

# 西藏洞错埃达克质火山岩LA-ICP-MS锆石U-Pb年龄及其构造意义

闫国川<sup>1,2</sup>, 王保弟<sup>2</sup>, 刘 函<sup>2</sup>, 王立全<sup>2</sup>, 周 放<sup>1,2</sup>

YAN Guochuan<sup>1,2</sup>, WANG Baodi<sup>2</sup>, LIU Han<sup>2</sup>, WANG Liquan<sup>2</sup>, ZHOU Fang<sup>1,2</sup>

1. 中国地质大学, 北京100083;

2. 中国地质调查局成都地质调查中心, 四川 成都 610081

1. *China University of Geosciences, Beijing 100083, China;*

2. *Chengdu Center of Geological Survey, CGS, Chengdu 610081, Sichuan, China*

**摘要:**班公湖-怒江缝合带是青藏高原的主要缝合带之一,其闭合时限还存在争议,制约了班公湖-怒江特提斯洋演化历史的研究。在班公湖-怒江缝合带洞错地区新识别出一套早白垩世晚期的粗安岩,LA-ICP-MS测得其锆石<sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U年龄为102.0±1.9Ma,岩石高SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、富Na及高的Sr/Y值(25.2~42.2),贫Nb(11.1×10<sup>-6</sup>~16.6×10<sup>-6</sup>)、Y(11.7×10<sup>-6</sup>~18.3×10<sup>-6</sup>)和Yb(1.06×10<sup>-6</sup>~1.77×10<sup>-6</sup>),轻、重稀土元素分异明显,具有与埃达克质岩相似的地球化学特征,同时具有高Mg<sup>#</sup>的特点(Mg<sup>#</sup>=50.0~54.1)。认为洞错高Mg<sup>#</sup>埃达克质岩很可能是残留洋壳部分熔融上升过程中交代地幔的产物,形成于板内构造环境。由此推测,洞错早白垩世晚期埃达克质岩的形成与班公湖-怒江洋盆闭合后拉萨地块与羌塘地块碰撞有关,结合区域地质资料,认为班公湖-怒江特提斯洋闭合时限应该在102Ma之前。

**关键词:**西藏洞错;班公湖-怒江特提斯洋;粗安岩;埃达克质岩;LA-ICP-MS锆石U-Pb年龄;残余洋壳熔融

**中图分类号:**P588.14;P597+.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-2552(2017)10-1772-11

**Yan G C, Wang B D, Liu H, Wang L Q, Zhou F. LA-ICP-MS zircon U-Pb ages of adakitic rocks in Dongco area, Tibet, and their tectonic implications. *Geological Bulletin of China*, 2017, 36(10):1772-1782**

**Abstract:** The Bangong Co-Nujiang suture zone is one of the main suture zones in the Tibetan Plateau. Its closure time has been controversial, which causes some restrictions to the study of the evolution of the Tibetan Plateau. This paper deals with the discovered trachyandesite which occurs in Bangong Co-Nujiang suture zone. LA-ICP-MS zircon U-Pb analyses suggest that the trachyandesite was formed at 102±1.9Ma, and that the volcanic rocks were formed in late Early Cretaceous. They are characterized by adakite-like rock: high Na content, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Mg<sup>#</sup> and high Sr/Y values (25.2~42.2), and low Nb (11.1×10<sup>-6</sup>~16.6×10<sup>-6</sup>), Y (11.7×10<sup>-6</sup>~18.3×10<sup>-6</sup>) and Yb (1.06×10<sup>-6</sup>~1.77×10<sup>-6</sup>) values. The differentiation between HREE and LREE is obvious. The authors hold that high Mg<sup>#</sup> adakite-like rock (Mg<sup>#</sup>=(50.0~54.1)) resulted from the reaction between the rising melt of remnant oceanic crust and the mantle wedge. Therefore, the origin of Dongco adakite-like rocks may be related to the collision between Lasha and Qiangtang blocks after the closure of the Bangong Co-Nujiang Ocean. Based on these data, the authors consider that Bangong Co-Nujiang Ocean had been closed before 102Ma.

**Key words:** Dongco area; Bangong Co-Nujiang Ocean; trachyandesite; adakitic rock; LA-ICP-MS zircon U-Pb ages; remnant oceanic crust

收稿日期:2016-05-06;修订日期:2017-03-15

资助项目:中国地质调查局项目《西南三江有色金属资源基地调查》(编号:DD20160016)和国家自然科学基金项目《羌塘中部泥盆纪-石炭纪岩浆作用对古特提斯洋构造演化的制约》(批准号:41773026)、《藏南仲巴地区始新世花岗岩质岩石成因及其对拉萨地壳加厚的启示》(批准号:41603038)

作者简介:闫国川(1988-),男,在读硕士生,地球化学专业。E-mail:dizhixiaochuan@163.com

通讯作者:王保弟(1975-),男,博士,研究员,从事青藏高原地质研究。E-mail:baodiwang@163.com; wbaodi@cgs.cn

班公湖-怒江缝合带是青藏高原北部重要的板块缝合带,是羌塘地块和拉萨地块的界线<sup>[1-2]</sup>,东西断续长逾 3000km,自西向东依次为班公湖-改则段、东巧-安多段及丁青-怒江段<sup>[3-4]</sup>。很多学者对该缝合带进行过大量的研究工作<sup>[5-13]</sup>,多数学者<sup>[14-15]</sup>认为班公湖-怒江洋盆在晚二叠世打开,早一中侏罗世洋壳开始俯冲消减,洋盆一直持续到早白垩世晚期才闭合。由于班怒带自身构造特征的复杂性及规模宏大,班公湖-怒江洋的俯冲极性及其闭合时限至今仍存在较大的争议。

班公湖-怒江洋盆在不同位置闭合时间也不尽相同,在东西段具有一定的穿时性,总体为东早西晚,且在改则-东巧段最晚。在东段,丁青蛇绿岩的时代为晚三叠世,其上的盖层时代为中侏罗世,表明洋盆在早侏罗世已经闭合<sup>[16]</sup>。根据东巧地区的蛇绿岩中发现的晚侏罗世放射虫,推断洋盆闭合时限为晚侏罗世<sup>[17]</sup>。在缝合带中段,塔仁本 OIB 型玄武岩及多玛玄武岩年龄约为 110Ma,说明此时洋壳还没有完全消失<sup>[18]</sup>;申扎-班戈一带出现 110Ma 的碰撞后 A 型花岗岩,表明此时拉萨与羌塘已经发生碰撞,洋盆闭合时代应该为早白垩世晚期;在中部发

现富含白垩纪放射虫的蛇绿岩,其年龄在 108~132Ma 之间,说明洋盆直到晚白垩世才闭合<sup>[19]</sup>;而改则-尼玛段的沉积、构造特征说明,碰撞时间发生在早白垩世<sup>[8]</sup>。

在地质调查中,笔者在洞错蛇绿混杂岩中发现一套早白垩世晚期的火山岩,其位于缝合带中段与西段连接部位(图 1-b)。本文报道该岩石的野外地质特征及锆石 U-Pb 年龄,探讨了岩石成因及其形成的构造环境,阐述了其对于班公湖-怒江洋壳消减闭合时限的制约。

### 1 地质概况

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,由北向南依次是:松潘-甘孜地块、羌塘地块、拉萨地块与喜马拉雅地块<sup>[15]</sup>,中间依次为金沙江缝合带、班公湖-怒江缝合带、雅鲁藏布江缝合带所分割。其中,羌塘地块又被龙木错-双湖缝合带分为北羌塘地块和南羌塘地块(图 1-a)。班公湖-怒江缝合带位于青藏高原中部,从班公湖、洞错向东经东巧、丁青至怒江河谷进入滇西,全长逾 2000km,是

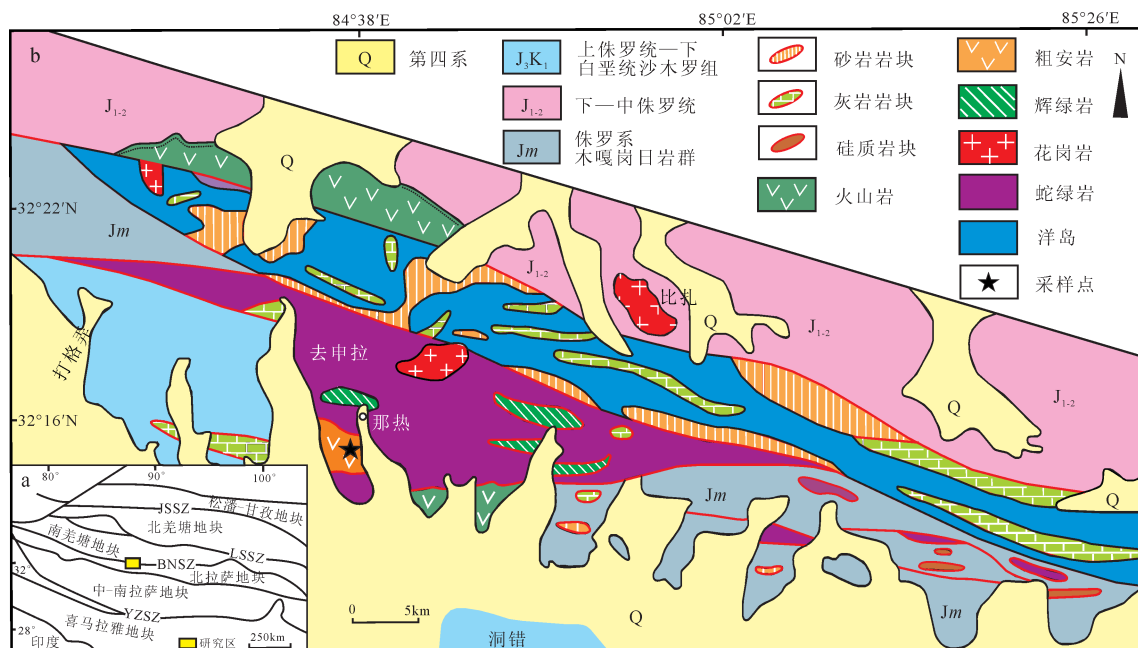


图 1 青藏高原构造格架图(a)和改则县洞错地区地质简图(b)<sup>[20]</sup>

Fig. 1 Tectonic outline map of the Tibetan Plateau (a) and simplified geological map of Dongco ophiolite in Gerze County, Tibet (b)

JSSZ—金沙江缝合带;LSSZ—龙木错-双湖缝合带;BNSZ—班公湖-怒江缝合带;YZSZ—雅鲁藏布江缝合带

拉萨地块与南羌塘板块的构造界线,同时也是冈瓦纳大陆内部特提斯蛇绿岩的东延部分。许多学者根据班公湖-怒江缝合带内蛇绿岩混杂岩中辉长岩、斜长花岗岩的锆石U-Pb年龄和层间硅质岩放射虫生物地层学年龄、构造接触关系等证据<sup>[21-25]</sup>,认为班公湖-怒江洋壳发育时限在晚三叠世-早白垩世期。但也有研究者提出,班公湖-怒江洋壳可能在古生代就已经形成<sup>[10,26]</sup>。洞错蛇绿岩是班公湖-怒江缝合带中出露规模较大、岩石组合较齐全的蛇绿岩块之一,地表形态为楔状体,东西延长约50km,西段最宽处为5~6km,总厚度大于5km。从底到顶依次由地幔橄榄岩、镁铁-超镁铁质堆晶杂岩、基性熔岩及放射虫硅质岩组成,但因构造肢解作用通常只可见2~3个岩石单元。

本次研究的洞错火山岩位于西藏改则县洞错北侧,产于洞错蛇绿混杂岩内(图1-b),火山岩南、北两侧皆与变质橄榄岩或碳酸盐化超基性岩呈断层接触。主要岩石类型为粗安岩与凝灰岩,野外观察二者为整合接触关系(图2-a、c),代表了不同火山喷发韵律。粗安岩在镜下呈斑状结构;斑晶成分主

要为长石,次为角闪石,含有少量石英,长石多为半自形柱状;角闪石呈长柱状,长宽比为2~4,粒径大小一般在0.1~2mm之间,个别粒径可达4mm,具有一定的蚀变;基质具安山结构,主要由细小的长石和石英组成,有少量火山玻璃、磁铁矿、磷灰石等(图2-b)。

## 2 实验方法

本次选取洞错火山岩中的粗安岩样品(11DC-9)中的锆石为U-Pb同位素测定对象。锆石的挑选与分选由河北省廊坊区域地质调查研究院地质实验室完成。锆石在双目镜下按晶形使用双面胶粘在玻璃基板上,使用环氧树脂凝固成靶,然后去掉玻璃基板,在细砂纸上粗磨锆石晶体揭露出来,之后抛光制成样品靶,通过阴极发光(CL)图像揭示锆石内部结构,锆石CL照相由北京铀年领航科技有限公司完成。锆石U-Pb同位素在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室(GPMR)用LA-ICP-MS测得,锆石U-Pb同位素测定利用LA-ICP-MS完成,LA-ICP-MS为Agi-

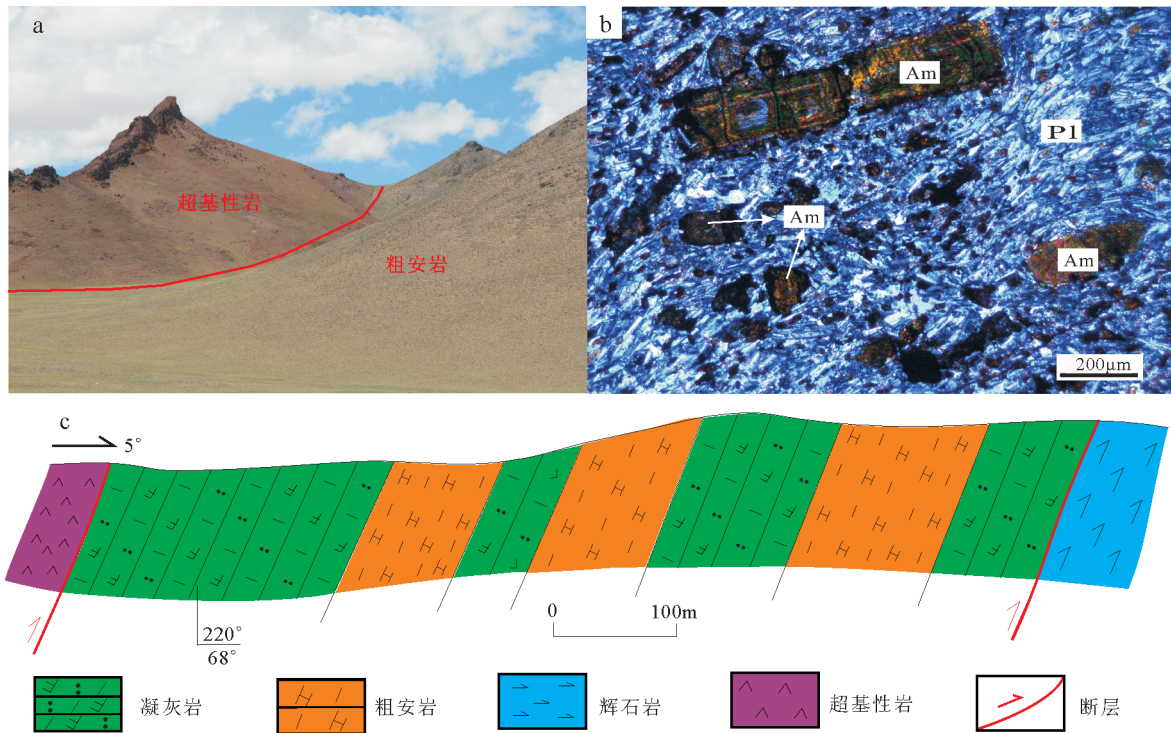


图2 洞错粗安岩野外特征(a)、显微照片(正交偏光)(b)及剖面图(c)

Fig. 2 Field characteristics (a), photomicrograph (b) and geological section (c) of the trachyandesite in the Dongco area

Am—角闪石;Pl—长石

lent 7500a, 激光剥蚀系统为配备有 193nm ArF 准分子激光器的 GeoLas 2005, 每个时间分辨分析数据包括 20~30s 的空白信号和 50s 的样品信号, 测定斑束直径为 32 μm, 详细的仪器操作条件和数据处理方法见 Liu 等<sup>[27-28]</sup>。

样品主量元素分析在成都地质矿产研究所采用 XRF (Rigaku RIX 2100 型) 玻璃熔饼法完成, 分析的精度优于 4%。微量元素分析在中国科学院广州地球化学研究所采用酸溶法利用 Agilent 7500a 型 ICP-MS 完成, 分析精度和准确度一般优于 5%。详细的测定方法和分析流程参考 Chen 等<sup>[29]</sup>。

### 3 测定结果

#### 3.1 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素

锆石颜色为浅灰色到无色, 自形程度较好, 形态为短柱状-长柱状, 长为 100~130 μm, 长宽比为 2~3。在锆石 CL 图像中, 部分可见残留核部发育 (图 3)。锆石的 U 和 Th 含量分别为  $104 \times 10^{-6}$ ~ $1649 \times 10^{-6}$  和  $14.6 \times 10^{-6}$ ~ $8384 \times 10^{-6}$ , Th/U 值为 0.05~4.17, 表现出岩浆锆石的特点。

共测得 20 颗锆石的 U-Pb 同位素数据, 结果列于表 1。其中 1、6、15、18 号点谐和度较差 (谐和度小于 40%), 在处理数据时将其舍弃 (表 1); 其余 16

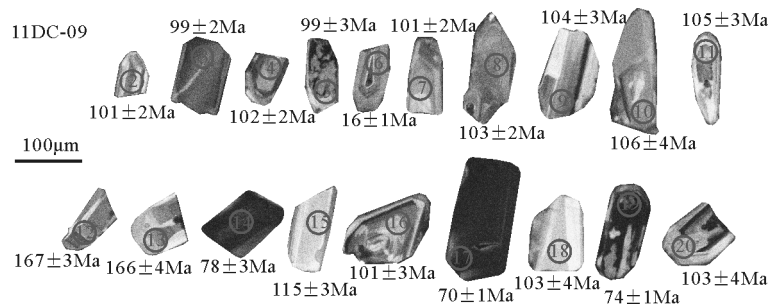


图 3 洞错粗安岩 (11DC-9) 锆石阴极发光图像

Fig. 3 Cathodoluminescence images showing the internal structures of the analyzed zircon grains from the trachyandesite in the Dongco area

个点所作的 U-Pb 年龄谐和图可见 3 组年龄 (图 4-a), 其中 14、17、19 号点为一组, 年龄加权平均值为  $70 \pm 2.6$  Ma, 但从这 3 颗锆石的 CL 图像看, 其发光性与其他锆石存在很大差异, 色调呈深灰色, 明显不同于其他族群的浅灰色色调, 笔者认为, 这很可能是样品在分选时交叉污染所致, 其可信度较低 (图 4-a); 12、13 号点为一组, 其  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄明显偏大, 可能属于继承锆石; 2~5、7~11、16、20 号点为一组, 其  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄范围为 99~104 Ma, 年龄加权平均值为  $102 \pm 1.9$  Ma (MSWD=0.31, n=11) (图 4-b), 代表洞错火山岩的形成年龄。

#### 3.2 元素地球化学特征

洞错火山岩 5 件样品的主量、微量元素列于表 2。主量元素方面, 粗安岩  $\text{SiO}_2$  含量为 59.82%~64.98%,

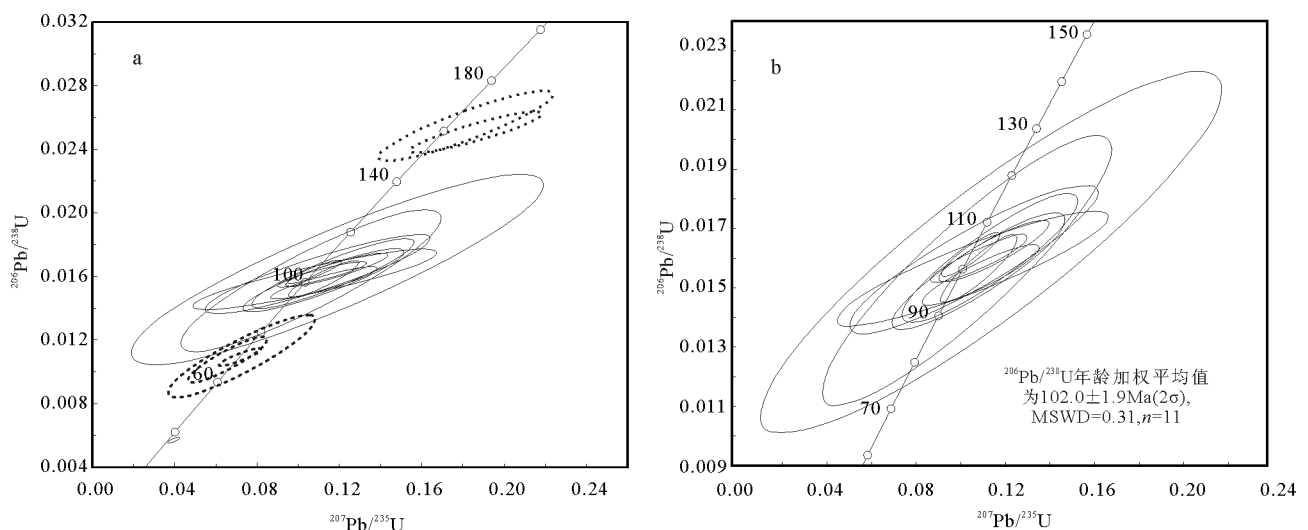


图 4 洞错粗安岩锆石 U-Pb 谐和图

Fig. 4 U-Pb concordia diagrams of zircon grains from the trachyandesite in the Dongco area

表1 洞错粗安岩LA-ICP-MS锆石U-Th-Pb同位素分析结果  
Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Th-Pb isotope analytical results of trachyandesite from Dongco area

测点号	含量/ $10^{-6}$			Th/U	同位素比值(已扣除普通铅)						年龄/Ma				谐和度
	Pb	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 $\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 $\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 $\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 $\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 $\sigma$	
1	1.53	300	284	1.06	0.298	0.026	0.097	0.007	0.003	0.000	17	1	36	2	38%
2	6.16	33.5	343	0.098	0.050	0.004	0.111	0.009	0.016	0.000	103	2	152	12	95%
3	2.71	82.9	132	0.626	0.059	0.033	0.117	0.042	0.016	0.002	104	16	103	14	92%
4	18.5	241	1016	0.237	0.047	0.002	0.108	0.005	0.016	0.000	104	2	103	4	99%
5	30.3	362	1936	0.187	0.053	0.003	0.112	0.007	0.016	0.000	101	3	116	10	93%
6	9.92	2378	3050	0.780	0.050	0.003	0.018	0.001	0.003	0.000	17	0	16	1	35%
7	4.52	14.6	274	0.054	0.055	0.005	0.112	0.011	0.016	0.000	99	3	176	18	91%
8	6.42	44.8	359	0.125	0.053	0.004	0.118	0.010	0.016	0.000	104	3	114	17	91%
9	3.49	128	163	0.789	0.061	0.012	0.116	0.016	0.016	0.001	103	6	110	9	91%
10	1.82	30.2	104	0.290	0.049	0.005	0.112	0.016	0.016	0.001	100	5	120	14	93%
11	3.76	113	184	0.612	0.049	0.011	0.108	0.022	0.016	0.001	103	6	97	21	98%
12	5.71	153	170	0.898	0.054	0.004	0.185	0.013	0.025	0.001	159	3	158	7	91%
13	4.54	111	137	0.816	0.054	0.005	0.180	0.017	0.025	0.001	161	6	161	10	95%
14	28.8	3898	1302	2.99	0.048	0.003	0.072	0.004	0.011	0.000	70	1	74	2	99%
15	2.88	83.1	106	0.784	0.155	0.019	0.355	0.044	0.016	0.001	103	6	204	20	0%
16	2.87	79.1	136	0.582	0.051	0.012	0.108	0.025	0.016	0.001	101	5	122	23	96%
17	35.2	5183	1585	3.270	0.044	0.006	0.066	0.008	0.011	0.001	69	4	69	6	93%
18	1.12	25.1	55.1	0.455	0.194	0.043	0.317	0.056	0.016	0.001	103	9	176	26	8%
19	52.6	8384	2012	4.17	0.047	0.010	0.072	0.015	0.011	0.001	70	7	72	11	99%
20	99.1	1233	5306	0.232	0.049	0.013	0.106	0.026	0.016	0.002	100	12	104	20	98%

具有高的  $\text{Na}_2\text{O}$  (3.59%~4.17%)、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  (15.52%~16.01%)、 $\text{MgO}$  (2.13%~2.98%) 含量、 $\text{Mg}^\#$  (50.0~54.1) 和低的  $\text{K}_2\text{O}$  (1.74%~2.17%)。在 Nb/Y-Zr/TiO<sub>2</sub> 图解(图5)中,洞错火山岩样品点均落入粗安岩区,与镜下鉴定的结果一致。

洞错粗安岩富集稀土元素,其稀土元素总量( $\Sigma\text{REE}$ )为  $429 \times 10^{-6}$ ~ $509 \times 10^{-6}$ ,平均为  $483 \times 10^{-6}$ 。尤其富集轻稀土元素(La平均为  $124 \times 10^{-6}$ ),在稀土元素球粒陨石标准化配分图解(图6-a)中,所有样品具有近似的变化趋势,表现为轻稀土元素(LREE)富集的右倾型,且轻、重稀土元素显示较强的分馏特征,(La/Yb)<sub>N</sub>=12.0~19.2。粗安岩样品显示弱的负Eu异常, $\delta\text{Eu}$ 值为0.89~0.92。在微量元素原始地幔标准化蛛网图(图6-b)中,洞错粗安岩亏损Nb、Ta、Ti等高场强元素(HFSE),富集Rb、Ba等大离子亲石元素(LILE)及U、Th等元素。

## 4 讨论

### 4.1 洞错粗安岩形成的构造环境

曲晓明等<sup>[12]</sup>在班公湖-怒江缝合带中段发现一套约110Ma的碰撞型花岗岩,并认为班公湖-怒江缝合带中段早白垩世晚期已经处于碰撞后环境。这与前人根据地层及火山岩确定的洋盆闭合时间相一致<sup>[7,32-33]</sup>。本次研究结果显示,洞错火山岩样品在Hf-Rb-Ta图解(图7)中全部落入板内区域,这与前人结果一致。综上所述,洞错粗安岩形成于板内构造环境。

### 4.2 洞错粗安岩岩石成因

#### 4.2.1 洞错埃达克质岩地球化学特征

埃达克岩(Adakite)是1990年由Defant等<sup>[35]</sup>在研究阿留申群岛火山岩时提出的一种地球化学特征和成因特殊的中酸性火山岩或侵入岩,其地球化

表 2 洞错粗安岩主量、微量和稀土元素分析结果  
Table 2 Major, trace and rare earth elements analyses of trachyandesite from Dongco area

样品编号	11DC-9	11DC-10	11DC-11	11DC-12	11DC-14	样品编号	11DC-9	11DC-10	11DC-11	11DC-12	11DC-14
SiO <sub>2</sub>	59.82	60.54	60.79	59.88	64.98	Zr	231	227	232	231	199
TiO <sub>2</sub>	0.89	0.87	0.85	0.90	0.60	Nb	16.6	16.5	16.3	16.5	11.1
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15.90	16.01	15.88	15.88	15.52	Cs	1.54	1.05	1.19	1.16	0.68
TFe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.50	5.45	5.57	6.16	4.26	Ba	427	405	425	393	664
MnO	0.06	0.07	0.07	0.06	0.05	La	29.9	29.9	29.8	28.7	30.2
MgO	2.36	2.65	2.81	2.98	2.13	Ce	57.9	57.0	57.0	55.5	52.4
CaO	6.00	5.57	5.50	5.70	3.36	Pr	6.96	6.92	6.83	6.66	6.20
Na <sub>2</sub> O	3.61	3.59	3.64	3.62	4.17	Nd	26.1	25.2	25.1	24.9	22.2
K <sub>2</sub> O	1.75	1.86	1.86	1.74	2.17	Sm	4.69	4.48	4.56	4.44	3.59
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.31	0.30	0.30	0.30	0.17	Eu	1.34	1.28	1.30	1.27	1.05
烧失量	2.98	3.00	2.65	2.42	2.15	Gd	4.35	4.05	4.09	4.04	3.18
总量	99.18	99.91	99.92	99.64	99.56	Tb	0.61	0.60	0.58	0.58	0.42
Mg <sup>#</sup>	50.0	53.1	54.1	53.0	53.8	Dy	3.44	3.30	3.24	3.31	2.16
Sc	14.2	13.4	13.5	14.5	9.5	Ho	0.70	0.66	0.66	0.68	0.42
Ti	4933	4735	4746	4996	3412	Er	1.84	1.78	1.72	1.74	1.19
V	97.8	95.6	93.5	101	71.5	Tm	0.27	0.26	0.25	0.25	0.16
Cr	95.1	85.9	82.0	96.8	54.4	Yb	1.77	1.74	1.66	1.68	1.06
Co	17.2	16.6	16.3	17.8	10.4	Lu	0.26	0.26	0.26	0.25	0.17
Ni	52.1	51.9	47.9	52.0	23.5	Hf	4.88	4.75	4.84	4.82	4.44
Ga	18.7	18.2	18.3	18.4	17.9	Ta	1.03	1.05	1.03	1.02	0.73
Ge	1.24	1.25	1.17	1.28	1.29	Pb	10.7	10.2	9.85	10.2	12.0
Rb	39.1	37.7	39.3	37.9	47.0	Th	5.01	5.00	4.96	4.78	5.38
Sr	475	449	452	458	494	U	1.15	1.19	1.19	1.07	1.17
Y	18.3	16.9	17.3	17.7	11.7	ΣREE	509	498	496	486	429

注:主量元素含量单位为%,微量和稀土元素单位为 $10^{-6}$

学标志是: SiO<sub>2</sub>≥56%, 高铝(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>≥15%), MgO < 3%, 贫 Y 和 Yb (Y≤18×10<sup>-6</sup>, Yb≤1.9×10<sup>-6</sup>), Sr 含量高 (>400×10<sup>-6</sup>), LREE 富集, 无 Eu 异常(或有轻微的负 Eu 异常)<sup>[35]</sup>。洞错粗安岩具有较高的 Sr 含量(449×10<sup>-6</sup>~494×10<sup>-6</sup>), Sr/Y 值(25.2~42.2)和较低的 Y 含量(11.7×10<sup>-6</sup>~18.3×10<sup>-6</sup>), 明显亏损重稀土元素 Yb (1.06×10<sup>-6</sup>~1.70×10<sup>-6</sup>), 较高的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (15.5%~16.0%)、MgO (2.13%~2.98%) 含量和 Mg<sup>#</sup> (50.0~54.1), 轻微的 Eu、Sr 负异常(图 6-a、b)。在 Y-Sr/Y 图解(图 8)中, 样品点均落入埃达克岩区。但与典型的埃达克岩相比, 洞错粗安岩具有高 MgO 含量

和 Mg<sup>#</sup> 值特征。因此, 笔者将研究区粗安岩称为高镁埃达克质岩石。

#### 4.2.2 岩石成因

Defant 等<sup>[35]</sup>认为, 埃达克岩是年轻的俯冲洋壳在石榴子石稳定区域内部分熔融的产物。随后的研究显示, 埃达克质岩石还具有其他成因模式: 加厚下地壳的部分熔融<sup>[36]</sup>、幔源基性岩浆的分离结晶<sup>[37-38]</sup>、拆沉下地壳的部分熔融<sup>[39-41]</sup>及残余洋壳的部分熔融<sup>[42-44]</sup>。

上述分析表明, 早白垩世晚期的洞错粗安岩形成于拉萨地块与羌塘地块碰撞拼合后的板内构造

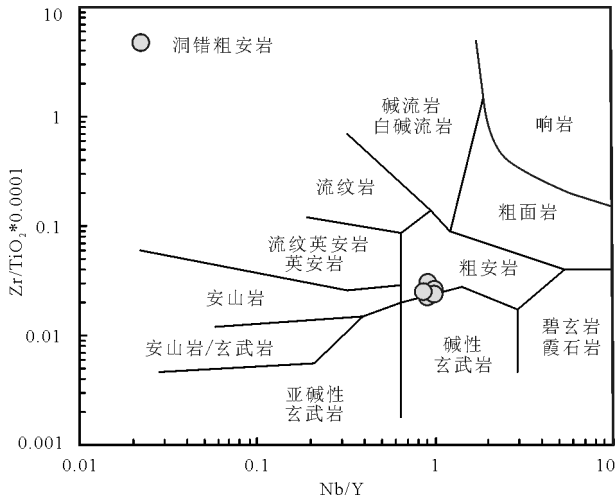


图5 洞错粗安岩 Nb/Y-Zr/TiO<sub>2</sub> 分类图解

(据参考文献[30]修改)

Fig. 5 Nb/Y-Zr/TiO<sub>2</sub> classification diagram for the trachyandesite in the Dongco area

环境,暗示其不可能形成于班公湖-怒江洋壳的俯冲消减过程。因此排除俯冲洋壳在石榴子石稳定区域部分熔融成因。

洞错火山岩具有高 Na<sub>2</sub>O 含量(3.59%~4.17%)及 Na<sub>2</sub>O/K<sub>2</sub>O(1.9~2.1)值,类似于洋壳的成分,而明显不同于北拉萨地块增厚下地壳部分熔融形成的富钾、贫钠的埃达克质岩<sup>[45]</sup>;同时在 SiO<sub>2</sub>-MgO 图解(图9)中,洞错粗安岩样品点均落入洋壳物质区域,表明其岩浆源区并非来源于加厚下地壳。因此,洞

错粗安岩不应该由增厚下地壳或拆沉下地壳部分熔融形成。

前人研究显示,基性岩浆的分离结晶作用形成埃达克岩的一个重要条件是有同时代大规模基性岩浆的存在<sup>[39,47-48]</sup>。然而,在研究区域未发现同时代大规模基性岩的出露,因此洞错火山岩不可能是幔源基性岩浆分离结晶作用的产物。

综上所述,结合洞错粗安岩的岩浆源区主要来源于洋壳物质(图9),形成于羌塘地块与拉萨地块碰撞后的板内构造环境,笔者认为,班公湖-怒江特提斯洋残留洋壳的部分熔融很可能是洞错粗安岩的岩石成因。在 Defant 等<sup>[35]</sup>最初的定义中,埃达克岩应该具有低 Mg<sup>#</sup>值(40.0~45.0)。洞错粗安岩具有较高的 Mg<sup>#</sup>(50.0~54.1)值。许多研究成果显示,高镁埃达克岩主要成因为大洋板片部分熔融形成的中酸性埃达克质熔体(低镁的),在上升穿过弧下地幔楔时与地幔橄榄岩相互作用使 Mg 含量升高<sup>[49]</sup>。例如, Xu 等<sup>[50]</sup>认为,出露于勉略蛇绿岩带中的三岔子高镁埃达克岩是板片熔融的熔体与上覆地幔楔交换作用的产物; Rapp 等<sup>[51]</sup>的高压实验也证实,埃达克质熔体与地幔橄榄岩反应可以使埃达克质岩浆中的 Mg、Ni 和 Cr 含量明显增加, Mg<sup>#</sup>增大,添加 10%的橄榄岩即可使 Mg<sup>#</sup>从 44 升高到 55; Stern 等<sup>[52]</sup>的研究表明, Cook 岛高镁埃达克岩(Mg<sup>#</sup>=68)仅需要 10%~20%的地幔橄榄岩加入。因此,洋壳板片熔融形成的埃达克质岩浆与地幔物质混合能产生高镁埃达克质岩石,已经成为共识。洞错粗安岩具有较

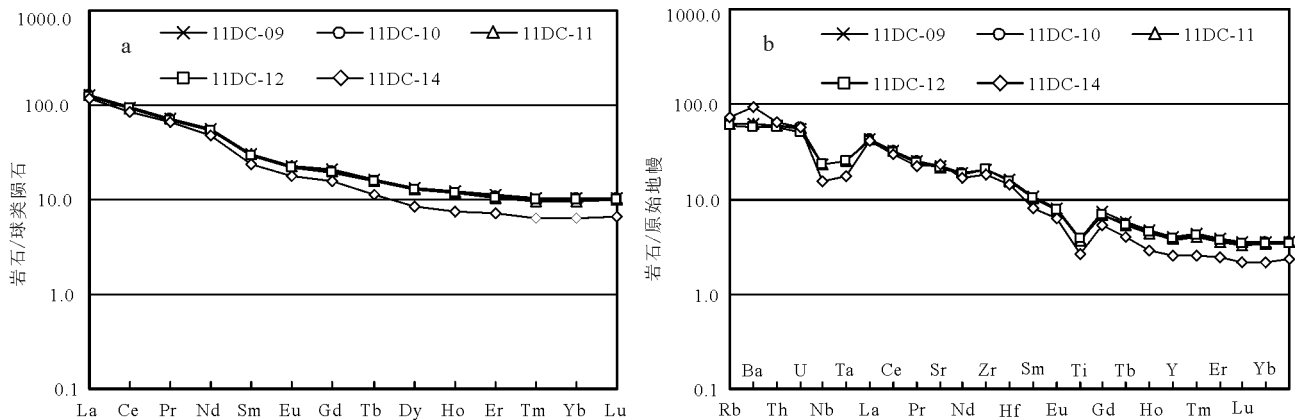


图6 洞错粗安岩稀土元素球粒陨石标准化配分曲线(a)和微量元素

原始地幔标准化蛛网图(b)(据参考文献[31]修改)

Fig. 6 Chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive mantle normalized incompatible element spider diagram (b) of the trachyandesites in the Dongco area

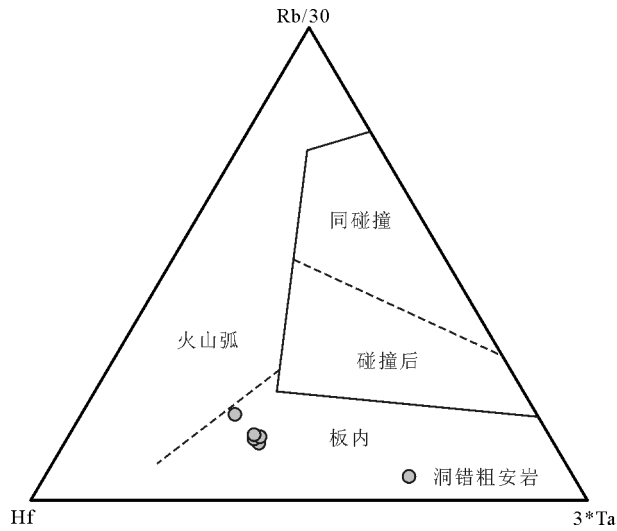


图7 洞错粗安岩 Hf-Rb-Ta 图解<sup>[34]</sup>

Fig. 7 Hf-Rb-Ta diagram of the trachyandesites in the Dongco area

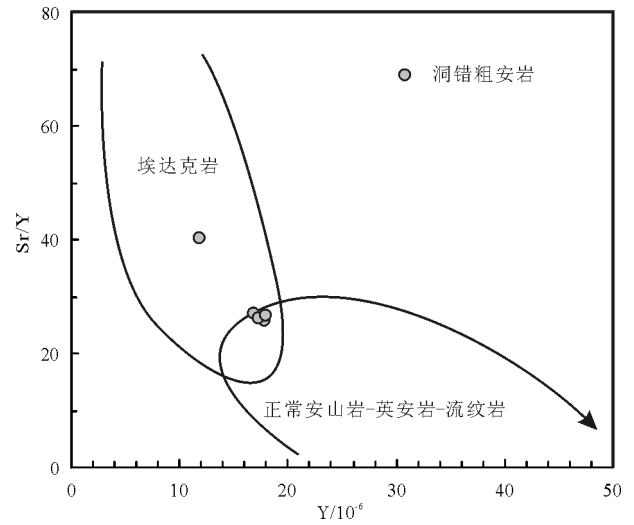


图8 洞错粗安岩 Y-Sr/Y 判别图<sup>[36]</sup>

Fig. 8 Plot of Sr/Y versus Y for the trachyandesites in the Dongco area

高的 MgO (2.13%~2.98%) 含量和  $Mg^\#$  值 (50.0~54.1), 同时相对于普通的埃达克岩, 洞错粗安岩的 Ni ( $23.5 \times 10^{-6} \sim 52.1 \times 10^{-6}$ ) 和 Cr ( $54.4 \times 10^{-6} \sim 96.8 \times 10^{-6}$ ) 含量明显增加。因此, 笔者认为, 班公湖-怒江残留洋壳部分熔融形成的埃达克质熔体, 在上升过程中与地幔成分相互作用, 最终形成洞错高镁埃达克质岩石。

### 4.3 对班公湖-怒江特提斯洋闭合时限的制约

通常认为, 羌塘地块与拉萨地块的碰撞导致了

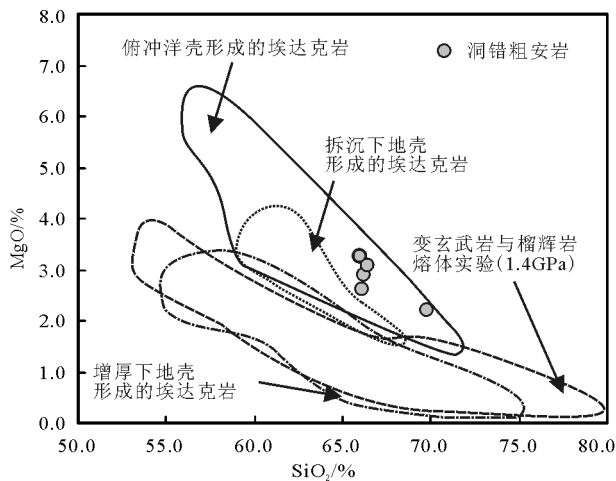


图9 洞错粗安岩 SiO<sub>2</sub>-MgO 图解<sup>[46]</sup>

Fig. 9 Plot of SiO<sub>2</sub> versus MgO for the trachyandesites in the Dongco area

班公湖-怒江特提斯洋的闭合, 羌塘地块与拉萨地块碰撞的时限, 也就是班公湖-怒江特提斯洋的闭合时限是现今青藏高原研究关注的重大地质问题之一。目前, 对该时限的认识主要来自班公湖-怒江缝合带蛇绿岩残片和变质矿物年龄, 但由于对蛇绿岩的性质和成因难以准确约束, 造成对班公湖-怒江洋盆最终闭合及拉萨与羌塘地体碰撞造山的时间存在早白垩世<sup>[53-54]</sup>、晚侏罗世-早白垩世早期<sup>[55-56]</sup>、早侏罗世末<sup>[57-59]</sup>、晚侏罗世-早白垩世多期碰撞作用<sup>[1]</sup>等不同的认识。晚白垩世竟柱山组的磨拉石建造被学术界普遍认为代表了班公湖-怒江洋的彻底消失, 此后羌塘地块与拉萨地块的碰撞才真正开始。

近年的许多研究结果显示, 班公湖-怒江特提斯洋的闭合时限大致在早白垩世晚期, 例如, 拉萨地体北部尼玛地区存在 118~125Ma 的海相向非海相转变的记录<sup>[54]</sup>; 曲晓明等<sup>[12,60]</sup>在色林错以南获得 114Ma、112Ma、110Ma 和 106Ma 碰撞后花岗岩的年龄; 在班公湖-怒江缝合带中段西部的改则-班戈地区, 也存在大量的早白垩世晚期 (100~107Ma) 去申拉组火山沉积, 以尼玛县中仓乡附近的去申拉组和双湖县多玛乡塔仁本洋岛附近的去申拉组为典型代表。不管是尼玛县中仓乡附近的去申拉组, 还是双湖县多玛乡塔仁本洋岛附近的去申拉组, 它们



均不整合覆盖于蛇绿岩、洋岛和木嘎岗日岩群之上,其均含有碰撞型的火山岩夹层与陆相红层夹层,充分说明此时班公湖-怒江洋已经消减闭合,两侧的陆块已碰撞造山<sup>[61-64]</sup>。谌微微<sup>[65]</sup>和Chen等<sup>[66]</sup>对该区去申拉组陆相火山岩与红层进行了详细的古地磁方面的研究,从古地磁角度证实该地区班公湖-怒江洋在104Ma前后已经闭合。

本次研究的洞错粗安岩锆石U-Pb年龄约为102Ma(图4-b),在构造环境判别图中,所有样品点均落入板内火山岩区域(图7),表明洞错火山岩形成于板内构造环境,指示在102Ma拉萨地块与羌塘地块已经拼合完成,进入陆内演化阶段,暗示班公湖-怒江特提斯洋在此之前就已经闭合。本次在班公湖-怒江缝合带内发现的这套高镁埃达克质岩为班公湖-怒江特提斯洋的闭合时限提供了重要的岩石学约束。

## 5 结 论

(1)洞错地区粗安岩的LA-ICP-MS锆石U-Pb年龄约为102Ma,指示班公湖-怒江缝合带内存在早白垩世晚期岩浆活动。

(2)洞错粗安岩具有高镁埃达克质岩的地球化学特征,很可能是班公湖-怒江残留洋壳部分熔融的产物,形成于板内构造环境。

(3)班公湖-怒江特提斯洋在102Ma之前就已经闭合,拉萨和羌塘地块已经拼合进入陆内演化阶段,为其碰撞时限提供了制约。

**致谢:**审稿专家对本文进行了认真的审阅,提出许多宝贵的意见和建议,成文过程中中国地质调查局成都地质调查中心贺娟、王启宇博士给予帮助,中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室、中国科学院广州地球化学研究所同位素地球化学国家重点实验室分别在LA-ICP-MS、微量元素测试上给予帮助,在此表示衷心的感谢。

## 参考文献

[1]Pearce J A, Mei H. Volcanic Rocks of the 1985 Tibet Geotraverse: Lhasa to Golmud[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 1988, 327(1594): 169-201.  
 [2]Pearce J A, Deng W. The Ophiolites of the Tibetan Geotraverses, Lhasa to Golmud (1985) and Lhasa to Kathmandu (1986)[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 1988, 327(1594): 215-238.

[3]Dewey J F, Sun Y. The Tectonic Evolution of the Tibetan Plateau[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 1988, 327(1594):379-413.  
 [4]潘桂棠,朱弟成,王立全,等.班公湖-怒江缝合带作为冈瓦纳大陆北界的地质地球物理证据[J].地质前缘,2004,11(4):371-382.  
 [5]张旗,杨瑞英.西藏丁青蛇绿岩中玻镁安山岩类的深成岩及其地质意义[J].科学通报,1985,30(16):1243-1243.  
 [6]Matte P, Tapponnier P, Arnaud N, et al. Tectonics of Western Tibet, between the Tarim and the Indus[J]. Earth & Planetary Science Letters, 1996, 142(3): 311-330.  
 [7]Kapp P, Murphy M A, Harrison T M. Mesozoic and Cenozoic tectonic evolution of the Shiquanhe area of western Tibet[C]//中国科学院地质与地球物理研究所二〇〇三学术论文集·第二卷. 2003: 253-253.  
 [8]Kapp P, Yin A, Harrison T M, et al. Cretaceous-Tertiary shortening, basin development, and volcanism in central Tibet[J]. Geological Society of America Bulletin, 2005, 117(7): 865-878.  
 [9]史仁灯,杨经绥,许志琴,等.西藏班公湖蛇绿混杂岩中玻安岩系火山岩的发现及构造意义[J].科学通报,2004,49(12):1179-1184.  
 [10]潘桂棠,莫宣学,侯增谦,等.冈底斯造山带的时空结构及演化[J].岩石学报,2006,22(3):521-533.  
 [11]曲晓明,王瑞江,辛洪波,等.西藏西部与班公湖特提斯洋盆俯冲相关的火成岩年代学和地球化学[J].地球化学,2009,38(6):523-535.  
 [12]曲晓明,辛洪波,杜德道,等.西藏班公湖-怒江缝合带中段碰撞后A型花岗岩的时代及其对洋盆闭合时间的约束[J].地球化学,2012,41(1):1-14.  
 [13]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(7):1993-2002.  
 [14]Tapponnier P, Zhiqin X, Roger F, et al. Geology-Oblique step-wise rise and growth of the Tibet plateau[J]. Science, 2001, 294(5547): 1671-1677.  
 [15]Yin A, Harrison T M. Geologic Evolution of the Himalayan-Tibetan Orogen[J]. Annual Review of Earth & Planetary Sciences, 2000, 28(1): 211-280.  
 [16]王建平,刘彦明,李秋生,等.西藏班公湖-丁青蛇绿岩带东段侏罗纪盖层沉积的地层划分[J].地质通报,2002,21(7):405-410.  
 [17]陈国荣,刘鸿飞,蒋光武,等.西藏班公湖-怒江结合带中段沙木罗组的发现[J].地质通报,2004,23(2):193-194.  
 [18]朱弟成,潘桂棠,莫宣学,等.青藏高原中部中生代OIB型玄武岩的识别:年代学、地球化学及其构造环境[J].地质学报,2006,80(9):1312-1328.  
 [19]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(s3/4): 236-249.  
 [20]Wang B D, Wang L Q, Chung S L, et al. Evolution of the Ban-

- gong-Nujiang Tethyan ocean: Insights from the geochronology and geochemistry of mafic rocks within ophiolites[J]. *Lithos*, 2016, 245: 18-33.
- [21] 张玉修. 班公湖-怒江缝合带中西段构造演化[D]. 中国科学院研究生院(广州地球化学研究所)博士学位论文, 2007.
- [22] 强巴扎西, 谢尧武, 吴彦旺, 等. 藏东丁青蛇绿岩中堆晶辉长岩锆石 SIMS U-Pb 定年及其意义[J]. *地质通报*, 2009, 28(9): 1253-1258.
- [23] 曲晓明, 辛洪波, 赵元艺, 等. 西藏班公湖中特提斯洋盆的打开时间: 镁铁质蛇绿岩地球化学与锆石 U-Pb LA-ICP-MS 定年结果[J]. *地学前缘*, 2010, 17(3): 53-63.
- [24] 王希斌, 鲍佩声, 邓万明, 等. 西藏蛇绿岩(喜马拉雅岩石圈构造演化)[M]. 北京: 地质出版社, 1987: 139-152.
- [25] 孙立新, 白志达, 徐德斌, 等. 西藏安多蛇绿岩中斜长花岗岩地球化学特征及锆石 U-Pb SHRIMP 年龄[J]. *地质调查与研究*, 2011, 34(1): 10-15.
- [26] 陈玉禄, 张宽忠, 李关清, 等. 班公湖-怒江结合带中段上三叠统确哈拉群与下伏岩系角度不整合关系的发现及意义[J]. *地质通报*, 2005, 24(7): 621-624.
- [27] Liu Y. 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 from mantle xenoliths[J]. *Journal of Petrology*, 2010, 51(1/2): 537-571.
- [28] Liu Y, Hu Z, 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(1/2): 34-43.
- [29] Chen J L, Xu J F, Wang B D, et al. Origin of Cenozoic alkaline potassic volcanic rocks at KonglongXiang, Lhasa terrane, Tibetan Plateau: Products of partial melting of a mafic lower-crustal source?[J]. *Chemical Geology*, 2010, 273(3): 286-299.
- [30] Winchester J A, Floyd P A. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements[J]. *Chemical Geology*, 1977, 20(4): 325-343.
- [31] 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.
- [32] 陈玉禄, 江元生. 西藏班戈一切里错地区早白垩世火山岩的时代确定及意义[J]. *地质力学学报*, 2002, 8(1): 43-49.
- [33] 陈国荣, 刘鸿飞, 蒋光武, 等. 西藏班公湖-怒江结合带中段沙木罗组的发现[J]. *地质通报*, 2004, 23(2): 193-194.
- [34] Harris N B W, Pearce J A, Tindle A G. Geochemical characteristics of collision-zone magmatism[J]. *Geological Society London Special Publications*, 1986, 19(5): 67-81.
- [35] Defant M J, Drummond M S. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere[J]. *Nature*, 1990, 347(6294): 662-665.
- [36] Atherton M P, Peford N. Generation of sodium-rich magmas from newly underplated basaltic crust[J]. *Nature*, 1993, 362: 144-146.
- [37] Macpherson C G, Dreher S T, Thirlwall M F. Adakites without slab melting: High pressure differentiation of island arc magma, Mindanao, the Philippines[J]. *Earth & Planetary Science Letters*, 2006, 243(3/4): 581-593.
- [38] Castillo P R, Janney P E, Solidum R U. Petrology and geochemistry of Camiguin Island, southern Philippines: insights to the source of adakites and other lavas in a complex arc setting[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1999, 134(1): 33-51.
- [39] Kay S M, Marquez M. Evidence in Cerro Pampa volcanic rocks for slab-melting prior to ridge-trench collision in southern South America[J]. *Journal of Geology*, 1993, 101(6): 703-714.
- [40] Xu J F, Shinjo R, Defant M J, et al. Origin of Mesozoic adakitic intrusive rocks in the Ningzhen area of east China: Partial melting of delaminated lower continental crust?[J]. *Geology*, 2002, 30(12): 1111-1114.
- [41] Gao S, Rudnick R L, Yuan H L, et al. Recycling lower continental crust in the North China craton[J]. *Nature*, 2004, 432(7019): 892-897.
- [42] Gao Y. Lamproitic Rocks from a Continental Collision Zone: Evidence for Recycling of Subducted Tethyan Oceanic Sediments in the Mantle Beneath Southern Tibet[J]. *Journal of Petrology*, 2007, 48(4): 729-752.
- [43] Gao Y F. Neogene porphyries from Gangdese: petrological, geochemical characteristics and geodynamic significances[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2003, 19(3): 418-428.
- [44] Qu X, Hou Z, Li Y. Melt components derived from a subducted slab in late orogenic ore-bearing porphyries in the Gangdese copper belt, southern Tibetan plateau[J]. *Lithos*, 2004, 74(3/4): 131-148.
- [45] 李华亮. 班公湖-怒江缝合带西段洋陆转换的标志及时间[D]. 中国地质大学博士学位论文, 2014.
- [46] Defant M J, Jifeng X U, Kepezhinskas P, et al. Adakites: some variations on a theme[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2002, 18(2): 129-142.
- [47] Barr J, Grove T L, Elkinstanton L. High-magnesian andesite from Mount Shasta: A product of magma mixing and contamination, not a primitive melt: comment and reply[J]. *Geology*, 2007, 35(1): 351-354.
- [48] Guo F. Generation of Palaeocene Adakitic Andesites by Magma Mixing; Yanji Area, NE China[J]. *Journal of Petrology*, 2007, 48(4): 41-55.
- [49] 许继峰, 邬建斌, 王强, 等. 埃达克岩与埃达克质岩在中国的研究进展[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2014, 33(1): 6-13.
- [50] Xu J F, Wang Q, Yu X Y. Geochemistry of high-Mg andesites and adakitic andesite from the Sanchazi block of the Mian-Lue ophiolitic melange in the Qinling Mountains, central China: Evidence of partial melting of the subducted Paleo-Tethyan crust[J].

- Geochemical Journal, 2000, 34(34): 359–377.
- [51] Rapp R P, Shimizu N, Norman M D, et al. Reaction between slab-derived melts and peridotite in the mantle wedge: experimental constraints at 3.8GPa[J]. Chemical Geology, 1999, 160(4): 335–356.
- [52] Stern C R, Kilian R. Role of the subducted slab, mantle wedge and continental crust in the generation of adakites from the Andean Austral Volcanic Zone[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1996, 123(3): 263–281.
- [53] 郭铁鹰, 梁定益, 张宜智, 等. 西藏阿里地质[M]. 北京: 地质出版社, 1991: 201–204.
- [54] Kapp P, DeCelles P G, Gehrels G E, et al. Geological records of the Lhasa–Qiangtang and Indo–Asian collisions in the Nima area of central Tibet[J]. Bull. Geol. Soc. Am., 2007, 119(7/8): 917–932.
- [55] An Y, Harrison T M. Geologic evolution of the Himalayan–Tibetan orogen[J]. Annu. Rev. Earth Planet. Sci., 2000, 28: 211–280.
- [56] 常承法, 郑锡阔. 中国西藏南部珠穆朗玛峰地区构造特征及青藏高原东西向诸山系形成的探讨[J]. 地质科学, 1973, 2: 1–12.
- [57] 刘国惠, 金成伟, 王富宝. 西藏变质岩及火成岩[M]. 北京: 地质出版社, 1990: 100–233.
- [58] Xu R H, Scharer U, Allègre C J. Magmatism and metamorphism in the Lhasa block (Tibet): a geochronological study[J]. J. Geol., 1985, 93: 41–57.
- [59] 胡道功, 吴珍汉, 江万, 等. 藏北纳木错西缘前寒武纪辉长岩变质变形年代学研究[J]. 岩石学报, 2004, 20(3): 627–632.
- [60] 曲晓明, 王瑞江, 代晶晶, 等. 西藏班公湖–怒江缝合带中段雄梅斑岩铜矿的发现及意义[J]. 矿床地质, 2012, 31(1): 1–12.
- [61] 吴浩, 李才, 胡培远, 等. 西藏尼玛县塔色普勒地区去申拉组火山岩的发现及其地质意义[J]. 地质通报, 2013, 32(7): 1014–1026.
- [62] 吴浩, 李才, 胡培远, 等. 藏北班公湖–怒江缝合带早白垩世双峰式火山岩的确定及其地质意义[J]. 地质通报, 2014(11): 1804–1814.
- [63] 王永胜, 张树岐, 谢元和, 等. 1: 25万帕度错幅等4幅区域地质调查报告[M]. 北京: 地质出版社, 2010.
- [64] Wu H, Li C, Xu M J, et al. Early Cretaceous adakitic magmatism in the Dachagou area northern Lhasa terrane Tibet: implications for slab roll-back and subsequent slab break-off of the lithosphere of the Bangong–Nujiang Ocean[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2015, 97(1): 51–66.
- [65] 湛微微. 羌塘地块白垩纪火山岩和红层古地磁学和年代学新结构及其大地构造意义[D]. 中国地质大学(北京)博士学位论文, 2014.
- [66] Chen W, Zhang S, Ding J, et al. Combined paleomagnetic and geochronological study on Cretaceous strata of the Qiangtang terrane, central Tibet[J]. Gondwana Research, 2017, 41: 373–389.