

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2020.045>



西藏隆巴俄桑地区玄武岩与安山玢岩的地球化学： 对班公湖-怒江洋构造演化的启示

尹滔, 尹显科, 秦宇龙, 裴亚伦

四川省地质调查院稀有稀土战略资源评价与利用四川省重点实验室, 四川成都 610081

摘要: 狮泉河-永珠-嘉黎蛇绿混杂岩带的构造属性及其与班公湖-怒江缝合带演化的关系, 是了解班公湖-怒江洋中生代构造演化的关键。对隆巴俄桑地区的玄武岩和安山玢岩脉开展了岩石地球化学研究。结果表明, 玄武岩属拉斑玄武岩系列, 富集LREE和大离子亲石元素Rb、Ba、K、Sr、Pb等, 亏损高场强元素Nb、Ta、Ti, 与岛弧拉斑玄武岩特征一致。安山玢岩脉属拉斑玄武岩系列, 有向钙碱系列演化的趋势, 富集大离子亲石元素Rb、Ba、K、Sr、Pb、U等, 亏损高场强元素Nb、Ta, 显示岛弧成因岩浆岩地球化学特征, 低 ΣREE ($11.8 \times 10^{-6} \sim 13.8 \times 10^{-6}$), $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}} = 0.37 \sim 0.43$, 亏损LREE, 与N-MORB相似, 具有岛弧岩浆岩(IAB)和正常洋中脊玄武岩(N-MORB)双重特征, 与不成熟的弧后盆地玄武岩(BABB)特征一致。综合区域地质资料认为, 隆巴俄桑玄武岩和安山玢岩形成的构造环境均与俯冲相关, 可能分别形成于班公湖-怒江洋壳南向俯冲消减相关的洋内或者活动大陆边缘的岛弧环境和不成熟的弧后盆地环境, 是中侏罗至早白垩世期间班公湖-怒江洋壳南向俯冲消减的再循环的产物。

关键词: 岩石成因; 俯冲消减; 弧后盆地; 狮泉河蛇绿混杂岩; 班公湖-怒江缝合带; 构造地质。

中图分类号: P581

文章编号: 1000-2383(2020)07-2345-15

收稿日期: 2020-03-10

Geochemistry of Basalt and Andesitic Porphyrite in Longbaesang Area, Tibet: Implications for the Tectonic Evolution of the Bangonghu-Nujiang Ocean

Yin Tao, Yin Xianke, Qin Yulong, Pei Yalun

Evaluation and Utilization of Strategic Rare Metals and Rare Earth Resource Key Laboratory of Sichuan Province, Sichuan Geological Survey, Chengdu 610081, China

Abstract: The tectonic nature of Shiquanhe-Yongzhu-Jiali ophiolitic mélangé zone and its relationship to the Bangonghu-Nujiang suture zone are key to understanding the Mesozoic tectonic evolution of the Bangonghu-Nujiang Ocean. Geochemistry of basalt and andesitic porphyrite in Longbaesang area are reported in this paper. The results show that the basalt are tholeiitic rocks, and enriched in light rare earth elements and large ion lithophile elements (Rb, Ba, K, Sr, Pb), and depleted Nb, Ta, Ti. All of the geochemistry characteristics of the basalt rocks are the same as typical of island arc tholeiite. The andesitic porphyrite are tholeiitic rocks, which has the trend of evolution to calc alkaline rocks, enriched large ion lithophile elements (Rb, Ba, K, Sr, Pb, U), depleted Nb, Ta, clearly displaying compositional characteristics of island-arc volcanic rocks. Additionally, the compositional characteristics of lower ΣREE ($11.8 \times 10^{-6} \sim 13.8 \times 10^{-6}$), $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}} (0.37 \sim 0.43)$ and depleted in light rare earth elements, which are also similar to normal mid-ocean ridge basalt. Therefore, the andesitic porphyrite may be formed in a immature back-arc basin. Combined with the regional geological data, the tectonic environment of the basalts and andesitic porphyrites both are related to

基金项目: 中国地质调查局项目 (Nos. DD20160026, DD20191029).

作者简介: 尹滔 (1983-), 男, 工程师, 硕士, 主要从事区域地质与矿产地质调查相关的研究工作. ORCID: 0000-0001-9002-5890. E-mail: 406593621@qq.com

引用格式: 尹滔, 尹显科, 秦宇龙, 等, 2020. 西藏隆巴俄桑地区玄武岩与安山玢岩的地球化学: 对班公湖-怒江洋构造演化的启示. 地球科学, 45(7): 2345-2359.

subduction, which respectively, may be formed in the oceanic or the active continental margin of island arc environment and the immature back-arc basin environment, related to the South subduction of Bangonghu-Nujiang ocean crust, which are record the recycling of the Southern subducted Bangonghu-Nujiang oceanic crust during the late Jurassic to the early Cretaceous.

Key words: petrogenesis; subduction; back-arc basin; Shiquanhe ophiolitic mélange belt; Bangonghu-Nujiang Suture Zone; tectonics.

0 引言

狮泉河—永珠—嘉黎蛇绿混杂岩带是青藏高原最重要的构造带之一,其规模宏大,西起狮泉河—昂龙岗日,经古昌、拉果错、阿索、永珠、纳木错、嘉黎、波密,东至察隅,全长超过 1 800 km. 一直以来,狮泉河—永珠—嘉黎蛇绿混杂岩带由于基础资料相对欠缺,研究程度偏低,其成因存在较多争议. 一部分学者认为狮泉河—永珠—嘉黎蛇绿混杂岩带具有“异地”成因,是班公湖—怒江洋在闭合过程中南向俯冲形成的推覆体(Kapp *et al.*, 2003; 张玉修, 2007); 另一部分学者认为它是“原地”形成的,是班公湖—怒江洋演化过程中形成的弧后盆地或弧间盆地(王保弟等, 2007; Zhu *et al.*, 2011; 徐梦婧, 2014; Yuan *et al.*, 2015; Zeng *et al.*, 2018), 还有一部分学者认为该带是雅江洋和班公—怒江洋的持续向北俯冲促使的拉萨地块岩石圈伸展和裂解(曾云川, 2017). 由此可见,对于狮泉河—永珠—嘉黎蛇绿混杂岩带的成因和形成构造环境还存在很大争议,严重制约了对青藏高原班公湖—怒江洋中生代构造演化历史的认识.

众所周知,弧后盆地是岛弧发展到一定阶段弧后扩张的产物,是沟—弧—盆体系构造演化的一个重要组成部分,弧后盆地的前缘必定存在俯冲消减的证据. 近年来,随着班公湖—怒江缝合带研究的深入,越来越多的证据表明班公湖—怒江洋壳发生了南向俯冲(康志强等, 2010; Zhu *et al.*, 2011; 张诗启等, 2018; 尹滔等, 2019). 而作者在西藏隆巴俄桑地区狮泉河蛇绿混杂岩的基质中新识别一套具岛弧拉斑玄武岩特征的玄武岩和一套具弧后盆地玄武岩(BABB)特征的安山玢岩脉,很可能代表了晚侏罗至早白垩世期间班公湖—怒江缝合带的南向俯冲形成的弧—盆体系的浅部响应,对于探讨班公湖—怒江洋和狮泉河—永珠—嘉黎洋的构造演化具有重要意义.

本文拟在详细的野外地质调查基础上,对新发现的玄武岩和安山玢岩进行岩石学、地球化学研究,结合区域上最新的研究成果,探讨中侏罗至早

白垩世期间拉萨地块北部昂龙岗日地区的大地构造背景与隆巴俄桑玄武岩和安山玢岩形成的地球动力学机制,为构建班公湖—怒江缝合带与狮泉河—永珠—嘉黎缝合带演化史提供最新的数据资料.

1 地质背景

狮泉河—永珠—嘉黎蛇绿混杂岩带位于班公湖—怒江蛇绿混杂岩带与印度—雅鲁藏布蛇绿混杂岩带之间,大地构造位置隶属于拉萨地块中北部,该带和洛巴堆—米拉山断裂带将拉萨地块由北向南进一步划分为北部、中部、南部亚地块(图 1a)(Zhu *et al.*, 2013).

研究区位于狮泉河—永珠—嘉黎蛇绿混杂岩带西部日土县和革吉县交界的昂龙岗日地区,主体属狮泉河蛇绿混杂岩带的一部分,出露中生代侏罗纪拉贡塘组($J_{2-3}l$)深水复理石相岩屑砂岩夹泥岩,早白垩纪乌木垄铅波岩组(K_1w)中酸性火山碎屑岩以及滨—浅海相生物碎屑灰岩、砂砾岩、泥岩,早白垩纪郎山组(K_1l)浅海相生物碎屑灰岩、粉砂岩、杂砂岩,以及狮泉河蛇绿混杂岩(JK_1sh),另在狮泉河蛇绿混杂岩带中局部侵入有晚白垩世正长花岗岩($\xi\gamma K_2$)、二长花岗岩($\eta\gamma K_2$)及中新世二长花岗岩($\eta\gamma N_1$)(图 1b).

狮泉河蛇绿混杂岩带总体呈北西西向展布,中东部局部呈近东西向展布,在昂龙岗日地区有向班公湖—怒江蛇绿混杂岩带延伸之势,其主要由超基性岩(辉橄岩、橄辉岩或蛇纹岩)、基性岩(玄武岩、辉石岩、辉绿岩、辉绿岩墙、斜长岩)、中酸性火山岩、火山碎屑岩(粗安质火山碎屑岩、流纹质火山碎屑岩、流纹质和英安质火山碎屑岩)以及基质(砂板岩、硅质岩、砾岩、灰岩)等(Kapp *et al.*, 2003; 郑有业等, 2004); 北侧与侏罗系拉贡塘组碎屑沉积呈断裂接触,晚期被郎山组地层角度不整合覆盖(郑有业等, 2004); 带内韧性变形、褶皱、构造置换现象极为发育.

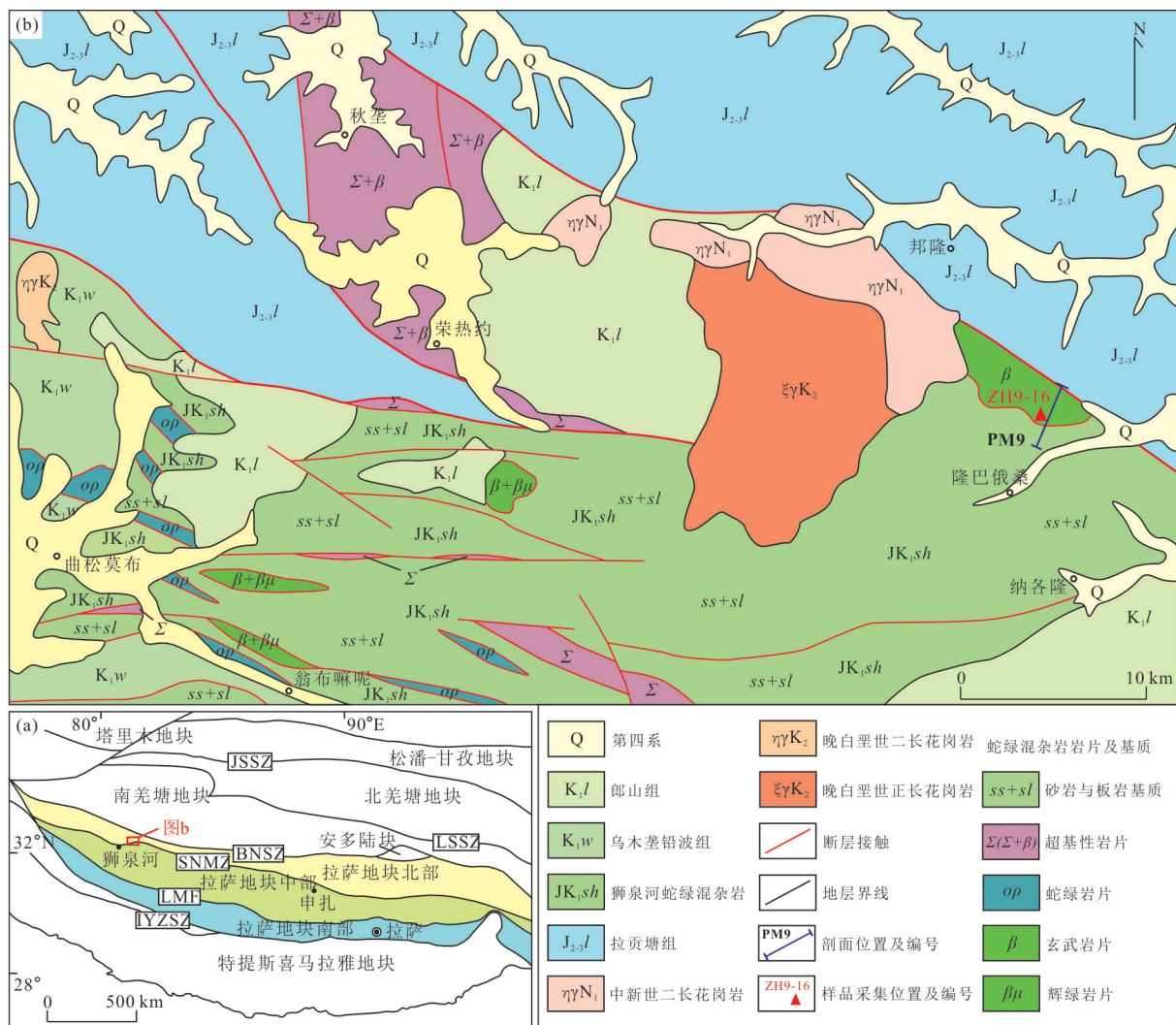


图1 昂龙岗日地区地质简图

Fig.1 Simplified geological map in the Anglonggangri region

a. 青藏高原构造单元划分(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;SNMZ. 狮泉河—纳木错蛇绿混杂岩带;LMF. 洛巴堆—米拉山断裂带;IYZSZ. 印度河—雅鲁藏布缝合带;据 Zhu *et al.*, 2013 修改); b. 研究区地质图(据 1:25 万革吉幅地质图、1:25 万狮泉河幅地质图修改)

2 剖面岩石学特征

野外工作对昂龙岗日地区狮泉河蛇绿混杂岩带隆巴俄桑火山岩露头进行了剖面测量,剖面岩石特征简述如下:

中上侏罗统拉贡唐组(J_{2-3l}), >14 m

⑨青灰色薄层状板岩, >14 m

断层接触

侏罗—早白垩统狮泉河蛇绿混杂岩群(JK_{1sh}), >2 577 m

⑧墨绿色、绿色块状粗玄岩, >597 m

⑦深灰色硅质岩, 31 m

⑥墨绿色、绿色块状粗玄岩, 741 m

⑤深灰色、黑灰色玄武岩、玄武质火山角砾岩, 局部发育少量安山玢岩脉, 433 m

断层接触

④青灰色砂质板岩、砾岩, 偶夹板岩、钙质板岩, 96 m

③灰—青灰色硅质岩, 52 m

②青灰色板岩、钙质板岩、砂质板岩, >627 m

不整合接触

①第四系全新统冲积物

本次样品采自狮泉河蛇绿混杂岩带东北部昂龙岗日地区 PM9 隆巴俄桑火山岩剖面(图 2), 共采集了 6 件玄武岩和 2 件安山玢岩, 用于地球化学分析。

玄武岩呈深灰色、黑灰色, 具斑状结构, 块状构造, 斑晶主要为基性斜长石(5%~10%), 基质以隐晶质为主, 发育许多微小斜长石晶屑。剖面中的玄

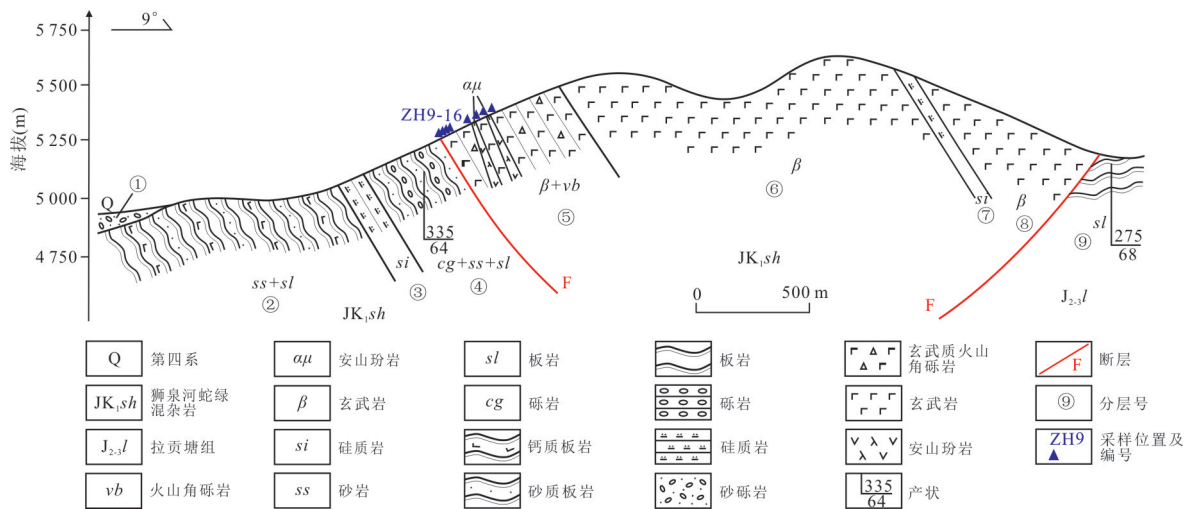


Fig.2 Section of the Longbaesang volcanic rocks

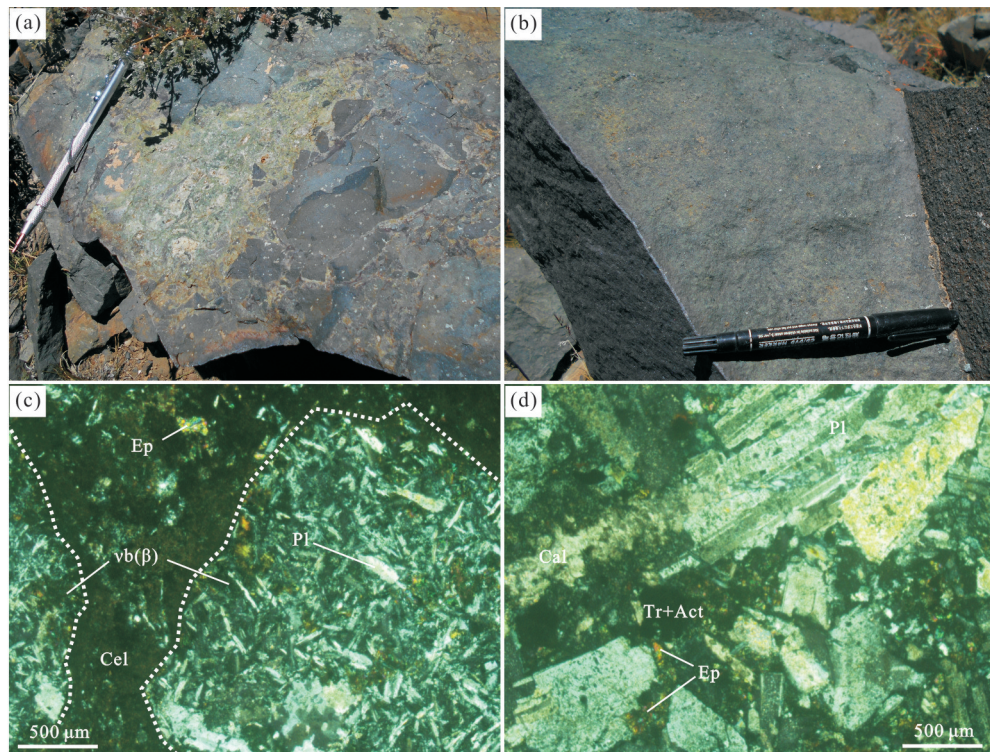


图 3 隆巴俄桑火山岩样品野外露头及镜下照片

Fig.3 Field and petrographic photographs of the Longbaesang volcanic rocks

a. 斑状玄武岩火山角砾岩筒; b. 安山玢岩; c. 玄武质火山角砾岩火山角砾结构; d. 安山玢岩斑状结构; Ep. 绿帘石; vb(β). 玄武质火山角砾; Cel. 绿帘石; Pl. 斜长石; Cal. 方解石; Tr+Act. 透闪石和阳起石集合体(次闪石化, 保留辉石假象)

武岩与玄武质火山角砾岩呈不等厚互层组成一套火山机构, 断层接触于砾岩、硅质岩、砂板岩基质之上. 玄武岩中局部发育火山岩角砾岩筒(图 3a 和图 3c), 局部发育薄膜状孔雀石化.

安山玢岩呈暗绿色, 具斑状结构, 块状构造(图

3b 和图 3d), 主要由辉石、基性斜长石组成, 局部发育蚀变, 常见次闪石化、绿帘石化、绿泥石化. 安山玢岩呈脉状侵入玄武岩与玄武质火山角砾岩组成的火山机构内.

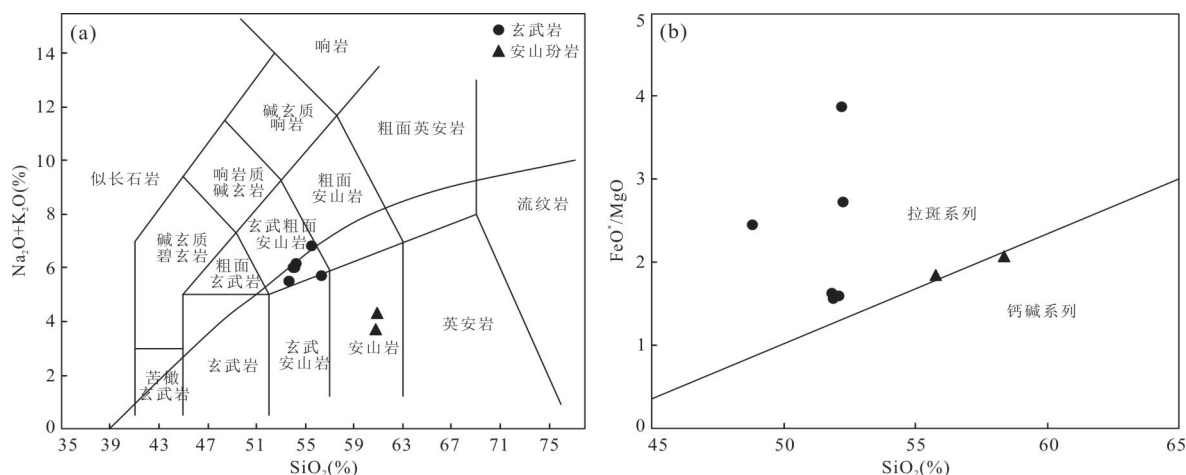
图4 隆巴俄桑玄武岩和安山玢岩 TAS(a)及 $\text{SiO}_2\text{-FeO}^*/\text{MgO}$ (b)图解

Fig.4 Total alkalis - silica (a) and $\text{SiO}_2\text{-K}_2\text{O}$ (b) diagrams of the Longbaesang basalt and andesitic porphyrite
据 Le Maitre(1989);Miyashiro(1974)

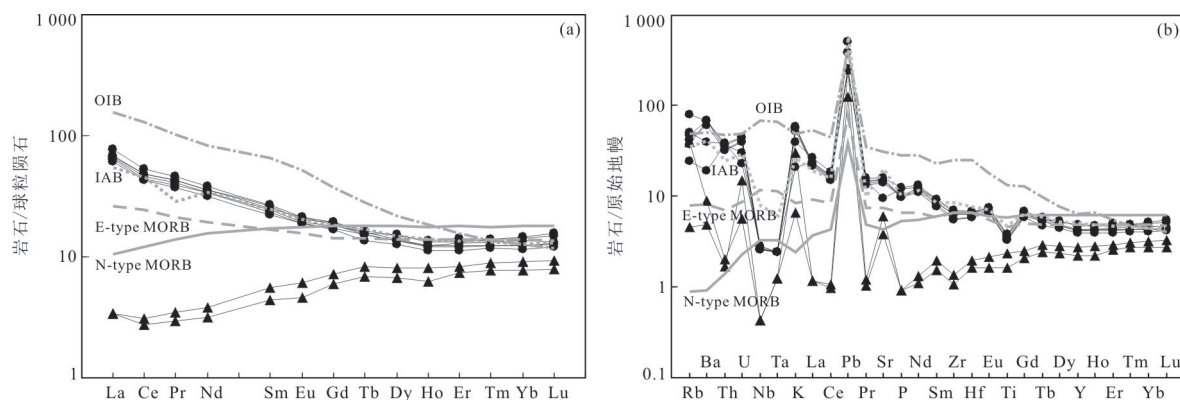


图5 隆巴俄桑玄武岩和安山玢岩球粒陨石标准化稀土元素配分曲线图(a)及原始地幔标准化微量元素蛛网图(b)

Fig.5 Chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive mantle-normalized trace element spider diagrams (a) of the Longbaesang basalt and andesitic porphyrite

a. 标准化值据 Boynton(1984); b. 标准化值据 Sun and McDonough(1989); OIB, E-type MORB, N-type MORB 数据引自 Sun and McDonough(1989), IAB 数据为平均值引自杨婧等(2016a)

3 分析方法

选择新鲜的、具代表性的玄武岩、安山玢岩岩石样品,经室内切割,然后粉碎至 200 目。主量、微量和稀土元素的分析均在广州澳实矿物实验室完成。主量元素采用 Philips PW2404 型 X 荧光光谱仪(XRF)测定。首先在试样中加入含有硝酸锂的助熔剂,充分混合后高温熔融,然后将熔融物倒入铂金模子形成扁平玻璃片后,再用荧光光谱仪分析,另选取一份试样放入马弗炉中加热至 $1\,000\,^{\circ}\text{C}$ 达 1 h,试样的加热前后的重量差即为烧失量。微量元素和稀土元素采用 Perkin Elmer Elan 9000 型电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)测定,分析精度优于 5%。微量元素试样用高氯酸、硝酸、氢氟酸消解,蒸

至近干后,用稀盐酸溶解定容,再用等离子体质谱仪分析;稀土元素试样先将样品加入到偏硼酸锂/四硼酸锂熔剂中,混合均匀后,在 $1\,025\,^{\circ}\text{C}$ 以上的熔炉中熔化,待熔液冷却后,用硝酸、盐酸和氢氟酸定容,再用等离子体质谱仪分析,微量元素和稀土元素分析精度均优于 10%。

4 岩石地球化学特征

隆巴俄桑玄武岩、安山玢岩的地球化学分析结果见表 1。

4.1 玄武岩

隆巴俄桑玄武岩在 TAS 图解(图 4a)中位于粗面玄武岩区域, SiO_2 含量为 48.9%~52.3%,MgO 含

Table 1 Bulk-rock major(%), trace elements(10^{-6}) of the Longbaesang porphyry basalt and andesitic porphyrite[illegible]

续表1

样品编号	PM9ZH9	PM9ZH10	PM9ZH11	PM9ZH12	PM9ZH14	PM9ZH16	PM9ZH13	PM9ZH15
样品名称	玄武岩	玄武岩	玄武岩	玄武岩	玄武岩	玄武岩	安山玢岩	安山玢岩
Pb	2	2	4	3	4	2	2	<2
Th	2.71	3.02	3.28	3.29	3.12	2.82	0.14	0.17
U	0.82	0.93	0.48	0.92	0.62	0.85	0.31	0.12
ΣREE	76.3	82.5	93.0	84.9	87.0	79.8	13.8	11.8
LREE	64.0	68.7	78.3	71.5	72.2	66.7	6.05	5.22
HREE	12.3	13.8	14.7	13.4	14.8	13.1	7.74	6.54
LREE/HREE	5.20	4.99	5.34	5.32	4.88	5.08	0.78	0.80
La _N /Yb _N	5.33	4.81	5.34	5.47	4.64	5.11	0.37	0.43
δEu	0.97	0.91	0.92	0.97	0.89	0.94	0.96	0.90
δCe	0.87	0.87	0.85	0.87	0.87	0.86	0.91	0.88
Nb/Ta	18	20	20	19	19	18	/	/

注: $Mg^\# = 100 \times Mg / (Mg + \sum Fe)$; $FeO^* = FeO + 0.998 \times Fe_2O_3$

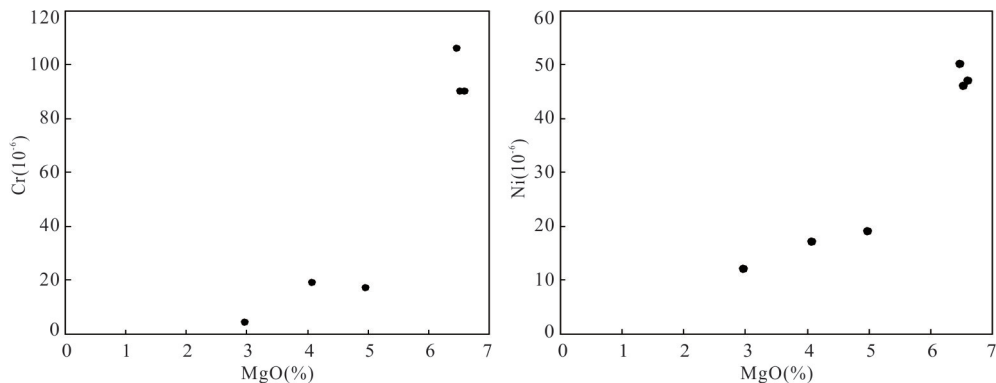


图6 隆巴俄桑玄武岩选择性地球化学图解
Fig.6 Selective geochemical diagrams of the Longbaesang basalt

量为2.80%~6.34%, $Mg^\#$ 值在32.7~54.0之间, K_2O 含量为0.20%~0.90%, Na_2O 含量为3.94%~4.67%, TFe_2O_3 含量为10.7%~11.8%, Al_2O_3 含量为14.6%~16.0%,在 SiO_2 - FeO^*/MgO 图解(图4b)中位于拉斑系列区域.在稀土元素球粒陨石标准化图解上表现出右倾型配分模式,轻稀土略富集 $[(La/Yb)_N=4.64\sim5.47]$, $\Sigma REE=76.3\times10^{-6}\sim93.0\times10^{-6}$,Eu异常不明显($Eu/Eu^*=0.89\sim0.97$),在微量元素原始地幔标准化蛛网图上显示样品亏损高场强元素Nb、Ta、Ti,富集大离子亲石元素Rb、Ba、K、Sr、Pb,与岛弧拉斑玄武岩的特征一致(图5).

4.2 安山玢岩

隆巴俄桑安山玢岩在TAS图解(图4a)中位于安山岩区域, SiO_2 含量为55.8%~58.4%, MgO 含量为4.41%~4.81%, $Mg^\#$ 值在47.0~49.7之间, K_2O 含量为0.63%~1.78%, Na_2O 含量为2.50%~3.93%,

TFe_2O_3 含量为9.66%~9.87%, Al_2O_3 含量为13.1%~14.0%,在 SiO_2 - FeO^*/MgO 图解(图4b)中位于拉斑系列与钙碱性系列之间区域.安山玢岩具有低 $\Sigma REE=11.8\times10^{-6}\sim13.8\times10^{-6}$,Eu异常不明显($Eu/Eu^*=0.88\sim0.91$),在稀土元素球粒陨石标准化图解上表现出左倾型配分模式,轻稀土略亏损 $[(La/Yb)_N=0.37\sim0.43]$,与N-MORB相似(图5a).在微量元素原始地幔标准化蛛网图上显示样品富集大离子亲石元素Rb、Ba、K、Sr、Pb、U,亏损高场强元素Nb、Ta,具有岛弧成因的岩浆岩地球化学特征(图5b).

5 讨论

5.1 岩石成因与源区特征

隆巴俄桑玄武岩具有中等偏低的 MgO 含量(3.78%~6.34%),中等的 $Mg^\#$ 值(32.7~54.0),明显

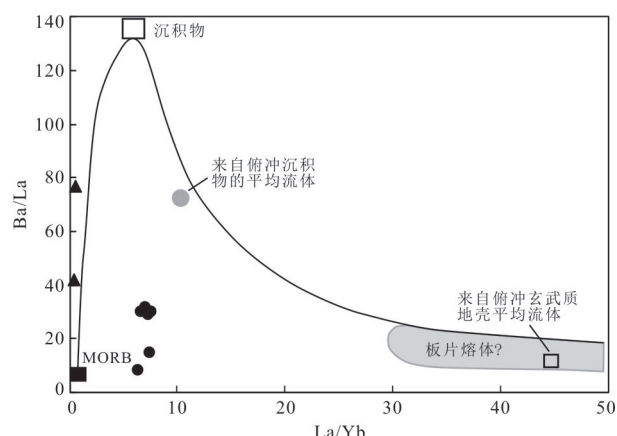


图7 隆巴俄桑玄武岩和安山玢岩脉的Ba/La-La/Yb图解
Fig.7 Ba/La-La/Yb diagram of the Longbaesang basalt and andesitic porphyrite
据朱弟成等(2006a)

低于原始岩浆 65 的 $Mg^\#$ 参考值 (Olsen, 1995), 表明分离结晶作用较明显. 随着 MgO 含量的降低, Cr 、 Ni 等也具有下降趋势 (图 6), 表明具有橄榄石的分离结晶. MgO 与 Fe_2O_3 和 TiO_2 含量没有明显的相关性, 表明没有 $Fe-Ti$ 氧化物的分离结晶. MgO 与 Al_2O_3 没有明显的相关性, Eu 异常不明显, 表明没有明显的斜长石分离结晶. 岩石富集轻稀土元素和大离子亲石元素 Rb 、 Ba 、 K 、 Sr 、 Pb 、 U , 暗示岩浆可能受到过消减板片脱水形成的流体的交代; 亏损高场强元素 Nb 、 Ta 、 Ti , 表明在整个俯冲消减过程中金红石作为残留相. 利用 Nb/Yb 值可以判断地幔富集、俯冲影响的程度 (Pearce and Stern, 2006), 本区玄武岩 Nb/Yb 值 (0.75~0.91), 比 N-MORB 偏高 (0.76, Sun and McDonough, 1989), 表明其源区与正常的洋中脊玄武岩相当. 已有研究表明, 高 Ba/La 比值是代表俯冲流体来源于消减沉积物和玄武质洋壳的良好标志, 高 La/Yb 比值是板片熔体来源的重要参数 (Castillo and Newhall, 2004). 在 $Ba/La-La/Yb$ 图解 (图 7) 中, 样品具有较高的 Ba/La 值和较低的 La/Yb 值, 没有明确显示具有来自远洋沉积物或板片熔体的关系, 但较低的 Nb/U 值 (2.07~4.17), 与全球大洋沉积物相似 ($Nb/U=5.3$, Plank and Langmuir, 1998), 暗示了来自俯冲板片的沉积物对这些岩浆形成的贡献. 综上所述, 玄武岩为俯冲构造环境下来自消减沉积物的流体进入亏损的岩石圈地幔楔并诱发其部分熔融而形成隆巴俄桑安山玢岩 (SiO_2 含量 (55.8%~58.4%), 具有相对较高的 $Mg^\#$ 值 (47.0~49.7), 而与下地壳部分熔融有关的岩

浆 $Mg^\#$ 值一般小于 40 (Atherton and Petford, 1993), 因此隆巴俄桑安山玢岩可能与幔源相关. 较低的 $(La/Yb)_N$ 值 (0.37~0.43), 亏损轻稀土元素, 暗示岩浆源区可能与亏损地幔有关. 极低的 ΣREE 值 ($11.8 \times 10^{-6} \sim 13.8 \times 10^{-6}$)、 P_2O_5 值 (0.02%)、 Zr 值 ($12 \times 10^{-6} \sim 15 \times 10^{-6}$), 与原始地幔值接近 (Sun and McDonough, 1989); Nb/Yb 值 (0.19~0.23) 低于 N-MORB (0.76, Sun and McDonough, 1989). 富集大离子亲石元素 Rb 、 Ba 、 K 、 Sr 、 Pb 、 U , 亏损高场强元素 Nb 、 Ta , 指示了岩浆源区有消减板片脱水形成的流体的加入. 岩石未见明显 Eu 异常特征, 这也可能与岩浆大量富水抑制了斜长石分离结晶有关 (Yuan *et al.*, 2008). 在 $Ba/La-La/Yb$ 图解 (图 7) 中, 样品具有较高的 Ba/La 值和较低的 La/Yb 值, 显示具有来自俯冲沉积物的平均流体成分的加入趋势; 较低的 Nb/U (0.97~2.50), 表明来自俯冲板片的沉积物对这些岩浆形成的贡献. 这些特征表明安山玢岩的源区比正常的洋中脊玄武岩源区更加亏损的地幔, 可能为先期流体交代过的古老熔融残余地幔.

5.2 形成的时代

本次研究工作尽管目前尚未获得两套火山岩可信的同位素年龄, 但产于狮泉河蛇绿混杂岩带中的隆巴俄桑玄武岩以及仅见于玄武岩及玄武质火山角砾岩中的安山玢岩脉的形成时限可以参考狮泉河蛇绿混杂岩的形成时代.

已有古生物化石研究表明, 狮泉河蛇绿混杂岩带中基质发育含大量晚侏罗世—早白垩世的放射虫化石的硅质岩 (郑有业等, 2004), 晚期该混杂岩带被郎山组地层角度不整合覆盖 (郑有业等, 2004), 蛇绿岩中灰岩和粉砂岩岩层中也发现的珊瑚和植物化石等形成于早白垩世 (郭铁鹰等, 1991); 已有同位素年代学研究表明, 到目前为止, 虽然狮泉河镇地区的蛇绿混杂岩带获得的最老年龄为 193.1 ± 2.3 Ma (郑有业等, 2004), 但区内大量基性—超基性岩的形成年龄主要集中于中侏罗世 (辉长闪长岩墙中锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为 163.35 ± 35.00 Ma, 郑有业等, 2006; 辉长岩锆石 SHRIMP U-Pb 加权平均年龄为 167.0 ± 1.4 Ma, 史仁灯, 2007; 高镁安山岩锆石 U-Pb 年龄为 160.8 ± 2.3 Ma 和 160.7 ± 2.9 Ma, Liu *et al.*, 2018). 从空间位置来看, 隆巴俄桑玄武岩和安山玢岩总体位于狮泉河蛇绿混杂岩的东部延伸段, 明显有往班公湖—怒江缝合带延伸的趋势 (图 1), 其北侧居鲁地区的

西班牙公湖—怒江混杂岩带中辉长岩锆石年龄为 103.8 ± 3.9 Ma (Liu *et al.*, 2014), 暗示在早白垩世期间班公湖—怒江缝合带还是打开的; 而自研究区向东的拉果错(斜长角闪岩的角闪石 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 坪年龄 137.9 ± 6.4 Ma, Yuan *et al.*, 2015)、仲仓(辉长岩锆石 U-Pb 年龄 $113.4 \sim 116.1$ Ma, 徐梦婧, 2014)、阿索(辉长岩锆石 U-Pb 年龄 $114.9 \sim 117.3$ Ma, Zeng *et al.*, 2016, 2018)、永珠(辉绿岩墙锆石 U-Pb 表面年龄 $114 \sim 133$ Ma, 王永胜等, 2003)等地区还发现有早白垩世的基性岩片的存在。基于以上地质事实、古生物化石研究及年代学证据, 本文认为隆巴俄桑玄武岩和安山玢岩可能均形成于中侏罗—早白垩世期间。

5.3 形成的构造环境

玄武质岩石的地球化学特征对构造背景非常敏感, 可以有效地揭示岩石产出的构造背景。为探讨火山岩形成的构造环境, 需要重点分析该区火山岩中不活动元素、稀土元素、高场强元素、强相容元素以及大离子亲石元素等提供的信息, 从而厘定其形成的大地构造环境。

隆巴俄桑玄武岩具有较低的 TiO_2 ($0.71\% \sim 0.83\%$), 与岛弧火山岩 ($0.58\% \sim 0.85\%$) 相似 (Pearce and Cann, 1973); 而 P_2O_5 ($0.21\% \sim 0.27\%$) 接近 IAB 平均值 0.22% (杨婧等, 2016a); Condie (1999) 统计了不同构造环境的玄武岩, 以 $\text{La}/\text{Nb} = 1.4$ 为界, 洋中脊玄武岩 (MORB)、洋岛玄武岩 (OIB) 和大洋玄武岩 $\text{La}/\text{Nb} < 1.4$, $\text{Ni} > 30 \times 10^{-6}$, 岛弧玄武岩 $\text{La}/\text{Nb} > 1.4$, 本区玄武岩 La/Nb 值为 $7.75 \sim 9.15$, 属于岛弧玄武岩范围。稀土配分模式呈现右倾型曲线, 大离子亲石元素 Rb、Ba、K、Sr 富集, 高场强元素 Nb、Ta、Ti 亏损, 具有岛弧玄武岩的特征, 表明岩石遭受到消减板片流体交代的地幔楔源区的部分熔融而形成 (Gribble *et al.*, 1998)。在 V-Ti/1 000 图解 (图 8a) 中落于岛弧拉斑玄武岩和俯冲板片近端弧后和弧前玄武岩区域。此外, 高场强不相容元素 Th、Hf、Nb、Yb 等因不易受后期地质作用影响而具有较好稳定性, 因此常用来判别火山岩构造背景。在 Th/Yb-Nb/Yb 图解 (图 8b) 中隆巴俄桑玄武岩位于大洋岛弧和活动大陆边缘区域, 总体表现出与大洋岛弧和活动大陆边缘火山岩的亲缘性。在微量元素 Ti/100-Zr-Sr/2 图解 (图 8c) 中隆巴俄桑玄武岩落入活动陆缘钙碱性玄武岩区域, 而在 Hf/3-Th-Nb/16 图解 (图 8d) 中同样落入活动陆缘钙碱

性玄武岩区域, 与主量元素 $\text{SiO}_2\text{-FeO}^*/\text{MgO}$ 图解中显示的拉斑系列与不一致, 与冲绳海槽玄武岩相似 (国坤等, 2016), 较高的 Th/Nb 值 ($1.51 \sim 1.73$), 暗示浆源区受到了更多的深俯冲过程的影响, 由于 Th 和轻稀土元素等在深俯冲过程中容易迁移, 由此掩盖了拉斑玄武岩系列中的 Th, 使其表现出钙碱性系列的特征。

隆巴俄桑安山玢岩具有极低的 ΣREE 值 ($11.8 \times 10^{-6} \sim 13.8 \times 10^{-6}$)、 P_2O_5 值 (0.02%)、Zr 值 ($12 \times 10^{-6} \sim 15 \times 10^{-6}$), 与原始地幔值接近 (Sun and McDonough, 1989), 稀土配分模式呈现左倾型曲线, 亏损 LREE, 显示具有 N-MORB 的特征, 表明岩浆源区可能为先期流体交代过的古老熔融残余地幔; 极低的 TiO_2 ($0.35\% \sim 0.50\%$), 与岛弧火山岩相近 ($0.58\% \sim 0.85\%$, Pearce and Cann, 1973), 富集大离子亲石元素 Rb、Ba、K、Sr, 亏损高场强元素 Nb、Ta, 显示具有岛弧玄武岩的特征, 表明岩浆源区可能受到了消减板片流体的交代。在 Th/Yb-Nb/Yb 图解 (图 9) 中隆巴俄桑安山玢岩位于大洋岛弧区域, 表明具有大洋岛弧岩浆的亲缘性。在微量元素 Ti/100-Zr-Sr/2 图解 (图 8c) 中隆巴俄桑安山玢岩落入岛弧拉斑玄武岩区域, 而在 Hf/3-Th-Nb/16 图解 (图 8d) 中同样落入岛弧拉斑玄武岩区域, 与主量元素 $\text{SiO}_2\text{-FeO}^*/\text{MgO}$ 图解中显示的拉斑系列与钙碱系列稍有不同, 可能源于安山玢岩相对偏中性, 岩浆从源区至地表经过了一些列的岩浆演化, 而高场强元素在后期的岩浆演化过程中相对稳定, 但主量元素将伴随岩浆的演化向于钙碱性演化的趋势。此外, 杨婧等 (2016b) 研究表明 BABB 兼具 MORB 和 IAB 的地球化学特征, BABB 相对于 MORB 更富集 Cs、Rb、U、Ba、Th 和 Pb 等不相容元素, 有明显的 Nb-Ta 负异常, 这些地球化学特征与本区的安山玢岩相似。

综上, 结合隆巴俄桑玄武岩与安山玢岩的接触关系, 本文认为隆巴俄桑玄武岩具有岛弧玄武岩的特征, 可能形成于俯冲相关的洋内岛弧环境或者活动大陆边缘岛弧环境, 而安山玢岩具有 N-MORB 和 IAB 的双重地球化学特征, 且具有原始地幔的亲缘性, 可能形成于不成熟的弧后盆地环境。

5.4 大地构造意义

如前所述, 狮泉河—永珠—嘉黎缝合带的成因还存在如下争议: ①“异地”说; ②“初始洋盆”说; ③班公湖—怒江洋壳南向俯冲的“弧后盆地”说。

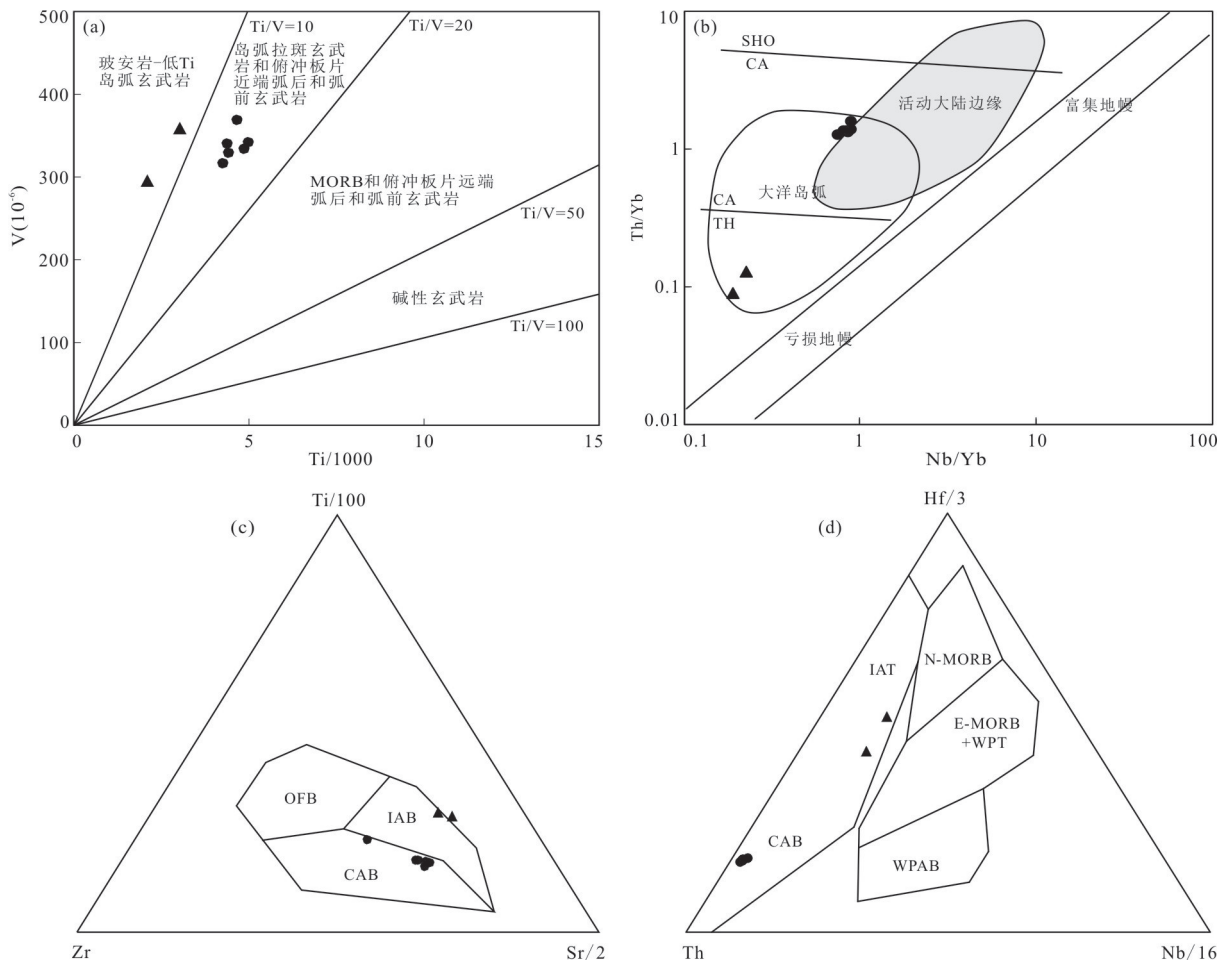


图 8 火山岩构造判别图解

Fig.8 Tectonic setting discrimination diagrams of the volcanic rocks

a. V-Ti/1 000 图解;b. Th/Yb-Nb/Yb 图解 (Pearce, 1982); c. Ti/100-Zr-Sr/2 图解 (Pearce and Cann, 1973); d. Hf/3-Th-Nb/16 图解 (Wood, 1980); SHO. 橄辉安粗岩系; CA. 钙碱系列; TH. 拉斑系列; CAB. 活动陆缘玄武岩; IAT. 岛弧拉斑玄武岩; IAB. 岛弧玄武岩; OFB. 扩张板块边缘的玄武岩; N-MORB. N 型洋中脊玄武岩; E-MORB. 富集型洋中脊玄武岩; WPT. 板内拉斑玄武岩; WPAB. 板内碱性玄武岩

关于“异地”说,野外调查中并没有找到相应的地质证据,相反,玄武岩和安山玢岩脉均具原地产出特征,其理由如下:首先,两套岩石类型明显不同于北侧班公湖—怒江蛇绿混杂岩带具超基性岩或枕状、块状玄武岩的岩石类型;其二,调查区的区域构造特征显示具北向逆冲特点,断层倾向南,很难用由北向南的推覆体解释;其三,两套岩石的地球化学特征表明分别具有 IAB 和 BABB 特征,明显不同于北侧班公湖—怒江蛇绿混杂岩带中具 N-MORB 的特征枕状玄武岩(据江玛—赛登地区 1:5 万四幅矿产地质调查报告);最后,在成岩时代方面,两套岩体作为狮泉河蛇绿混杂岩带的夹层和侵入体,形成时代应该不早于早白垩世,与北侧班公湖—怒江缝合带中蛇绿岩形成时代. 综上所述,玄武岩和安山玢岩脉为原地系统,在岩石类型、地质

构造、地球化学、年代学方面均与北侧班公湖—怒江蛇绿混杂岩中玄武岩明显不同;再次,狮泉河—永珠—嘉黎缝合带与班公—怒江缝合带近于平行延伸约 2 000 km,目前尚未发现由该蛇绿岩套推覆形成规模化的“飞来峰”或者“构造窗”,因此,“异地”说很难令人信服.

“初始洋盆”说(曾云川, 2017)认为永珠辉石岩地球化学特征具有红海型蛇绿岩的特征,可能为晚侏罗世拉萨地块岩石圈伸展和裂解形成的一个初始洋盆,但关于辉石岩的岩石地球化学特征是否具有 Nb-Ta 值负异常,是否与俯冲带有关还有待进一步的研究 (Berly *et al.*, 2006). 此外,狮泉河—永珠—嘉黎缝合带中还存在许多位置、时代不同且具有类似地球化学特征的基性岩 (Yuan *et al.*, 2015; Zeng *et al.*, 2018),以及本文所报道的安山玢岩很难

用同样的理论解释。因此,即使永珠初始洋盆存在,扩大到整个狮泉河—永珠—嘉黎缝合带,也很难用岩石圈伸展和裂解模式来解释晚侏罗纪以来拉萨地块的构造演化。

“弧后盆地”说认为狮泉河—永珠—嘉黎蛇绿岩带代表班公湖—怒江洋壳南向俯冲形成的弧后盆地。主要基于以下的证据:形成时代方面,班公湖—怒江洋盆早在晚二叠世打开,三叠纪—侏罗纪期间不断演化发展(Wang *et al.*, 2008; 徐梦婧, 2014; Zhang *et al.*, 2014; Wang *et al.*, 2016; Zhang *et al.*, 2016; 武勇等, 2018; Fan *et al.*, 2018),一直持续到早白垩世晚期(朱弟成等, 2006b; Fan *et al.*, 2014; Liu *et al.*, 2014; Zhang *et al.*, 2014)。因此,班公湖—怒江洋的演化历史明显比侏罗纪—白垩纪的狮泉河—永珠—嘉黎洋盆复杂;蛇绿混杂岩的规模和物质组成方面,班公湖—怒江缝合带明显比狮泉河—永珠—嘉黎缝合带规模大、延续稳定,且发育侏罗纪复理石沉积,且带中铁镁质岩的组成更加完善,按照地球化学特征主要可分为MORB、岛弧玄武岩、碱性洋岛玄武岩和玻安岩等,而狮泉河—永珠—嘉黎缝合带主要分为MORB、岛弧玄武岩(徐梦婧, 2014),缺少了代表与俯冲无关的洋岛玄武岩的证据;古地磁方面, Li *et al.* (2016)研究表明拉萨地块和羌塘地块在晚三叠时期有着大约50°纬度差,其洋盆的规模非常大;在岩浆的浅部响应方面,早白垩世期间北拉萨地块广泛发育多尼组、去申拉组等火山岩以及盐湖、阿翁错等复式花岗岩,为班公湖—怒江洋壳的南向俯冲消减和板片断离提供了证据(康志强等, 2010; Zhu *et al.*, 2011; 张诗启等, 2018; 尹滔等, 2019),而考虑到班公湖—怒江洋盆的打开时间,北拉萨地块缺乏晚三叠纪到侏罗纪的岩浆活动则一直被部分学者所质疑。众所周知,洋壳的俯冲消减是大陆增生的主要机制之一,对洋壳和大陆地壳之间的物质再循环具有重要意义。而已有研究表明,北拉萨地块以新生地壳为主(朱弟成等, 2012),洋壳和大陆地壳之间的物质再循环在晚三叠纪到侏罗纪可能更多地以连续地增生的形式存在,而且弧后盆地同样属于洋壳的俯冲消减的物质再循环系统,在北拉萨地块的狮泉河、达如错等地区普遍发现有基性、超基性的镁铁质岩块以及高镁安山岩的报道(郑有业等, 2004; 李小波等, 2015; Liu *et al.*, 2018)。而狮泉河—永珠—嘉黎缝合带的铁镁质岩主要具有大洋中脊玄武岩和大洋岛弧玄

武岩的双重特征或岛弧玄武岩特征(徐梦婧, 2014),与本文中的玄武岩、安山岩脉一样可能与俯冲作用有关,因此,这些铁镁质岩石同样可能为班公湖—怒江洋壳南向俯冲消减的物质再循环。

近年来,越来越多的证据支持狮泉河—永珠—嘉黎洋盆是班公湖—怒江洋壳南向俯冲的弧后盆地。徐梦婧等(2014)对果芒错蛇绿混杂岩中的硅质岩进行了报道,认为果芒错蛇绿混杂岩的形成环境为靠近大陆边缘的弧后盆地;但大部分学者主要针对蛇绿岩开展了岩石学、地球化学和年代学研究,如狮泉河(邱瑞照等, 2005)、拉果错(王保弟等, 2007; Yuan *et al.*, 2015)、永珠—果芒错(王永胜等, 2003; 叶培盛等, 2005)、仁错—纳木错(Yuan *et al.*, 2015; Zhong *et al.*, 2015; Zeng *et al.*, 2018)、凯蒙(和钟铎等, 2006)等,这些早侏罗世—早白垩世期间形成的蛇绿岩地球化学特征具洋中脊和岛弧火山岩的双重特征,与SSZ型蛇绿岩特征一致,指示可能形成于弧间盆地或弧后盆地环境。虽然蛇绿岩和硅质岩的地球化学特征均指示可能为弧后盆地环境,但如果能在时间尺度上和空间尺度上将北拉萨地块的岩浆作用与狮泉河—永珠—嘉黎洋的构造演化结合在一起探讨将更具说服力。

已有研究表明,狮泉河蛇绿混杂岩带获得的最老年龄为 193.1 ± 2.3 Ma(郑有业等, 2004),但也有可能是早侏罗期间班公湖—怒江洋壳南向俯冲消减而形成的蛇绿岩岩片,其不具代表性。而大量的同位素年代学表明,自中侏罗世起,在狮泉河蛇绿混杂岩带中开始形成了一些岛弧环境的高镁安山岩及弧后盆地环境的基性超基性岩(郑有业等, 2006; 史仁灯, 2007; Liu *et al.*, 2018),可能表明班公湖—怒江洋壳已开始南向俯冲消减,并逐渐增生的形式形成了北拉萨地块,南向俯冲的物质再循环作用可能主要表现为弧后岩浆系统,而岛弧岩浆系统次之;直到早白垩世,可能受雅江洋壳北向俯冲的影响,在班公湖—怒江缝合带、北拉萨地块以及狮泉河洋盆发生了大规模的岩浆爆发,在北拉萨地块主要发育了早白垩世多尼组、去申拉组火山岩及阿翁错—盐湖等复式花岗岩,在班公湖—怒江缝合带则发育了去申拉组火山岩及少量中酸性侵入岩,这些岩浆的年代学和地球化学特征均表明班公湖—怒江洋壳在早白垩世发生了南向俯冲消减,并在110 Ma左右发生了板片断离(康志强等, 2010; Zhu *et al.*, 2011; 隋清霖, 2014; 张诗启等, 2018; 尹滔等,

2019),而在狮泉河蛇绿岩带主要发育了早白垩世乌木堇铅波组的钙碱性性岛弧型中酸性火山岩(杨永锋等,2016),因此,这些岩浆均可能是早白垩世期间班公湖—怒江洋壳南向俯冲消减或板片断离导致的物质再循环的产物。

综上所述,本次在狮泉河—永珠—嘉黎缝合带隆巴俄桑地区发现的玄武岩和安山玢岩可能代表了中侏罗至早白垩世期间班公湖—怒江洋壳南向俯冲消减的再循环物质。

6 结论

(1)隆巴俄桑玄武岩属拉斑玄武岩系列,岩石富集 LREE 和大离子亲石元素 Rb、Ba、K、Sr、Pb 等,亏损高场强元素 Nb、Ta、Ti,属岛弧拉斑玄武岩;隆巴俄桑安山玢岩属拉斑玄武岩系列,有向钙碱系列演化的趋势,富集大离子亲石元素 Rb、Ba、K、Sr、Pb、U 等,亏损 LREE 和高场强元素 Nb、Ta,具有正常洋中脊玄武岩(N-MORB)、岛弧玄武岩(IAB)的双重特征,属不成熟弧后盆地玄武岩。

(2)隆巴俄桑玄武岩与安山玢岩可能分别形成于班公湖—怒江洋壳南向俯冲消减相关的洋内或者活动大陆边缘的岛弧环境和不成熟的弧后盆地环境,是中侏罗至早白垩世期间班公湖—怒江洋壳南向俯冲消减的再循环的产物。

致谢:感谢两位审稿老师和编辑部老师提出宝贵的意见和建议!

References

- Atherton, M. P., Petford, N., 1993. Generation of Sodium-Rich Magmas from Newly Underplated Basaltic Crust. *Nature*, 362(6416): 144—146. <https://doi.org/10.1038/362144a0>
- Berly, T.J., Hermann, J., Arculus, R.J., et al., 2006. Supra-Subduction Zone Pyroxenites from San Jorge and Santa Isabel (Solomon Islands). *Journal of Petrology*, 47(8): 1531—1555. <https://doi.org/10.1093/petrology/egl019>
- Boynton, W.V., 1984. Geochemistry of the Rare Earth Elements: Meteorite Studies. In: Henderson, P., ed., *Rare Earth Element Geochemistry*. Elsevier, Amsterdam, 63—114.
- Castillo, P.R., Newhall, C.G., 2004. Geochemical Constraints on Possible Subduction Components in Lavas of Mayon and Taal Volcanoes, Southern Luzon, Philippines. *Journal of Petrology*, 45(6): 1089—1108. <https://doi.org/10.1093/petrology/egh005>
- Condie, K. C., 1999. Mafic Crustal Xenoliths and the Origin of the Lower Continental Crust. *Lithos*, 46(1): 95—101. [https://doi.org/10.1016/s0024-4937\(98\)00056-5](https://doi.org/10.1016/s0024-4937(98)00056-5)
- Fan, J. J., Li, C., Liu, J. H., et al., 2018. The Middle Triassic Evolution of the Bangong-Nujiang Tethyan Ocean: Evidence from Analyses of OIB-Type Basalts and OIB-Derived Phonolites in Northern Tibet. *International Journal of Earth Sciences*, 107(5): 1755—1775. <https://doi.org/10.1007/s00531-017-1570-x>
- Fan, J. J., Li, C., Xie, C. M., et al., 2014. Petrology, Geochemistry, and Geochronology of the Zhonggang Ocean Island, Northern Tibet: Implications for the Evolution of the Banggongco—Nujiang Oceanic Arm of the Neo-Tethys. *International Geology Review*, 56(12): 1504—1520. <https://doi.org/10.1080/00206814.2014.947639>
- Gribble, R. F., Stern, R. J., Newman, S., et al., 1998. Chemical and Isotopic Composition of Lavas from the Northern Mariana Trough: Implications for Magmagenesis in Back-Arc Basins. *Journal of Petrology*, 39(1): 125—154. <https://doi.org/10.1093/ptro/39.1.125>
- Guo, K., Zhai, S.K., Yu, Z.H., et al., 2016. Determination and Tectonic Significance of Volcanic Rock Series in the Okinawa Trough. *Earth Science*, 41(10): 1655—1664 (in Chinese with English abstract).
- Guo, T.Y., Liang, D.Y., Zhang, Y.Z., et al., 1991. Geology of Ngari Tibet. China University of Geosciences Press, Wuhan, 1—464 (in Chinese).
- He, Z. H., Yang, D. M., Wang, T. W., 2006. Age, Geochemistry and Its Tectonic Significance of Kaimeng Ophiolites in Jiali Fault Belt, Tibet. *Acta Petrologica Sinica*, 22(2): 653—660 (in Chinese with English abstract).
- Kang, Z.Q., Xu, J.F., Wang, B.D., et al., 2010. Qushenla Formation Volcanic Rocks in North Lhasa Block: Products of Bangong Co-Nujiang Tethy's Southward Subduction. *Acta Petrologica Sinica*, 26(10): 3106—3116 (in Chinese with English abstract).
- 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): 3-1—3-24. <https://doi.org/10.1029/2001tc001332>
- Le Maitre, R.W., 1989. A Classification of Igneous Rocks and Glossary of Terms. Blackwell, Oxford, 1—193.
- Li, X.B., Wang, B.D., Liu, H., et al., 2015. The Late Jurassic High-Mg Andesites in the DaruTso Area, Tibet: Evidence for the Subduction of the Bangong Co—Nujiang River Oceanic Lithosphere. *Geological Bulletin of China*, 34(2—3): 251—261 (in Chinese with English abstract).
- Li, Y. L., He, J., Han, Z. P., et al., 2016. Late Jurassic So-

- dium-Rich Adakitic Intrusive Rocks in the Southern Qiangtang Terrane, Central Tibet, and Their Implications for the Bangong-Nujiang Ocean Subduction. *Lithos*, 245: 34–46. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2015.10.014>
- Liu, W. L., Huang, Q. T., Gu, M., et al., 2018. Origin and Tectonic Implications of the Shiquanhe High-Mg Andesite, Western Bangong Suture, Tibet. *Gondwana Research*, 60: 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2018.03.017>
- Liu, W. L., Xia, B., Zhong, Y., et al., 2014. Age and Composition of the Rebang Co and Julu Ophiolites, Central Tibet: Implications for the Evolution of the Bangong Mesozo-Tethys. *International Geology Review*, 56(4): 430–447. <https://doi.org/10.1080/00206814.2013.873356>
- Miyashiro, A., 1974. Volcanic Rock Series in Island Arcs and Active Continental Margins. *American Journal of Science*, 274(4): 321–355. <https://doi.org/10.2475/ajs.274.4.321>
- Olsen, K.H., 1995. Continental Rifts: Evolution, Structure, Tectonics. Amsterdam: Elsevier, 1–466.
- Pearce, J. A., Cann, J. R., 1973. Tectonic Setting of Basic Volcanic Rocks Determined Using Trace Element Analyses. *Earth and Planetary Science Letters*, 19(2): 290–300. [https://doi.org/10.1016/0012-821x\(73\)90129-5](https://doi.org/10.1016/0012-821x(73)90129-5)
- Pearce, J. A., Stern, R. J., 2006. Origin of Back-Arc Basin Magmas: Trace Element and Isotope Perspectives. Back-Arc Spreading Systems: Geological, Biological, Chemical, and Physical Interactions. Geophys. Monogr. Ser. AGU, Washington, DC, 63–86.
- Pearce, J. A., 1982. Trace Elements Characteristics of Lavas from Destructive Plate Boundaries. In: Thorpe, R. S., ed., Andesites. Wiley, New York, 525–548.
- 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. [https://doi.org/10.1016/s0009-2541\(97\)00150-2](https://doi.org/10.1016/s0009-2541(97)00150-2)
- Qiu, R. Z., Deng, J. F., Zhou, S., et al., 2005. Ophiolite Types in Western Qinghai Tibetan Plateau: Evidences from Petrology and Geochemistry. *Earth Science Frontiers*, 12(2): 277–291 (in Chinese with English abstract).
- Shi, R. D., 2007. SHPIMP Dating of the Bangong Lake SSZ-Type Ophiolite: Constraints on the Closure Time of Ocean in the Bangong Lake-Nujiang River, Northwestern Tibet. *Chinese Science Bulletin*, 52(2): 223–227 (in Chinese).
- Sui, Q. L., 2014. Chronology, Petrogenesis, and Tectonic Implication of Magmatic Rocks from Yanhu in Northern Lhasa Terrane, Tibet (Dissertation). China University of Geosciences, Beijing, 1–109 (in Chinese with English abstract).
- Sun, S. S., McDonough, W. F., 1989. Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts: Implications for Mantle Composition and Processes. In: Saunders, A. D., Norry, M. J., eds., Magmatism in the Oceanic Basins. *Geological Society, London, Special Publications*, 42(1): 313–345.
- Wang Y. S., Qu Y. G., Lü P., et al., 2003. The Geologic Features of Ophiolite Zone in the Yongzhu Area, Tibet. *Jilin Geology*, 22(2): 1–14 (in Chinese with English abstract).
- Wang, B. D., Wang, L. Q., Chung, S. L., et al., 2016. Evolution of the Bangong-Nujiang Tethyan Ocean: Insights from the Geochronology and Geochemistry of Mafic Rocks within Ophiolites. *Lithos*, 245: 18–33. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2015.07.016>
- Wang, B. D., Xu, J. F., Zeng, Q. G., et al., 2007. Geochemistry and Genesis of Lhaguo Tso Ophiolite in South of Gerze Area, Center Tibet. *Acta Petrologica Sinica*, 23(6): 1521–1530 (in Chinese with English abstract).
- Wang, W. L., Aitchison, J. C., Lo, C. H., et al., 2008. Geochemistry and Geochronology of the Amphibolite Blocks in Ophiolitic Mélanges along Bangong-Nujiang Suture, Central Tibet. *Journal of Asian Earth Sciences*, 33(1/2): 122–138. <https://doi.org/10.1016/j.jseas.2007.10.022>
- Wood, D. A., 1980. The Application of a Th-Hf-Ta Diagram to Problems of Tectonomagmatic Classification and to Establishing the Nature of Crustal Contamination of Basaltic Lavas of the British Tertiary Volcanic Province. *Earth and Planetary Science Letters*, 50(1): 11–30. [https://doi.org/10.1016/0012-821x\(80\)90116-8](https://doi.org/10.1016/0012-821x(80)90116-8)
- Wu, Y., Chen, S. Y., Qin, M. K., et al., 2018. Zircon U-Pb Ages of Dongcuo Ophiolite in Western Bangonghu-Nujiang Suture Zone and Their Geological Significance. *Earth Science*, 43(4): 1070–1084 (in Chinese with English abstract).
- Xu, M. J., 2014. The evolution of Shiquanhe-Yongzhu-Jiali Ophiolitic Mélange Belt, Tibetan Plateau (Dissertation). Jilin University, Jilin, 1–152 (in Chinese with English abstract).
- Xu, M. J., Li, C., Wu, Y. W., et al., 2014. Geochemical Characteristics and Sedimentary Environments of Siliceous Rocks in Guomang-Co Ophiolitic Mélange of Tibet. *Geological Bulletin of China*, 33(7): 1061–1066. (in Chinese with English abstract)
- Yang, J., Wang, J. R., Zhang, Q., et al., 2016a. Global IAB Data Excavation: The Performance in Basalt Discrimination Diagrams and Preliminary Interpretation. *Geological Bulletin of China*, 35(12): 1937–1949 (in Chinese with English abstract).

- Yang, J., Wang, J.R., Zhang, Q., et al., 2016b. Back-Arc Basin Basalt(BABB) Data Mining: Comparison with MORB and IAB. *Advances in Earth Science*, 31(1): 66—77 (in Chinese with English abstract).
- Yang, Y.F., Jiang, Y.G., Wang, T.C., et al., 2016. Petro-Geochemistry and Sedimentary Environment of the Early Cretaceous Strata from the Shiquanhe-Gegyai area in Tibet and Their Geological Significance. *Geological Bulletin of China*, 35(9): 1456—1462 (in Chinese with English abstract).
- Ye, P.S., Wu, Z.H., Hu, D.G., et al., 2005. Geochemical Characteristics of Ophiolites in Yongzhu-Guomangcuo, Tibet and Its Tectonic Significance. *Geoscience*, 19(4): 508—514(in Chinese with English abstract).
- Yin, T., Li, W., Yin, X.K., et al., 2019. The Early Cretaceous Granodiorites in the Aweng Co Area, Tibet: Evidence for the Subduction of the Bangong Co-Nujiang River Oceanic Crust to the South. *Geology in China*, 46(5): 1105—1115 (in Chinese with English abstract).
- Yuan, C., Sun, M., Xiao, W. J., et al., 2008. Garnet-Bearing Tonalitic Porphyry from East Kunlun, Northeast Tibetan Plateau: Implications for Adakite and Magmas from the MASH Zone. *International Journal of Earth Sciences*, 98 (6): 1489—1510. <https://doi.org/10.1007/s00531-008-0335-y>
- Yuan, Y.J., Yin, Z.X., Liu, W.L., 2015. Tectonic Evolution of the Meso - Tethys in the Western Segment of Bangonghu - Nujiang Suture Zone: Insights from Geochemistry and Geochronology of the Lagkor Tso Ophiolite. *Acta Geologica Sinica-English Edition*, 89(2): 369—388. <https://doi.org/10.1111/1755-6724.12436>
- Zeng, X. W., Wang, M., Fan, J. J., et al., 2018. Geochemistry and Geochronology of Gabbros from the Asa Ophiolite, Tibet: Implications for the Early Cretaceous Evolution of the Meso-Tethys Ocean. *Lithos*, 320—321: 192—206. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2018.09.013>
- Zeng, Y.C., Chen, J.L., Xu, J.F., et al., 2016. Sediment Melting during Subduction Initiation: Geochronological and Geochemical Evidence from the Darutso High-Mg Andesites within Ophiolite Melange, Central Tibet. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 17(12): 4859—4877. <https://doi.org/10.1002/2016gc006456>
- Zeng, Y.C., 2017. Late Triassic-Late Jurassic Magmatic-Tectonic Evolution of the Lhasa Terrane(Dissertation). Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou, 1—193 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, K. J., Xia, B., Zhang, Y. X., et al., 2014. Central Tibetan Meso-Tethyan Oceanic Plateau. *Lithos*, 210—211: 278—288. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2014.09.004>
- Zhang, S.Q., Qi, X.X., Wei, C., et al., 2018. Geochemistry, Zircon U-Pb Dating and Hf Isotope Compositions of Early Cretaceous Magmatic Rocks in Yongzhu Area, Northern Lhasa Terrane, Tibet, and Its Geological Significance. *Earth Science*, 43(4): 1085—1109 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y. X., Li, Z. W., Zhu, L. D., et al., 2016. Newly Discovered Eclogites from the Bangong Meso-Tethyan Suture Zone (Gaize, Central Tibet, Western China): Mineralogy, Geochemistry, Geochronology, and Tectonic Implications. *International Geology Review*, 58(5): 574—587. <https://doi.org/10.1080/00206814.2015.1096215>
- Zhang, Y.X., 2007. Tectonic Evolution of the Middle-Western Bangong-Nujiang Suture, Tibet(Dissertation). Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guang Zhou, 1—268 (in Chinese with English abstract).
- Zheng, Y.Y., Xu, R.K., He, L.X., et al., 2004. The Shiquan River Ophiolitic Mélange Zone in Xizang: The Delineation and Significance of a New Archipelagic Arc-Basin System. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 24(1): 13—20 (in Chinese with English abstract).
- Zheng, Y. Y., Xu, R. K., Ma, G. T., et al., 2006. Ages of Generation and Subduction of Shiquan River Ophiolite: Restriction from SHRIMP Zircon Dating. *Acta Petrologica Sinica*, 22(4): 895—904 (in Chinese with English abstract).
- Zhong, Y., Xia, B., Liu, W.L., et al., 2015. Geochronology, Petrogenesis and Tectonic Implications of the Jurassic Namco-Renco Ophiolites, Tibet. *International Geology Review*, 57(4): 508—528. <https://doi.org/10.1080/00206814.2015.1017776>
- Zhu, D.C., Pan G.T., Mo, X.X., et al., 2006a. Identification for the Mesozoic OIB-Type Basalts in Central Qinghai-Tibetan Plateau: Geochronology, Geochemistry and Their Tectonic Setting. *Acta Geologica Sinica*, 80(9): 1312—1328 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, D.C., Pan, G.T., Mo, X.X., et al., 2006b. Late Jurassic - Early Cretaceous Geodynamic Setting in Middle - Northern Gangdese: New Insights from Volcanic Rocks. *Acta Petrologica Sinica*, 22(3): 534—546 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, D.C., Zhao Z.D., Niu, Y.L., et al., 2012. Origin and Paleozoic Tectonic Evolution of the Lhasa Terrane. *Geological Journal of China Universities*, 18(1): 1—15 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, D. C., Zhao, Z. D., Niu, Y. L., et al., 2013. The Origin and Pre - Cenozoic Evolution of the Tibetan Plateau.

Gondwana Research, 23(4): 1429—1454. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2012.02.002>

Zhu, D. C., Zhao, Z. D., Niu, Y. L., et al., 2011. The Lhasa Terrane: Record of a Microcontinent and its Histories of Drift and Growth. *Earth and Planetary Science Letters*, 301(1/2): 241—255. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2010.11.005>

附中文参考文献

曾云川, 2017. 拉萨地块晚三叠纪—晚侏罗纪岩浆—构造演化(博士学位论文). 广州:中国科学院广州地球化学研究所, 1—193.

郭铁鹰, 梁定益, 张宜智, 等, 1991. 西藏阿里地质. 武汉:中国地质大学出版社, 1—464.

国坤, 翟世奎, 于增慧, 等, 2016. 冲绳海槽火山岩岩石系列的厘定及构造环境意义. *地球科学*, 41(10): 1655—1664.

和钟铎, 杨德明, 王天武, 2006. 西藏嘉黎断裂带凯蒙蛇绿岩的年代学、地球化学特征及大地构造意义. *岩石学报*, 22(2): 653—660.

康志强, 许继峰, 王保弟, 等, 2010. 拉萨地块北部去申拉组火山岩:班公湖—怒江特提斯洋南向俯冲的产物? *岩石学报*, 26(10): 3106—3116.

李波, 王保弟, 刘函, 等, 2015. 西藏达如错地区晚侏罗世高镁安山岩——班公湖—怒江洋壳俯冲消减的证据. *地质通报*, 34(2—3): 251—261.

邱瑞照, 邓晋福, 周肃, 等, 2005. 青藏高原西部蛇绿岩类型:岩石学与地球化学证据. *地学前缘*, 12(2): 277—291.

史仁灯, 2007. 班公湖 SSZ 型蛇绿岩年龄对班—怒洋时限的制约. *科学通报*, 52(2): 223—227.

隋清霖, 2014. 西藏拉萨地块盐湖地区早白垩世岩浆岩年代学、岩石成因及构造意义(博士学位论文). 北京:中国地质大学, 1—109.

王保弟, 许继峰, 曾庆高, 等, 2007. 西藏改则地区拉果错蛇绿岩地球化学特征及成因. *岩石学报*, 23(6): 1521—1530.

王永胜, 曲永贵, 吕鹏, 等, 2003. 西藏永珠蛇绿岩带地质特征. *吉林地质*, 22(2): 1—14.

武勇, 陈松永, 秦明宽, 等, 2018. 西藏班公湖—怒江缝合带西段洞错蛇绿岩中的辉长岩锆石 U-Pb 年代学及地质意义. *地球科学*, 43(4): 1070—1084.

徐梦婧, 2014. 青藏高原狮泉河—永珠—嘉黎蛇绿混杂岩带的构造演化(博士学位论文). 吉林:吉林大学, 1—152.

徐梦婧, 李才, 吴彦旺, 等, 2014. 西藏果芒错蛇绿混杂岩中硅质岩的地球化学特征及其形成环境. *地质通报*, 33(7): 1061—1066.

杨婧, 王金荣, 张旗, 等, 2016a. 全球岛弧玄武岩数据挖掘——在玄武岩判别图上的表现及初步解释. *地质通报*, 35(12): 1937—1949.

杨婧, 王金荣, 张旗, 等, 2016b. 弧后盆地玄武岩(BABB)数据挖掘:与 MORB 及 IAB 的对比. *地球科学进展*, 31(1): 66—77.

杨永锋, 姜亚国, 王天赐, 等, 2016. 西藏狮泉河—革吉一带早白垩世地层沉积环境、岩石地球化学特征及其地质意义. *地质通报*, 35(9): 1456—1462.

叶培盛, 吴珍汉, 胡道功, 等, 2005. 西藏永珠—果芒错蛇绿岩的地球化学特征及其构造意义. *现代地质*, 19(4): 508—514.

尹滔, 李威, 尹显科, 等, 2019. 西藏阿翁错地区早白垩世花岗闪长岩——班公湖—怒江洋壳南向俯冲消减证据. *中国地质*, 46(5): 1105—1115.

张诗启, 戚学祥, 韦诚, 等, 2018. 拉萨地体北部永珠地区早白垩世岩浆岩地球化学、锆石 U-Pb 年代学、Hf 同位素组成及其地质意义. *地球科学*, 43(4): 1085—1109.

张玉修, 2007. 班公湖—怒江缝合带中西段构造演化. 广州:中国科学院广州地球化学研究所, 1—268.

郑有业, 许荣科, 何来信, 等, 2004. 西藏狮泉河蛇绿混杂岩带——一个新的多岛弧盆系统的厘定及意义. *沉积与特提斯地质*, 24(1): 13—20.

郑有业, 许荣科, 马国桃, 等, 2006. 锆石 SHRIMP 测年对狮泉河蛇绿岩形成和俯冲的时间约束. *岩石学报*, 22(4): 895—904.

朱弟成, 潘桂棠, 莫宣学, 等, 2006a. 冈底斯中北部晚侏罗世——早白垩世地球动力学环境:火山岩约束. *岩石学报*, 22(3): 534—546.

朱弟成, 潘桂棠, 莫宣学, 等, 2006b. 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. *地质学报*, 80(9): 1312—1328.

朱弟成, 赵志丹, 牛耀龄, 等, 2012. 拉萨地体的起源和古生代构造演化. *高校地质学报*, 18(1): 1—15.