

秦川, 李智武, 朱利东, 等. 西藏羌塘地体南缘改则嘎布扎花岗岩闪长岩侵位时代、成因及其地质意义[J]. 中国地质, 2015, 42(1): 105-117.  
Qin Chuan, Li Zhiwu, Zhu Lidong, et al. The emplacement epoch, petrogenesis and geological significance of Gabuzha granodiorite at the southern edge of Qiangtang, Tibet[J]. Geology in China, 2015, 42(1): 105-117(in Chinese with English abstract).

## 西藏羌塘地体南缘改则嘎布扎花岗岩闪长岩 侵位时代、成因及其地质意义

秦 川<sup>1</sup> 李智武<sup>1</sup> 朱利东<sup>1</sup> 张玉修<sup>2,3</sup> 杨文光<sup>1</sup> 黄 瑞<sup>1</sup>

(1. 成都理工大学油气藏地质及开发工程国家重点实验室, 四川 成都 610059; 2. 中国科学院计算地球动力学重点实验室, 北京 100049; 3. 中国科学院大学地球科学学院, 北京 100049)

**摘要:** 改则地区的嘎布扎花岗岩闪长岩侵入于南羌塘地体南缘的侏罗系色哇组, 为研究班公湖—怒江缝合带的演化提供新的约束。岩浆锆石的 LA-ICP-MS U-Pb 年龄为  $(143.8 \pm 0.5)$  Ma, 显示花岗岩闪长岩的侵位时代为晚侏罗世—早白垩世之交。花岗岩闪长岩具有准铝质 I 型花岗岩的特点, 属于高钾钙碱性岩石系列; 稀土元素为轻稀土富集型, 存在弱的 Eu 负异常; 明显富集 Rb、Ba、K、Th、U 等大离子亲石元素, 而亏损 Nb、Ta、P、Ti 等高场强元素。研究表明花岗岩闪长岩的岩浆源区可能经历了陆壳物质、俯冲沉积物与幔源楔等不同性质的岩浆混合, 并经历一定程度的分离结晶作用形成。改则嘎布扎花岗岩闪长岩形成于班公湖—怒江中特提斯洋晚侏罗世—早白垩世向北俯冲的岛弧环境。

**关键词:** 花岗岩闪长岩; 锆石 U-Pb 年龄; 俯冲; 岛弧; 班公湖—怒江缝合带

中图分类号: P588.12<sup>1</sup>; P597<sup>1.3</sup> 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2015)01-0105-13

## The emplacement epoch, petrogenesis and geological significance of Gabuzha granodiorite at the southern edge of Qiangtang, Tibet

QIN Chuan<sup>1</sup>, LI Zhi-wu<sup>1</sup>, ZHU Li-dong<sup>1</sup>, ZHANG Yu-xiu<sup>2,3</sup>, YANG Wen-guang<sup>1</sup>, HUANG Rui<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China; 2. Key Laboratory of Computational Geodynamics, CAS, Beijing 100049, China; 3. College of Earth Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** The Gabuzha granodiorite in Gerze area intruded into the Jurassic Sewa Formation at the southern edge of the southern Qiangtang terrane, and can be used to constrain the evolution of Bangong Co-Nujiang River suture zone. LA-ICP MS zircon U-Pb dating yielded a weighted mean age of  $(143.8 \pm 0.5)$  Ma, suggesting that the Gabuzha granodiorite formed during late Jurassic to early Cretaceous. The Gabuzha granodiorite is metaluminous I-type granite and belongs to high-K calc-alkaline series. Its REE model is characterized by enrichment of light REE, and Eu shows weak negative anomaly. Large ion lithophile elements are

收稿日期: 2014-07-19; 改回日期: 2014-11-19

基金项目: 中国地质调查项目(1212011086065)和国家自然科学基金项目(40802048, 41472209, 41002055)及高等学校博士学科点专项科研基金(20125122110010)联合资助。

作者简介: 秦川, 男, 1990年生, 硕士生, 构造地质学专业; E-mail: chuanqincq@163.com。

通讯作者: 李智武, 男, 1976年生, 副教授, 主要从事构造地质和油气地质研究; E-mail: lizhiwu06@cdu.cn。

obviously enriched in Rb, Ba, K, Th and U. High field strength elements Nb, Ta, P and Ti show strong depletion. The results show that the magma source of Gabuzha granodiorite might have been derived from mixture of continental crust materials, subducting sediments and mantle-derived wedge, and experienced a certain degree of separation and crystallization as well. The Gabuzha granodiorite formed in an island arc environment related to northward subduction of the Bangong Co-Nujiang River Meso-Tethys Ocean beneath the Qiangtang terrane.

**Key words:** granodiorite; zircon U-Pb age; subduction; island arc; Bangong Co-Nujiang River suture zone

About the first author: QIN Chuan, male, born in 1990, master candidate, mainly engages in the study of structural geology; E-mail: chuanqincq@163.com.

**About the corresponding author:** LI Zhi-wu, male, born in 1976, associate professor, mainly engages in the study of structural geology and petroleum geology; E-mail: lizhiwu06@cdu.cn.

位于南羌塘地体与拉萨地体之间的班公湖—怒江缝合带是青藏高原内部最重要的地质界线之一,对于深入认识青藏特提斯演化与高原形成具有重要的意义<sup>[1-2]</sup>。为此,国内外学者针对其形成、演化过程等开展了大量研究工作,对于班公湖—怒江洋形成—消减—闭合过程的理解已基本达成共识<sup>[3-10]</sup>。但是,在洋盆俯冲消减时限和俯冲极性等问题上还存在较大争议。一般认为班公湖—怒江特提斯洋是从中侏罗世开始俯冲消减,晚侏罗世—早白垩世闭合<sup>[11-16]</sup>。对其俯冲极性,也存在向北俯冲<sup>[17-20]</sup>、向南俯冲<sup>[21, 22]</sup>和双向俯冲<sup>[23]</sup>等不同观点。

本文以改则地区南羌塘地体南缘的嘎布扎花岗岩闪长岩体为研究对象,通过野外地质调查、薄片鉴定、LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素年龄分析与地球化学测试等综合分析手段研究嘎布扎花岗岩闪长岩体的侵位时代和岩石成因,并探讨其产出的构造背景,为约束班公湖—怒江中特提斯洋的消减—闭合历史提供基础资料。

## 1 地质背景及样品特征

班公湖—怒江缝合带是羌塘地体和拉萨地体的碰撞结合带(图 1-a),在中国境内西起班公湖,向东经改则、东巧、丁青,折向南东沿怒江进入滇西,总体呈 S 型东西向延伸逾 2000 km,南北宽度一般为几十千米,主体由近 100 个以侏罗纪时代为主的蛇绿岩套以及相关的混杂岩带构成<sup>[1, 2, 5, 20, 24]</sup>。在改则地区,班公湖—怒江缝合带以洞错蛇绿岩和拉果错蛇绿岩为标志<sup>[20]</sup>。

研究区位于洞错蛇绿岩带西北侧,南北横跨南羌塘地体南缘(I)和班公湖—怒江缝合带(II)2 个大构造单元(图 1)。羌塘南缘构造带由色哇组( $J_{1-2S}$ )

以及上覆的去申拉组( $K_1q$ )、康托组( $Nk$ )和喷呐湖组( $Ns$ )构成。色哇组主要为一套局部夹生物灰岩的碎屑岩,去申拉组为一套火山—沉积建造,康托组、喷呐湖组均以红色碎屑岩沉积为主,在喷呐湖组内夹有湖相碳酸盐岩沉积。班公湖—怒江缝合带主要由洞错蛇绿混杂岩带(II<sub>1-4</sub>)和复式单斜构造带构成(II<sub>5</sub>),自东向西呈帚状散开(图 1-b)。洞错蛇绿混杂岩主体由蛇绿岩岩片和木嘎岗日群构成。蛇绿岩岩片包括变质橄榄岩、堆积杂岩(辉长岩出露为主)、辉绿岩、玄武岩和浅色岩(斜长花岗岩和角闪石岩)等单元组分;木嘎岗日群以一套灰黑色板岩—砂岩构成的复理石为基质、夹有玄武岩—安山岩岩块的沉积混杂岩;复式单斜构造带由沙木罗组( $J_3K_{1S}$ )碎屑岩夹碳酸盐岩构成。

本文研究的嘎布扎花岗岩闪长岩体位于改则县城北东 40 km 处,位于南羌塘地体南缘,呈岩珠状侵位于侏罗纪色哇组千枚岩中,岩体出露面积较小,约 0.9 km<sup>2</sup>。总体岩性较为单一,主要为花岗岩闪长岩。岩体与围岩接触关系清晰,在接触处可见大量红柱石角岩(图 2-b)。样品总体为灰白色,细粒花岗结构(图 2-a)块状构造。矿物粒度 0.8~1.5 mm,矿物主要由斜长石(±50%)、石英(±20%)、黑云母(±15%)、钾长石(±8%)、普通角闪石(±5%)及少量副矿物(如磷灰石、榍石及金属矿物)组成,斜长石未见蚀变,黑云母较新鲜,基本未蚀变(图 2-c、d)。

## 2 分析方法

测试样品经人工破碎后,用常规重液和磁选方法分选出锆石,在双目镜下挑选。将待测样品的锆石颗粒、标准锆石 M257 和 TEM 置于环氧树脂制靶,然后研磨至一半,用于透射光、反射光、阴极发



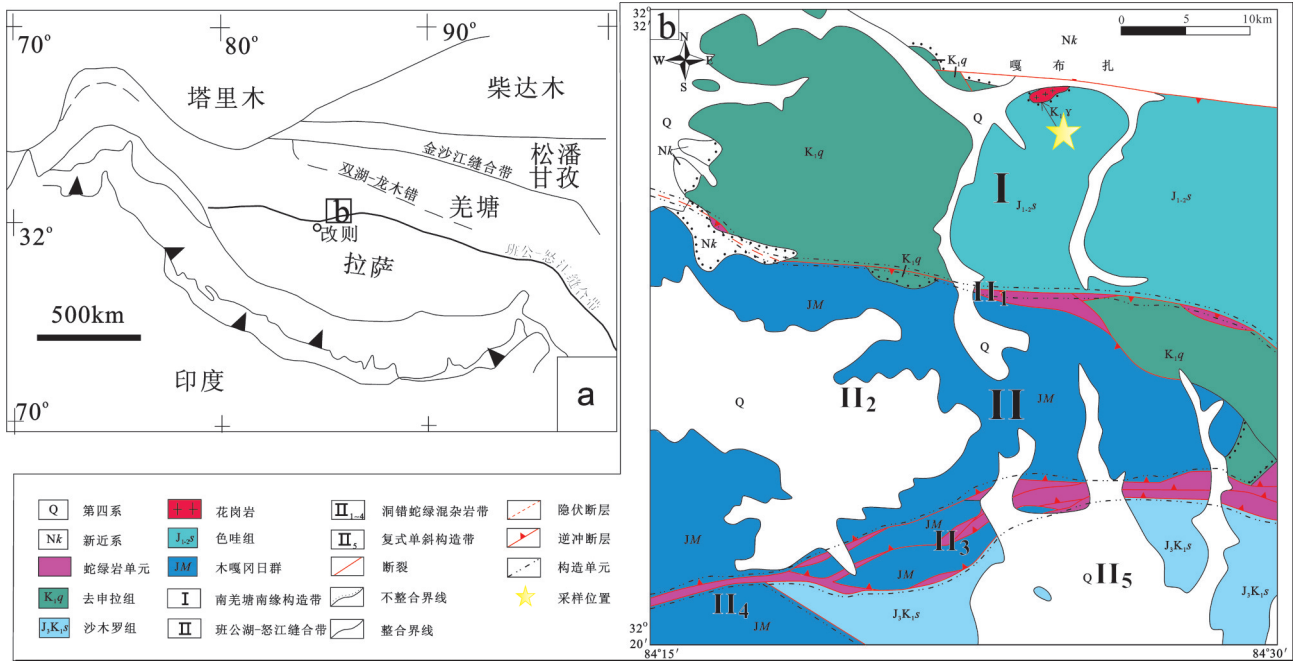


图1 青藏高原构造单元图及改则嘎布扎地质图  
a—青藏高原构造单元图<sup>[10]</sup>; b—改则嘎布扎地质图

Fig. 1 Tectonic subdivision of the Tibetan Plateau and simplified geological map of Gabuzha area, Gerze  
a—Simplified geological map of subdivision of the Tibetan Plateau<sup>[10]</sup>; b—Simplified geological map of Gabuzha area, Gerze



图2 花岗岩闪长岩露头(a)红柱石角岩(b)及显微照片(c,d)

Hbl—角闪石; Kfs—钾长石; Pl—斜长石; Q—石英

Fig.2 Exposures and microphotographs of granodiorite (a), andalusite hornfels (b) and photomicrographs (c, d)

Hbl—Hornblende; Kfs—K-feldspar; Pl—Plagioclase; Q—Quartz

光(CL)和U-Pb定年分析。U-Pb同位素定年分析在中国地质科学院矿产资源研究所国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室完成,所用仪器为FinniganNeptune型MC-ICP-MS及与之配套的Newwave UP 213激光剥蚀系统。激光剥蚀所用束斑直径为25  $\mu\text{m}$ ,频率为10 Hz,能量密度约为2.5 J/cm<sup>2</sup>,以He为载气。LA-MC-ICPMS激光剥蚀采样采用单点剥蚀的方式,锆石U-Pb测年以锆石GJ1为外标,U,Th含量以锆石M127(U:  $923 \times 10^{-6}$ ; Th:  $439 \times 10^{-6}$ ; Th/U: 0.475)<sup>[25]</sup>为外标进行校正。测试过程中每测定10个点重复测定2个标样锆石GJ1对样品进行校正,并测量一个锆石标样Plesovice,观察仪器的状态和测试的重现性。数据处理采用ICPMSDataCal程序,测量过程中绝大多数分析点<sup>206</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb>1000,未进行普通铅校正,<sup>204</sup>Pb由离子计数器检测,<sup>204</sup>Pb含量异常高的分析点可能受包体等普通Pb的影响,这些点在计算时剔除。锆石标准的重现性在1%(2 $\sigma$ )左右。所测数据应用Isoplot 3.0程序进行数据处理<sup>[26]</sup>,所得出的同位素比值和年龄的误差均在1 $\sigma$ 水平。

微量元素由中南大学地球科学与信息物理实验中心采用粉末压片法完成测试,所用仪器为ZSX Primus II型X射线荧光光谱仪,分析精度优于1%。微量元素由中国科学院青藏高原研究所实验测试中心分析,测试仪器使用美国Thermo公司生产的X Series电感耦合等离子体质谱仪。测试时首先采用酸溶法对样品进行预处理,然后再利用ICP-MS法测定,分析精度优于5%。

### 3 分析结果

#### 3.1 锆石U-Pb年龄

对花岗闪长岩锆石的18个测点进行了U-Pb同位素分析,测点位置如图(图3)所示,分析数据见表1。花岗闪长岩中的锆石绝大多数结晶较好,显示长轴状或短柱状的自形一半自形晶型,锆石长短轴比为1:1,少数可达2:1,且具有典型的岩浆震荡环带,Th/U比值范围为0.10~0.34,该比值高于变质成因锆石(通常<0.1),除一个样品外,均大于0.1,指示其为岩浆结晶的产物。在U-Pb谐和图上,样品的数据点位置除少数位于谐和线右侧外,其余都落在



图3 花岗闪长岩的锆石阴极发光图像  
Fig.3 Zircon CL images of the granodiorite



表1 花岗闪长岩的锆石 U-Pb 同位素分析结果  
Table 1 U-Pb isotope analyses of zircon from the granodiorite

测点号	Th/ $10^{-6}$	U/ $10^{-6}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 $\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 $\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 $\sigma$	Th/U	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄/Ma	1 $\sigma$
D0205-N-1	19	158	0.0497	0.0005	0.1543	0.0018	0.02253	0.0001	0.12	143.6	0.8
D0205-N-2	21	219	0.0495	0.0003	0.1543	0.0013	0.02263	0.0001	0.10	144.2	0.7
D0205-N-3	47	220	0.0495	0.0007	0.1547	0.0023	0.02266	0.0001	0.21	144.4	0.9
D0205-N-4	35	273	0.0499	0.0004	0.1547	0.0014	0.02248	0.0001	0.13	143.3	0.7
D0205-N-5	85	417	0.0511	0.0005	0.1594	0.0016	0.02263	0.0002	0.20	144.3	1.0
D0205-N-6	63	330	0.0493	0.0003	0.1529	0.0012	0.02248	0.0001	0.20	143.3	0.7
D0205-N-7	106	526	0.0492	0.0004	0.1530	0.0014	0.02256	0.0001	0.20	143.8	0.7
D0205-N-8	114	470	0.0500	0.0006	0.1556	0.0023	0.02257	0.0002	0.24	143.9	1.4
D0205-N-9	75	492	0.0494	0.0005	0.1538	0.0029	0.02259	0.0003	0.15	144.0	1.7
D0205-N-10	43	282	0.0503	0.0003	0.1576	0.0011	0.02274	0.0001	0.15	145.0	0.7
D0205-N-11	74	286	0.0512	0.0011	0.1589	0.0039	0.02251	0.0002	0.26	143.5	1.5
D0205-N-12	150	528	0.0515	0.0010	0.1617	0.0029	0.02277	0.0003	0.28	145.1	1.9
D0205-N-13	33	197	0.0494	0.0005	0.1531	0.0020	0.02249	0.0002	0.17	143.4	1.0
D0205-N-14	115	689	0.0497	0.0004	0.1558	0.0022	0.02277	0.0003	0.17	145.2	2.0
D0205-N-15	241	710	0.0486	0.0007	0.1522	0.0051	0.02268	0.0006	0.34	144.5	3.8
D0205-N-16	65	283	0.0500	0.0005	0.1566	0.0027	0.02268	0.0003	0.23	144.6	1.8
D0205-N-17	52	379	0.0490	0.0005	0.1519	0.0041	0.02252	0.0006	0.14	143.6	3.7
D0205-N-18	42	250	0.0491	0.0026	0.1505	0.0078	0.02227	0.0001	0.17	142.0	0.8

注: 中国地质科学院矿产资源研究所国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室完成。

谐和线上。花岗闪长岩 18 个锆石测点的  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄介于 142~145.2 Ma(图 4), 其加权平均值为 (143.8 $\pm$ 0.5) Ma, (95%置信度, MSWD=0.64)。

### 3.2 地球化学特征

对嘎布扎花岗闪长岩体所采集的 8 个样品进行测试, 结果见表 2。根据 Q-A-P 分类标准, 样品点大部分都落入花岗闪长岩区域内, 少量向石英二长闪长岩和二长花岗岩过渡(图 5)。SiO<sub>2</sub> 含量较低, 为 56.16%~61.53%, 平均 59.31%, 属中性范畴, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量偏低为 14.80%~15.91%, 较高的 K<sub>2</sub>O 含量(2.08%~3.04%)、Na<sub>2</sub>O 含量(2.95%~3.68%), 且 Na<sub>2</sub>O/K<sub>2</sub>O>1, 全碱含量(Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O)为 5.59%~6.39%, CaO 含量较高为 4.02%~5.33%, A/CNK 为 0.82~0.93(<1), 在 A/NK-A/CNK 图上样品均落在准铝质区内(图 6-b), P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 含量为 0.2~0.3, 具有较低的 MgO(1.35%~2.28%)。在 SiO<sub>2</sub>-K<sub>2</sub>O 图上样品均落入高钾钙碱性岩区(图 6-a)。标准矿物计算结果显示: 石英 Q

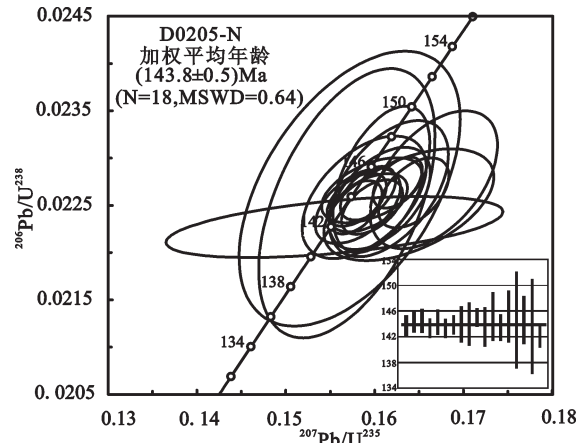


图4 花岗闪长岩锆石 U-Pb 年龄谐和图  
Fig.4 U-Pb concordia diagram of zircon from the granodiorite

(15.65~22.01)、钙长石 An(18.23~22.37)、钠长石 Ab (27.15~33.33)、正长石 Or(13.4~19.34); 分异指数 DI 介于 59.7~70.7, 平均为 66;  $\sigma$ (里特曼指数) 介于

表2 改则地区嘎布扎花岗闪长岩常量元素组成(%)  
Table 2 Major (%) element analyses of the granodiorite

样品号	P35-10H <sub>2</sub>	P35-11H <sub>1</sub>	P35-11H <sub>2</sub>	P35-11H <sub>3</sub>	P35-1H	P35-4H <sub>1</sub>	P35-8H <sub>2</sub>	P35-9H
SiO <sub>2</sub>	59.94	59.17	59.90	59.49	61.53	56.16	61.11	57.18
TiO <sub>2</sub>	0.58	0.63	0.60	0.60	0.54	0.81	0.57	0.77
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15.18	15.91	15.15	14.83	14.84	15.31	15.14	15.30
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>T</sup>	4.65	4.90	4.68	4.76	4.02	6.56	4.43	5.83
MnO	0.13	0.13	0.12	0.13	0.12	0.20	0.13	0.15
MgO	1.46	1.73	1.38	1.48	1.45	2.28	1.35	1.89
CaO	4.79	4.74	4.85	5.33	4.02	4.99	4.78	5.05
Na <sub>2</sub> O	3.52	3.68	3.63	3.54	3.25	2.95	3.67	3.51
K <sub>2</sub> O	2.65	2.70	2.40	2.36	3.04	2.71	2.33	2.08
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.22	0.22	0.24	0.27	0.20	0.28	0.20	0.30
烧失量	5.17	5.78	6.78	6.30	5.09	6.95	5.89	7.22
总量	98.29	99.59	99.73	99.09	98.10	99.20	99.60	99.28
Mg <sup>#</sup>	42.2	45.2	40.7	42.0	45.7	44.7	41.4	43.1
A/CNK	0.87	0.90	0.87	0.82	0.93	0.91	0.88	0.89
A/NK	2.46	2.49	2.51	2.51	2.36	2.7	2.52	2.74
石英(Q)	18.92	16.07	19.32	18.98	22.01	15.65	20.63	16.84
钙长石(An)	19.15	20.2	19.39	19.03	18.23	22.37	19.21	21.66
钠长石(Ab)	32.11	33.33	33.14	32.38	29.67	27.15	33.23	32.37
正长石(Or)	16.85	17.07	15.29	15.06	19.34	17.41	14.72	13.4
DI	67.88	66.47	67.75	66.42	71.02	60.21	53.28	68.58
σ	2.05	2.3	1.96	1.91	1.97	2.09	1.84	1.92
R <sub>1</sub>	2144	1990	2166	2182	2283	2043	2244	2083
R <sub>2</sub>	951	968	954	1011	855	1032	936	1019

注: A/CNK=Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/(CaO+Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O)摩尔比, A/NK=Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/(Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O)摩尔比; 分异指数(DI)=Qz+Or+Ab+Ne+Lc+Kp; 里特曼指数(σ)=(Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O)<sup>2</sup>/(SiO<sub>2</sub>-43); R<sub>1</sub>=4Si-11(Na+K)-2(Fe+Ti); R<sub>2</sub>=6Ca+2Mg+Al。

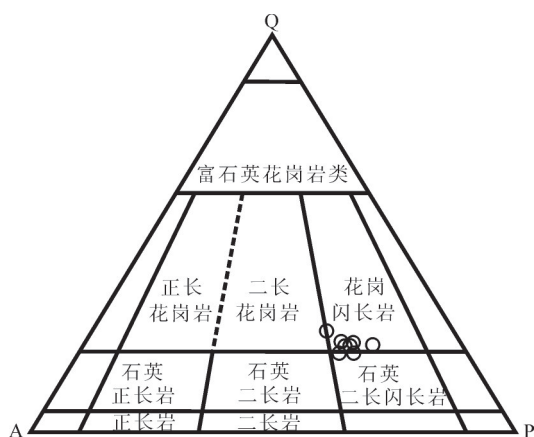


图5 Q-A-P分类命名图解<sup>[27]</sup>  
Fig. 5 Q-A-P classification diagram<sup>[27]</sup>

1.84~2.30, 为典型的钙碱性花岗岩。

嘎布扎花岗闪长岩稀土微量元素分析结果见表3。花岗闪长岩富含稀土元素,  $\Sigma\text{REE}=186.64 \times 10^{-6} \sim 296.46 \times 10^{-6}$ , LREE 相对 HREE 明显富集,  $\text{LREE}/\text{HREE}=9.76 \sim 13.39$ , 轻重稀土分馏显著,  $(\text{La}/\text{Yb})_N=10.36 \sim 18.20$ , Eu 存在弱的负异常,  $\delta\text{Eu}=0.71 \sim 0.85$ 。在 REE 元素球粒陨石标准化图上呈现光滑的右倾曲线, 曲线后半段相对平坦, 且尾部具有微弱上翘趋势, 暗示样品同时存在中稀土元素的亏损。各样品 REE 配分型式相互平行, 只有位置的高低, 显示其稀土分异程度相当, 具有同源岩浆特征(图 7-a)。微量元素中花岗闪长岩具有较高的 Sr 含量( $570 \times 10^{-6} \sim 727.9 \times 10^{-6}$ ), 相对低的 Yb( $1.78 \times 10^{-6} \sim 3.67 \times 10^{-6}$ )和 Y 含量( $20.57 \times 10^{-6} \sim 38.24 \times 10^{-6}$ )。在微量元素蛛网图上(图 7-b)所有样品具有富集 Rb、Ba、K、Th、U 等大离子亲

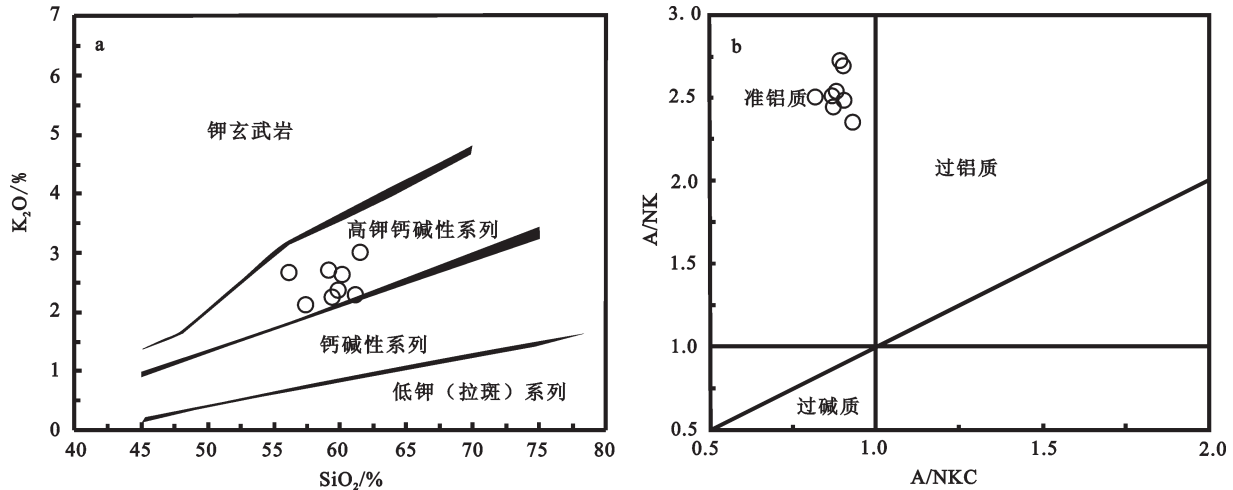


图6 花岗闪长岩地球化学散点图

a—花岗闪长岩  $\text{SiO}_2$ - $\text{K}_2\text{O}$  图解<sup>[28]</sup>; b—花岗闪长岩  $\text{A/NK}$ - $\text{A/CNK}$  图解<sup>[29]</sup>

Fig. 6 Geochemical plots of analyzed samples from the granodiorite

a-  $\text{SiO}_2$ - $\text{K}_2\text{O}$  diagram of the granodiorite<sup>[28]</sup>; b-  $\text{A/NK}$ - $\text{A/CNK}$  diagram of the granodiorite<sup>[29]</sup>

石元素(LILE), 高场强元素(HFES)中的Nb、Ta、P、Ti等则表现出明显的负异常, Ba相对于Rb和Th较亏损, Sr弱亏损, 具有明显的岛弧火山岩特征。花岗闪长岩的Eu、Sr、Ti等元素的亏损特征表明, 在岩浆源区斜长石和角闪石是作为残留相稳定存在, 即它们是在斜长角闪岩相条件下生成的<sup>[31]</sup>。

## 4 讨论

### 4.1 岩浆侵位时代

嘎布扎花岗闪长岩锆石结晶年龄为 $(143.8 \pm 0.5)$  Ma, 表明岩浆岩的侵位年龄为晚侏罗世—早白垩世之交, 这与改则北岩体所获得的锆石年龄 $(142.15 \pm 0.35)$  Ma一致<sup>[32]</sup>, 两者同属于改则地区的早期岛弧岩浆事件<sup>[16]</sup>。

### 4.2 岩浆源区与岩石成因

岩浆岩的类型和岩浆形成的地球动力学过程密切相关, 因此对嘎布扎地区花岗闪长岩类型的准确判断至关重要。前人大量的实验结果表明,  $\text{P}_2\text{O}_5$ 和Rb等在区分I型和S型花岗岩中是较为有效的方法, 在准铝质或弱过铝质花岗岩浆中, 磷灰石的溶解度很低, 并且会随着温度的降低和岩浆分异演化 $\text{SiO}_2$ 的增加而降低<sup>[33]</sup>。这些实验结果指示S型花岗岩的 $\text{P}_2\text{O}_5$ 随着 $\text{SiO}_2$ 增加呈增高或基本不变的趋势, 而I型花岗岩的 $\text{P}_2\text{O}_5$ 与 $\text{SiO}_2$ 呈负相关性<sup>[34]</sup>。嘎布扎花岗闪长岩 $\text{P}_2\text{O}_5$  (0.2~0.3)随着 $\text{SiO}_2$ 增加而减少, 属

于典型的I型花岗岩类(图8-a)。这一趋势同时亦可以得到Y和Rb呈现的正相关性的支持(图8-b)。因为富Y矿物不会在准铝质I型岩浆演化的早期阶段结晶出来, 从而引起分异的I型花岗岩的Y含量高, 并与Rb含量呈正相关关系。

Nb/Ta为强不相容元素, 在侵蚀和变质作用过程中比较稳定, 可以示踪原始岩浆源区的特征<sup>[35, 36]</sup>。本文的嘎布扎花岗闪长岩Nb/Ta值为11.32~16.97, 其特征介于原始地幔(17.39)<sup>[33]</sup>和大陆地壳(Nb/Ta=11~12)<sup>[37]</sup>之间, 暗示岩浆源区可能由地幔熔体和地壳熔体的混合形成。对大洋玄武岩的研究发现MORB和OIB的Nb/U比值较高且十分均一( $47 \pm 10$ ), 而大陆地壳的Nb/U比值通常很低, 因此Nb/U比值可作为判别地壳混染的一种标志<sup>[38]</sup>。花岗闪长岩低的Nb/U值(5.71~9.23) (表3)接近于大陆地壳的平均值(8.93), 而远离原始地幔平均值(33.59), 表明其岩浆源区在形成后的上升俯冲消减过程中混入了陆壳碎片和沉积物质, 岩石成因与俯冲作用有关。此外, 在微量元素Ce—Ce/Pb和Nb—Nb/Th比值图(图9-a、b)上, 它们的岩浆岩区显示出与岛弧火山岩十分相近, 说明源区物质与俯冲带岩石圈地幔有关。在Th/Sm—Th/Ce图(图9-c)上, 这些样品都落在印度洋型MORB地幔与俯冲沉积物之间的混合线上, 显示地幔源区受到来自俯冲板片沉积物熔体的交代, 花岗闪长岩参与交代的沉积物熔体小于5%。这些都

表3 改则地区嘎布扎花岗闪长岩稀土和微量元素组成( $10^{-6}$ )  
Table 3 Rare earth and trace element analyses of the granodiorite( $10^{-6}$ )

样品号	P35-10H <sub>2</sub>	P35-11H <sub>1</sub>	P35-11H <sub>2</sub>	P35-11H <sub>3</sub>	P35-1H	P35-4H <sub>1</sub>	P35-8H <sub>2</sub>	P35-9H
La	50.00	46.81	42.33	54.08	39.69	63.87	46.38	59.16
Ce	98.37	92.03	84.52	106.70	78.13	126.00	91.61	116.40
Pr	11.19	10.60	9.80	12.18	9.02	14.33	10.62	13.21
Nd	42.43	40.39	37.34	45.85	34.25	53.80	40.35	50.06
Sm	7.59	7.34	7.02	8.25	6.59	9.65	7.52	9.17
Eu	1.88	1.89	1.81	1.94	1.62	2.12	1.92	2.18
Gd	5.92	6.01	5.71	6.40	5.48	8.34	6.02	7.24
Tb	0.79	0.79	0.79	0.85	0.79	1.24	0.80	0.97
Dy	4.29	4.26	4.11	4.43	4.49	7.18	4.22	5.20
Ho	0.78	0.77	0.74	0.79	0.85	1.37	0.75	0.95
Er	2.14	2.05	1.97	2.08	2.43	3.79	2.00	2.55
Tm	0.30	0.29	0.28	0.30	0.37	0.55	0.28	0.36
Yb	2.03	1.91	1.83	1.98	2.56	3.67	1.78	2.31
Lu	0.30	0.28	0.28	0.29	0.39	0.54	0.26	0.33
Y	22.29	21.74	20.57	22.09	25.39	38.24	21.10	26.01
∑REE	228.03	215.43	198.52	246.11	186.64	296.46	214.52	270.08
δ Eu	0.83	0.85	0.85	0.79	0.80	0.71	0.85	0.79
(La/Yb) <sub>N</sub>	16.42	16.32	15.40	18.20	10.36	11.61	17.37	17.07
Rb	99.67	114.60	89.47	88.13	112.00	111.10	86.29	79.75
Sr	670.10	718.00	650.30	646.20	570.00	602.90	711.10	727.90
Ba	553.50	618.70	534.80	521.30	589.40	636.70	583.50	550.40
Th	14.40	13.27	12.30	16.08	11.96	19.08	13.43	16.30
U	2.55	2.61	2.42	3.58	3.58	3.10	2.51	2.82
Nb	21.17	24.11	19.43	20.45	21.29	23.33	22.52	23.59
Ta	1.32	1.55	1.20	1.34	1.88	1.58	1.66	1.39
Zr	286.50	300.80	291.30	326.20	248.20	387.30	289.30	412.70
Hf	7.19	7.52	7.38	8.17	6.58	9.49	7.06	9.88
Co	6.87	7.33	7.01	7.04	5.49	9.09	7.11	8.74
Ni	6.59	11.39	7.57	7.70	6.42	9.07	11.30	7.79
Cr	15.28	21.33	17.19	20.67	14.41	23.57	15.96	16.66
V	52.27	53.39	52.31	54.74	38.21	66.95	45.71	65.87
Sc	7.12	7.22	7.49	7.92	5.78	10.64	6.29	8.99
Li	43.05	112.80	58.54	47.77	53.79	55.82	36.65	49.41
Cs	5.17	8.93	6.04	5.26	7.20	6.29	5.41	8.64
Ga	23.19	23.98	23.31	23.10	21.77	24.58	22.63	24.71
P	947	978	1029	1163	886	1223	873	1299
K	21984	22431	19908	19572	25211	22463	19323	17272
Ti	3505	3758	3585	3589	3221	4848	3437	4596
Nb/Ta	16.04	15.55	16.2	15.26	11.32	14.77	13.57	16.97
Ce/Pb	4.49	3.57	4.33	5.24	2.71	6.76	5.01	7.97
Nb/U	8.3	9.23	8.03	5.71	5.95	7.53	8.97	8.37

注: 中国科学院青藏高原研究所完成。

说明嘎布扎花岗闪长岩形成于岛弧环境, 岩浆源区有俯冲沉积物熔体的混入。

显然如果仅仅是上述地幔与地壳熔体的混合形成的母岩浆直接结晶, 难以解释现今观察到的微量元素地球化学特征。嘎布扎花岗闪长岩亏损Nb、

Ta、P、Ti和Eu的地球化学特征指示其母岩浆经历了分离结晶作用。例如, Nb、Ta和Ti的亏损指示了富钛矿物相(如钛铁矿/或金红石)的分离, 而P的强烈亏损表明发生了磷灰石的分离结晶, Eu的亏损与斜长石和/或钾长石的分离结晶作用有关, Sr和Ba的



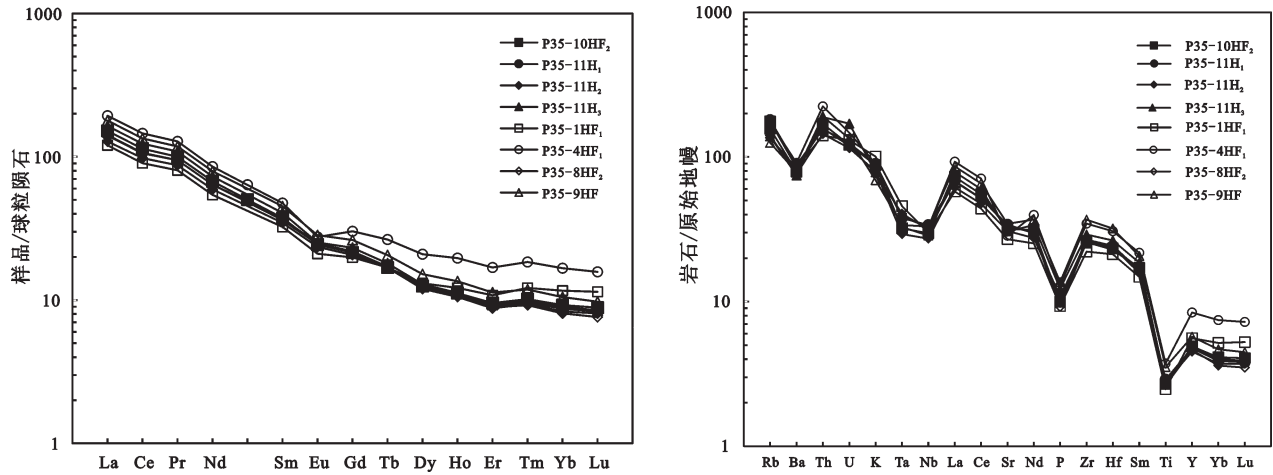


图7 花岗闪长岩的稀土元素球粒陨石标准化和微量元素原始地幔标准化图解<sup>[30]</sup>

Fig.7 Chondrite-normalized rare earth elements and primitive Mantle-normalized trace element patterns of the granodiorite<sup>[30]</sup>

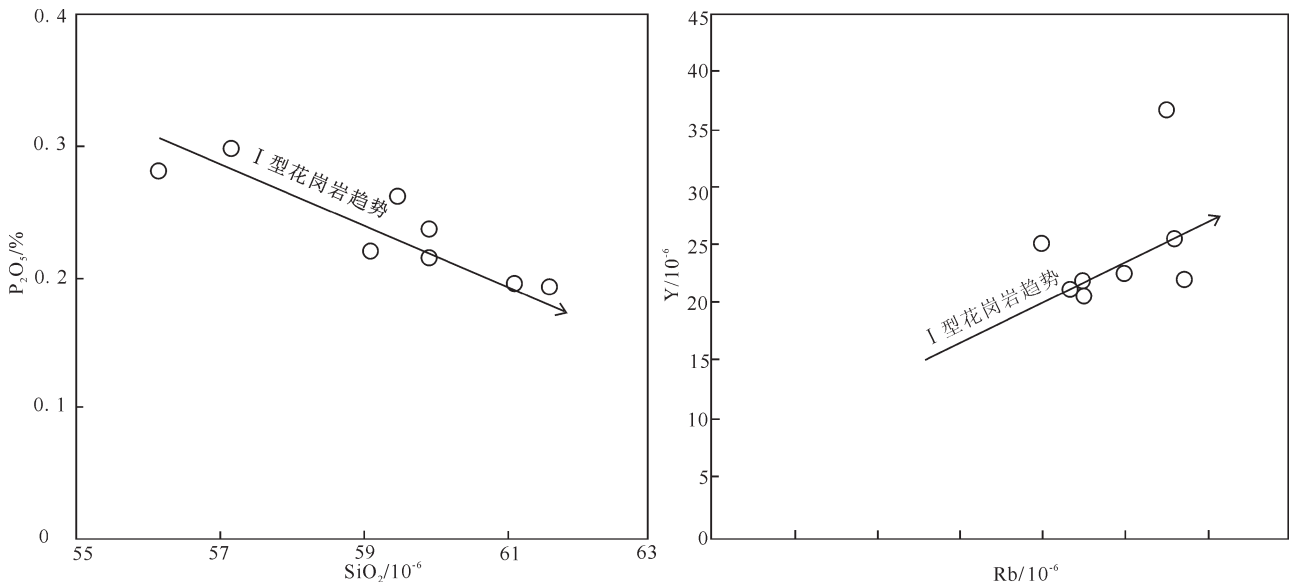


图8 花岗闪长岩岩石类型判别图解

a—P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-SiO<sub>2</sub>图解; b—Y-Rb图解

Fig.8 Discrimination diagrams of granodiorite

a- P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-SiO<sub>2</sub> diagram; b- Y-Rb diagram

亏损进一步支持斜长石和钾长石的分离结晶作用。此外,在 Ta/Yb-Th/Yb 比值图(图 9-d)上,样品均落在活动大陆边缘内且靠近分离结晶线附近,说明其经历了一定程度的分离结晶作用。

因此,嘎布扎花岗闪长岩很可能是陆壳物质、俯冲沉积物与幔源楔等不同性质岩浆的混合,并经历一定程度的分离结晶作用形成。

### 4.3 形成环境与意义

嘎布扎花岗闪长岩为钙碱性系列火山岩,富集

轻稀土元素,亏损重稀土元素,微量元素地球化学特征显示其富集大离子不相容元素 Rb、Ba、K、Th、U,亏损高场强元素 Nb、Ta、P 和 Ti,符合岛弧型岩作用的基本特征。在构造环境判别图(Rb-(Y+Nb)、Nb-Y)中,投点均落入岛弧型岩浆岩环境(VAG)(图 10-a、b)。此外,在 R<sub>1</sub>-R<sub>2</sub><sup>[44]</sup>因子判别图中,样品均落入碰撞前阶段(图 10-c),进一步证实了花岗闪长岩形成于俯冲环境。因此,改则嘎布扎花岗闪长岩(143.8±0.5) Ma 是形成于俯冲环境的岛弧岩浆岩。

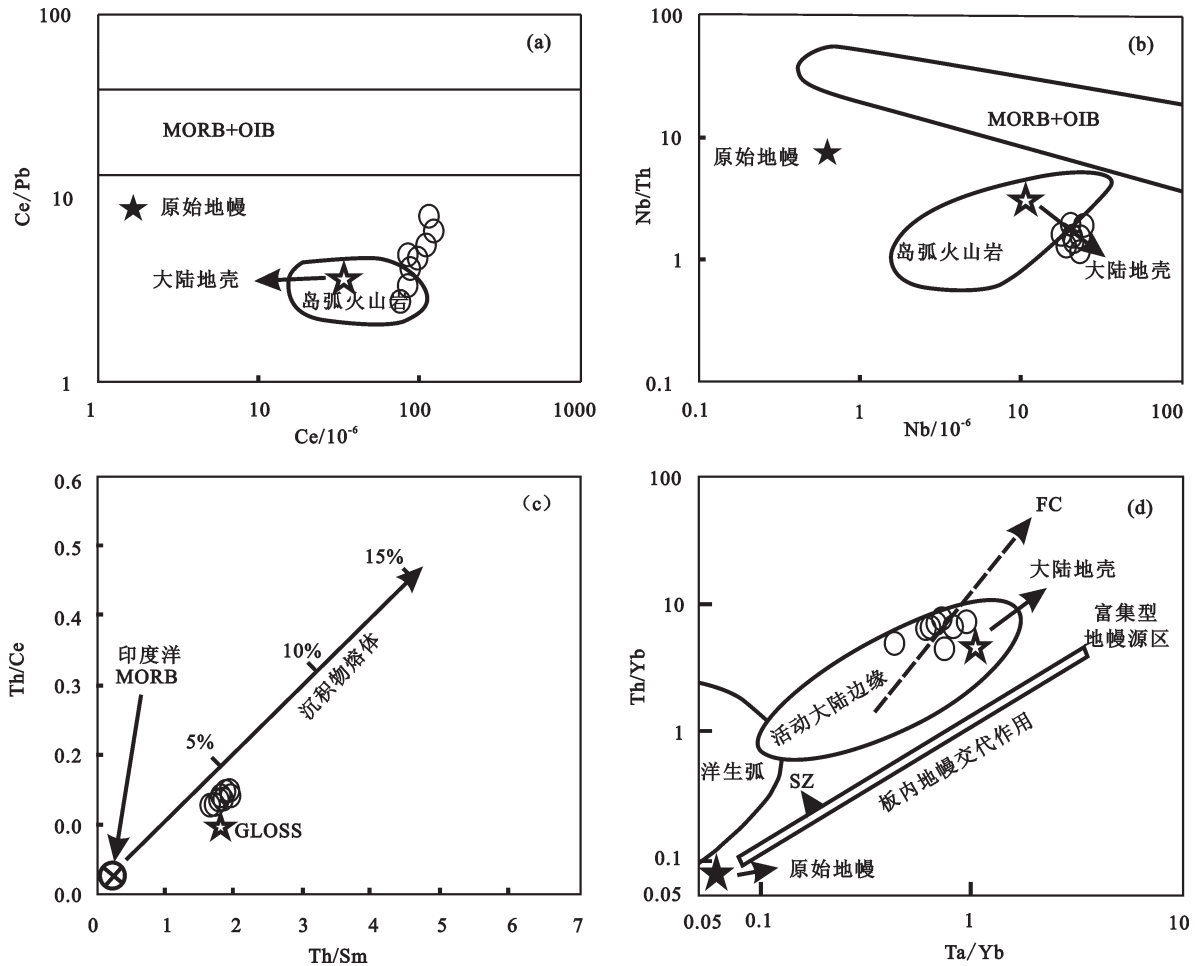


图9 西藏改则嘎不扎花岗闪长岩微量元素图解

a— Ce—Ce/Pb 图解; b— Nb—Nb/Th 图解(底图据[39], 其中原始地幔据[40], 大陆地壳、MORB+OIB 和岛弧型火山岩区域据[41]); c— Th/Sm—Th/Ce 图解(底图据[32]; 其中图中标有沉积物熔体的箭头线为沉积物熔体与印度洋 MORB 地幔的混合线, 线上的百分数代表沉积物熔体所占的百分比; 印度洋 MORB 据[42]; GLOSS 据[43]); d— Ta/Yb—Th/Yb 图解(底图据[39]; 其中原始地幔据[40], 大陆地壳、MORB+OIB 和岛弧型火山岩区域据[41], 图中 FC 和 SZ 分别指结晶分离作用和俯冲区域)

Fig.9 Trace elements diagram of the granodiorite in Gabuzha, Gerze, Tibet

a— Ce—Ce/Pb diagram; b— Nb—Nb/Th diagram (after [39], Primitive mantle data [40], crust data, MORB+OIB and volcanic arc basalts data after[41]); c— Th/Sm—Th/Ce diagram (after [32]; the arrow of sediment melt represents the mixing line of India Ocean MORB mantle and sediment melt, the percentage represents the percentage of sediment melt, after [42]; GLOSS data after [43]); d— Ta/Yb—Th/Yb diagram (after [39]; Primitive mantle data [40], crust data, MORB, OIB and volcanic arc basalts data after [41], the arrow of FC and SZ represents fractional crystallization and subduction zone)

最近的研究表明, 班公湖—怒江中特提斯洋从中二叠世一直持续到中白垩世<sup>[7, 18, 19]</sup>。晚侏罗世至早白垩世班公湖—怒江洋持续向北俯冲<sup>[16, 20, 32, 45]</sup>, 发育大量中酸性侵入体, 构成了羌南活动大陆边缘构造—岩浆弧<sup>[16, 20, 32, 46]</sup>。改则嘎布扎花岗闪长岩即属于该岛弧岩浆岩带, 是班公湖—怒江中特提斯洋晚侏罗世—早白垩世向北俯冲形成的。

## 5 结论

(1) 改则嘎布扎花岗闪长岩的 LA-ICP-MS 锆石 U—Pb 为  $(143.8 \pm 0.5)$  Ma, 代表嘎布扎花岗闪长岩的侵位时代为晚侏罗世—早白垩世之交。

(2) 改则嘎布扎花岗闪长岩属于典型的 I 型钙碱性花岗岩类, 轻稀土富集, Eu 存在弱的负异常, 微

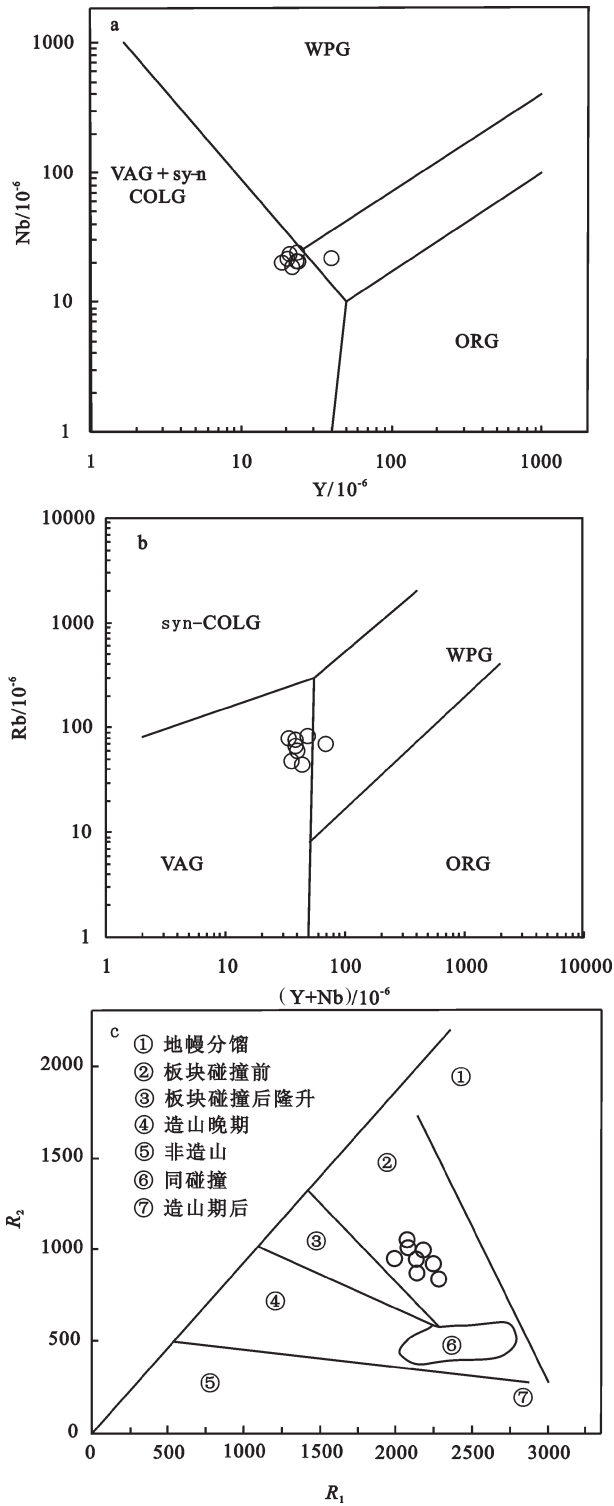


图 10 花崗閃長岩构造环境判别图

a—Y-Nb 图解; b—(Y+Nb)-Rb 图解; c—R<sub>1</sub>-R<sub>2</sub>图解(底图据 [44])

Fig. 10 Discrimination diagrams of tectonic environments of granodiorite

a—Y-Nb diagram; b—(Y+Nb)-Rb diagram; c—R<sub>1</sub>-R<sub>2</sub> diagram (after [44])

量元素中富集 Rb、Ba、K、Th、U 等大离子亲石元素, 而亏损 Nb、Ta、P、Ti 等高场强元素, 与岛弧岩浆岩特征一致, 形成于班公湖—怒江中特提斯洋向北俯冲的岛弧环境。

**致谢:** 侯可军博士和研究生纪国忠、曾江、陶刚、于浩、曾璐、何碧、陈顺、赵君星等在野外和室内研究中给予帮助, 评审专家及责任编辑杨艳老师提出了建设性的修改意见, 在此一并表示感谢。

**参考文献(References):**

[1] 西藏自治区地质矿产局. 西藏自治区区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 1993, 1-707.  
Tibet Autonomous Region Bureau of Geology and Mineral Resources. Regional Geology of Tibet Autonomous Region[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1993, 1-707(in Chinese with English abstract).

[2] Yin A, Harrison T M. Geologic evolution of the Himalayan - Tibetan orogen[J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 2000, 28(1): 211-280.

[3] 莫宣学. 青藏高原地质研究的回顾与展望[J]. 中国地质, 2010, 37(4): 841-853.  
Mo Xuanxue. A review and prospect of Geological researches on the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Geology in China, 2010, 37(4): 841-853(in Chinese with English abstract).

[4] 芮宗瑶, 陆彦, 李光明, 等. 西藏斑岩铜矿的前景展望[J]. 中国地质, 2003, 30(3): 302-308.  
Rui Zongyao, Lu Yan, Li Guangming, et al. Looking forward to the prospects of porphyry copper deposits in Tibet[J]. Geology in China, 2003, 30(3): 302-308(in Chinese with English abstract).

[5] 郭铁鹰, 梁定益, 张宜智, 等. 西藏阿里地质[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1991, 1-464.  
Guo Tiejing, Liang Dingyi, Zhang Yizhi, et al. Geology of Ngari Tibet[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1991, 1-464(in Chinese with English abstract).

[6] Zhang K J, Zhang Y X, Tang X C, et al. Late Mesozoic tectonic evolution and growth of the Tibetan plateau prior to the Indo-Asian collision[J]. Earth Science-Reviews, 2012, 114: 236-249.

[7] Zhang Y. X., Li Z. W., Zhu L D, et al. Newly discovered eclogites from the Bangong Meso-Tethyan suture zone (Gaize, Tibet, western China): Mineralogy, geochemistry, geochronology, and tectonic implications[J]. Lithos, under revision

[8] Zhang K. J, Zhang Y X, Li B, et al. Nd isotopes of siliciclastic rocks from Tibet, western China: Constraints on the pre-Cenozoic tectonic evolution[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2007, 256: 604-616.

[9] Zhang K J, Zhang Y X, Tang X C, et al. First report of eclogites from central Tibet, China: evidence for ultradeep continental



- subduction prior to the Cenozoic India – Asian collision[J]. *Terra Nova*, 2008, 20: 302–308.
- [10] Zhang K J, Zhang Y X, Xia B D, et al. Temporal variations of the Mesozoic sandstone composition in the Qiangtang block, northern Tibet (China): Implications for provenance and tectonic setting[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2006, 76: 1035–1048.
- [11] Kapp P, Murphy M A, Yin A, et al. Mesozoic and Cenozoic tectonic evolution of the Shiquanhe area of western Tibet[J]. *Tectonics*, 2003, 22(4): 1029.
- [12] 曲晓明, 辛洪波. 藏西班牙公湖斑岩铜矿带的形成时代与成矿构造环境[J]. *地质通报*, 2006, 25(7): 792–799.  
Qu Xiaoming, Xin Hongbo. Ages and tectonic environment of the Bangong Co porphyry copper belt in western Tibet, China[J]. *Geological Bulletin of China*, 2006, 25(7): 792–799(in Chinese with English abstract).
- [13] 廖六根, 曹圣华, 肖业斌, 等. 班公湖—怒江结合带北侧陆缘火山—岩浆弧带的厘定及其意义[J]. *沉积与特提斯地质*, 2008 (2): 163–170.  
Liao Liugen, Cao Shenghua, Xiao Yebin, et al. The delineation and significance of the continental – margin volcanic – magmatic arc zone in the northern part of the Bangong – Nujiang suture zone[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 2008, (2): 163–170(in Chinese with English abstract).
- [14] 李光明, 段志明, 刘波, 等. 西藏班公湖—怒江结合带北缘多龙地区侏罗纪增生杂岩的特征及意义[J]. *地质通报*, 2011, 30(5): 1256–1260.  
Li Guangming, Duan Zhiming, Liu Bo, et al. The discovery of Jurassic accretionary complexes in Duolong area, northern Bangong Co – Nujiang suture zone, Tibet, and its geologic significance[J]. *Geological Bulletin of China*, 2011, 30(5): 1256–1260(in Chinese with English abstract).
- [15] 李金祥, 李光明, 秦克章, 等. 班公湖带多不杂富金斑岩铜矿床斑岩—火山岩的地球化学特征与时代: 对成矿构造背景的制约[J]. *岩石学报*, 2008, 24(3): 531–543.  
Li Jinxiang, Li Guangming, Qin Kezhang, et al. Geochemistry of porphyries and volcanic rocks and ore-forming geochronology of Duobuza gold-rich porphyry copper deposit in Bangonghu belt, Tibet: Constraints on metallogenic tectonic settings[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2008, 24(3): 531–543(in Chinese with English abstract).
- [16] Zhang Y X, Li Z W, Zhang K J, et al. Two phases northern subduction of the Bangong – Nujiang Meso – Tethyan ocean: Geochronology, geochemistry and isotopes of the Gaize middle Mesozoic magmatic arc rocks in central Tibet, western China[J]. Under revision.
- [17] Kapp P, Yin A, Harrison T M, Ding L. Cretaceous – Tertiary shortening, basin development, and volcanism in central Tibet[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2005, 117(7/8): 865–878.
- [18] Zhang Y X, Zhang K J, Li B, et al. Zircon SHRIMP U – Pb geochronology and petrogenesis of the plagiogranites from the Lagkor Lake ophiolite, Gerze, Tibet, China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2007, 52(5): 651–659.
- [19] Zhang K J, Xia B, Zhang Y X, et al. Central Tibetan Meso – Tethyan oceanic plateau [J]. *Lithos*, 2014, doi: 10.1016/j.lithos.2014.09.004.
- [20] 张玉修. 班公湖—怒江缝合带中西段构造演化[D]. 博士论文, 中国科学院广州地球化学研究所, 2007, 1–257.  
Zhang Y X. Tectonic Evolution of the Middle – Western Bangong – Nujiang Suture, Tibet[D]. Doctoral Dissertation, Guangzhou Institute of Geochemistry of the Chinese Academy of Science, 2007: 1–257 (in Chinese with English abstract).
- [21] 莫宣学, 董国臣, 赵志丹, 等. 西藏冈底斯带花岗岩的时空分布特征及地壳生长演化信息[J]. *高校地质学报*, 2006, 11(10): 281–290.  
Mo Xuanxue, Dong Guochen, Zhao Zhidan, et al. Spatial and Temporal Distribution and Characteristics of Granitoids in the Gangdese, Tibet and Implication for Crustal Growth and Evolution[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2006, 11 (10): 281–290(in Chinese with English abstract).
- [22] 刘伟, 李奋其, 杨晓勇, 等. 西藏南木林县罗扎地区早白垩世流纹岩锆石 U – Pb 年龄及地球化学特征[J]. *中国地质*, 2012, 39(5): 1151–1161.  
Liu Wei, Li Fenqi, Yang Xiaoyong, et al. Zircon U – Pb age and geochemistry of Early Cretaceous rhyolite in Luozha area of Namling County, Tibet[J]. *Geology in China*, 2012, 39(5): 1151–1161(in Chinese with English abstract).
- [23] 耿全如, 潘桂棠, 王立全, 等. 班公湖—怒江带羌塘地块特提斯演化与成矿地质背景[J]. *地质通报*, 2011, 31(8): 1261–1274.  
Geng Quanru, Pan Guitang, Wang Liquan, et al. Tethyan evolution and metallogenic geological background of the Bangong Co – Nujiang belt and the Qiangtang massif in Tibet[J]. *Geological Bulletin of China*, 2011, 31(8): 1261 – 1274(in Chinese with English abstract).
- [24] 许志琴, 杨经绥, 李海兵, 等. 青藏高原与大陆动力学——地体拼合、碰撞造山及高原隆升的深部驱动力[J]. *中国地质*, 2006, 33(2): 221–238.  
Xu Zhiqin, Yang Jingsui, Li Haibing, et al. The Qinghai – Tibet plateau and continental dynamics: A review on terrain tectonics, collisional orogenesis, and processes and mechanisms for the rise of the plateau[J]. *Geology in China*, 2006, 33(2): 221 – 238(in Chinese with English abstract).
- [25] Nasdala L, Hofmeister W, Norberg N, et al. Zircon M257—a Homogeneous Natural Reference Material for the Ion Microprobe U – Pb Analysis of Zircon[J]. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 2008, 32(3): 247–265.
- [26] Williams I S. U – Th – Pb geochronology by ion microprobe[M] // Mckibben M A, Shanks W C, Ridley W I. Applications of Microanalytical Techniques to Understanding Mineralizing

- Processes. Reviews in Economic Geology 7. Socorro (NM, United States): Society of Economic Geologists, 1998: 1–35.
- [27] Le Maitre R W, Bateman P, Dudek A, et al. A Classification of Igneous Rocks and Glossary of Terms: Recommendations of the IUGS Commission on the Systematics of Igneous Rocks[M]. 1989.
- [28] Hugh R, Rollinson R. Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation, Interpretation[M]. Singapore: Longman Singapore Publishers (Pte) Ltd. 1993: 213–265.
- [29] Maniar P D, Piccoli P M. Tectonic discrimination of granitoids[J]. Geological Society of America Bulletin, 1989, 101(5): 635–643.
- [30] Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes[J]. Geological Society, London, Special Publications, 1989, 42(1): 313–345.
- [31] 江军华, 王瑞江, 曲晓明, 等. 青藏高原西部班公湖岛弧带特提斯洋盆闭合后的地壳伸展作用[J]. 地球科学, 2011, 36(6): 1021–1032.
- Jiang Junhua, Wang Ruijiang, Qu Xiaoming, et al. Crustal extension of the Bangong Lake Arc Zone, Western Tibetan Plateau, after the closure of the Tethys oceanic basin[J]. Earth Science, 2011, 36(6): 1021 – 1032(in Chinese with English abstract).
- [32] 杜德道, 曲晓明, 王根厚, 等. 西藏班公湖—怒江缝合带西段中特提斯洋盆的双向俯冲: 来自岛弧型花岗岩锆石 U–Pb 年龄和元素地球化学的证据[J]. 岩石学报, 2011, 27(10): 1993–2002.
- Du Dedao, Qu Xiaoming, Wang Genhou, et al. Bidirectional subduction of the Middle Tethys oceanic basin in the west segment of Bangonghu – Nujiang suture, Tibet: Evidence from zircon U – Pb LAICPMS dating and petrogeochemistry of arc granites[J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27(7): 1993 – 2002(in Chinese with English abstract).
- [33] Wolf M B, London D. Apatite dissolution into peraluminous haplogranitic melts: an experimental study of solubilities and mechanisms[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1994, 58(19): 4127–4145.
- [34] Li X H, Li W X, Li Z X. On the genetic classification and tectonic implications of the Early Yanshanian granitoids in the Nanling Range, South China[J]. Chinese Science Bulletin, 2007, 52(14): 1873–1885.
- [35] Barth M G, McDonough W F, Rudnick R L. Tracking the budget of Nb and Ta in the continental crust[J]. Chemical Geology, 2000, 165(3): 197–213.
- [36] Pfänder J A, Münker C, Stracke A, et al. Nb/Ta and Zr/Hf in ocean island basalts—implications for crust–mantle differentiation and the fate of Niobium[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2007, 254(1): 158–172.
- [37] Hofmann A W. Nb in Hawaiian magmas: constraints on source composition and evolution[J]. Chemical Geology, 1986, 57(1): 17–30.
- [38] Taylor S R, McLennan S M. The Continental Crust: Its Composition and Evolution[M]. Oxford: Blackwell Scientific Publication, 1985.
- [39] Boztuğ D, Harlavan Y, Arehart G B, et al. K–Ar age, whole–rock and isotope geochemistry of A–type granitoids in the Divriği–Sivas region, eastern–central Anatolia, Turkey[J]. Lithos, 2007, 97(1): 193–218.
- [40] Hofmann A W. Chemical differentiation of the Earth: the relationship between mantle, continental crust, and oceanic crust[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1988, 90(3): 297–314.
- [41] Schmidberger S S, Hegner E. Geochemistry and isotope systematics of calc–alkaline volcanic rocks from the Saar–Nahe basin (SW Germany) – implications for Late – Variscan orogenic development[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1999, 135(4): 373–385.
- [42] Hofmann A W. Recycled ocean crust and sediment in Indian Ocean MORB[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1997, 147(1): 93–106.
- [43] Plank T, Langmuir C H. The chemical composition of subducting sediment and its consequences for the crust and mantle[J]. Chemical Geology, 1998, 145(3): 325–394.
- [44] Batchelor R A, Bowden P. Petrogenetic interpretation of granitoid rock series using multicationic parameters[J]. Chemical Geology, 1985, 48(1): 43–55.
- [45] 莫宣学, 潘桂棠. 从特提斯到青藏高原形成: 构造–岩浆事件的约束[J]. 地学前缘, 2006, 13(6): 43–51.
- Mo Xuanxue, Pan Guitang. From the Tethys to the formation of the Qinghai – Tibet Plateau: constrained by tectono – magmatic events[J]. Earth Science Frontiers, 2006, 13(6): 43–51(in Chinese with English abstract).
- [46] 陈华安, 祝向平, 马东方, 等. 西藏波龙斑岩铜金矿床成矿斑岩年代学、岩石化学特征及其成矿意义[J]. 地质学报, 2013, 87(10): 1593–1611.
- Chen Huaan, Zhu Xiangping, Ma Dongfang, et al. Geochronology and Geochemistry of the Bolong Porphyry Cu–Au Deposit, Tibet and Its Mineralizing Significance[J]. Acta Geologica Sinica, 2013, 87(10): 1593–1611(in Chinese with English abstract).