

doi:10.3799/dqkx.2011.108

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

江军华^{1,2}, 王瑞江¹, 曲晓明¹, 辛洪波¹, 王振中³

1. 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037

2. 五矿勘查开发有限公司, 北京 100044

3. 成都理工大学地球科学学院, 四川成都 610059

摘要: 青藏高原西部班公湖—怒江缝合带西端的班公湖地区分布着一系列南北向和东西向岩脉: 花岗斑岩和闪长玢岩。通过岩石地球化学系统分析和锆石 U-Pb LA-ICP-MS 年龄测定, 指出这些岩脉代表了班公湖中特提斯洋盆闭合后的地壳伸展事件。呈南北向产出的花岗斑岩脉 13 个锆石颗粒测试结果给出了 79.59 ± 0.32 Ma (MSWD=1.08) 的加权平均年龄; 既有南北向也有东西向产出的闪长玢岩脉 6 个锆石颗粒给出了 75.9 ± 1.2 Ma (MSWD=2.8) 的加权平均年龄。这些结果表明班公湖岛弧带发生在晚白垩世的地壳伸展作用一开始只沿东西向进行, 稍后南北向也开始伸展。岩石地球化学特征表明, 2 种脉岩都具有岛弧岩浆特征, 这是由于岩浆源区的印度洋 MORB 型地幔受到了来自俯冲沉积物熔体的交代。处于较深部位的闪长玢岩源区参与交代的沉积物熔体大体在 1%~10% 之间, 部分熔融程度约为 8%~15%; 处于较浅部位的花岗斑岩源区参与交代的沉积物熔体约在 10%~15% 之间, 部分熔融程度大于 15%。

关键词: 地壳伸展; 岩脉; 岩浆源区; 班公湖岛弧带; 青藏高原。

中图分类号: P617

文章编号: 1000-2383(2011)06-1021-12

收稿日期: 2011-02-11

Crustal Extension of the Bangong Lake Arc Zone, Western Tibetan Plateau, After the Closure of the Tethys Oceanic Basin

JIANG Jun-hua^{1,2}, WANG Rui-jiang¹, QU Xiao-ming¹, XIN Hong-bo¹, WANG Zhen-zhong³1. *The Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China*2. *Minmetals Exploration and Development Limited Company, Beijing 100044, China*3. *Faculty of Earth Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China*

Abstract: A series of NS-and EW-striking dykes occur in Bangong lake region, western segment of the Bangong lake-Nujiang suture in Tibetan plateau, including both granite porphyry and diorite porphyrite. Based on petrochemical analyses and zircon U-Pb LA-ICP-MS dating combined with field investigation, the present authors propose that these dykes represent a crustal extension event of the Bangong lake arc zone after the closure of Bangong lake middle-Tethys oceanic basin. The granite porphyries occurring only in NS-strike and the diorite porphyrites occurring both in NS- and EW-strike respectively yield a weighted mean age of 79.59 ± 0.32 Ma (MSWD=1.08) with 13 zircons and 75.9 ± 1.2 Ma (MSWD=2.8) with 6. These results indicate that the crustal extensional process of the Bangong lake arc zone occurring in Late Cretaceous epoch was initiated only in EW-trending and slightly later also in NS-trending. Petrochemically, the two types of the dykes appear arc magmatic features characterized by enrichment of large iron incompatible elements (Rb, U, Th, K, Pb) and depletion of high field strength elements (Nb and Ti) which were attributed to metasomatism of Indian-MORB mantle by subducted sediment melt. Furthermore, by analyzing geochemical characteristics of the dyke, we come to the conclusion that the granite porphyries were generated at a shallower depth under amphibolite facies conditions, and the diorite porphyrites were probably under eclogite facies or garnet amphibolite conditions. And the amount of sediment melt involved in the mantle metasomatism related to diorite porphyrites va-

基金项目: 国家“十一·五”科技支撑计划项目 (No. 2006BAB01A05); 中国地质调查局大调查项目 (No. 1212010818097)。

作者简介: 江军华 (1984—), 男, 硕士研究生, 矿产普查与勘探专业。E-mail: jiangjh07@163.com

ries largely from 1% to 10% with a source partial melting degree ranging from 8% to 15%. Whereas in the granite porphyries, the amount varies from 10% to 15% and their source partial melting degree is up to 15%.

Key words: crustal extension; dyke; magma source; Bangong lake island arc zone; Tibetan plateau.

0 引言

作为印度大陆与亚洲大陆碰撞对接的主缝合带,同时也是青藏高原上规模最大的一条缝合带,夹持于羌塘地块与拉萨地块之间的班公湖—怒江缝合带横贯高原东西延伸长达 2 000 余 km. 它所代表的中特提斯洋盆,无论是作为分割冈瓦纳古陆与劳亚古陆的初始大洋(常承法等,1978;潘桂棠等,2004),还是作为一个局限性的弧后盆地(Wang *et al.*, 2008),其构造演化历史都直接关系到整个青藏高原的命运. 人们以前对该缝合带的研究往往集中在板块碰撞、挤压、地壳南北向短缩、垂向增厚等问题上. 如 Yin and Harrison(2000)把印度与亚洲大陆碰撞过程中 180 km 的南北向地壳短缩量归结于班公湖—怒江缝合带的吸纳. Kapp *et al.* (2003)更是把缝合带西端狮泉河一带蛇绿混杂岩在南北方向的重复出现归因于特提斯洋盆闭合后地壳由北向南的多次推覆作用. 相比之下,

该缝合带在特提斯洋盆闭合后的地壳伸展过程被人们远远地忽视了. 然而,缝合带西段班公湖一带一系列南北向和东西向脉岩的发育意味着本地区经历过重要的地壳伸展过程. 本文就是在对班公湖地区南北向和东西向脉岩系统的野外调查和取样的基础上,开展了锆石 U-Pb 年代学和岩石地球化学研究,目的是查明:(1)班公湖岛弧带地壳伸展作用发生的时间;(2)伸展过程发生的方式;(3)地壳伸展过程中的岩浆作用表现,以期对班公湖—怒江缝合带西段的构造演化历史取得一个更全面的了解.

1 班公湖—怒江缝合带

班公湖—怒江缝合带夹持于北面的羌塘地块和南面的拉萨地块之间,以一系列东西向伸展的近线状蛇绿岩碎块为标志(图 1),整个缝合带横贯青藏高原东西达 2 000 余 km. 该缝合带的一个突出特点

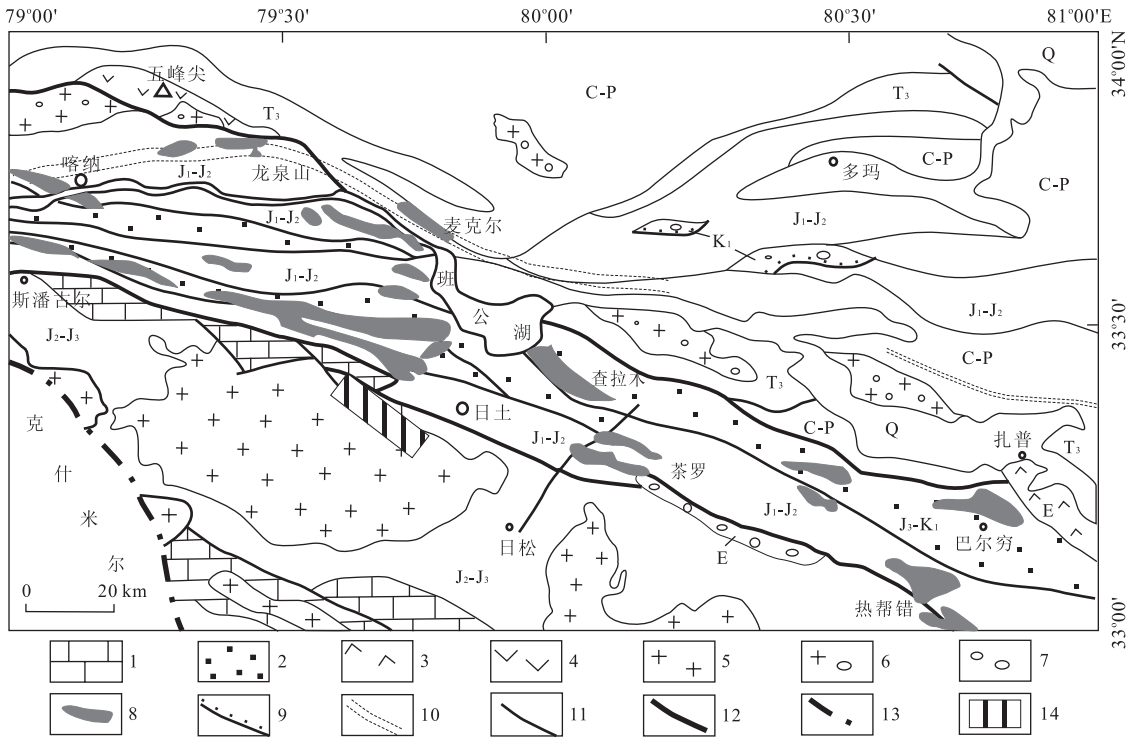


图 1 西藏班公湖岛弧带地质图(据 1:25 万地质图修改)

Fig. 1 Geological map of Bangong lake island arc zone, Tibet plateau

1. 早白垩世灰岩;2. 晚侏罗世—早白垩世砂板岩;3. 古近系火山岩;4. 上侏罗统火山岩;5. 晚白垩—始新世花岗岩;6. 早白垩世花岗岩;7. 古近系牛堡组;8. 蛇绿混杂岩;9. 角度不整合;10. 韧性剪切带;11. 次级断裂;12. 主断裂;13. 国界;14. 脉岩分布区

是蛇绿岩南北向展布范围大,一般为几十 km,在西段狮泉河和东段安多一带,蛇绿岩的横向展布宽度达 200 余 km. 因此,对于该缝合带是代表着一个单一的洋盆俯冲带(Girardeau *et al.*, 1985; Coward *et al.*, 1988)还是包含着由多条洋间弧分割的多个洋盆俯冲(Mei *et al.*, 1981; Srimal, 1986; Pearce and Deng, 1988; Dunlap and Wysoczanski, 2002),人们还有着不同的意见. Kapp *et al.* (2003)坚持单一洋盆向北俯冲的观点,把狮泉河一带多条蛇绿混杂岩的重复出现归因于洋盆闭合后由北向南的多次逆掩推覆作用. 然而,从笔者近年来的野外地质调查和发现的岛弧型火成岩的时空分布看,狮泉河一带班公湖—怒江缝合带应该包括 3 条俯冲带,最充分的证据是狮泉河附近的 3 条蛇绿混杂岩带. 北面的一条位于班公湖至日土县城一带,南北宽有十几 km,东西向延伸有百余 km,向东一直到多不杂矿区以北都有零星的蛇绿岩碎块出露;中间的一条位于狮泉河—改则—洞错一线的北侧,南北宽十几 km,沿走向延伸长达 400 多 km,且连续性较好,这条蛇绿岩带应该是班公湖—怒江缝合带的主俯冲带;南面的一条位于改则县南面约 20 km 的拉果错湖北岸,宽有几 km,沿 NWW-SEE 向延伸,长有 50 km,向北陡倾(Wang *et al.*, 2008).

2 脉岩产状、分布及岩相学

班公湖岛弧带特提斯洋盆闭合后侵入的脉岩集中分布在日土县城一带,东西向展布范围约 100 km,多数(4 条)呈南北走向,近于直立,产状一般在 $280^{\circ}\sim 295^{\circ}\angle 70^{\circ}\sim 80^{\circ}$ 之间,宽从 5~20 m 不等,延伸从几十 m 到几百 m 不等;少数(1 条)呈东西走向,向南陡倾,宽 5~8 m,产状: $170^{\circ}\angle 70^{\circ}$. 南北向脉岩之间的间距从几 km 到十几 km 不等,地貌上多呈正地形,与围岩侏罗系砂板岩系呈侵入接触关系(图 2).

从岩石类型上看,脉岩分为 2 种:一种为花岗斑岩,只有南北向的两条;另一种为闪长玢岩或石英闪长玢岩,产状既有南北向的,也有东西向的. 2 种类型的脉岩在矿物组成和结构构造上都存在着显著差异. 花岗斑岩具斑状结构、块状构造. 斑晶由石英、钾长石、黑云母组成,大小一般在 1~3 mm 之间,含量约占岩石体积的 30%~35%. 基质具隐晶质的糖粒状结构,主要由长英质矿物组成,另外有少量微细鳞片状黑云母和副矿物磷灰石、锆石、磁铁矿等. 斑晶石英无波状消光,形态圆滑规则,广泛被基质熔蚀;钾长石表面有较多的绢云母和土状物分布,具板状外形;黑云母呈宽大的片状、全部变为绿泥石,强烈

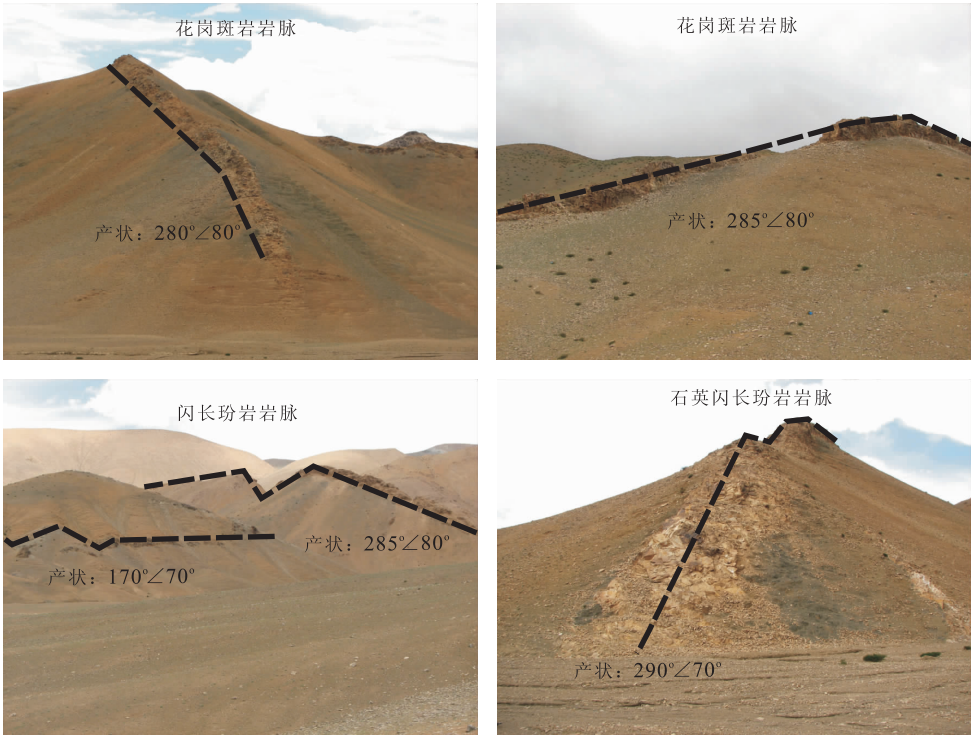


图 2 班公湖岛弧带中酸性脉岩野外分布

Fig. 2 Field distribution of mid-acid dykes in the Bangong lake island arc zone

析铁析钛,有较多的针状金红石生成,矿物含量上石英约占 25%,钾长石 10%,黑云母 15%,其余为隐晶质基质及少量副矿物。闪长玢岩脉含石英增多时构成石英闪长玢岩,具斑状结构,基质为半自形粒状结构,块状构造。岩石中斑晶由斜长石和石英构成,大小在 1~2 mm 之间,含量较低,约占岩石体积的 15%。基质成分有斜长石、石英、黑云母、磷灰石、锆石、榍石、磁铁矿等,基质中主要矿物颗粒大小一般在 0.5 mm 以下,构成显微半自形粒状结构。斜长石斑晶呈宽大的板状,基质则呈小板条状杂乱排列,广泛被绢云母交代,可见模糊的聚片斑双晶。黑云母无论是斑晶还是基质都已强烈绿泥石化,明显析铁析钛。石英主要呈他形微细粒状分布于斜长闪石隙中。少量的副矿物锆石、磷灰石、榍石等呈柱粒状零星分布于基质中或包于斜长石、黑云母颗粒内。岩石组成上斜长石占绝对优势,含量约为 70%~80%,石英约占 2%~10%,黑云母约占 10%~15%。另外,岩石具比较明显的蚀变,包括绢云母化、绿泥石化及碳酸盐化等。

3 地球化学

用作地球化学分析的样品取自 4 条岩脉,其中南北向花岗斑岩 1 条,南北向石英闪长玢岩 2 条,东西向闪长玢岩 1 条。样品的岩石地球化学分析是在北京核工业地质分析研究中心完成的,常量元素是用 PHILLIPS PW-2404 型 X-荧光光谱仪分析完成的,精度优于 1%;微量元素和稀土元素是用 ICP-MS 测定的,仪器型号是 ELEMENT-2 质谱仪,分析精度优于 2%,分析流程见 Qu *et al.* (2004),分析结果见表 1。

3.1 常量元素

呈南北向岩墙产出的花岗斑岩以高 SiO_2 (76.1%~79.38%)、高 K_2O (3.13%~3.55%) 为特征, CaO (0.23%~0.29%)、 MgO (0.12%~0.15%)、 $\text{Fe}_2\text{O}_3(\text{T})$ (0.40%~0.91%) 含量低,尤其是 Na_2O 的含量很低 (0.12%~0.15%),使得它们在 A/NK-A/CNK 图 (图 3a) 中反映不出来。在 $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ (图 3b) 中落在高钾钙碱性岩—中钾钙碱性岩系列。相比之下,既以南北向岩脉、也以东西向岩脉产出的闪长玢岩 (±石英) SiO_2 含量在 56.13%~66.05% 之间,属中性岩范畴。 K_2O (1.94%~3.06%)、 Na_2O (3.45%~4.30%)、 CaO (1.50%~4.16%) 含量相当, $\text{Fe}_2\text{O}_3(\text{T})$ 含量较高 (3.23%~6.82%), MgO 含量在不同的岩脉中变化

较大,从 0.61%~4.57%。在 A/NK-A/CNK 图中 (图 3a) 它们都落在过铝质岩区,在 $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ 图中 (图 3b) 它们都属于高钾钙碱性系列。

3.2 微量元素

在 N-MORB 标准化的微量元素蛛网图上 (图 4a),花岗斑岩与闪长玢岩之间除个别元素之外,整体上表现出一致的分布形式,如明显富集大离子不相容元素 Rb、Th、U、K、Pb,亏损高场强元素 Nb、Ta、Ti 等,显示出岛弧岩浆作用的基本特征。所不同的是,花岗斑岩 Sr、Ti 强烈亏损, Nb 与 Ta 发生明显分异 ($\text{Nb}/\text{Ta}=5.02\sim5.51$),闪长玢岩的情况是 Sr 弱富集, Ti 弱亏损, Nb、Ta 表现为共同亏损 ($\text{Nb}/\text{Ta}=11.95\sim15.29$)。这些地球化学特征说明这 2 种脉岩之间有着本质的联系,同时在形成条件和演化过程中又存在明显差异。

3.3 稀土元素

球粒陨石标准化稀土元素分配曲线 (图 4b) 显示,与闪长玢岩相比,花岗斑岩出现强烈的负 Eu 异常 ($\delta\text{Eu}=0.31\sim0.48$)。轻、重稀土元素的分馏程度变化较大 ($\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}=4.23\sim25.33$ 。闪长玢岩只有弱的负 Eu 异常 ($\delta\text{Eu}=0.69\sim0.86$),轻重稀土元素分馏明显 ($\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}=10.71\sim21.24$ 。花岗斑岩在这里所表现出的 Eu、Sr、Ti 一致亏损清楚地表明,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。

3.4 锆石 U-Pb 年龄

用作锆石 U-Pb 年龄测定的样品取自一条南北向花岗斑岩脉 (B08-021) 和一条东西向闪长玢岩脉 (B08-011)。锆石的阴极发光 (CL) 研究在国土资源部同位素地质重点实验室完成。LA-ICP-MS (激光剥蚀等离子质谱) 法单颗粒锆石微区 U-Pb 年龄测定在西北大学大陆动力学重点实验室完成。采用 Agilent 7500 型 ICP-MS 和 ComPex102 ArF 准分子激光器,工作物质 ArF,波长 193 nm,与 GeoLas200M 光学系统联机进行。锆石年龄采用国际标准锆石 91500 作为外标标准物质,元素含量采用 NIST SRM610 作为外标,²⁹Si 作为内标。数据用 Ludwig SQUID 1.0 和 ISOPLLOT 程序处理,分析结果见表 2。

花岗斑岩中的锆石自形程度较高,大多呈自形柱状,大小一般在 50~100 μm 之间,最大者可达 250 μm ,振荡环带发育 (图 5a),说明它们是在岩浆侵位后冷却结晶过程中生成的,其年龄可以代表脉岩的侵位年龄。由 13 个锆石颗粒测得的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$

表 1 班公湖岛弧带岛弧型侵入岩常量元素、微量元素和稀土元素分析结果

Table 1 Major, trace and rare earth element analysis results of arc magmatic rocks in the Bangong lake island arc zone

样品 编号	B08- 011	B08- 012	B08- 013	B08- 021	B08- 022	B08- 023	B08- 031	B08- 032	B08- 033	B08- 041	B08- 042	B08- 043
岩石类型	闪长玢岩			花岗斑岩			石英闪长玢岩					
常量、微量(%)												
SiO ₂	56.13	57.58	56.14	76.01	78.44	79.38	64.41	66.05	64.82	65.26	62.89	64.83
TiO ₂	1.07	1.10	1.12	0.21	0.07	0.081	0.70	0.66	0.72	0.67	0.64	0.68
Al ₂ O ₃	16.34	16.39	15.80	15.17	14.19	13.34	16.62	16.52	16.38	16.65	16.52	15.92
Fe ₂ O ₃	5.92	6.64	6.82	0.91	0.42	0.40	3.77	3.52	3.79	3.35	3.37	3.23
FeO	3.65	4.72	4.50	0.50	0.25	0.22	0.80	2.50	2.55	0.40	0.40	0.65
CaO	4.16	3.20	4.00	0.29	0.28	0.23	2.15	1.50	2.14	2.33	3.72	2.98
MgO	3.93	4.14	4.57	0.27	0.15	0.22	1.92	1.86	1.96	0.68	0.65	0.61
MnO	0.079	0.079	0.088	0.0061	0.0041	0.0072	0.058	0.054	0.057	0.059	0.056	0.057
Na ₂ O	3.45	3.62	3.77	0.14	0.12	0.15	4.30	3.91	4.36	3.57	3.86	3.91
K ₂ O	2.21	2.09	1.94	4.11	3.55	3.13	2.60	2.60	2.50	3.06	2.82	2.86
P ₂ O ₅	0.33	0.35	0.35	0.039	0.021	0.026	0.24	0.23	0.25	0.22	0.22	0.22
LOI	6.32	4.72	5.32	2.78	2.68	2.97	3.16	3.03	2.95	4.08	5.22	4.67
Total	112.00	113.00	114.00	115.00	116.00	117.00	118.00	119.00	120.00	121.00	122.00	123.00
Ba	417.00	357.00	535.00	437.00	313.00	314.00	420.00	430.00	412.00	369.00	312.00	417.00
Be	2.51	2.05	1.96	3.85	2.45	2.41	1.98	1.83	1.91	1.94	2.03	2.24
Sc	13.70	14.60	14.30	3.23	3.13	2.82	7.82	7.63	8.45	7.34	7.33	7.27
V	121.00	126.00	122.00	17.50	3.97	5.38	67.20	66.80	70.40	67.60	62.60	62.20
Cr	74.00	81.30	91.30	7.05	4.72	8.77	26.30	30.30	29.90	26.50	24.70	18.40
Co	23.90	19.00	18.40	0.861	0.42	2.00	9.31	9.13	9.73	11.20	10.70	9.68
Ni	57.20	55.20	60.30	3.06	2.83	8.24	28.30	30.80	28.80	31.70	27.60	18.70
Cu	56.10	56.00	35.80	1.99	3.12	2.45	25.50	22.70	22.50	35.10	42.50	26.50
Pb	14.60	8.69	14.30	14.00	16.00	17.80	9.65	10.30	13.30	8.70	9.89	8.52
Zn	84.60	62.20	79.70	29.20	19.00	24.30	88.70	86.80	75.10	56.60	59.50	49.60
Ga	22.00	21.80	21.30	21.20	15.80	15.20	20.50	21.10	21.80	20.80	20.10	19.90
Rb	85.00	82.90	62.00	166.00	120.00	107.00	114.00	121.00	101.00	112.00	113.00	125.00
Sr	384.00	407.00	439.00	15.00	24.90	34.90	400.00	350.00	432.00	257.00	324.00	368.00
W	0.38	0.359	0.156	4.53	0.547	0.88	0.098	0.171	0.131	0.84	0.794	2.28
Mo	1.91	1.07	0.733	0.355	—	0.006	0.355	0.285	0.26	0.964	1.50	1.80
Sb	5.46	2.24	2.03	1.11	0.743	0.774	1.80	1.70	1.17	0.977	0.849	1.15
Bi	0.143	0.093	0.145	0.182	0.179	0.096	0.031	0.027	0.051	0.13	0.11	0.063
Nb	21.40	20.80	19.70	10.10	10.30	10.90	13.90	13.50	13.80	16.20	14.30	15.20
Ta	1.41	1.36	1.30	1.89	2.05	1.98	1.06	1.13	1.02	1.25	1.13	1.22
Zr	463.00	494.00	436.00	123.00	118.00	126.00	318.00	323.00	340.00	251.00	219.00	238.00
Hf	10.30	9.71	8.47	3.81	5.01	5.43	6.96	6.75	7.22	5.70	5.31	5.46
U	2.81	2.75	2.22	2.51	3.04	2.96	2.02	2.07	2.05	3.18	2.82	2.88
Th	14.40	13.60	12.00	14.70	18.20	18.10	10.80	11.60	11.10	15.20	13.70	14.50
Y	21.70	20.60	20.40	12.50	27.30	22.30	14.90	15.80	15.40	15.30	15.20	15.80
REE(10 ⁻⁶)												
La	43.80	32.60	28.80	45.80	16.00	22.10	38.90	36.20	36.00	43.00	38.90	40.10
Ce	81.40	60.50	56.40	80.00	32.30	43.50	65.20	63.30	66.00	73.30	67.70	71.90
Pr	8.48	6.72	5.85	8.27	3.83	5.00	7.23	6.84	7.00	7.45	7.21	7.10
Nd	31.00	24.00	23.00	26.50	14.70	18.10	25.30	24.30	24.80	26.10	24.50	25.90
Sm	5.01	3.88	3.62	3.73	3.51	4.00	3.77	3.84	3.93	3.97	3.86	3.98
Eu	1.09	1.03	0.978	0.556	0.395	0.383	0.993	0.939	1.05	1.05	1.05	1.01
Gd	4.65	3.73	3.81	3.24	3.33	3.47	3.53	3.58	3.47	3.54	3.54	3.59
Tb	0.732	0.634	0.613	0.407	0.679	0.574	0.522	0.518	0.512	0.547	0.528	0.517
Dy	3.82	3.65	3.49	2.07	4.04	3.38	2.67	2.89	2.72	2.85	2.51	2.85
Ho	0.742	0.698	0.66	0.391	0.867	0.701	0.506	0.505	0.515	0.524	0.518	0.541
Er	2.10	2.01	1.92	1.13	2.54	2.13	1.38	1.45	1.43	1.44	1.37	1.57
Tm	0.308	0.308	0.291	0.188	0.396	0.363	0.205	0.244	0.213	0.23	0.206	0.223
Yb	1.96	1.91	1.74	1.17	2.45	2.04	1.36	1.37	1.36	1.31	1.34	1.38
Lu	0.304	0.284	0.27	0.20	0.373	0.336	0.208	0.218	0.199	0.205	0.201	0.215
以下单位为 1												
Nb/Ta	15.18	15.29	15.15	5.34	5.02	5.51	13.11	11.95	13.53	12.96	12.65	12.46
(La/Yb) _N	14.46	11.04	10.71	25.33	4.23	7.01	18.51	17.10	17.13	21.24	18.78	18.80
δEu	0.69	0.82	0.81	0.48	0.35	0.31	0.83	0.77	0.86	0.85	0.86	0.81

注：—表示未检出.

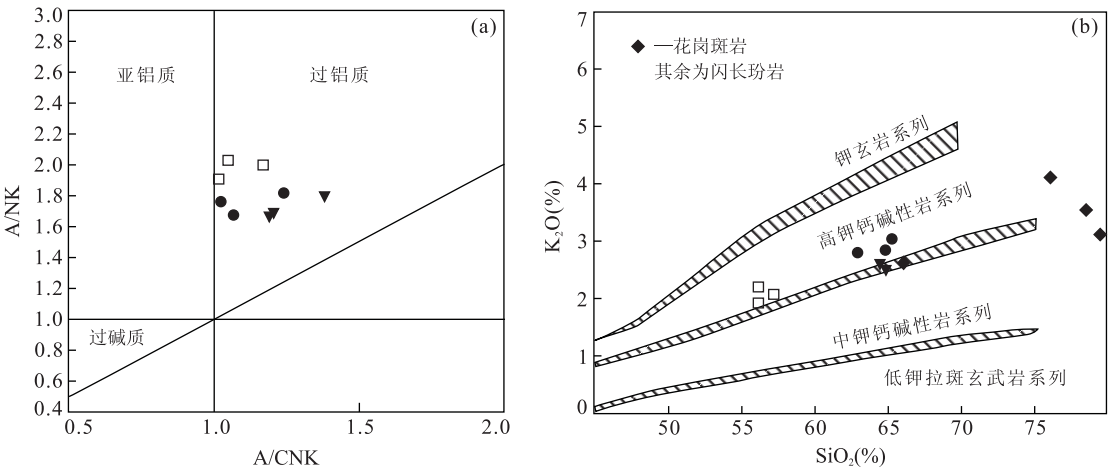


图 3 班公湖岛弧带洋盆闭合后形成的岩脉的 A/NK-A/CNK 图(a)和 K₂O-SiO₂ 图(b)

Fig. 3 A/NK-A/CNK diagram (a) and K₂O-SiO₂ diagram (b) of the dykes formed after the closure of the Tethys oceanic basin in the Bangong lake arc zone

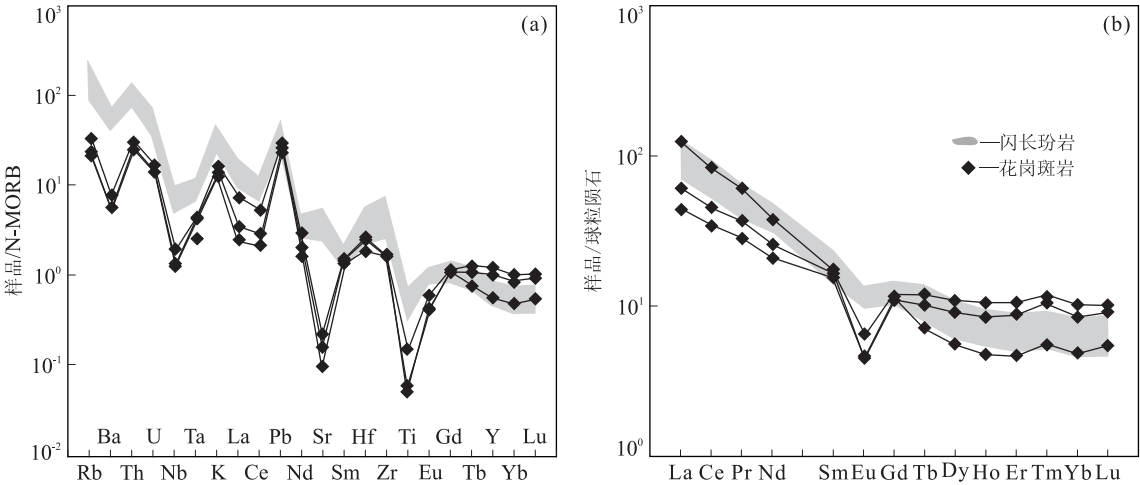


图 4 班公湖岛弧带洋盆闭合后形成的脉岩的微量元素蛛网图(a)和稀土元素球粒陨石标准化分布曲线(b)

Fig. 4 Trace element spider diagram (a) and rare earth element chondrite-normalized patterns (b) of the dykes formed after the closure of the Tethys oceanic basin in the Bangong Lake island arc zone

年龄给出了 79.59 ± 0.32 Ma 的加权平均年龄, $MSWD=1.08$, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ - $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 一致年龄图见图 5b.

选自闪长玢岩(B08-011)的锆石自形程度稍差, 常呈半自形柱粒状或浑圆粒状, 大小一般在 $40 \sim 100 \mu\text{m}$ 之间, 边缘常有碎裂或熔蚀现象, 颗粒内多具振荡环带, 尽管不是很清晰(图 6a), 但仍能反映岩浆结晶特点. 由 12 个锆石颗粒给出二组 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄, 较老的一组由 6 个一致线年龄组成, 其加权平均年龄为 130.9 ± 1.8 Ma, $MSWD=3.5$ (图略). 根据锆石颗粒形态和区域地质条件, 笔者认为它们代表的是源区残留年龄. 另一组 6 个 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄给出了 76.9 ± 1.2 Ma 的加权平均年龄,

$MSWD=2.8$, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 一致线年龄图见图 6b. 根据锆石的自形程度和内部结构, 笔者认为这一组年龄应该代表这套脉岩的侵位年龄.

5 讨论

拉萨地块火山岩非常发育, 构成了沿缝合带分布的冈底斯岩浆弧带, 分为南、中、北 3 条. 前两条火山岩带主要由新特提斯洋岩石圈向北的低角度俯冲至拉萨地体之下形成 (Coulon *et al.*, 1986; Yin and Harrison, 2000), 而北带则更多地被认为是古特提斯洋岩石圈向北俯冲的结果 (潘桂棠等, 2006). 在拉萨地块的西南部分, 出现了大面积 (东西

表 2 班公湖岛弧带洋盆闭合后形成的锆石 U-Pb 同位素分析结果

Table 2 U-Pb isotope analysis results of zircon from the dykes formed after the closure of the Tethys oceanic basin in the Bangong lake island arc zone

岩石类型	样品号/ 分析号	²⁰⁶ Pb _c (%)	U(10 ⁻⁶)	Th(10 ⁻⁶)	Th/U	Pb* (10 ⁻⁶)	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U 年龄(Ma)	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ
花岗岩斑岩	B08-021-01	—	464.3	272.53	0.586 970	7.809 557	79.4	0.5	0.083 16	0.002 01	0.012 40	0.000 08
	B08-021-02	—	840.14	662.57	0.788 642	15.141 36	78.9	0.7	0.092 84	0.003 10	0.012 32	0.000 11
	B08-021-04	—	124.89	76.4	0.611 738	2.117 163	79	1	0.089 37	0.005 91	0.012 39	0.000 18
	B08-021-07	—	620.21	271.02	0.436 981	10.137 69	79.8	0.5	0.081 72	0.001 84	0.012 45	0.000 08
	B08-021-09	—	395.5	225.71	0.570 695	6.705 114	79.8	0.6	0.088 39	0.002 27	0.012 46	0.000 09
	B08-021-10	—	575.72	335.72	0.583 131	9.597 674	78.4	0.9	0.086 23	0.003 79	0.012 24	0.000 14
	B08-021-13	—	757.95	607.01	0.800 858	13.328 61	78.4	0.5	0.086 09	0.001 91	0.012 24	0.000 08
	B08-021-14	0.19	800.41	477.87	0.597 032	13.571 48	80	0.5	0.083 44	0.002 25	0.012 49	0.000 08
	B08-021-15	—	500.96	292.25	0.583 380	8.490 788	79.7	0.6	0.085 50	0.002 23	0.012 44	0.000 09
	B08-021-16	—	411.86	222.64	0.540 572	6.943 306	80.4	0.6	0.087 93	0.002 21	0.012 55	0.000 09
	B08-021-17	—	300.8	189.75	0.630 818	5.097 190	79.7	0.6	0.083 83	0.002 60	0.012 44	0.000 10
	B08-021-18	—	816.8	961.51	1.177 167	16.568 62	80	0.4	0.090 91	0.001 56	0.012 48	0.000 07
	B08-021-19	—	141.53	70.45	0.497 774	2.341 428	80	1	0.091 74	0.007 20	0.012 43	0.000 23
	B08-011-01	2.98	208.9	149.1	0.713 739	6.773 065	129.4	0.9	0.138 64	0.005 44	0.020 28	0.000 14
	B08-011-02	3.31	191.13	114.43	0.598 702	6.065 559	128.9	0.9	0.139 33	0.005 32	0.020 20	0.000 14
闪长玢岩	B08-011-03	—	215.21	66.9	0.310 859	5.941 502	130.7	0.9	0.154 16	0.004 12	0.020 48	0.000 15
	B08-011-04	—	319.92	72.56	0.226 807	8.594 291	131.9	0.8	0.148 10	0.002 75	0.020 67	0.000 12
	B08-011-06	—	154.05	162.67	1.055 956	3.010 571	77.9	0.6	0.091 07	0.002 63	0.012 15	0.000 09
	B08-011-10	1.48	226.5	241.91	1.068 035	4.449 303	77.1	0.6	0.077 29	0.003 12	0.012 03	0.000 10
	B08-011-11	—	127.13	126.01	0.991 190	2.468 350	79	1	0.092 47	0.005 38	0.012 26	0.000 17
	B08-011-12	5.89	226.74	317.38	1.399 753	5.195 432	75.4	0.6	0.080 99	0.004 44	0.011 76	0.000 10
	B08-011-13	—	131.1	65.33	0.498 322	3.801 205	133.5	0.9	0.159 92	0.003 82	0.020 93	0.000 15
	B08-011-14	4.97	137.97	140.04	1.015 003	2.900 800	76.4	0.7	0.081 09	0.004 65	0.011 93	0.000 10
	B08-011-16	5.72	166.98	211.07	1.264 044	3.776 840	77	1	0.089 81	0.010 54	0.012 02	0.000 21
	B08-011-18	1.48	248.32	117.35	0.472 576	7.109 877	131	1	0.137 08	0.005 56	0.020 47	0.000 17

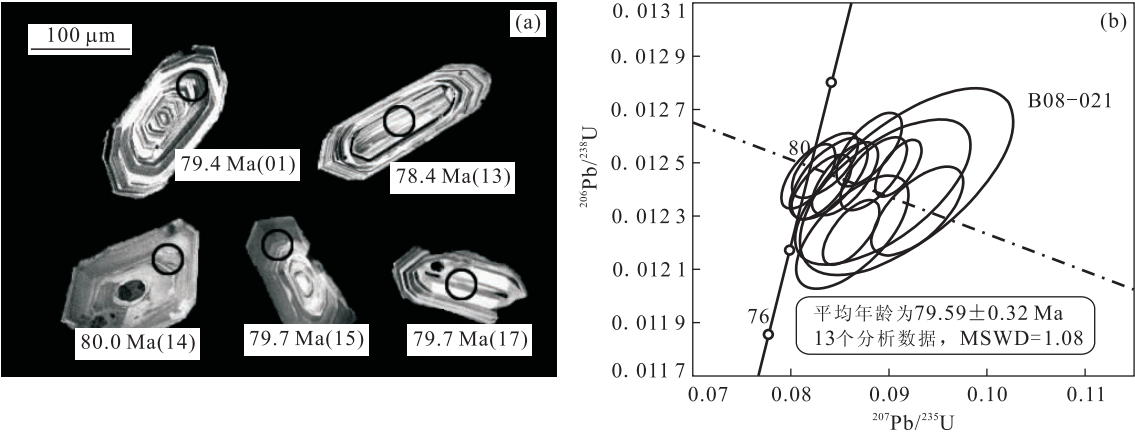


图 5 班公湖岛弧带洋盆闭合后形成的花岗斑岩的锆石阴极发光图(a)和 U-Pb 一致线年龄图(b)
Fig. 5 Zircon CL images (a) and U-Pb concordant diagram (b) of granite porphyry formed after the closure of the Tethys oceanic basin in the Bangong Lake island arc zone

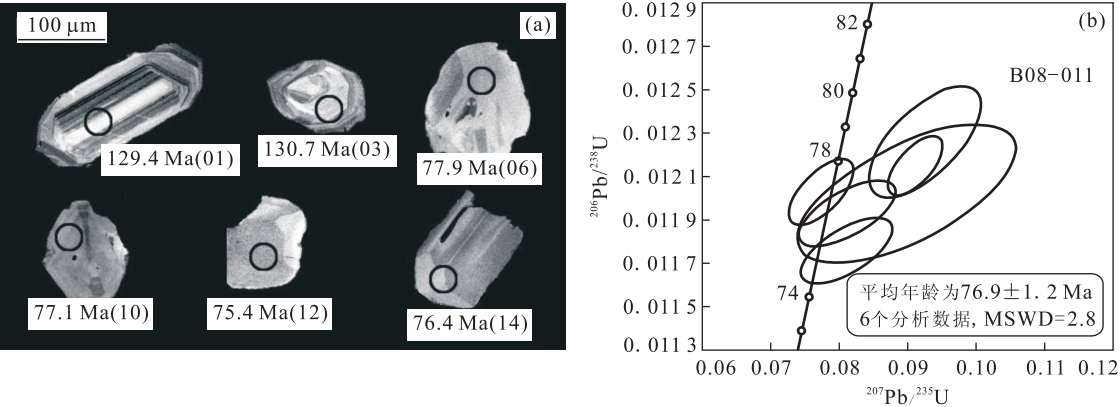


图 6 班公湖岛弧带洋盆闭合后形成的闪长玢岩的锆石阴极发光图(a)和 U-Pb 一致线年龄图(b)
Fig. 6 Zircon CL images (a) and U-Pb concordant diagram (b) of diorite porphyrite formed after the closure of the Tethys oceanic basin in the Bangong lake island arc zone

长>600 km)的岩脉群,这些岩脉的走向主要以南北向为主,少数呈东西向(Yin *et al.* , 1994; Miller *et al.* , 1999; Williams *et al.* , 2001). 这种走向相同或近乎垂直的岩脉群集出现,在时间和空间上紧密相连,说明这并非是一个偶然局部的现象,而更像是区域上的构造事件造成,暗示它们可能侵位于以东向西伸展为主的构造应力场. 这种现象不能用简单的板块构造和碰撞理论来解释(Williams *et al.* , 2001; 曹圣华等,2009). Yin *et al.* (1999)指出南、北西藏在晚新生代出现南北向的裂谷,暗示了整个青藏高原发生过东西向的伸展而不是藏北相对于藏南向东挤压的结果,引起整个高原伸展的是区域性边界条件.

5.1 地壳伸展的时间

伸展作用的地壳常表现为高角度正断层或走滑构造的形式这种近平行的岩脉侵位和正断层不完全

相同,它无疑与裂隙扩大和伸展有关,因此可以用侵入岩脉的最古老年龄代表伸展作用开始的时间(Williams *et al.* , 2001). 和藏西南发育的一系列超钾质、钾质和钙碱性火山岩岩脉类似,班公湖岛弧带发育的中酸性岩脉呈垂直或近平行的关系,暗示着地壳发生过伸展事件. 研究表明,班公湖岛弧带是由多个局限性中特提斯洋盆于中侏罗世晚期(166~159 Ma)沿日土和狮泉河两条俯冲带同时向北俯冲的结果(曲晓明等,2009). 根据沉积盆地的地层覆盖关系,Kapp *et al.* (2003)把班公湖—怒江洋盆的闭合时间限定在侏罗纪末与白垩纪初之间(145 Ma 前后). 但是,他们把班公湖—狮泉河一带蛇绿混杂地在南北方向上的重复出现解释为晚白垩世—早第三纪期间(75~65 Ma)中地壳由北向南的多次逆冲推覆作用,理由是在这期间本地区有一次快速冷却事件(从 275~150 °C)是逆冲推覆作用使地壳增厚的

结果. 从本文的研究看,班公湖岛弧带晚白垩世(80~75 Ma±)地壳恰恰不是逆冲推覆,而是伸展拉张. 若按时间顺序认为在地壳伸展之后(75 Ma)马上跟着逆冲推覆也不合理,因为花岗斑岩中完整的石英斑晶连一点波状消光都没有,说明它们侵位后并没有遭受明显挤压变形. 因此,即使 Kapp *et al.* (2003)所说的本地区存在中地壳逆冲推覆构造,那么其时间也应在 80 Ma 之前. 根据 Zhao *et al.* (2008)对日土花岗质深成岩体的研究,这些花岗质岩体形成于 80 Ma,指示该地区此时已经进入后造山阶段. 这个年龄与南北向花岗斑岩岩脉(碰撞后地壳隆升阶段,见下文)的侵位年龄在误差范围内完全一致,说明该地区正处于碰撞后地壳隆升向伸展垮塌阶段的转变时期,也即是伸展开始.

5.2 地壳伸展的方式

在班公湖—怒江缝合带南面的印度河—雅鲁藏布江缝合带上,人们把沿冈底斯地块南缘发育的一系列南北向裂谷和岩脉解释为地壳抬升到最大高度后发生重力塌陷的结果(Coleman and Hodges, 1995; Williams *et al.*, 2001). 而从班公湖岛弧带的情况看,地壳伸展表现为一系列南北向、东西向脉岩侵位,开始只有南北向脉岩花岗斑岩侵位($t=79.58$ Ma),说明此时只有东西向地壳伸展. 稍后便有更多数量的闪长玢岩岩墙沿南北向和东西向同时侵位,说明此时地壳沿东西和南北两个方向同时伸展,暗示着地壳深部有顶穹构造. 在 R_1 - R_2 图(图 7)中,几条闪长玢岩的样品都落在碰撞后地壳隆升区内,表明班公湖岛弧带这

一时期正处于碰撞后地壳隆升阶段.

5.3 岩浆源区

班公湖岛弧带晚白垩世发生的地壳伸展作用,伴随着地壳深部物质的熔融. 从前面的岩石化学分析结果可以看出,这些在地壳伸展期间侵位的南北向和东西向脉岩,普通具有富集大离子亲石元素 Rb、Th、U、K、Pb,亏损高场强元素 Nb、Ta、Ti 的岛弧岩浆作用特征,说明这时的岩浆作用仍然受岛弧环境的控制. 在 Th/Ce-Th/Sm 和 Ce/Pb-Pb 图上(图 8a, b),这些脉岩都落在印度洋型 MORB 地幔与俯冲沉积物之间的混合线上,说明它们的岩浆源区是被俯冲沉积物熔体交代过的富集型地幔. 脉岩中的 Nb、Ta 负异常可能就是 MORB 型地幔被沉积物熔体交代的结果,因为许多研究已经发现随洋壳板片俯冲到深部的沉积物,其熔体具有负 Nb 异常(Elliott *et al.*, 1997; Turner *et al.*, 1997; Class *et al.*, 2000). 在混合线上最早形成的花岗斑岩具有较高的沉积物含量(图 8a)或靠近沉积物一端(图 8b);而稍晚形成的闪长玢岩则总是靠近印度洋型 MORB 地幔. 这些结果说明最早形成的花岗斑岩的地幔源区受沉积物熔体交代富集的程度较高,可达 15%以上,而后来形成的闪长玢岩的地幔源区受沉积物熔体交代富集的程度低,不超过 10%.

5.4 熔融条件

岩石地球化学上,最早形成的花岗斑岩富 SiO₂、K₂O, 贫 Na₂O、CaO、Fe₂O₃ (T)、MgO, Sr、Ti 强烈亏损,负 Eu 异常明显. 这些都与岩浆源区有大量的斜长石和角闪石残留是一致的,即岩浆生成于斜长角闪岩相条件下. 岩石中 Nb/Ta 比值低也可以由角闪石在源区残留来解释,因为实验研究已经证实,在俯冲环境角闪石在岩浆源区会优先综合 Nb 而排斥 Ta,造成相应熔体 Nb/Ta 比值降低(Tiepolo *et al.*, 2000). 相比之下,闪长玢岩 Si₂O 含量较低, K₂O、Na₂O、CaO 含量相当, Sr 弱富集, Ti 弱亏损,负 Eu 异常弱, Nb、Ta 同时亏损. 这些特征指示它们岩浆源区斜长石和角闪石是不稳定的,它们应该有更大的深度. 在 Nb/Ta-Nb 图中(图 8c)花岗斑岩靠近含角闪石 85%的斜长角闪岩相线分布;闪长玢岩则在含角闪石很低的板内玄武岩(IP-BAS)与板片熔体(SM)的混合线附近(含角闪石在 0~20%左右). 图 8d 进一步表明,班公湖岛弧带在晚白垩世地壳伸展过程中最早形成的花岗斑岩与稍后形成的闪长玢岩不仅在源区富集程度、变质相(残留矿物组合)及深度上有差异,其部分熔融程度也是不一样

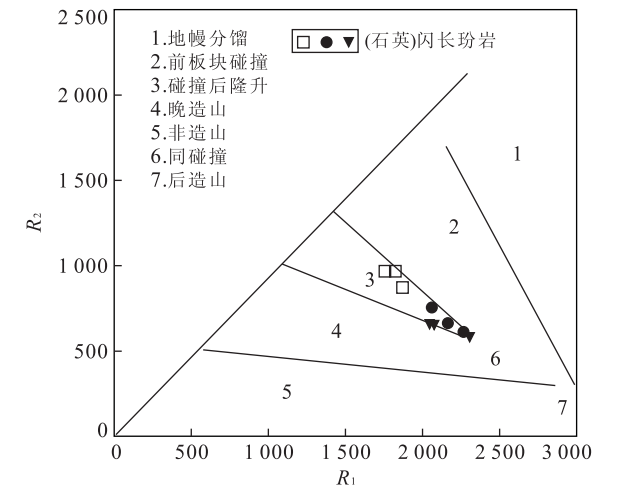


图 7 班公湖岛弧带洋盆闭合后形成的脉岩的 R_1 - R_2 图
Fig. 7 R_1 - R_2 diagram of the dykes formed after the closure of the Tethys oceanic basin in the Bangong lake island arc zone

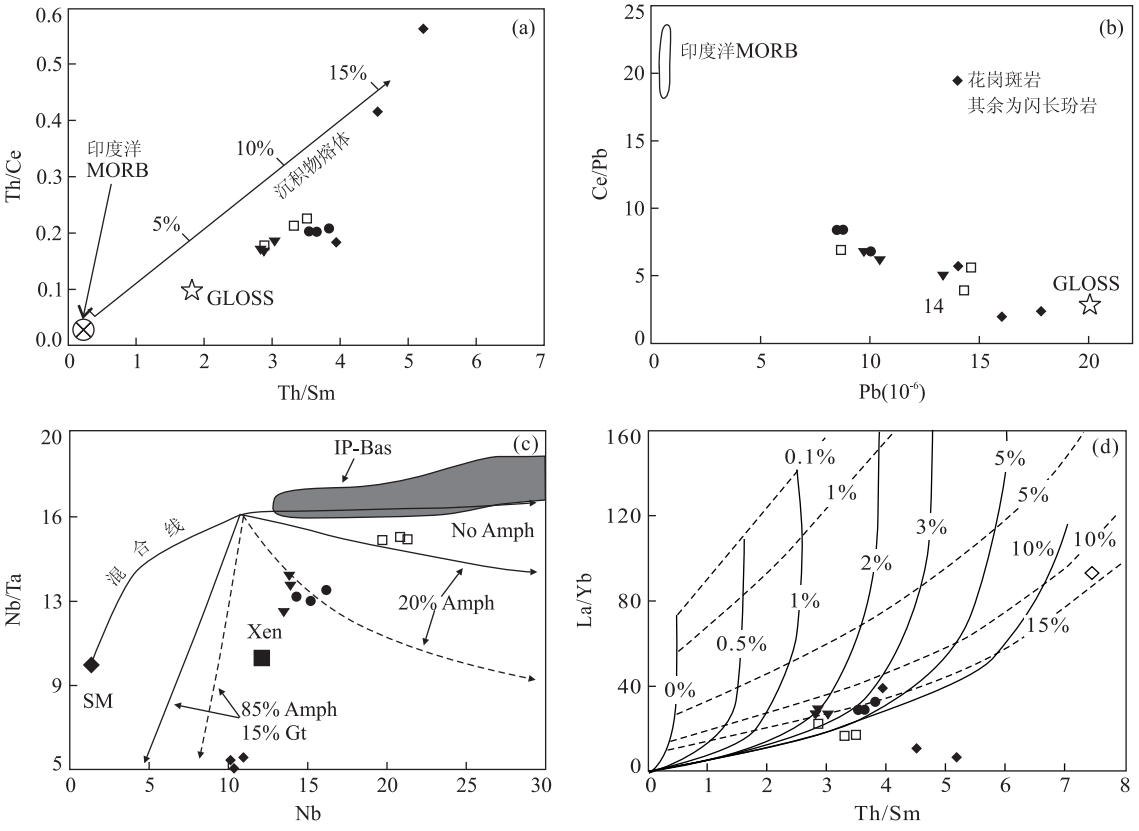


图 8 班公湖岛弧带洋盆闭合后形成的脉岩的地球化学特征

Fig. 8 Geochemical characters of the dykes formed after the closure of the Tethys oceanic basin in the Bangong lake island arc zone
a. 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;b. 样品分布呈负斜率代表二元混合;a 和 b 图中的印度洋 MORB 据 Rehkämpfe and Hofmann(1997);GLOSS 据 Plank and Langmuir(1998);c. IP-Bas 代表板内玄武岩;SM 代表沉积物熔体;Xen 代表地壳混染物;箭头线代表不同角闪石含量的混合线;原图据 Gómez-Tuena *et al.* (2007);d. 虚线上的百分数代表地幔的部分熔融程度,实线上的百分数代表沉积物熔体所占的比例

的。闪长玢岩岩浆源区深度较大,沉积物熔体大体在 1%~10% 之间,部分熔融程度约 8%~15%;而花岗斑岩的岩浆源区位于斜长石角闪石稳定的较浅部位,沉积物熔体大于 10%,部分熔融程度则大于 15%。

6 结论

(1)青藏高原西部班公湖岛弧带发育一系列南北向和东西向岩脉,指示着造山带在特提斯洋盆闭合后经历过地壳伸展过程。岩脉包括 2 种岩石类型,一种为花岗斑岩,只发育南北向的,锆石 U-Pb LA-ICP-MS 加权平均年龄为 79.59 ± 0.32 Ma, MSWD=1.08;另一种为闪长玢岩(±石英),既有南北向的,也有东西向的,锆石 U-Pb LA-ICP-MS 加权平均年龄为 76.9 ± 1.2 Ma, MSWD=2.8。这些结果说明班公湖岛弧带的地壳伸展过程发生在晚白垩世,一开始伸展只表现为东西向,稍后南北向也开

始伸展。

(2)伸展开开始时形成的花岗斑岩岩石化学上富 SiO₂、K₂O,贫 Na₂O、CaO、Fe₂O₃(T)、MgO,地球化学上高度富集大离子不相容元素 Rb、U、Th、K、Pb,强烈亏损高场强元素 Nb、Ti,Nb/Ta 比值低,负 Eu 异常强烈。这些特征一致表明它们的岩浆源区有大量斜长石和角闪石残留,即岩浆生成于斜长角闪石相条件下,岩浆源区较浅。

(3)与花岗斑岩相比,稍晚形成的闪长玢岩 SiO₂ 含量降低,K₂O、Na₂O、CaO 三者含量相当,Fe₂O₃(T)含量增高。地球化学上除了富集大离子不相容元素 Rb、U、Th、K、Pb,亏损高场强元素 Nb、Ti 外,Ta 与 Nb 同等亏损,Nb/Ta 比值增高,Sr 呈弱富集状态,负 Eu 异常大大减弱。这些特征说明它们的岩浆源区不是以斜长石和角闪石作为残留相,很可能形成于更大的深度,即榴辉岩相或石榴石角闪岩相条件下。

(4)2 种岩脉都具有 Rb、U、Th、Pb 明显富集,

Nb、Ti 强烈亏损的岛弧岩浆作用特征,是由于它们的岩浆源区印度洋型 MORB 地幔都受到了随板片俯冲到深部的沉积物熔体的交代,生成于较深部位的闪长玢岩参与交代的沉积物熔体较少,大约在 1%~10% 之间,部分熔融程度也较低,约 8%~15%;而生成于较浅部位的花岗斑岩参与交代的沉积物熔体较多(>10%),部分熔融程度则>15%。

致谢:野外工作得到了成都理工大学李佑国教授热忱的帮助,匿名审稿人提出了宝贵的修改意见,在此一并表示谢意!

References

- Cao, S. H., Li, D. W., Yu, Z. Z., et al., 2009. Characteristics and mechanism of the Dangra Yun Co and Xuru Co NS-trending graben in the Gangdese, Tibet. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 34 (6): 914—920 (in Chinese with English abstract).
- Chang, C. F., Zheng, X. L., Pan, Y. S., 1978. The geology history of Himalaya and tectonic belt division and causes for uplift. International Geological Collection of Academic Paper I—Regional Tectonic and Geomechanics. Geological Publishing House, Beijing, 198—211 (in Chinese).
- Class, C., Miller, D. M., Goldstein, S. L., et al., 2000. Distinguishing melt and fluid subduction components in Umnak volcanics, Aleutian arc. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 1, 1—34.
- Coleman, M., Hodges, K., 1995. Evidence for Tibetan plateau uplift before 14 Myr ago from a new minimum age for east-west extension. *Nature*, 374: 49—52.
- Coulon, C., Maluski, H., Bollinger, C., et al., 1986. Mesozoic and Cenozoic volcanic rocks from central and southern Tibet: $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ dating, petrological characteristics and geodynamical significance. *Earth and Planetary Science Letters*, 79 (3—4): 281—302. doi: 10. 1016/0012—821X(86)90186—X
- Coward, M. P., Kidd, W. S. F., Pan, Y., et al., 1988. The structure of the 1985 Tibet geotraverse, Lhasa to Golmud. *Philosophical Transactions of the Royal Society*, 327(1594): 307—333. doi: 10. 1098/rsta. 1988. 0131
- Dunlap, W. J., Wysoczanski, R., 2002. Thermal evidence for Early Cretaceous metamorphism in the Shyok suture zone and age of the Khardung volcanic rocks, Ladakh, India. *Journal of Asian Earth Sciences*, 20 (5): 481—490. doi: 10. 1016/S1367—9120(01)00042—6
- Elliott, T., Plank, T., Zindler, A., et al., 1997. Element transport from slab to volcanic front at the Mariana arc. *Journal of Geophysical Research*, 102 (B7): 14991—15019. doi: 10. 1029/97JB00788
- Girardeau, J., Marcoux, J., Fourcade, E., et al., 1985. Xainxa ultramafic rocks, Central Tibet, China: tectonic environment and geodynamic significance. *Geology*, 13 (5): 330—333. doi: 10. 1130/0091—7613(1985)13<330: XURCTC>2. 0. CO;2
- Gómez-Tuénal, A., Langmuir, C. H., Goldstein, S. L., et al., 2007. Geochemical evidence for slab melting in the Trans-Mexican volcanic belt. *Petrology*, 48 (3): 537—562. doi: 10. 1093/petrology/egl071
- Kapp, P., Murphy, M. A., Yin, A., et al., 2003. Mesozoic and Cenozoic tectonic evolution of the Shiquanhe area of western Tibet. *Tectonics*, 22 (4): 1029—1053. doi: 10. 1029/2001TC001332.
- Mei, H. J., Lin, X. N., Chi, J. X., et al., 1981. On ophiolite system on Qinghai-Xizang plateau with particular reference to its genesis in West Xizang. *Geol. Ecol. Study of Qinghai-Xizang Plateau Proc. Symp. Qinghai-Xizang Plateau*, 1: 545—556.
- Miller, C., Schuster, R., Klötzli, U., et al., 1999. Post-collisional potassic and ultrapotassic magmatism in SW Tibet: geochemical and Sr-Nd-Pb-O isotopic constraints for mantle source characteristics and petrogenesis. *Journal of Petrology*, 40 (9): 1399—1424. doi: 10. 1093/etroj/40. 9. 1399
- Pan, G. T., Mo, X. X., Hou, Z. Q., et al., 2006. Spatial-temporal framework of the Gangdese orogenic belt and its evolution. *Acta Petrologica Sinica*, 22 (3): 521—533 (in Chinese with English abstract).
- Pan, G. T., Zhu, D. C., Wang, L. Q., et al., 2004. Bangong Lake-Nu river suture zone—the northern boundary of Gondwana land: evidence from geology and geophysics. *Earth Science Frontiers*, 11 (4): 371—382 (in Chinese with English abstract).
- Pearce, J. A., Deng, W. M., 1988. The ophiolites of the Tibetan geotraverses, Lhasa to Golmud (1985) and Lhasa to Kathmandu (1986). *Philosophical Transactions of the Royal Society*, 327(1594): 215—238. doi: 10. 1098/rsta. 1988. 0127
- Plank, T., Langmuir, C. H., 1998. The chemical composition of subducting sediment and its consequences for the crust and mantle. *Chemical Geology*, 145 (3—4): 325—394. doi: 10. 1016/S0009—2541(97)00150—2
- Qu, X. M., Hou, Z. Q., Li, Y. G., 2004. Melt components derived from a subducted slab in late orogenic ore-bearing porphyries in the Gangdese copper belt, southern Tibet—an plateau. *Lithos*, 74 (3—4): 131—148. doi: 10. 1016/j.

- lithos, 2004, 01, 003
- Qu, X. M., Wang, R. J., Xin, H. B., et al., 2009. Geochronology and geochemistry of igneous rocks related to the subduction of the Tethys oceanic plate along the Bangong Lake arc zone, the western Tibetan plateau. *Geochimica*, 38(6): 523—535 (in Chinese with English abstract).
- Rehkämpe, M., Hofmann, A. W., 1997. Recycled ocean crust and sediment in Indian Ocean MORB. *Earth and Planetary Sciences Letters*, 147 (1—4): 93—106. doi: 10.1016/S0012-821X(97)00009-5
- Srimal, N., 1986. India-Asia collision; implications from the geology of the eastern Karakoram. *Geology*, 14 (6): 523—527. doi: 10.1130/0091-7613(1986)14<523:ICIFTG>2.0.CO;2
- Tiepolo, M., Vannucci, R., Oberti, R., et al., 2000. Nb and Ta incorporation and fractionation in titanite and kaersutite, crystal-chemical constraints and implications for natural systems. *Earth and Planetary Science Letters*, 176(2): 185—201. doi: 10.1016/S0012-821X(00)00004-2
- Turner, S., Hawkesworth, C., Rogers, N., et al., 1997. ²³⁸U-²³⁰Th disequilibria, magma petrogenesis, and flux rates beneath the depleted Tonga-Kermadec island arc. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 61 (22): 4855—4884. doi: 10.1016/S0016-7037(97)00281-0
- Wang, W. L., Aitchison, J. C., Lo, C. H., et al., 2008. Geochemistry and geochronology of the amphibolite blocks in ophiolitic melange along Bangong-Nujing suture, Central Tibet. *Journal of Asian Earth Sciences*, 33: 122—138.
- Williams, H., Turner, S., Kelly, S., et al., 2001. Age and composition of dikes in southern Tibet; new constraints on the timing of east-west extension and its relationship to postcollisional volcanism. *Geology*, 29(4): 339—342. doi: 10.1130/0091-7613(2001)029<0339:AACODI>2.0.CO;2
- Yin, A., Harrison, T. M., 2000. Geological evolution of the Himalayan-Tibetan orogen. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 28: 211—280. doi: 10.1146/annurev.earth.28.1.211
- Yin, A., Harrison, T. M., Ryerson, F. J., et al., 1994. Tertiary structural evolution of the Gangdese thrust system, southeastern Tibet. *Journal of Geophysical Research*, 99(B9): 18175—18201.
- Yin, A., Kapp, P. A., Murphy, M. A., et al., 1999. Significant Late Neogene east-west extension in northern Tibet. *Geology*, 27 (9): 787—790. doi: 10.1130/0091-7613(1999)027<0787:SLNEWE>2.3.CO;2
- Zhao, T. P., Zhou, M. F., Zhao, J. H., et al., 2008. Geochronology and geochemistry of the c. 80 Ma Rutog granitic pluton, northwestern Tibet; implications for the tectonic evolution of the Lhasa Terrane. *Geological Magazine*, 145(6): 845—857. doi: 10.1017/S0016756808005025

附中文参考文献

- 曹圣华, 李德威, 余忠珍, 等, 2009. 西藏冈底斯当惹雍错—许如错南北向地堑的特征及成因. *地球科学——中国地质大学学报*, 34(6): 914—920.
- 常承法, 郑锡澜, 潘裕生, 1978. 喜马拉雅的地质发展历史、构造带的划分和隆起原因探讨. *国际交流地质学术论文集(1)——区域构造、地质力学*. 北京: 地质出版社, 198—211.
- 潘桂棠, 莫宣学, 侯增谦, 等, 2006. 冈底斯造山带的时空结构及演化. *岩石学报*, 22(3): 521—533.
- 潘桂棠, 朱弟成, 王立全, 等, 2004. 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. *地学前缘*, 11(4): 371—382.
- 曲晓明, 王瑞江, 辛洪波, 等, 2009. 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. *地球化学*, 38(6): 523—535.