup>)分析结果

1175

Table 1 Major elements (%), trace elements ( $\times 10^{-6}$ ) and rear earth elements ( $\times 10^{-6}$ ) composition of Baicuo granites in the Oiangtang Baicuo area

ьп	16R2	16R2	16R2	16R2	16R2	16R2
点亏	-H3	-H4	-H5	-H6	-H7	-H8
SiO	78, 81	76, 90	67.94	67.42	70.42	71, 18
TiO <sub>2</sub>	0.31	0.33	0.68	0.68	0.69	0.69
Al <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	10.48	11.58	13.44	13.44	13.88	14.13
$Fe_2O_3$	0.41	0.49	0.68	0.79	0.44	0.48
FeO	1.88	1.96	3.51	3.48	0.68	0.43
MnO	0.03	0.03	0.09	0.09	0.02	0.01
MgO	1.42	1.41	2.22	2.31	2.12	1.66
CaO	0.65	0.69	1.98	2.05	4.51	3.74
Na <sub>2</sub> O	3.12	4.15	3.64	3.57	4.68	4.98
$K_2O$	1.32	0.81	3.10	3.34	0.82	0.85
$P_{2}O_{5}$	0.06	0.06	0.12	0.12	0.13	0.15
烧失量	1.46	1.47	2.41	2.50	1.44	1.54
A/CNK	1.36	1.30	1.04	1.02	0.83	0.89
A/NK	1.60	1.50	1.44	1.42	1.62	1.55
Ba	202.00	94.00	416.00	475.00	133.00	160.00
Hf	2.65	3.32	5.27	5.65	4.48	4.65
Та	0.41	0.48	0.92	1.02	0.90	1.10
U	1.72	1.92	4.14	4.49	2.02	2.26
Rb	47.20	31.60	88.40	101.00	22.90	32.40
$\mathbf{Sr}$	123.00	122.00	128.00	130.00	306.00	300.00
Zr	105.00	121.00	180.00	172.00	168.00	173.00
Nb	5.62	5.35	10.80	11.60	11.00	11.80
Y	9.70	11.40	21.80	24.70	21.40	25.40
Ga	9.66	12.00	15.80	17.00	16.20	16.30
La	13	18.3	29.9	32.4	30.2	61.1
Ce	29.5	44.2	58.6	63.9	62.5	111
$\mathbf{Pr}$	2.98	4.16	6.73	7.39	7.38	11.5
Nd	10.8	14.4	24.7	27.2	26.8	38.7
Sm	2.07	2.7	4.62	5.28	5.14	6.4
Eu	0.5	0.55	1.15	1.27	1.14	1.32
$\operatorname{Gd}$	2.01	2.53	4.58	5.04	4.82	6.11
Tb	0.34	0.42	0.77	0.86	0.81	0.94
Dy	1.83	2.23	4.03	4.43	4.06	4.69
Ho	0.36	0.45	0.81	0.89	0.8	0.91
Er	1.12	1.34	2.32	2.59	2.27	2.66
Tm	0.19	0.22	0.39	0.43	0.36	0.43
Yb	1.18	1.50	2.39	2.68	2.30	2.67
Lu	0.20	0.24	0.39	0.43	0.36	0.40
Σree	66.08	93.24	141.38	154.79	148.94	248.83
LREE	58.85	84.31	125.70	137.44	133.16	230.02
HREE	7.23	8.93	15.68	17.35	15.78	18.81
δEu	0.74	0.63	0.76	0.74	0.69	0.64

 $(MSWD=2.10)(\boxtimes 3f)_{\circ}$ 

#### 3.2 锆石 Hf 同位素

本文对 3 个花岗岩样品分别进行了 10 个点位

表 2 西藏羌塘中部白措花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素分析结果

Table 2 LA-ICP-MS Zircon U-Pb analytic data for variety rocks in Baicuo granites in the central Qiangtang Block, Xizang(Tibet)

	元素	5含量(×1(	0_6)				同位素	素比值					同位素年	龄(Ma)			
测点号	DF,	Ē	Ē	Th/U	$n(^{207}{ m Pb})_{\prime}$	$/n(^{206}{\rm Pb})$	$n(^{207}{\rm Pb}).$	$/n(^{235}U)$	$n(^{206} Pb).$	$/n(^{238}U)$	$n(^{207}\mathrm{Pb})/$	$n(^{206}\mathrm{Pb})$	$n(^{207}{ m Pb})/$	'n( <sup>235</sup> U)	$n(^{206}\mathrm{Pb})/$	$n(^{238}U)$	谐和度
	67	II	5		测值	lσ	测值	lσ	测值	lσ	测值	10	测值	lσ	测值	lσ	(%)
							花図	闪长岩(样品	1 등 16R2-4)	-				_			
1	131	803	1553	0.52	0.0511	0.0018	0. 2330	0.0084	0.0328	0.0003	256	81.5	213	6.9	208	1.9	76
7	194	1305	1471	0.89	0.0499	0.0021	0. 2222	0.0088	0.0324	0.0003	191	93.5	204	7.3	205	2.0	66
б	120	736	1067	0.69	0.0487	0.0022	0.2190	0.0092	0.0329	0.0003	132	99.1	201	7.7	208	2.2	96
4	90	531	1037	0.51	0.0514	0.0024	0. 2346	0.0109	0.0332	0.0004	261	109	214	9.0	210	2.6	98
S	78	466	975	0.48	0.0530	0.0024	0. 2368	0.0103	0.0328	0.0004	328	106	216	8.5	208	2.4	96
9	122	723	1201	0.60	0.0533	0.0023	0. 2393	0.0099	0.0327	0.0004	343	96.3	218	8.1	207	2.3	95
7	208	1320	2365	0.56	0.0514	0.0016	0. 2266	0.0068	0.0319	0.0003	257	68.5	207	5.6	203	1.6	97
8	62	354	LLL	0.46	0.0522	0.0027	0.2402	0.0121	0.0334	0.0004	300	117	219	9.9	211	2.6	96
6	121	730	1274	0.57	0.0504	0.0020	0. 2265	0.0088	0.0326	0.0003	217	92.6	207	7.2	207	2.2	66
10	101	520	931	0.56	0.0638	0.0030	0. 2921	0.0138	0.0332	0.0004	744	100	260	10.8	211	2.5	66
11	233	1538	1440	1.07	0.0576	0.0026	0.2606	0.0113	0.0329	0.0003	522	98	235	9.1	209	2.2	98
12	82	482	912	0.53	0.0511	0.0021	0.2313	0.0093	0.0328	0.0004	256	94.4	211	7.7	208	2.4	98
13	75	444	904	0.49	0.0498	0.0023	0.2179	0.0102	0.0319	0.0003	187	109	200	8.5	202	2.2	98
14	97	581	1167	0.50	0.0494	0.0021	0.2199	0.0091	0.0324	0.0003	165	98.1	202	7.6	205	1.9	98
15	103	549	1128	0.49	0.0581	0.0024	0.2667	0.0114	0.0332	0.0004	532	97.2	240	9.2	211	2.4	96
16	95	590	1034	0.57	0.0508	0.0025	0. 2275	0.0108	0.0326	0.0004	232	113	208	9.0	207	2.3	66
17	198	1257	1695	0.74	0.0489	0.0017	0.2264	0.0081	0.0336	0.0003	143	89.8	207	6.7	213	2.2	<i>L</i> 6
18	136	863	1133	0.76	0.0486	0.0022	0.2190	0.0097	0.0328	0.0004	128	106	201	8.1	208	2.3	96
19	85	469	1075	0.44	0.0509	0.0023	0. 2352	0.0102	0.0337	0.0004	235	108	214	8.4	213	2.5	66
20	157	910	1916	0.47	0.0466	0.0015	0.2153	0.0072	0.0333	0.0003	31.6	77.8	198	6.0	211	2.0	93
21	85	485	1005	0.48	0.0473	0.0024	0.2147	0.0102	0.0330	0.0004	64.9	124	197	8.5	209	2.3	94
22	66	621	1016	0.61	0.0476	0.0018	0.2180	0.0081	0.0334	0.0004	79.7	88.9	200	6.7	212	2.3	94
							花	岗岩(样品号	<sup>∃</sup> / <sub>7</sub> 16R2-3)								
1	176	1076	2043	0.53	0.0483	0.0016	0.2178	0.0071	0.0326	0.0003	122	79.6	200	5.9	207	2.0	96
7	250	1565	2509	0.62	0.0474	0.0016	0.2127	0.0068	0.0326	0.0003	77.9	64.8	196	5.7	207	1.9	94
$\omega$	269	1555	3379	0.46	0.0467	0.0014	0.2132	0.0064	0.0329	0.0003	35.3	70.4	196	5.4	209	1.8	93
4	342	2276	2762	0.82	0.0497	0.0014	0. 2273	0.0062	0.0330	0.0003	189	60.2	208	5.2	209	1.8	66
5	82	469	1061	0.44	0.0515	0.0023	0.2348	0.0105	0.0329	0.0003	265	102	214	8.6	209	2.2	76
9	230	1103	3060	0.36	0.0552	0.0015	0.2567	0.0071	0.0336	0.0003	420	56.5	232	5.7	213	2.0	91
7	146	879	1610	0.55	0.0511	0.0018	0.2484	0.0094	0.0349	0.0004	243	81.5	225	7.6	221	2.2	98
×	140	884	1814	0 40	0 0400	0 0017	CLCC 0	0 0077	0 0328	0 0003	101	106	208	6 4	208	1 7	00

1176

	元素	含量(×1)	0_0)				同位募	ぎ比値					同位素年	龄(Ma)			
测点号	DP	Ē	=	Th/U	$n(^{207}\mathrm{Pb})$	'n( <sup>206</sup> Pb)	n( <sup>207</sup> Pb),	/n( <sup>235</sup> U)	$n(^{206}{\rm Pb})$	$/n(^{238}U)$	$n(^{207}{ m Pb})/.$	$n(^{206}\mathrm{Pb})$	$n(^{207}\mathrm{Pb})/$	$n(^{235}U)$	$n(^{206}\mathrm{Pb})/i$	$n(^{238}U)$	谐和度
	CD	-	-		测值	lσ	测值	$1\sigma$	测值	lσ	测值	1σ	测值	lσ	测值	lσ	(%)
6	154	910	1630	0.56	0.0509	0.0019	0. 2359	0.0083	0.0335	0.0003	239	83.3	215	6.9	213	2.0	98
10	177	1286	2307	0.56	0.0584	0.0018	0.2675	0.0082	0.0331	0.0004	546	66.7	241	6.6	210	2.2	06
11	201	1261	2108	0.60	0.0488	0.0016	0.2264	0.0075	0.0336	0.0003	200	77.8	207	6.2	213	1.9	76
12	166	1007	1716	0.59	0.0504	0.0018	0.2294	0.0077	0.0331	0.0003	217	81.5	210	6.3	210	2.0	66
13	155	804	1654	0.49	0.0481	0.0016	0.2280	0.0075	0.0343	0.0003	102	77.8	209	6.2	217	2.0	95
14	200	1078	2573	0.42	0.0533	0.0016	0.2408	0.0072	0.0327	0.0003	339	36.1	219	5.9	207	1.9	94
15	80	368	1435	0.26	0.0494	0.0019	0.2250	0.0084	0.0331	0.0004	169	90.7	206	6.9	210	2.4	98
16	165	915	1806	0.51	0.0508	0.0017	0.2310	0.0075	0.0330	0.0004	232	77.8	211	6.2	209	2.2	66
17	87	401	1347	0.30	0.0502	0.0021	0.2376	0.0096	0.0345	0.0004	211	96.3	216	7.9	219	2.6	98
18	139	828	1716	0.48	0.0504	0.0016	0.2246	0.0071	0.0322	0.0003	213	41.7	206	5.9	205	1.8	66
19	314	2156	2393	0.90	0.0504	0.0015	0.2236	0.0065	0.0321	0.0003	213	68.5	205	5.4	204	1.8	66
							花员	1岩(样品号	· 16R2—2)								
1	149	892	1439	0.62	0.0524	0.0021	0. 2378	0.0089	0.0331	0.0003	306	88.9	217	7.3	210	2.2	96
2	161	006	1558	0.58	0.0496	0.0019	0.2251	0.0082	0.0331	0.0003	176	88.9	206	6.8	210	2.0	98
3	131	742	1290	0.58	0.0482	0.0021	0. 2238	0.0097	0.0337	0.0003	109	95.4	205	8.0	213	2.1	96
4	81	402	835	0.48	0.0463	0.0025	0.2194	0.0118	0.0343	0.0004	13.1	126	201	9.9	218	2.7	92
5	75	390	793	0.49	0.0509	0.0024	0.2376	0.0110	0.0339	0.0004	235	107	216	9.0	215	2.4	66
6	244	1390	1886	0.74	0.0503	0.0015	0.2342	0.0067	0.0338	0.0003	209	39.8	214	5.5	214	2.0	66
7	119	600	1263	0.48	0.0479	0.0020	0. 2238	0.0097	0.0337	0.0004	94.5	100	205	8.0	214	2.3	95
8	131	736	1058	0.70	0.0531	0.0024	0.2424	0.0106	0.0332	0.0003	345	104	220	8.7	211	2.1	95
6	292	1918	2292	0.84	0.0485	0.0015	0.2237	0.0070	0.0332	0.0003	124	71.3	205	5.8	211	1.8	76
10	304	1888	2476	0.76	0.0483	0.0016	0. 2287	0.0073	0.0343	0.0003	122	79.6	209	6.0	217	2.2	96
11	128	LLL	1382	0.56	0.0469	0.0018	0. 2223	0.0083	0.0343	0.0003	42.7	88.9	204	6.9	218	2.1	93
12	141	828	1400	0.59	0.0470	0.0018	0.2256	0.0085	0.0347	0.0003	55.7	144	207	7.1	220	2.1	93
13	120	755	1285	0.59	0.0470	0.0019	0.2215	0.0089	0.0340	0.0003	50.1	92.6	203	7.4	215	2.2	94
14	73	445	721	0.62	0.0475	0.0030	0.2188	0.0124	0.0336	0.0005	72.3	144	201	10.4	213	2.9	94
15	159	987	1634	0.60	0.0490	0.0019	0.2246	0.0084	0.0331	0.0003	150	88.9	206	6.9	210	2.2	76
16	125	820	944	0.87	0.0463	0.0023	0.2168	0.0109	0.0340	0.0004	16.8	115	199	9.1	215	2.4	92
17	200	1254	1891	0.66	0.0500	0.0017	0. 2339	0.0077	0.0338	0.0003	198	76.8	213	6.4	215	1.9	66
18	117	602	1223	0.58	0.0512	0.0020	0.2379	0.0090	0.0338	0.0004	250	88.9	217	7.4	214	2.3	98

1177



图 3 羌塘中部白措花岗岩典型锆石阴极发光图像和锆石 U-Pb 年龄谐和图

Fig. 3 Representative cathodoluminescence images of zircons and zircon U-Pb Concordia plot

of Baicuo granites in central Qiangtang

的锆石 Hf 同位素分析,分析位置与定年位置重叠或 相交,分析结果见表 3(表中参数计算公式参见黄道 袤等,2016;杨佳林等,2018)。30个测点的  $n(^{176}$ Hf)/ $n(^{177}$ Hf)值的范围为0.282104~ 0.282370, $\varepsilon_{\rm Hf}(t)$ 的数值均为负值,范围主要集中变 化于-10~-15, $f_{\rm La/Hf}$ 值为-0.99~-0.96,小于大 陆地壳 $f_{\rm La/Hf}$ 平均值(-0.55,Griffin et al.,2000),因 此二阶段模式年龄可以更真实地反映真正的壳幔分 异作用的时代或其源区物质的平均地壳存留年龄 (黄道袤等,2016),对应的Hf 同位素地壳二阶段模 式年龄( $T_{\rm DM2}$ )为1655~2170 Ma,显示源区为古远古 代古老地壳。

#### 3.3 岩石地球化学

主量元素分析结果显示,白措花岗岩的 SiO<sub>2</sub> 含 量为 67.42% ~ 78.81%,平均 72.11%,属于高硅, 岩石中含有大量石英斑晶,在 QAP 分类图解中落入 花岗岩和花岗闪长岩类(图 4a),与野外和镜下鉴定 结果一致。碱含量(K<sub>2</sub>O+Na<sub>2</sub>O=4.4% ~ 6.91%) 中等, Na<sub>2</sub>O 含量和 Na<sub>2</sub>O/K<sub>2</sub>O 值较高,分别为 3.12% ~ 4.98%和 1.1 ~ 5.8,且 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 随 SiO<sub>2</sub> 含量 的增高有降低的趋势,反映出 I 型花岗岩类型的特 征。Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量为 10.48% ~ 14.13%,铝饱和指数 A/NCK=0.82 ~ 1.35,反映出由准铝质到过偏铝质 的过渡趋势(图 4b)。以上特征表明,白措花岗岩为 硅过饱和的准铝质—弱过铝质岩石。

1179

花岗岩体样品显示出一致的稀土元素特征(图 5a),稀土配分曲线为典型的右倾型,稀土元素总量 (ΣREE)为66×10<sup>-6</sup>~249×10<sup>-6</sup>,其中ΣLREE=59× 10<sup>-6</sup>~230×10<sup>-6</sup>,ΣHREE=7×10<sup>-6</sup>~19×10<sup>-6</sup>,轻稀 土元素明显富集;δEu值为0.63~0.76,Eu负异常 明显,表明在岩浆分离结晶作用过程中有一定程度 的斜长石的分离或源区有斜长石残留。微量元素配 分曲线一致,组成上强烈富集 K、Th、U、Rb 和 La等 大离子亲石元素,强烈亏损 Nb、Ta、P、Ti等高场强 元素(图 5b),显示出岩浆源区为壳源特征的性质。 相似的主量元素和微量元素特征,表明研究区花岗 岩和花岗闪长岩均为同源岩浆结晶的产物。

## 4 讨论

#### 4.1 岩体的形成时代

龙木措—双湖缝合带上侵入的花岗岩体,侵位 时间约束了构造混杂岩的时代上限,同时约束了龙 木措—双湖特提斯洋演化的结束年代。因此,花岗 岩体的形成时代具有十分重要的地质意义。早在 2000~2005年,前人在1:25万填图过程中已采用 K-Ar和Rb-Sr法对该区的花岗岩开展了少量同位



图 4 白措花岗岩的 QAP 和 A/NK—A/CNK 图解 Fig. 4 Diagrams of QAP and A/NK—A/CNK of Baicuo granites



素年代学工作,然而由于受测试精度的制约,得到的 年龄误差较大,主要集中于早侏罗世---中侏罗世 (144~166 Ma 和 178~186 Ma)。近年来,部分学者 对花岗岩重新开展了高精度锆石 U-Pb 年代学研 究。冈塘错花岗岩体的年龄为 222、214 和 210 Ma (李静超等,2014),果干加年山花岗闪长岩体和花 岗岩体的结晶年龄为 225 Ma 和 210 Ma(胡培远等, 2010),蜈蚣山亦发现印支期花岗岩体(胡培远等, 2012),红脊山香桃湖花岗岩体的就位年龄亦被从 晚侏罗世重新修正为晚三叠世 211 Ma 和 213 Ma (张修政等,2014),松本错花岗岩体年龄为 222 Ma, 日湾茶卡花岗岩 205~226 Ma, 荣玛花岗岩体的年龄 为210~212 Ma,嘎措花岗岩和花岗闪长岩的年龄为 212~222 Ma(Li Guangming et al., 2015)。再加上本 文所测得白措花岗岩的年龄分别为 208 Ma、210 Ma 和 214 Ma。显然,羌塘中部花岗岩的侵位年龄与同 时期那底岗日组火山岩的喷发时代一样均由最初的 侏罗纪修正为晚三叠世(王剑等,2007),两者亦存 在同源的可能。综合以上本区域花岗岩体的大量测 年数据进行系统分析,表明龙木措——双湖缝合带上 花岗岩体的侵位时代为晚三叠世(222~210 Ma)。

#### 4.2 源区特征和岩浆演化

白措花岗岩在球粒陨石标准配分图上,显示强 烈的 Eu 负异常(图 5a),与典型的地壳成因的花岗 岩一致,暗示岩浆演化过程中有一定程度的斜长石 结晶分离。在微量元素原始地幔标准化蛛网图上, 明显亏损 Ta、Nb、Sr、P 和 Ti(图 5b),显示出"TNT" 异常,暗示岛弧构造环境或继承自受俯冲组分改造 的地幔楔部分熔融。本文测得 Hf 同位素显示,花岗 岩显示出更低的  $\varepsilon_{\mu}(t)$  的负值(表 3),主要集中于-10~-15(图 6a), 变化范围相对较小, 对应的 Hf 同 位素地壳二阶段模式年龄(T<sub>DM2</sub>)为1.6~2.1 Ga,峰 值为 1.78Ga(图 6b);与同时期酸性火山岩的  $\varepsilon_{\rm H}(t)$ 值(-10~-17)及其对应的 Hf 同位素地壳二阶段模 式年龄(1.8~2.0Ga)一致,暗示源区并未有幔源成 分的参与,主要来源于古老地壳深熔作用。不同的 是,花岗岩中含有大量闪长质淬冷包体,是指示其演 化过程中存在岩浆混合作用的最重要证据(徐夕生 等,2010)。考虑到同时期火山作用形成的那底岗 日组火山岩(典型的双峰式火山岩),与花岗岩应为 同一构造岩浆活动的产物。因此,推测熔融的主要 因素是同时期玄武质岩浆的底侵作用,在地壳深部 诱发富硅质基底岩石重熔,快速喷发则形成玄武 岩-流纹岩双峰式组合:而花岗岩则是由玄武质岩 浆在地壳充分熔融后,岩浆沿羌塘中部已有的构造 破碎带侵入形成,并且在熔融过程中有镁铁质岩浆 注入少量结晶的长英质岩浆中形成暗色包体。以上 源区特征和岩石成因是与地表的岩石构造组合相吻 合的。

#### 4.3 构造背景

地球化学特征和 Hf 同位素组成显示,花岗岩源 区主要来源于古老地壳深熔作用。显然,本区酸性

表 3 西藏羌塘盆地白措花岗岩锆石原位 Hf 同位素组成

Table 3 In-situ Hf isotopic compositions of zircons from Baicuo granites of Qiangtang Basin, Xizang(Tibet)

测点号	年龄 (Ma)	$\frac{n(\frac{176}{n})}{n(\frac{177}{n})}$	<sup>5</sup> Yb) <sup>7</sup> Hf)	$\frac{n(\frac{176}{n})}{n(\frac{177}{n})}$	<sup>5</sup> Lu) <sup>7</sup> Hf)	$\frac{n(17)}{n(17)}$	<sup>6</sup> Hf) <sup>7</sup> Hf)	$\varepsilon_{\rm Hf}(0)$	$arepsilon_{ m Hf}(t)$	$\left[\frac{n(^{176}\mathrm{Hf})}{n(^{177}\mathrm{Hf})}\right]_{\mathrm{i}}$	<i>Т</i> <sub>DM1</sub> (Ма)	Т <sub>DM2</sub> (Ма)	$f_{\rm Lu/Hf}$
		测值	2σ	测值	2σ	测值	2σ						
16R2-2-1	210	0.026040	0.000288	0.000745	0.000010	0. 282197	0.000021	-20.3	-15.8	0. 282195	1477	1989	-0.98
16R2-2-2	210	0.029904	0.000660	0.000961	0.000015	0. 282227	0.000031	-19.3	-14.8	0.282224	1445	1934	-0.97
16R2-2-3	213	0.036392	0.000683	0.001111	0.000026	0. 282162	0.000030	-21.6	-16.8	0. 282159	1541	2055	-0.97
16R2-2-4	218	0.021359	0.000212	0.000686	0.000007	0. 282199	0.000023	-20.3	-15.7	0.282197	1472	1984	-0.98
16R2-2-7	214	0.014204	0.000490	0.000449	0.000013	0. 282248	0.000026	-18.5	-13.8	0.282247	1396	1885	-0.99
16R2-2-8	211	0.043617	0.000938	0.001387	0.000025	0. 282215	0.000033	-19.7	-14.9	0.282211	1478	1952	-0.96
16R2-2-9	211	0.023175	0.000128	0.000712	0.000007	0. 282220	0.000034	-19.5	-15.0	0.282218	1444	1943	-0.98
16R2-2-10	217	0.016908	0.000024	0.000548	0.000008	0. 282224	0.000192	-19.4	-14.7	0.282222	1432	1933	-0.98
16R2-2-12	220	0.033727	0.000459	0.001065	0.000017	0. 282237	0.000029	-18.9	-14.4	0.282234	1434	1913	-0.97
16R2-2-15	210	0.032908	0.000499	0.001032	0.000015	0. 282231	0.000025	-19.1	-14.5	0.282228	1441	1923	-0.97
16R2-3-1	207	0.034620	0.000604	0.001061	0.000013	0. 282327	0.000029	-15.7	-10.6	0.282324	1308	1726	-0.97
16R2-3-3	209	0.034892	0.000728	0.001173	0.000031	0. 282307	0.000026	-16.4	-12.0	0.282304	1340	1779	-0.96
16R2-3-4	209	0.031882	0.000505	0.001034	0.000019	0. 282334	0.000020	-15.5	-11.0	0.282331	1297	1724	-0.97
16R2-3-5	209	0.046791	0.002233	0.001366	0.000051	0. 282312	0.000021	-16.3	-12.2	0.282308	1340	1777	-0.96
16R2-3-6	213	0. 020361	0.000362	0.000714	0.000011	0. 282351	0.000022	-14.9	-10.3	0.282349	1263	1689	-0.98
16R2-3-8	208	0.038550	0.000600	0.001282	0.000025	0. 282370	0.000022	-14.2	-9.7	0.282366	1256	1655	-0.96
16R2-3-9	213	0.023276	0.000520	0.000743	0.000020	0. 282104	0.000025	-23.6	-19.1	0.282102	1606	2170	-0.98
16R2-3-10	210	0.028001	0.000474	0.000939	0.000015	0. 282323	0.000028	-15.9	-11.2	0.282320	1310	1743	-0.97
16R2-3-14	207	0. 031971	0.000593	0.001008	0.000037	0. 282303	0.000031	-16.6	-11.0	0.282300	1339	1764	-0.97
16R2-3-15	210	0.026194	0.000400	0.000889	0.000016	0. 282358	0.000026	-14.7	-10.3	0.282355	1259	1680	-0.97
16R2-4-1	208	0.021101	0.000160	0.000711	0.000007	0. 282318	0.000017	-16.0	-11.6	0.282316	1308	1754	-0.98
16R2-4-2	205	0.022339	0.000318	0.000712	0.000006	0. 282332	0.000018	-15.6	-11.2	0.282330	1289	1728	-0.98
16R2-4-4	210	0. 021599	0.000521	0.000729	0.000010	0. 282316	0.000019	-16.1	-11.6	0.282314	1311	1757	-0.98
16R2-4-5	208	0.018955	0.000483	0.000612	0.000014	0. 282296	0.000020	-16.8	-12.3	0. 282294	1335	1796	-0.98
16R2-4-6	207	0.014708	0.000277	0.000487	0.000005	0. 282323	0.000024	-15.9	-11.4	0.282322	1294	1744	-0.99
16R2-4-8	211	0. 028198	0.000491	0.000943	0.000011	0. 282308	0.000018	-16.4	-12.1	0.282305	1331	1779	-0.97
16R2-4-11	209	0.017344	0.000653	0.000571	0.000025	0. 282307	0.000021	-16.5	-12.0	0.282305	1319	1776	-0.98
16R2-4-14	205	0.019736	0.000120	0.000649	0.000005	0. 282292	0.000023	-17.0	-12.5	0.282290	1342	1804	-0.98
16R2-4-15	211	0.016622	0.000099	0.000515	0.000004	0. 282304	0.000024	-16.5	-12.2	0.282302	1321	1782	-0.98
16R2-4-16	207	0.019940	0.000111	0.000607	0.000006	0. 282288	0.000019	-17.1	-12.7	0.282286	1346	1814	-0.98

注:计算公式如下(参见黄道袤等,2016;杨佳林等,2018):





火山岩和花岗岩反映的是其源区的特征而非形成时 的构造背景,研究区的花岗岩地球化学数据不能直 接用于其构造背景的判别(赵振华,2016),必须要 结合区域地质背景进行判别。然而,前人的研究几 乎都是直接用地球化学数据进行判别,得出不同的 结果,长期以来困扰众多学者。本文结合同时期的 地质事件耦合,另辟蹊径,与花岗岩相比较,对研究 区花岗岩形成的构造背景重新进行初步剖析。

从岩石地球化学成分角度考虑,玄武岩的地球 化学特征更能反映岩石形成时的构造背景。综合作 者已有的研究成果,那底岗日组玄武岩属于钠质碱 性玄武岩或拉斑玄武岩, Na<sub>2</sub>O的含量远远大于 K<sub>2</sub>O,并非单一剖面特征,而是区域上广泛存在的地 球化学特征,大部分酸性火山岩也是显示钠质特征, 且玄武岩与流纹岩组成双峰式组合(李学仁等, 2018;李学仁,2019)。通常大陆板内岩浆中 Na<sub>2</sub>O 的含量高于 K<sub>2</sub>O,且伴有双峰式火山岩分布,如东非 裂谷等地,这与俯冲造山带具有富钾甚至超钾镁质 岩浆截然不同。那底岗日组酸性火山岩和研究区的 酸性侵入岩均表现为 1.8 Ga 古老地壳深熔的源区 特征,流纹岩与玄武岩伴生喷发,无论是在分布特征 和形成时代上均相同,但花岗岩则有不同之处。花 岗岩仅分布于双湖以西的变质岩带之上,埋藏深度 浅,极易剥露至地表,具有一定的局限性。羌塘中部 变质岩带形成的解释主要有两种:南北羌塘之间的 原位缝合带(李才等,2016)和金沙江洋向南俯冲在 羌塘中部局部形成的构造混杂岩(Kaap et al., 2000,2003)。在 230 Ma 以前已经完成了变质和折 返,造山碰撞隆起之后又遭受快速剥蚀,向盆地提供 物源碎屑,那底岗日组喷发之前的地层中已经有变 质岩的沉积碎屑出现(Peng Touping et al., 2015)。 花岗岩的侵位时代集中在 222~208 Ma. 与那底岗日 组的集中喷发时间(205~225 Ma)重合,源区特征又 与流纹岩相似,只是具有更高的  $[n(^{87}Sr)/n(^{86}Sr)];$ 值和更低的 $\varepsilon_{Nd}(t)$ 值(图7), 表明其在地壳熔融的时间更久,与其相比,流纹岩则



图 7 羌塘中部晚三叠世岩浆岩[n(<sup>87</sup>Sr)/n(<sup>86</sup>Sr)]<sub>i</sub>—*e*<sub>Nd</sub> (*t*)同位素图解(玄武岩和流纹岩数据据王剑等,2009; 花岗岩数据 Li Guangming et al., 2015; Peng Touping et al., 2015)

Fig. 7  $[n(^{87}Sr)/n(^{86}Sr)]_i - \varepsilon_{Nd}(t)$  isotopic diagrams of the late Triassic magnatic rocks in central Qiangtang Block (Data of basalts and rhyoliites from Wang Jian et al., 2009&; Data of granites from Li Guangming et al., 2015; Peng Toupinget al., 2015) 时间较短,快速喷出地表。花岗岩闪长质淬冷包体 的存在,亦表明有玄武质岩浆的混合,但变质岩带之 上并未有同时期未发生变质的基性侵入岩与之伴 生,则该时期只有那底岗日组玄武岩浆可以作为合 理供给源区。因此,花岗岩与流纹岩应是同一动力 机制的产物,只是喷出和侵入的产状不同。变质岩 带作为已有的构造破碎带,岩浆极易沿构造裂隙侵 入,造成其分布局限的特点。从岩浆演化序列上看, 一次构造岩浆活动往往以酸性岩的侵入作为结束; 从盆地的沉积演化来看,羌塘中部花岗岩侵位之上 是受班公湖—怒江洋盆扩张控制的羌塘侏罗纪海相 盆地。

# 5 结论

(1) 羌塘盆地白措花岗岩的锆石 U-Pb 年龄分 别为 213. 8±1.3 Ma、210. 0±1.1 Ma 和 208. 1±1.4 Ma, 侵位时代为晚三叠世诺利期。

(2) 地球化学特征和 Hf 同位素显示, 白措花岗 岩源区主要来源于深度熔融的古元古代地壳。

(3) 白措花岗岩与同时期火山岩应是同一动力 机制的产物,只是喷出和侵入的产状不同,并且对羌 塘侏罗纪海相盆地的开启进行了有效约束。

**致谢:**野外工作期间,成都地质调查中心羌塘油 气项目组成员在采样中给予了帮助,中国地质大学 (武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室在锆 石测年和 Hf 同位素测试过程中给予了指导,在论文 写作和修改过程中,编辑对本文提出了建设性意见 和建议,在此一并表示衷心感谢!

#### 参考文献 / References

(The literature whose publishing year followed by a "&" is in Chinese with English abstract; The literature whose publishing year followed by a "#" is in Chinese without English abstract)

- 冯兴雷,付修根,谭富文,陈文彬. 2018. 羌塘盆地沃若山地区上三
   叠统土门格拉组烃源岩沉积环境分析. 沉积与特提斯地质,38
   (2):3~13.
- 付修根,王剑,谭富文,陈明,李忠雄,陈文彬,冯兴雷. 2015. 藏 北羌塘盆地油气地质勘探新进展. 沉积与特提斯地质,35(1): 16~24.
- 胡培远, 李才, 杨韩涛, 张海波, 于红. 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(12): 1825~1832.
- 胡培远, 李才, 苏犁, 张红雨. 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<sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar 年龄. 地质通报, 31(6): 843~851.
- 黄道袤,万渝生,张德会,董春艳,赵元艺. 2016. 华北克拉通南缘 下汤地区古元古代构造热事件—地球化学特征、锆石 SHRIMP U-Pb 定年和 Hf 同位素研究. 地质论评,62(6):1439~1461.

李才. 2008. 青藏高原龙木错一双湖一澜沧江板块缝合带研究二十 年. 地质论评, 54(1): 105~119.

1183

- 李才. 2016. 羌塘地质. 北京: 地质出版社: 1~857.
- 李静超,赵中宝,郑艺龙,袁国礼,梁晓,王根厚,刘曦. 2014. 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. 岩石学报,31(7):2078~2088.
- 李学仁,王剑,万友利. 2018. 羌塘盆地晚三叠世裂谷盆地演化:来 自同裂谷期那底岗日组的证据. 东北石油大学学报,42(02): 23~32+61+118~119.
- 李学仁. 2019. 羌塘盆地那底岗日组火山—沉积岩石学特征及构造 属性研究. 导师:王剑. 北京:中国地质大学(北京)博士学位论 文:1~145.
- 李忠雄,马龙,卫红伟,尹吴海,蒋华中,叶天生.2019. 羌塘盆地 油气二维地震勘探进展综述. 沉积与特提斯地质,39(1):96~ 111.
- 谭富文,张润合,王剑,斯春松,马立桥. 2016. 羌塘晚三叠世一早 白垩世裂陷盆地基底构造. 成都理工大学学报:自然科学版, 43(5):513~521.
- 王剑,谭富文,李亚林,李永铁. 2004. 青藏高原重点沉积盆地油气 资源潜力分析. 北京:地质出版社:1~317.
- 王剑, 汪正江, 陈文西, 付修根, 陈明. 2007. 藏北北羌塘盆地那底 岗日组时代归属的新证据. 地质通报, 26(4): 404~409.
- 王剑,丁俊,王成善,谭富文. 2009. 青藏高原油气资源战略选区调 查与评价. 北京:地质出版社:1~645.
- 王剑, 付修根. 2018. 论羌塘盆地沉积演化. 中国地质, 45(2): 237 ~259.
- 徐夕生,邱检生. 2010. 火成岩岩石学. 北京:科学出版社: 91~92.
- 杨佳林,顾玉超,杨凤超,李东涛,鞠楠,贾宏翔.2018. 辽东半岛大金 山花岗岩体 SHRIMP U-Pb 年龄、元素地球化学和 Hf 同位素特 征及地质意义.地质论评,64(6):1541~1556.
- 张修政,董永胜,李才,邓明荣,张乐,许王. 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.

赵振华. 2016. 微量元素地球化学原理. 北京:科学出版社: 1~534.

- Blichert-Toft J, Albarède F. 1997. The Lu-Hf isotope geochemistry of chondrites and the evolution of the mantle—crust system. Earth and Planetary Science Letters, 148(1~2): 243~258.
- Feng Xinglei, Fu Xiugen, Tan Fuwen, Chen Wenbin. 2018&. Sedimentary environments of the Upper Triassic Tumengela Formation in the Woruo Mountain area in the Qiangtang Basin, Xizang. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 38(2): 3~13.
- Fu Xiugen, Wang Jian, Tan Fuwen, Chen Ming, Chen Wenbin. 2010. The Late Triassic rift-related volcanic rocks from eastern Qiangtang, northern Tibet (China): age and tectonic implications. Gondwana Research, 17: 135~144.
- Fu Xiugen, Wang Jian, Tan Fuwen, Chen Ming, Li Zhongxiong, Chen Wenbin, Feng Xinglei. 2015&. Recent progressin oil and gas geological exploration in the Qiangtang Basin, northern Xizang. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 35(1): 16~24.
- Fu Xiugen, Wang Jian, Tan Fuwen, Chen Ming, Li Zhongxiong, Zeng Yuhong, Feng Xinglei. 2016. New insights about petroleum geology and exploration of Qiangtang Basin, northern Tibet, China: A model for low-degree exploration. Marine & Petroleum Geology, 77: 323~ 340.
- Griffin W L, Pearson N J, Belousova E, Jackson S E, Achterbergh E, O'Reilly Suzanne Y, Shee S R. 2000. The Hf isotope composition of cratonic mantle: LAM-MC-ICPMS ananlysis of zircon megacrysts in kimberlites. Geochimica et Cosmochimica Acta, 64(1): 133 ~ 147.

- Hu Peiyuan, Li Cai, Yang Hantao, Zhang Haibo, Yu Hong. 2010&. Characteristic, zircon dating and tectonicsignificance of Late Triassic granite in the Guogan jianianshan area, central Qiangtang, Qinghai—Tibet Plateau, China. Geological Bulletin of China, 29 (12): 1825~1832.
- Hu Peiyuan, Li Cai, Su Li, Zhang Hongyu. 2012&. Geochemical and<sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Arisotope chronological characteristics of Wugongshan Indo-Chinese granites in central Qiangtang, Tibetan Plateau. Geological Bulletin of China, 31(6): 843~851.
- Huang Daomao, Wan Yusheng, Zhang Dehui, Dong Chunyan, Zhao Yuanyi. 2016&. Paleoproterozoic tectono—thermal events in the Xiatang area, Lushan County, southern margin of the North China Craton—Evidence from geochemical features, zircon SHRIMP dating and Hf isotopic analysis. Geological Review, 62(6): 1439~ 1461.
- Kapp P, Yin An, Manning C E, Harrison T M, Ding Lin, Deng Xiguang, Wu Cunming. 2000. Blueschist—bearing metamorphic core complexes in the Qiangtang block reveal deep crustal structure of northern Tibet. Geology, 28(1): 19~22.
- Kapp P, Yin An, Manning C E, Harrison T M, Michael H T. 2003. Tectonic evolution of the early Mesozoic blueschist—bearing Qiangtang metermorphicbelt, central Tibet. Tectonics, 22 (4): 1043.
- Li Cai. 2008&. A Review on 20 Years Study of the Longmu Co-Shuanghu—Lancang River Suture Zone in Qinghai—Xizang (Tibet) Plateau. Geological Review, 54(1): 105~119.
- Li Cai. Qiangtang Dizhi. 2016&. Beijing: Geological Publishing House: 1~857.
- Li Guangming, Li Jinxiang, Zhao Junxing, Qin Kezhang, Cao Mingjian, Noreen J. Evans. 2015. Petrogenesis and tectonic setting of Triassic granitoids in the Qiangtang terrane, central Tibet: Evidence from U-Pb ages, petrochemistry and Sr—Nd—Hf isotopes. Journal of Asian Earth Sciences, 105: 443~455.
- Li Jingchao, Zhao Zhongbao, Zheng Yilong, Yuan Guoli, Liang Xiao, Wang Genhou, Liu Xi. 2014&. 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.
- Li Xueren, Wang Jian, Wan Youli. 2018&. The late Triassic rifte devolution of Qiangtang basin: Evidence from the syn-rifting Nadigangri formation. Journal of Northeast Petroleum University, 42 (2): 23~32+61+118~119.
- Li Xueren. 2019&. Volcanic—Sedimentary Petrological Characteristics and Tectonic Attribute of Nadigangri Formation in Qiangtang Basin. Supervisor: Wang Jian. Beijing: Doctoral Dissertation of China University of Geosciences (Beijing): 1~145.
- Li Zhongxiong, Ma Long, Wei Hogwei, Yin Wuhai, Jiang Huazhong, Ye Tiansheng. 2019&. Current advances of the 2D seismic exploration in the Qiangtang Basin: A nover view. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 39(1): 96~111.
- Liu Yongsheng, Hu Zhaochu, Gao Shan, Detlef Günther, Xu Jun, Gao Changgui, Chen Haihong. 2008. In situ analysis of major and trace elements of an hydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard. Chemical Geology, 257(1): 34~43.
- Liu Yongsheng, Hu Zhaochu, Zong Keqing, Gao Changgui, Gao Shan, Xu Juan, Chen Haihong. 2010. Reappraisement and refinement of zircon U-Pb isotope and trace element analyses by LA-ICP-MS. Chinese Science Bulletin, 55(15): 1535~1546.
- Ludwig K R. 2012. User's manual for Isoplot3. 75: a geochronological toolkit for Microsoft Excel. Berkeley: Berkeley Geochronology

Centre, Special Publication, 5: 1~75.

- Peng Toupin, Zhao Guochun, Fan Weiming, Peng Binxia, Ma Yongsheng. 2015. Late Triassic granitic magmatismin the Eastern Qiangtang, Eastern Tibetan Plateau: geochronology, petrogenesis and implications for the tectonic evolution of the Paleo—Tethys. Gondwana Research, 28: 1494~1508.
- Pullen A, Kapp P, Gehrels G E, Vervoort J D, Ding Lin. 2008. Triassic continental subduction in central Tibet and Mediterranean style closure of the Paleo—Tethys Ocean. Geology, 36(5): 351~ 354.
- Söderlund U, Patchett P J, Vervoort J D, Isachsen C E. 2004. The <sup>176</sup>Lu decay constant determined by Lu-Hf and U-Pb isotope systematics of Precambrian mafic intrusions. Earth and Planetary Science Letters, 219(3~4): 311~324.
- Sun S S and Mcdonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. Geological Society of London Special Publications, 42: 313~345.
- Tan Fuwen, Zhang Runhe, Wang Jian, Si Chunsong, Ma Liqiao. 2016&. Discussion on basement structures of the late Triassic early Cretaceous Qiangtang rift basin in Tibet, China. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 43(5): 513~521.
- Wang Jian, Tan Fuwen, Li Yalin, Li Yongtie. 2004&. The Potential of the Oil and Gas Resources in Major Sedimentary Basins on the Qinghai—Xizang (Tibet) Plateau. Beijing: Geological Publishing House: 1~317.
- Wang Jian, Wang Zhengjiang, Chen Wenxi, Fu Xiugen, Chen Ming. 2007&. New evidences for the age assignment of the NadiKangri Formation in the North Qiangtang basin, northern Tibet, China. Geological Bulletin of China, 26(4): 404~409.
- Wang Jian, Ding Jun, Wang Chengshan, Tan Fuwen. 2009&. Investigation and Evaluation of the Qinghai—Tibet Plateauoil and Gas Resources Strategy Constituency. Beijing: Geological Publishing House: 1~645.
- Wang Jian, Fu Xiugen. 2018&. Sedimentary evolution of the Qiangtang Basin. Geology in China, 45(2): 237~259.
- Wang Zhongwei, Wang Jian, Fu Xiugen, Feng Xinglei, Armstrong-Altrin John, Zhan Wangzhong, Wan Youli, Song Chunyan, Ma Long, Shen Lijun. 2019. Sedimentary successions and onset of the Mesozoic Qiangtang rift basin (northern Tibet), Southwest China: Insights on the Paleo- and Meso-Tethys evolution. Marine & Petroleum Geology, 102:657~679.
- Xu Xisheng, Qiu Jiansheng. 2010&. Igneous Petrology. Beijing: Science Press: 91~92.
- Yang Jialin, Gu Yuchao, Yang Fengchao, Li Dongtao, Ju Nan, Jia Hongxiang. 2018. SHRIMP U-Pb ages, elements geochemistry and Hf isotopic characteristics of the Dajinshan granite in Liaodong Peninsula and geological significance. Geological Review, 64(6): 1541~1556.
- Zhai Qingguo, Zhang Ruyuan, Jahn Bor-Ming, Li Cai, Song Shuguang, Wang Jun. 2011. Triassic eclogites from central Qiangtang, northern Tibet, China: petrology, geochronology and metamorphic P—T path. Lithos, 125: 173~189.
- Zhai Qingguo, Jahn Bor ming, Su Li, Wang Jun, Mo Xuanxue, Lee Haoyang, Wang kuolung, Tang Suohan. 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 ~ 78.

1185

- Zhang Kaijun, Cai Jianxin, Zhang Yuxiu, Zhao Taiping. 2006. Eclogites from central Qiangtang, northern Tibet (China) and tectonic implications. Earth and Planetary Science Letters, 245: 722~729.
- Zhang Kaijun, Tang Xianchun, Wang Yang, Zhang Yuxiu. 2011. Geochronology, geochemistry, and Nd isotopes of early Mesozoic bimodal volcanism in northern Tibet, western China: Constraints on the exhumation of the central Qiangtang metamorphic belt. Lithos,

 $121(1 \sim 4): 167 \sim 175.$ 

- Zhang Xiuzheng, Dong Yongsheng, Li Cai, Deng Mingrong, Zhang Le, Xu Wang. 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.
- Zhao Zhenhua. 2016 &. Geochemical Principles of Trace Elements. Beijing: SciencePress: 1~534.

# Petrogeochemical characteristics, zircon U-Pb ages and Hf isotopic composition of Baicuo granites in central Qiangtang Basin, and its tectonic significance

LI Xueren<sup>1, 2)</sup>, WAN Youli<sup>1, 2)</sup>, WANG Jian<sup>3)</sup>

1) Chengdu Center of China Geological Survey, Chengdu, 610081;

2) Key Laboratory for Sedimentary Basin and Oil and Gas Resources, Ministry of Natural Resources, Chengdu, 610081;
 3) Oiangtang Institute of Sedimentary Basin, Southwest Petroleum University, Chengdu, 610500

**Objectives**: The granites in central Qiangtang have important geological significance, which not only constraints the evolution of Longmuco—Shuanghu Suture belt, but also the onset of Qiangtang Jurassic marine basin. Combined with zircon geochronology, geochemistry and Hf isotope, we briefly discuss the geological significance of the Baicuo granites.

Methods: Based on the field work, through the microscope observation, the zircon geochronology, the whole rock chemical analysis, Hf isotope analysis of Baicuo granites.

**Results**: The Baicuo granites in central Qiangtang show that the pluton is a composite batholith placed by granodiorite and monzogranite. The zircon U-Pb ages are 213.8±1.3 Ma, 210.0±1.1 Ma and 208.1±1.4 Ma, respectively. The Baicuo granites have typical characteristics of crust source, with enrichments of large ion lithophile elements (LILES) and depletion of high field strength elements (HFSEs), as well as exhibiting obvious Eu anomalies. The  $\varepsilon_{\rm HF}(t)$  is negative, mainly concentrated in  $-10 \sim -15$ . The corresponding two-stage model age ( $T_{\rm DM2}$ ) varies between 1.66 Ga and 2.17 Ga, which indicates that the source region is from the Paleoproterozoic ancient crust. The dark xenoliths maybe indicate magma mixing, which is caused by the injection of mafic magma into felsic magma. The Granites formed by basaltic underplating and full melting, intruded along the existed structural fracture zone in central Qiangtang.

**Conclusion**: The granites and the coeval bimodal volcanic rocks are the products of the same rift dynamic mechanism. The intrusion of granites indicates the end of the tectonomagmatic activities in the Late Triassic Qiangtang basin, and the onset of the Jurassic Qiangtang marine basin.

Keywords: zircon U-Pb ages; geochemistry; Hf isotope; granites; Qiangtang

Acknowledgements: This study was supported by the Natural Science Foundation of China (No. 41902138)

First author: LI Xueren, male, born in 1986, engineer, mainly working on tectonic sedimentology. Email: xueren. li@ foxmail.com

Manuscript received on: 2020-07-09; Acceptedon: 2020-08-21; Edited by: HUANG Daomao **Doi**: 10.16509/j.georeview. 2020. 05. 007