

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2019.247>



西藏班戈寒武纪辉长闪长岩体的发现及其构造意义

豆孝芳^{1,3}, 陈鑫², 郑有业^{1,2*}, 姜晓佳², 王进寿³, 郑顺利¹, 任欢¹, 杨成⁴, 朱继华⁵

1. 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083
2. 中国地质大学资源学院, 湖北武汉 430074
3. 青海省地质调查院, 青海西宁 810017
4. 湖北省地质调查院, 湖北武汉 430034
5. 湖南省地质调查院, 湖南长沙 410000

摘要: 西藏班戈地区构造单元属北拉萨地体, 到目前为止, 该地体尚未有寒武纪岩浆活动的报道. 本文就班戈地区首次发现的辉长闪长岩体, 在野外地质调查、元素地球化学及同位素年代学研究的基础上, 得出以下结论: 该岩体属高钾钙碱性系列, 具有富集大离子亲石元素(如 Rb、Ba)和轻稀土元素(La、Ce), 亏损 Nb、Ta、Zr、Hf 和 Ti 等高场强元素, 呈现出安第斯型岛弧岩浆特征, 显示该岩体是俯冲沉积物部分熔融形成的熔体交代上覆地幔楔的产物. 锆石 U-Pb 年代学指示其侵入年龄为 512 ± 3 Ma, 形成于寒武纪, 为北拉萨地体存在早古生代岩浆活动提供了可靠的年代学证据. 综合证实其属于冈瓦纳大陆北缘的一部分, 该成果为进一步探讨青藏高原的构造演化提供了新的约束.

关键词: 辉长闪长岩; 寒武纪; 构造意义; 班戈地区; 西藏; 岩石学.

中图分类号: P581

文章编号: 1000-2383(2020)06-2091-12

收稿日期: 2019-06-08

The Newly Discovered Cambrian Gabbro-Diorite in Bange, Tibet and Their Tectonic Implications

Dou Xiaofang^{1,3}, Chen Xin², Zheng Youye^{1,2*}, Jiang Xiaojia², Wang Jinshou³, Zheng Shunli¹, Ren Huan¹, Yang Cheng⁴, Zhu Jihua⁵

1. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China
2. School of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China
3. Qinghai Geological Survey Institute, Xining 810017, China
4. Hubei Institute of Geological Survey, Wuhan 430034, China
5. Hunan Institute of Geological Survey, Changsha 410000, China

Abstract: The Bange area is part of North Lhasa terrane. Cambrian magmatism has not been reported in the north Lhasa terrane. In this study, field geological survey and geochemical studies, as well as geochronology, were used to study the firstly discovered gabbro-diorite in Bange and the following conclusions are drawn. The gabbro-diorites belong to the high-K calc-alkaline series. They are rich in large ion lithophilic elements (e.g., Rb and Ba) and light rare earth elements (e.g., La and Ce), and are depleted in high-field strength elements (e.g., Nb, Ta, Zr, Hf and Ti), similar to the Andean island arc magmatic rocks. The rock is interpreted as resulting from partial melting of subduction sediments metasomatized with the overlying mantle wedge. Zircon U-Pb dating demonstrates that the gabbro-diorite formed at 512 ± 3 Ma, which indicates it formed at Cambrian and provides reliable

基金项目: 科技部国家重点研发计划“冈底斯中段斑岩成矿系统深部预测评价与找矿示范”课题(No.2018YFC0604104).

作者简介: 豆孝芳(1993-), 女, 硕士研究生, 地质工程专业. ORCID: 0000-0003-4052-4661. E-mail 1143957890@qq.com

* **通讯作者:** 郑有业, E-mail: zhyouye@163.com

引用格式: 豆孝芳¹, 陈鑫, 郑有业, 等, 2020. 西藏班戈寒武纪辉长闪长岩体的发现及其构造意义. 地球科学, 45(6):2091-2102.

chronological evidence for the existence of Early Paleozoic magmatic events in the North Lhasa terrane. It is confirmed that the North Lhasa terrane is part of northern margin of the Gondwana land. The results provide a new window for further study of the evolution of the tectonic of Tibetan Plateau.

Key words: gabbro-diorite; Cambrian; tectonic implication; Bange district; Tibet; petrology.

冈瓦纳超大陆是在新元古代末至古生代初(750~510 Ma)由东冈瓦纳和西冈瓦纳等几个大陆块体经过泛非巴西造山运动(以下简称泛非运动)联合组成的超级大陆(Cawood *et al.*, 2007). 随着冈瓦纳大陆拼合的结束,其周缘在新的俯冲和增生造山作用下转为活动陆缘(Zhu *et al.*, 2012). 青藏高原的东南缘多个不同位置因为发现了早古生代的岩浆活动,多数学者解释为是冈瓦纳大陆内部泛非造山事件的产物,近些年学者们更倾向是冈瓦纳大陆活动陆缘俯冲—增生造山作用的产物. 通过对青藏高原早古生代岩浆事件的详细研究,不仅对认识泛非期造山过程中冈瓦纳大陆的形成、拼贴及冈瓦纳超大陆形成后大陆边缘构造演化历史具有重要意义,而且有助于阐明青藏高原早古生代岩浆的起源、演化等关键科学问题.

拉萨地体是青藏高原四大东西向构造带(松潘—甘孜、羌塘、拉萨、喜马拉雅)之一(Zhu *et al.*, 2011),长约 2 000 km,宽约 100~300 km,夹于东西走向的班公—怒江缝合带(BNSZ)和印度—雅鲁藏布江缝合带(IYZSZ)之间(Zhu *et al.*, 2012)(图 1a, 1b),经历了洋壳俯冲、拉萨—羌塘碰撞、印—亚陆碰撞,伴随地壳加厚、生长和青藏高原的隆升剥蚀作用并最终定型于新生代晚期的复合造山带,其构造演化很可能受班公湖—怒江特提斯洋向南、雅鲁藏布洋向北的双向俯冲制约(潘桂棠等, 2006). 以狮泉河—拉果错—永珠—纳木错—嘉黎蛇绿混杂岩带(SNMZ)和沙莫勒麦拉—洛巴堆—米拉山断裂(LMF)为界将其自北向南解体为“北拉萨地体、中拉萨地体和南拉萨地体”(图 1b). 北拉萨地体主要发育中、新生代的岩浆岩(郑有业等, 2017),全岩 Nd 同位素和锆石 Hf 同位素组成表明北拉萨地体大部分地区为新生地壳(Zhu *et al.*, 2011). 中拉萨地体不仅具有中、新元古代的岩浆作用(田坎等, 2018),而且经历了新元古代的变质作用,说明其确实存在前寒武纪的变质基底;Zhu *et al.*(2012)报道了中拉萨地体存在早古生代的岩浆活动,认为中拉萨地体为一个微陆块(Zhu *et al.*, 2011, 2012). 南拉萨地体中大量中生代岩浆岩以正锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值和小于 1.0 Ga 的地壳模式年龄为主,显示新生地壳的特征

(Zhu *et al.*, 2011). 而最近的研究表明,南拉萨地体也存在寒武纪的岩浆作用. 综上所述,相对于拉萨地体广泛分布的中、新生代岩浆作用,古生代及之前的岩浆作用则寥寥无几.

以往对北拉萨地体的研究主要集中在中生代至新生代的特提斯演化发展阶段,由于缺少对于古生代岩浆岩的报道,使得该地区古生代的演化及构造环境还存在较大争议. 本次对北拉萨地体新发现的辉长闪长岩进行岩石地球化学和年代学研究,探讨其岩石成因,提供北拉萨地体存在寒武纪岩浆活动的确凿证据,无疑对研究班公湖—怒江缝合带以南有关拉萨地体的起源和早古生代演化历史具有重要意义.

1 地质背景及样品

班戈地区处于班公湖—怒江缝合带中段南侧,大地构造位置属于北拉萨地体的火山岩弧带(图 1b),是研究班公湖—怒江洋盆向南俯冲作用相关岩浆活动记录的理想区域(潘桂棠等, 2006). 该地区发育前震旦系念青唐古拉群、泥盆系、泥盆—石炭系、石炭系和白垩系地层(中国地质大学地调院, 2011. 西藏班戈地区地质矿产调查报告(内部印发). 武汉). 前震旦系念青唐古拉群是一套中—高级变质岩系,主要由片岩、角闪岩及大理岩等组成. 泥盆系为一套稳定型台地相的生物碎屑灰岩、砾屑灰岩夹含泥钙质粉砂岩沉积;泥盆—石炭系为以白云岩为主的碳酸盐岩建造;石炭系为一套海相碎屑岩建造,其主要岩性为细粒石英砂岩、页岩、少量粉砂岩,夹多层灰岩或钙质砂岩. 断层以近东西向—北北西向为主,多数具逆冲性质,控制岩体和地层的展布. 研究区北侧有大量白垩纪花岗岩体出露. 这些花岗岩可分为 4 期:早白垩世早期石英闪长岩和英云闪长岩(~138 Ma),早白垩世中期花岗闪长岩(132~128 Ma),早白垩世中晚期二云二长花岗岩(130~114 Ma),晚白垩世二长花岗岩(~80 Ma),形成环境由岛弧→同碰撞造山→后碰撞演变(高顺宝等, 2011). 班戈地区辉长闪长岩体出露面积约 0.8 km²,北西侧被第四系沉积物大面积覆盖,东侧

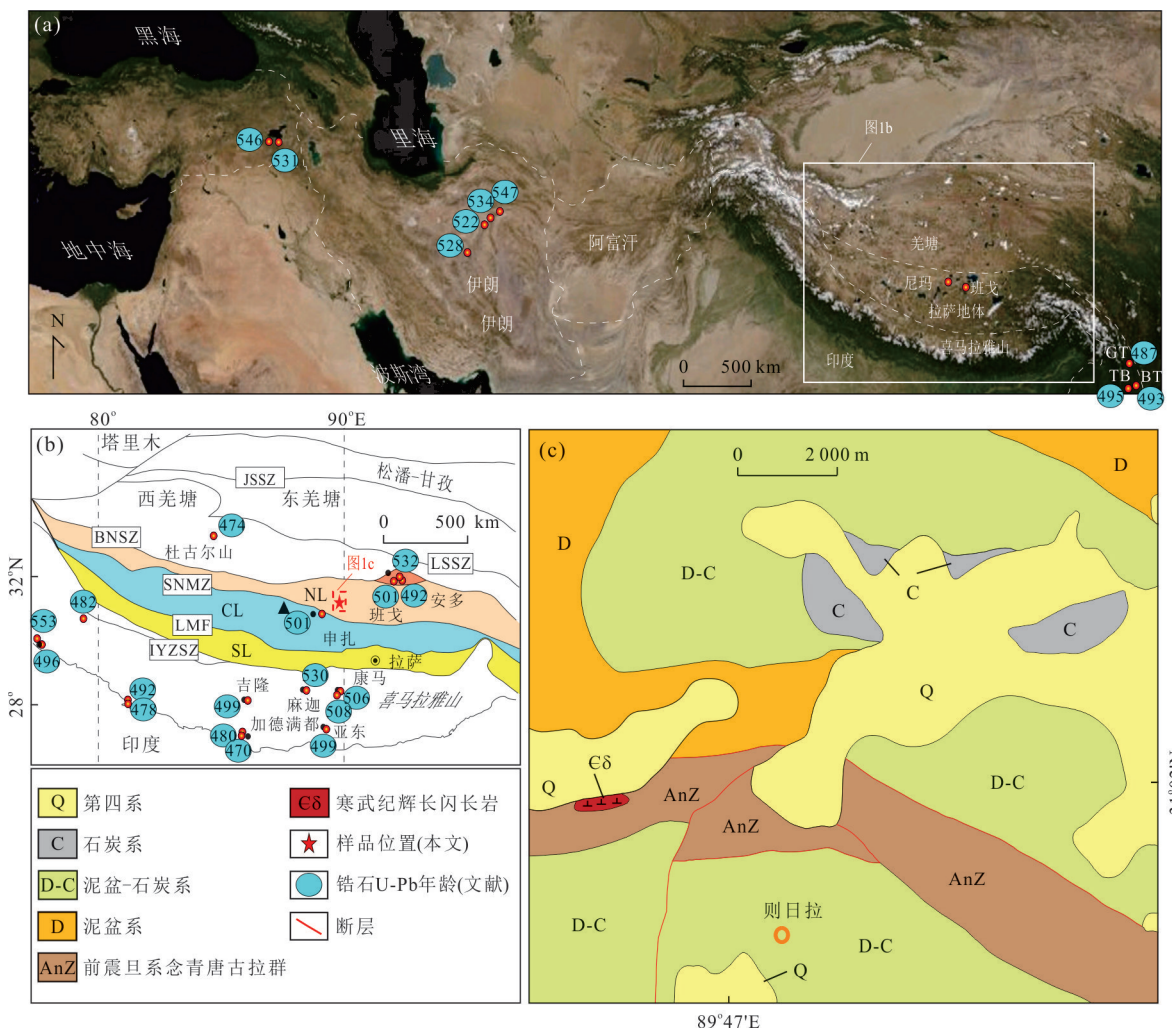


图 1 (a)亚欧大陆遥感地质简图及部分早古生代岩浆岩,(b)青藏高原地质简图,(c)班戈研究区地质简图和样品位置
 Fig.1 (a) Geographic map of Eurasia showing the distributions of Early Paleozoic magmatic rocks, (b) geological map of Qinghai-Tibet plateau, (c) geological map of Bangge district and sample location
 图 a 中, BT. 宝山地体, TB. 腾冲地体, GT. 贡山地体. 图 b 中, SL. 南拉萨地体, CL. 中拉萨地体, NL. 北拉萨地体. 图 a, b 据 Zhu *et al.* (2012) 修改

以断层与泥盆系接触,南部与泥盆—石炭系呈断层接触. 野外采集了 6 件辉长闪长岩样品,编号为 BG12-1, BG12-2, BG12-3, BG12-4, BG12-5, BG12-6, 采样点位于班戈县城西南部, GPS 坐标为 N31°01'53", E89°45'36", 所有的样品都在该 GPS 点附近.

2 样品岩石特征

据野外观察,样品新鲜、弱蚀变. 手标本岩石呈深灰色,中粒半自形粒状结构,块状构造,局部岩石中的斜长石及辉石、角闪石斑晶具轻微的定向排列. 主要由辉石(10%~15%),斜长石(60%~70%)和角闪石(20%~30%)组成. 斜长石呈半自形板状,粒径多 < 4 mm,双晶纹较模糊,可见钠长石双晶、卡钠

复合双晶等. 辉石为短柱状,粒度介于 0.01~2.0 mm. 角闪石呈半自形—他形柱、粒状,粒径多介于 0.03~3.0 mm. 多色性较明显,Ng'黄绿色, Np'浅黄绿色. 岩石中副矿物有锆石、楣石和磷灰石等.

3 实验方法

样品主微量元素分析工作由自然资源部武汉矿产资源监督检测中心完成. 主量元素含量采用 X 荧光光谱仪(XRF)分析,微量、稀土元素含量采用电感耦合等离子质谱仪(ICP-MS)分析;主量元素重复样合格率达 100%,精度优于 5%;稀土、微量元素分析精度优于 10%.

锆石分选由河北省区域地质矿产研究所完成,

锆石按常规方法分选,最后在双目镜下挑选出自形锆石颗粒.锆石制靶后,先在中国地质科学院国家离子探针中心进行锆石阴极发光(CL)照相.锆石 LA-ICP-MS U-Pb 同位素分析在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室 Agilent 7500a ICP-MS 仪器上测定,详细的实验原理和流程见 Liu *et al.* (2008).激光剥蚀采用的斑束直径为 32 μm , 频率为 10 Hz. 采用 ICPMS DataCal (ver 10.0) 对测试数据进行室内处理(Liu *et al.*, 2010), 年龄计算时以 91500 作外标,元素含量计算时以 NIST SRM 610 为外标, ^{29}Si 作内标.各样品的加权平均年龄计算及谐和图的绘制采用 Isoplot 3.0 程序(Ludwig, 2003).

4 岩石地球化学特征

6 件辉长闪长岩样品的 SiO_2 值变化范围小,介于 51.03%~53.97%,平均值为 52.46%; Al_2O_3 含量较高,介于 14.29%~15.45%,平均为 14.99%; 相对富 K_2O (1.26%~1.46%,平均为 1.36%); CaO 含量相对中等,介于 7.05%~9.71%,平均值为 8.40%; 铝指数 A/CNK 介于 1.00%~1.23%,平均值为 1.13%; 相对贫铁 ($\text{FeO}^T = 5.87\% \sim 7.19\%$) (附表

1); 岩石 $\text{Mg}^\#$ 指数较高,介于 65%~69%. 在 TAS 图中落在亚碱性辉长岩和辉长闪长岩区域中(图 2a; Middlemost, 1994); 在 SiO_2 - K_2O 图中,岩石落在钙碱性系列范围内(图 2b; Peccerillo and Taylor, 1976).

辉长闪长岩稀土总丰度值介于 $66.31 \times 10^{-6} \sim 78.80 \times 10^{-6}$, 总体上显示轻稀土元素相对富集 ($\text{LREE} = 53.31 \times 10^{-6} \sim 62.71 \times 10^{-6}$), 重稀土元素亏损 ($\text{HREE} = 13.00 \times 10^{-6} \sim 16.10 \times 10^{-6}$) 的特征(附表 1). 球粒陨石标准化稀土元素曲线介于现代异常洋中脊玄武岩(E-MORB)和洋岛玄武岩(OIB)之间(图 3a; Sun and McDonough, 1989). 轻稀土元素分配曲线呈右倾趋势 ($\text{La}_N/\text{Yb}_N = 2.82 \sim 3.75$), 重稀土元素部分的曲线形态较为平缓,所有样品均具弱的 Eu 负异常 ($\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0.82 \sim 0.94$), Ce 异常变化较为稳定 ($\text{Ce}/\text{Ce}^* = 0.93 \sim 0.95$) (附表 1).

原始地幔标准化微量元素蛛网图(图 3b) 显示样品呈右倾曲线,主要介于 E-MORB 和 OIB 之间(附表 1). 表现为 Rb、Ba、Th、U、Sr、K、Pb 等大离子亲石元素富集,亏损高场强元素 Ta、Nb、P、Zr、Hf 和 Ti 等,且 P、Ti 具有显著的负异常,表现出消减带岩浆岩的典型特征.

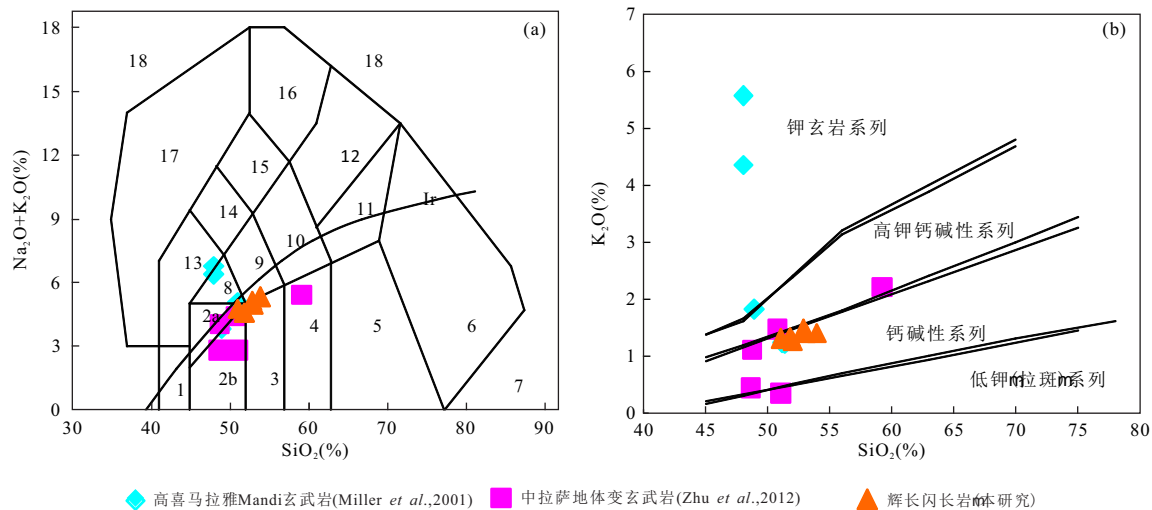


图 2 (a) SiO_2 - $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ 图解, (b) SiO_2 vs. K_2O 图解

Fig. 2 (a) SiO_2 vs. $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ diagram for classification, (b) SiO_2 vs. K_2O diagram

a. 据 Middlemost (1994); b 据 Peccerillo and Taylor (1976); Ir. Irvine 分界线, 上方为碱性, 下方为亚碱性. 深成岩: 1. 橄榄辉长岩; 2a. 碱性辉长岩; 2b. 亚碱性辉长岩; 3. 辉长闪长岩; 4. 闪长岩; 5. 花岗闪长岩; 6. 花岗岩; 7. 石英岩; 8. 二长辉长岩; 9. 二长闪长岩; 10. 二长岩; 11. 石英二长岩; 12. 正长岩; 13. 副长石辉长岩; 14. 副长石二长闪长岩; 15. 副长石二长正长岩; 16. 副长正长岩; 17. 副长深成岩; 18. 霓方钠岩/磷霞岩/粗白榴岩; 火山岩: 1. 苦橄玄武岩; 2. 玄武岩; 3. 玄武安山岩; 4. 安山岩; 5. 英安岩; 6. 流纹岩; 7. 英石岩; 8. 粗面玄武岩; 9. 玄武岩质粗面安山岩; 10. 粗面安山岩; 11. 粗面英安岩; 12. 粗面岩; 13. 碱玄岩; 14. 响质碱玄岩; 15. 碱玄质响岩; 16. 响岩; 17. 副长火山岩; 18. 方钠岩/霞石岩/纯白榴岩

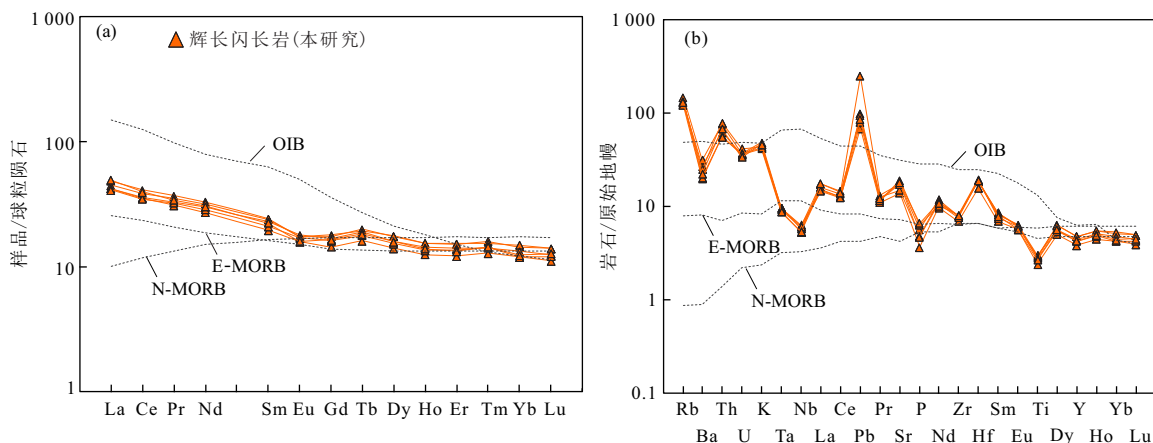


图 3 (a) 稀土元素球粒陨石标准化图解, (b) 微量元素原始地幔标准化蛛网

Fig.3 Chondrite-normalized REE (a), primitive mantle-normalized trace element spider diagram (b)

图中洋岛玄武岩(OIB),异常洋脊玄武岩(E-MORB)和正常洋脊玄武岩(N-MORB).据 Sun and McDonough(1989)

5 锆石 U-Pb 定年

班戈地区辉长闪长岩经粉碎、挑选后获得的锆石呈无色透明,形态呈等粒状或短柱状,晶体自形程度较高,粒径变化在 80~150 μm,长宽比介于 1:1~1.5:1.锆石 CL 图像揭示具有明显的岩浆韵律环带(图 4),且 Th/U 比值介于 0.55~0.86(附表 2),为典型的岩浆锆石.这些锆石具有一致且陡峭的球粒陨石标准化稀土曲线(图 6b,附表 3),铈正异常、铕负异常(Eu/Eu* = 0.16~0.26)明显,也说明其为典型的岩浆锆石.本次共获得 15 个有效分析点(附表 2),在 ²⁰⁶Pb/²³⁸U-²⁰⁷Pb/²³⁵U 谐和图上,数据均落在了

谐和线上,表明这些锆石基本没有受到后期的变质改造,²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄介于 509±3~518±5 Ma,计算后获得 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 加权平均年龄为 512±3 Ma(n=15, MSWD=0.36;图 5a),可以反映岩浆形成的时代,表明该辉长闪长岩体形成于寒武纪.

6 构造环境

西藏班戈地区辉长闪长岩在球粒陨石标准化的稀土配分模式图和微量元素蛛网图中具有高场强元素亏损(如 Nb、Ta、Zr、Hf 和 Ti)和轻稀土(如 La、Ce)及大离子亲石元素(Rb、Th、U 和 K)富集特征(图 3a 和 3b).首先我们排除洋中脊环境,因为该岩体与典型的洋中脊型玄武岩存在较大差异,典型的洋中脊型玄武岩岩浆来源于亏损的地幔源区,通常亏损轻稀土元素和大离子亲石元素(图 3a 和 3b),具低 K₂O 的特点.虽然 Zr/Y-Zr 图解(图 6a)显示该辉长闪长岩与中拉萨地体安第斯型岛弧玄武岩(Zhu *et al.*, 2012)和高喜马拉雅 Mandi 地区的玄武岩(Miller *et al.*, 2001)一致,都落在板内玄武岩内(Pearce and Norry, 1979),但 Th/Yb-Nb/Yb(图 6b; Pearce and Peate, 1995)和 IAB-MORB-CRB+OIB 与 MnO-TiO₂-P₂O₅ 图(图 6c 和 6d; Agrawal *et al.*, 2008)显示这些岩石与受到陆壳混染的典型峨眉山和 Siberian Traps 大陆溢流玄武岩(Xiao *et al.*, 2004)差异较大,因此说明该辉长闪长岩可能不是板内玄武岩.本次研究的辉长闪长岩、中拉萨地体变玄武岩(Zhu *et al.*, 2012)和高喜马拉雅 Mandi 地区的玄武岩(Miller *et al.*, 2001)也不同于典型的 SW Turkey 弧后盆地玄武岩,与典型的安第斯型岛

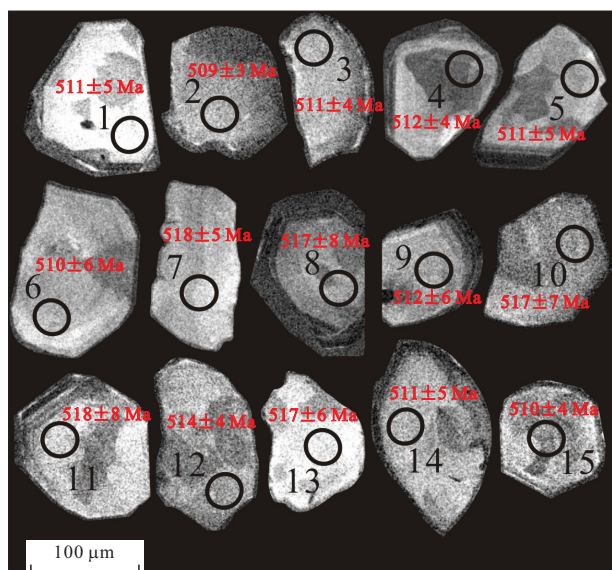


图 4 班戈地区辉长闪长岩锆石 CL 图像

Fig.4 Zircon CL images of gabbro-diorites from the Bange district

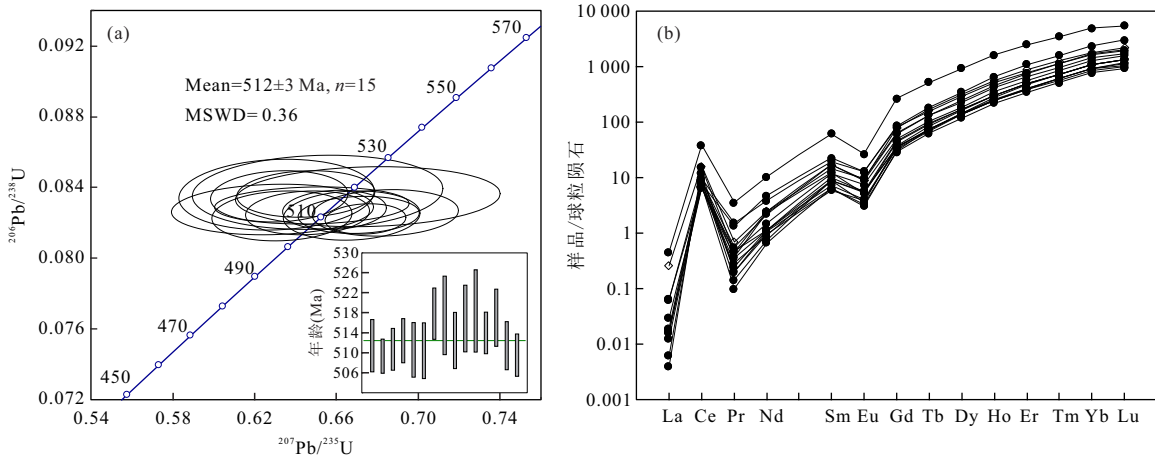


图 5 (a)班戈地区辉长闪长岩(BG12-1)中锆石 U-Pb 谐和图,(b)班戈地区辉长闪长岩(BG12-1)中稀土元素球粒陨石标准化图解

Fig.5 Zircon U-Pb concordia diagram of gabbro-diorite (BG12-1) from the Bange in Tibet (a), Chondrite-normalized REE of gabbro-diorite (BG12-1) from the Bange in Tibet (b)

球粒陨石标准化值据 Sun and McDonough(1989)

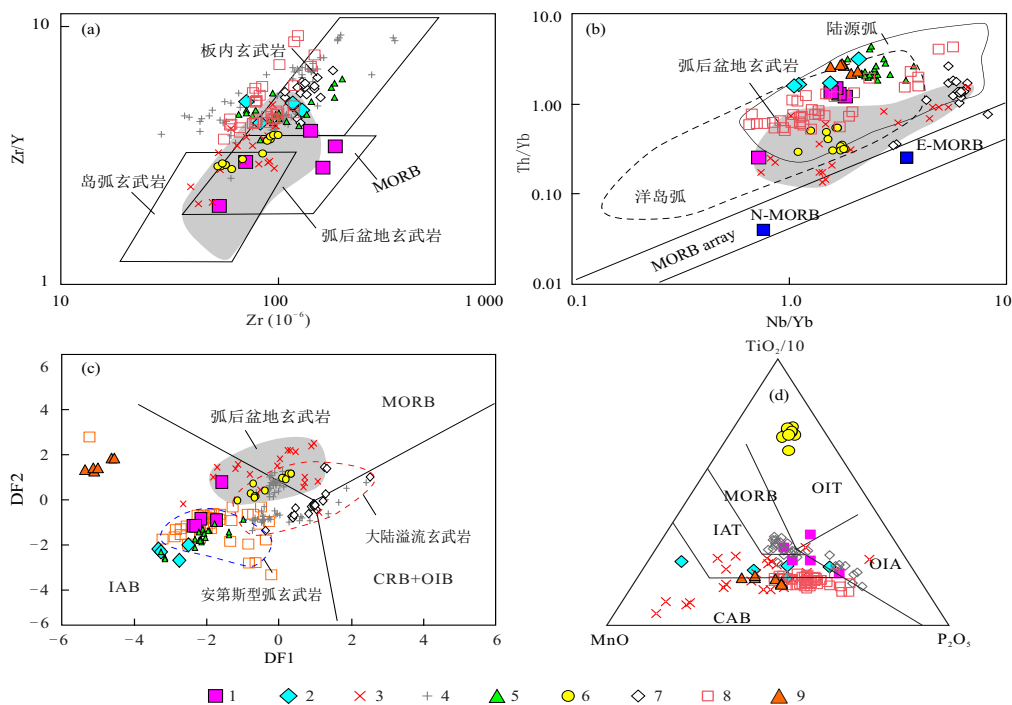


图 6 (a) Zr/Y-Zr 图解,(b) Th/Yb-Nb/Yb 图解,(c,d) IAB-MORB-CRB+OIB and $TiO_2/10-MnO-P_2O_5$ 图解

Fig.6 Zr/Y-Zr diagram (a), Th/Yb-Nb/Yb diagrams showing the tectonic setting of the gabbro-diorite (b), IAB-MORB-CRB+OIB and $TiO_2/10-MnO-P_2O_5$ diagrams (c, d)

1. 中拉萨地体变玄武岩 (~492 Ma); 2. 高喜马拉雅 Mandi 玄武岩 (~496 Ma); 3. SW Turkey 弧后盆地玄武岩 (~535 Ma); 4. Siberian Traps; 5. Kalkarindji 玄武岩 (~506 Ma); 6. Middle Okinawa Trough 弧后盆地玄武岩; 7. 峨眉山大陆溢流玄武岩; 8. 安第斯型岛弧玄武岩; 9. 辉长闪长岩; OIT. 洋岛拉斑玄武岩; OIA. 洋岛碱性玄武岩; MORB. 洋中脊玄武岩; IAT. 岛弧拉斑玄武岩; CAB. 钙碱性玄武岩; IAB. 岛弧玄武岩; CRB. 大陆裂谷玄武岩. 数据来源: Mandi 玄武岩 (Miller *et al.*, 2001), Kalkarindji 玄武岩 (Glass and Phillips, 2006; Evins *et al.*, 2009), SW Turkey 弧后盆地玄武岩 (Gürsu and Gönçüoğlu, 2005), Middle Okinawa Trough 弧后盆地玄武岩 (Shinjo *et al.*, 1999), 安第斯型岛弧玄武岩 (Hickey *et al.*, 1986), 峨眉山大陆溢流玄武岩 (Xiao *et al.*, 2004), and Siberian Traps (<http://georoc.mpch-mainz.gwdg.de/georoc/Entry.html>). a 据 Pearce and Norry (1979), 弧后盆地玄武岩范围来自 Floyd *et al.* (1991); b 据 Pearce and Peate (1995); c 据 Agrawal *et al.* (2008)

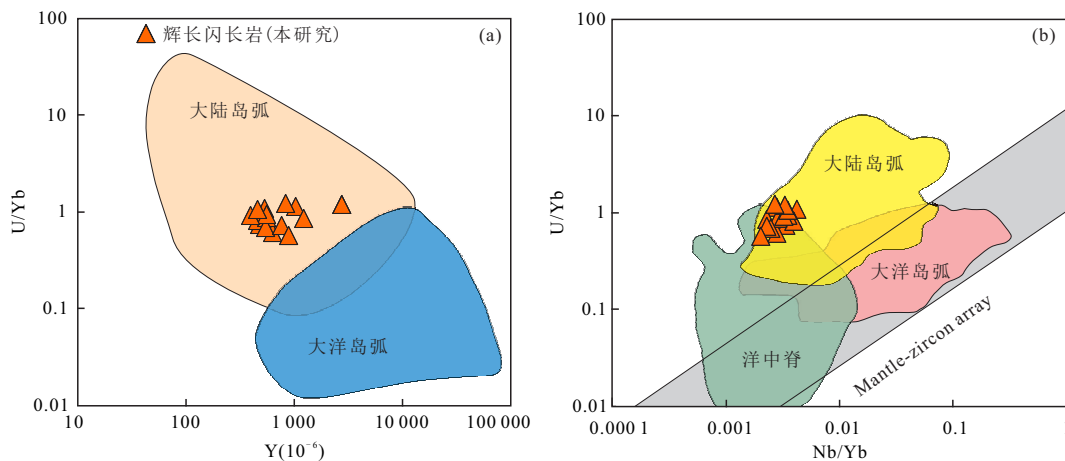


图7 锆石微量元素U/Yb-Y图解(据 Grimes *et al.*, 2007)和U/Yb-Nb/Yb图解(据 Grimes *et al.*, 2015)

Fig.7 Zircon trace-element of U/Yb-Y (a) (after Grimes *et al.*, 2007) and U/Yb-Nb/Yb (b) (after Grimes *et al.*, 2015) diagrams for the gabbro-diorite

弧玄武岩(Hickey *et al.*, 1986)类似(图6b~6d)。我们认为该辉长闪长岩与特提斯域发育的古生代基性岩浆活动基本一致(Miller *et al.*, 2001; Zhu *et al.*, 2012),具有大陆边缘的安第斯型岛弧岩浆特征。锆石微量元素图(图7a, 7b; Grimes *et al.*, 2007, 2015)进一步证实该辉长闪长岩具有明显的陆缘弧特征。安第斯型陆缘发育了大陆岩浆弧,同俯冲和俯冲后可形成玄武质—安山质—流纹质岩浆岩组合(郑永飞等, 2015),通常典型的安第斯型造山过程中不仅可以产生中基性岩浆作用,同时可以产生I型和S型等酸性岩浆作用,例如北美和南美的安第斯岩浆弧带(Ducea *et al.*, 2015)。岛弧岩浆在微量元素蛛网图上以富集大离子亲石元素、Pb和轻稀土元素、亏损高场强元素和重稀土元素为特征,一般称为弧型。大陆弧岩浆相对于大洋弧的岩浆更加富集大离子亲石元素和Pb等元素(郑永飞等, 2015),该辉长闪长岩非常富集大离子亲石元素和Pb,同时亏损高场强元素(如Nb、Ta、Zr、Hf和Ti)等,完全符合安第斯型弧岩浆的特征。结合区域构造环境,这些辉长闪长岩侵入在中元古界念青唐古拉群古老结晶基底中,进一步说明可能是陆缘弧环境。班戈地区岩浆作用与南拉萨地体米林地区S型花岗岩和中拉萨地体申扎地区双峰式火山岩接近同期,形成于515~480 Ma之间,主体上晚于东冈瓦纳大陆最后聚合的时间为570~510 Ma,也就是冈瓦纳大陆内部俯冲作用结束的时限(Cawood *et al.*, 2007)。Cawood *et al.* (2007)认为东冈瓦纳大陆拼贴结束之后,与其周围的大洋可能引发新的俯冲造山作用,印度大陆北缘古生代早期(515~480 Ma)的岩浆作

用和变质作用可能与原特提斯大洋(proto-Tethyan Ocean)岩石圈向印度大陆之下的俯冲有关或以拉萨、羌塘地体为代表的微陆块碰撞增生事件有关,是俯冲型造山作用的产物。说明北拉萨地体形成的辉长闪长岩与南拉萨地体米林地区S型花岗岩和中拉萨地体申扎地区双峰式火山岩(Zhu *et al.*, 2012),都是大陆边缘环境下岛弧岩浆作用的产物。这一安第斯型的造山作用在印度北部喜马拉雅带、中拉萨地体申扎和滇西地区还造成早古生代地层的不整合(Zhu *et al.*, 2012; 董昕和张泽明, 2015)。

7 岩石成因

辉长闪长岩具有中等的SiO₂含量(51.98%~53.97%),Mg[#]指数较高(65~69),同时具有高的Ni(37×10⁻⁶~114×10⁻⁶)、Cr(58×10⁻⁶~114×10⁻⁶)和V(187×10⁻⁶~211×10⁻⁶)含量,显示地幔岩浆特征,但是样品具有较高的Sr(297×10⁻⁶~405×10⁻⁶)和Pb(4.91×10⁻⁶~17.73×10⁻⁶)含量(附表1),远高于原始地幔特征,表明幔源岩浆可能受到了围岩混染或者俯冲板片熔流体的交代作用。但是辉长闪长岩中并没有发现长英质捕虏体,同时也没有斑杂构造等混染岩的显著特征,说明岩浆可能受围岩混染程度低。在微量元素尺度,Nb/U比值通常可判别岩石是否受到地壳物质的混染,辉长闪长岩中微量元素Nb/U比值(4.69~5.72)比MORB(Nb/U≈49; Sun and McDonough, 1989)和OIB(Nb/U≈47; Sun and McDonough, 1989)低很多,也低于上地壳(Nb/U比值≈9; Taylor and McLennan, 1985),接

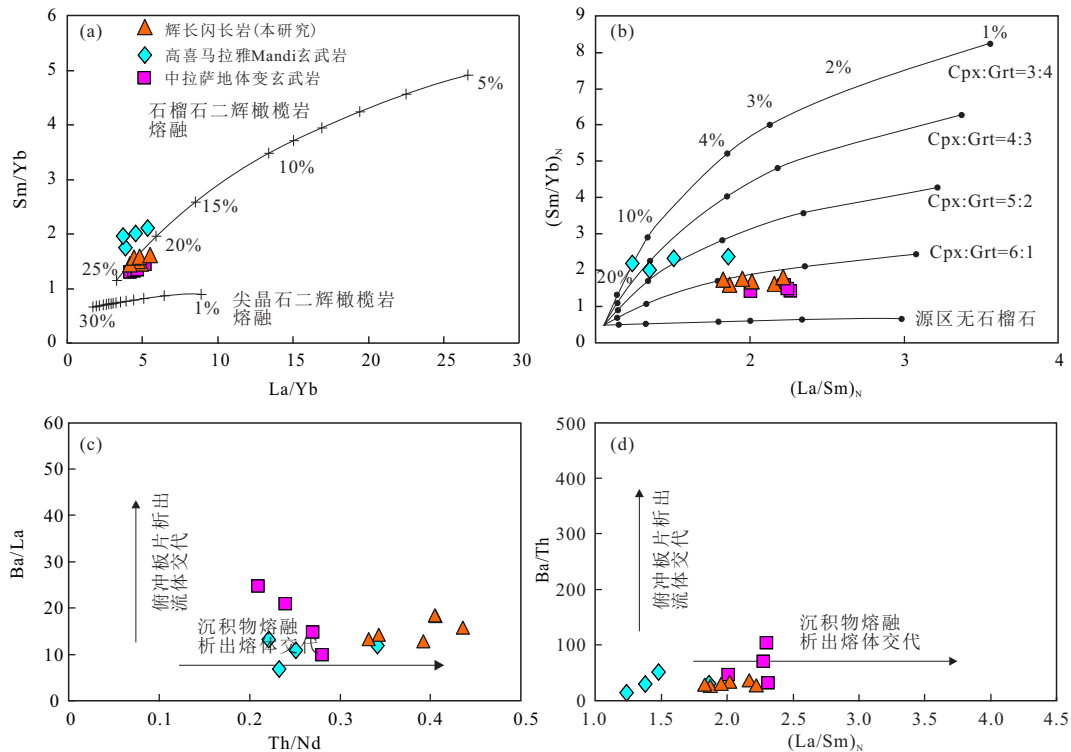


图 8 (a)辉长闪长岩的 La/Yb-Sm/Yb(据 Johnson *et al.*, 1990), (b)(Sm/Yb)_N-(La/Sm)_N (据 D'orazio *et al.*, 2001), (c)Ba/La-Th/Nd; (d)Ba/Th-(La/Sm)_N 图解

Fig. 8 Plots of (a) La/Yb vs. Sm/Yb (after Johnson *et al.*, 1990), (b) (Sm/Yb)_N vs. (La/Sm)_N (after D'orazio *et al.*, 2001), (c) Ba/La vs. Th/Nd, (d) Ba/Th vs. (La/Sm)_N for representative gabbro-diorite samples

近全球平均俯冲沉积物 ($Nb/U \approx 5$; Plank and Langmuir, 1998), 表明俯冲作用过程中沉积物释放的熔体对地幔的交代作用是地幔源区具有壳源特征的重要原因. 此外, 有地壳混染的岩石其 Nb/Ta 和 La/Yb 呈负相关 (Münker, 1998), 而该辉长闪长岩中的 Nb/Ta 与 La/Yb 则具正相关 (图略), 也表明其受地壳混染不显著. 我们认为本区辉长闪长岩岩浆可能主要起源于俯冲板片脱水形成的熔体交代石榴橄榄岩源区. 主要基于以下证据: (1) La/Yb-Sm/Yb (图 8a; Johnson *et al.*, 1990) 和 (Sm/Yb)_N-(La/Sm)_N (图 8b; D'orazio *et al.*, 2001) 图显示这些辉长闪长岩是石榴石二辉橄榄岩部分熔融形成, 辉石和石榴石的比例接近 6:1; (2) 岩石具有显著的 Nb、Ta、Ti、P 的负异常, 暗示岩浆源区受到俯冲板片影响, 岩石具有高的 Th/Nd 比值和低的 Ba/La 比值 (图 8c), 且具有较高的 (La/Sm)_N 值 (图 8d), 表明辉长闪长岩是俯冲沉积物部分熔融形成的熔体交代上覆地幔楔的产物. 通过对区域上玄武质岩石进行对比, 发现本区辉长闪长岩在 La/Yb-Sm/Yb (图 8a; Johnson *et al.*, 1990)、(Sm/Yb)_N-(La/Sm)_N (图 8b; D'orazio *et al.*,

2001) 图、Ba/La-Th/Nd (图 8c) 和 Ba/Th-(La/Sm)_N (图 8d) 上与高喜马拉雅 Mandi 玄武岩 (Miller *et al.*, 2001) 和中拉萨地体安第斯型岛弧玄武岩 (Zhu *et al.*, 2012) 非常相似. 它们的主要不同之处在于石榴子石和辉石的比例存在差异, 这更加印证了本区辉长闪长岩岩浆可能主要起源于俯冲板片脱水形成的熔体交代石榴橄榄岩源区的观点.

8 构造意义

冈瓦纳超大陆拼贴的时间主要发生在 750~510 Ma (Cawood *et al.*, 2007). 随着冈瓦纳大陆拼合的结束, 其周缘又开始新的俯冲和增生造山作用. 如冈瓦纳大陆南缘由于原太平洋的俯冲, 形成从澳大利亚东部、新西兰、南极洲、南非持续到美国西南海岸的造山带 (530~490 Ma). 北部由于原特提斯洋的俯冲, 在印度地块北部形成北印度造山带 (530~470 Ma) (Cawood *et al.*, 2007). 目前关于青藏高原喜马拉雅-拉萨地体出现的早古生代岩浆作用存在的争议主要集中在以下两点: (1) 这些早

古生代的岩浆作用能否反映冈瓦纳超大陆北界的地理位置;(2)这些古生代岩浆作用是泛非作用的产物,还是冈瓦纳超大陆拼贴之后周缘形成的俯冲和增生造山作用的产物?

中拉萨地体、南拉萨地体以及喜马拉雅造山带中均发育早古生代的岩浆活动,被认为古生代的古地理位置处于冈瓦纳大陆北部边缘(潘桂棠等, 2006).许志琴等(2005)通过 SHRIMP 定年获得高喜马拉雅角闪岩相孔兹岩系锆石 U-Pb 年龄为 457~529 Ma.李才等(2010)在藏东八宿县同卡地区卡穷岩群花岗岩中获得 507 ± 10 Ma 的年龄,并引用大量前人在喜马拉雅和拉轨岗日地区片麻岩中获得的泛非期年龄 501~515 Ma 及安多-聂荣微陆块中聂荣岩群(扎仁岩群)的片麻岩 491~515 Ma 等泛非事件的年龄,足以说明班公湖-怒江缝合带以南是冈瓦纳大陆的一部分.计文化等(2009)最早在中拉萨地体的申扎东侧发现了约 501 Ma 寒武纪变质火山岩,这些火山岩被奥陶纪底砾岩角度不整合覆盖(李才等, 2010).大致在同一位置, Gehrels *et al.* (2011)发现了寒武纪斑状细粒花岗岩,其锆石 U-Pb 年龄为 510 ± 7 Ma. Zhu *et al.* (2012)在中拉萨地体申扎控错地区发现略早于寒武纪-奥陶纪角度不整合的寒武纪末期变质酸性火山岩(锆石 U-Pb 年龄为 493~491 Ma)和变玄武岩(~492 Ma).董春艳等(2011)则以西藏羌塘龙木错-双湖缝合带南侧奥陶纪温泉石英岩碎屑锆石年龄及 Hf 同位素组成特点,证实羌南地块的构造属性归于冈瓦纳大陆.翟庆国等(2010)在羌塘的桃形湖地区发现最老变质堆晶辉长岩的时代为 467 ± 4 Ma,通过元素地球化学及同位素研究认为岩浆源区为亏损型地幔,与大洋中脊玄武岩类似,很可能是古洋壳的残片.这些特征说明羌塘地体的构造属性目前还存在一些争议.本次在北拉萨地体首次发现早古生代的辉长闪长岩,年代为 512 ± 3 Ma,与中拉萨地体的早古生的岩浆活动基本一致,表明北拉萨地体与中拉萨地体一致,都是冈瓦纳超大陆北界的一部分.

关于拉萨地体古生代岩浆作用的属性问题前人已经做了大量工作.印度大陆北缘的早古生代岩浆作用形成在冈瓦纳大陆的边缘,形成年龄多数小于冈瓦纳大陆的拼贴时间(750 ~ 510 Ma)(Cawood *et al.*, 2007),说明其可能并不是冈瓦纳大陆拼贴过程中泛非运动的产物(Zhu *et al.*, 2012).Zhu *et al.* (2012)进行了详细的地球化学研究,认为

~492 Ma 变玄武岩来源于富集岩石圈地幔的部分熔融,该地幔被俯冲岩石圈组分交代.多种构造环境判别图指示变玄武岩具有火山弧玄武岩的亲缘性(Zhu *et al.*, 2012),变质酸性火山岩的 Th/Ta 比值为 13.2~17.9,类似于活动大陆边缘的长英质岩石(Gorton and Schandl, 2000).结合变质火山岩地层中的石英岩发育的浅水沉积标志(如粒序层理和斜层理)(计文化等, 2009),表明这套寒武纪末期的双峰式火山岩很可能形成于活动大陆边缘,而不是大陆裂谷、板内和弧后盆地等环境(Zhu *et al.*, 2012).董昕和张泽明(2015)认为南拉萨地体和高喜马拉雅带的寒武纪 503~490 Ma 花岗质岩石亦是古生代早期原特提斯洋俯冲导致的安第斯型造山作用的产物,其中南拉萨地体中的寒武纪花岗岩发育岩浆成因过铝质矿物:白云母和石榴石,表明其为 S 型花岗岩;高喜马拉雅带的花岗岩可能系地壳物质部分熔融产生的 I 型花岗岩.因此这一系列的寒武纪“双峰式”火山岩及其晚寒武世-早奥陶世过铝质花岗岩浆事件,可以被看作位于特提斯大洋南侧,受控于原特提斯大洋扩展过程中的南部大陆(即冈瓦纳大陆)北缘的被动边缘俯冲造山事件(Zhu *et al.*, 2012;董昕和张泽明, 2015).本次在北拉萨地体发现的寒武纪岩浆活动基础上,结合其安第斯型弧岩浆的特征,认为北拉萨地体同样经历了与中拉萨地体相似的演化,是古生代早期原特提斯洋向南俯冲导致的安第斯型造山作用的产物.

9 结论

(1)北拉萨地体发现的辉长闪长岩的结晶年龄为 512 ± 3 Ma,为班-怒缝合带以南的北拉萨地体存在早古生代岩浆事件提供了可靠的年代学证据,证实北拉萨地体属冈瓦纳大陆北缘的一部分.

(2)辉长闪长岩是俯冲沉积物部分熔融形成的熔体交代上覆地幔楔的产物,结合前人研究,认为该辉长闪长岩是古生代早期原特提斯洋向南俯冲导致的安第斯型造山作用的产物,为进一步探讨青藏高原南部的构造演化提供了新的约束.

附表见本刊官网(<http://www.earth-science.net>).

致谢:在野外工作过程中,得到项目组其他成员的大力支持与帮助;在数据处理与撰写论文过程中,得到地球科学编委及匿名审稿人的认真指导和细心修改,在此一并致以诚挚的谢意!

References

- Agrawal, S., Guevara, M., Verma, S. P., 2008. Tectonic Discrimination of Basic and Ultrabasic Rocks through Log-transformed Ratios of Immobile Trace Elements. *International Geology Review*, 50(12):1057–1079. <https://doi.org/10.2747/0020-6814.50.12.1057>
- Cawood, P. A., Johnson, M. R. W., Nemchin, A. A., 2007. Early Palaeozoic Orogenesis along the Indian Margin of Gondwana: Tectonic Response to Gondwana Assembly. *Earth and Planetary Science Letters*, 255(1–2):70–84. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2006.12.006>
- Dong, C. Y., Li, C., Wan, Y. S., et al., 2011. Detrital Zircon Age Model of Ordovician Wenquan Quartzite South of Lungmuco-Shuanghu Suture in the Qiangtang Area, Tibet: Constraint on Tectonic Affinity and Source Regions. *Science China: Earth Sciences*, 41(3):299–308 (in Chinese).
- Dong, X., Zhang, Z. M., 2015. Cambrian Granitoids from the Southeastern Tibetan Plateau: Research on Petrology and Zircon Hf Isotope. *Acta Petrologica Sinica*, 31(5):1183–1199 (in Chinese with English abstract).
- D'orazio, M., Agostini, S., Innocenti, F., et al., 2001. Slab Window-Related Magmatism from Southernmost South America: The Late Miocene Mafic Volcanics from the Estancia Glencross Area (Similar to 52° S, Argentina-Chile). *Lithos*, 57(2–3):67–89. [https://doi.org/10.1016/s0024-4937\(01\)00040-8](https://doi.org/10.1016/s0024-4937(01)00040-8)
- Ducea, M. N., Saleeby, J. B., Bergantz, G., 2015. The Architecture, Chemistry, and Evolution of Continental Magmatic Arcs. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 43(1):299–331. <https://doi.org/10.1146/annurev-earth-060614-105049>
- Evins, L. Z., Jourdan, F., Phillips, D., 2009. The Cambrian Kalkarindji Large Igneous Province: Extent and Characteristics Based on New $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ and Geochemical Data. *Lithos* 110(1–4):294–304. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2009.01.014>
- Floyd, P. A., Castillo, P. R., Pringle, M., 1991. Tholeiitic and Alkaline Basalts of the Oldest Pacific-Ocean Crust. *Terra Nova*, 3(3):257–264. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3121.1991.tb00143.x>
- Gao, S. B., Zheng, Y. Y., Wang, J. S., et al., 2011. The Geochronology and Geochemistry of Intrusive Rocks in Bange Area: Constraints on the Evolution Time of the Bangong Lake-Nujiang Ocean Basin. *Acta Petrologica Sinica*, 27(7):1973–1982 (in Chinese with English abstract).
- Gehrels, G., Kapp, P., DeCelles, P., et al., 2011. Detrital Zircon Geochronology of Pre-Tertiary Strata in the Tibetan-Himalayan Orogen. *Tectonics*, 30(5). <https://doi.org/10.1029/2011tc002868>
- Glass, L. M., Phillips, D., 2006. The Kalkarindji Continental Flood Basalt Province: A New Cambrian Large Igneous Province in Australia with Possible Links to Faunal Extinctions. *Geology*, 34(6):461–464. <https://doi.org/10.1130/G22122.1>
- Gorton, M. P., Schandl, E. S., 2000. From Continents to Island Arcs: A Geochemical Index of Tectonic Setting for Arc-Related and Within-Plate Felsic to Intermediate Volcanic Rocks. *Canadian Mineralogist*, 38(5):1065–1073. <https://doi.org/10.2113/gscanmin.38.5.1065>
- Grimes, C. B., Wooden, J. L., Cheadle, M. J., et al., 2015. “Fingerprinting” Tectono-Magmatic Provenance Using Trace Elements in Igneous Zircon. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 170(5–6):46–71. <https://doi.org/10.1007/s00410-015-1199-3>
- Grimes, C. B., John, B. E., Kelemen, P. B., et al., 2007. Trace Element Chemistry of Zircons from Oceanic Crust: A Method for Distinguishing Detrital Zircon Provenance. *Geology*, 35(7):643–646.
- Gürsu, S., Göncüoğlu, M. C., 2005. Early Cambrian Back-Arc Volcanism in the Western Taurides, Turkey: Implications for Rifting along the Northern Gondwanan Margin. *Geological Magazine*, 142(5):617–631. <https://doi.org/10.1017/S0016756805000919>
- Hickey, R. L., Frey, F. A., Gerlach, C., 1986. Multiple Sources for Basaltic Arc Rocks from the Southern Zone of the Andes: Trace Element and Isotopic Evidence for Contributions from Subducted Oceanic Crust, Mantle, and Continental Crust. *Journal of Geophysical Research*, 91(B6):5963–5983.
- Ji, W. H., Chen, S. J., Zhao, Z. M., et al., 2009. Discovery of the Cambrian Volcanic Rocks in the Xainza Area, Gangdese Orogenic Belt, Tibet, China and Its Significance. *Geological Bulletin of China*, 28(9):1350–1354 (in Chinese with English abstract).
- Johnson, K. T. M., Dick, H. J. B., Shimizu, N., 1990. Melting in the Oceanic Upper Mantle: An Ion Microprobe Study of Diopsides in Abyssal Peridotites. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 95(B3):2661–2678.
- Li, C., Wu, Y. W., Wang, M., et al., 2010. Significant Progress on Pan-African and Early Paleozoic Orogenic Events in Qinghai-Tibet Plateau—Discovery of Pan-African Orogenic Unconformity and Cambrian System in the Gangdise Area, Tibet, China. *Geological Bulletin of China*, 29(12):1733–1736 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Y. S., Gao, S., Hu, Z. C., et al., 2010. Continental and Oceanic

- anic Crust Recycling-Induced Melt-Peridotite Interactions in the Trans-North China Orogen: U-Pb Dating, Hf Isotopes and Trace Elements in Zircons of Mantle Xenoliths. *Journal of Petrology*, 51(1-2): 537-571. <https://doi.org/10.1093/petrology/egp082>
- Liu, Y. S., Hu, Z. C., Gao, S., et al., 2008. In Situ Analysis of Major and Trace Elements of Anhydrous Minerals by LA-ICP-MS without Applying an Internal Standard. *Chemical Geology*, 257(1-2): 34-43. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2008.08.004>
- Ludwig, K. R., 2003. User's Manual for Isoplot/Ex Version 3.00: A Geochronology Toolkit for Microsoft Excel. Center Special Publication Isoplot v.3.0: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. Berkeley Geochronology Center Special Publication 4, Berkeley.
- Middlemost, E. A., 1994. Naming Materials in the Magma/Igneous Rock System. *Earth-Science Reviews*, 37(3-4): 215-224. [https://doi.org/10.1016/0012-8252\(94\)90029-9](https://doi.org/10.1016/0012-8252(94)90029-9)
- Miller, C., Thöni, M., Frank, W., et al., 2001. The Early Palaeozoic Magmatic Event in the Northwest Himalaya, India: Source, Tectonic Setting and Age of Emplacement. *Geological Magazine* 138(3): 237-251. <https://doi.org/10.1017/s0016756801005283>
- Münker, C., 1998. Nb/Ta Fractionation in a Cambrian Arc Back Arc System, New Zealand: Source Constraints and Application of Refined ICPMS Techniques. *Chemical Geology* 144(1-2): 23-45. [https://doi.org/10.1016/s0009-2541\(97\)00105-8](https://doi.org/10.1016/s0009-2541(97)00105-8)
- 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).
- Pearce, J. A., Norry, M. J., 1979. Petrogenetic Implications of Ti, Zr, Y and Nb Variations in Volcanic Rocks. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 69(1): 33-47. <https://doi.org/10.1007/bf00375192>
- Pearce, J. A., Peate, D. W., 1995. Tectonic Implications of the Composition of Volcanic Arc Magmas. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 23(1): 251-285. <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.23.1.251>
- Peccerillo, A., Taylor, S. R., 1976. Geochemistry of Eocene Calc-Alkaline Volcanic Rocks from the Kastamonu Area, Northern Turkey. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 58(1): 63-81. <https://doi.org/10.1007/bf00384745>
- 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)
- Shinjo, R., Chung, S. L., Kato, Y., et al., 1999. Geochemical and Sr-Nd Isotopic Characteristics of Volcanic Rocks from the Okinawa Trough and Ryukyu Arc: Implications for the Evolution of a Young, Intracontinental Back Arc Basin. *Journal of Geophysical Research*, 104(B5): 10591-10608. <https://doi.org/10.1029/1999jb900040>
- Sun, S. S., McDonough, W. F., 1989. Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts: Implications for Mantle Composition and Processes. *Geological Society, London, Special Publications*, 42(1): 313-345. <https://doi.org/10.1144/gsl.sp.1989.042.01.19>
- Taylor, S. R., McLennan, S. M., 1985. The Continental Crust: Its Composition and Evolution. Blackwell Scientific Publications, United States, 27.
- Tian, K., Zheng, Y. Y., Gao, S. B., et al., 2018. Petrogenesis and Geological Implications of Late Cretaceous Intrusion from Bangbule Pb-Zn-Cu Deposit, Western Gangdese, Tibet. *Earth Science*, 44(6): 1905-1922(in Chinese with English abstract).
- Xiao, L., Xu, Y. G., Mei, H. J., et al., 2004. Distinct Mantle Sources of Low-Ti and High-Ti Basalts from the Western Emeishan Large Igneous Province, SW China: Implications for Plume-Lithosphere Interaction. *Earth and Planetary Science Letters*, 228(3-4): 525-546. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2004.10.002>
- Xu, Z. Q., Yang, J. S., Liang, F. H., et al., 2005. Pan-African and Early Paleozoic Orogenic Events in the Himalaya Terrane: Inference from SHRIMP U-Pb Zircon Ages. *Acta Petrologica Sinica*, 21(1): 1-12(in Chinese with English abstract).
- Zhai, Q. G., Wang, J., Li, C., et al., 2010. SHRIMP U-Pb Dating and Hf Isotopic Analyses of Middle Ordovician Meta-Cumulate Gabbro in Central Qiangtang, Northern Tibetan Plateau. *Science China: Earth Sciences*, 40(5): 565-573(in Chinese).
- Zheng, Y. F., Chen, Y. X., Dai, L. Q., et al., 2015. Developing Plate Tectonics Theory from Oceanic Subduction Zones to Collisional Orogens. *Science China: Earth Sciences*, 45(6): 711-735(in Chinese).
- Zheng, Y. Y., Ci, Q., Wu, S., et al., 2017. The Discovery and Significance of Rongga Porphyry Mo Deposit in the Bangong-Nujiang Metallogenic Belt, Tibet. *Earth Science*, 42(9): 1441-1453(in Chinese with English abstract).
- 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>

Zhu, D. C., Zhao, Z. D., Niu, Y. L., 2012. Cambrian Bimodal Volcanism in the Lhasa Terrane, Southern Tibet: Record of an Early Paleozoic Andean-Type Magmatic Arc in the Australian Proto-Tethyan Margin. *Chemical Geology*, 328: 290-308. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2011.12.024>

附中文参考文献

董春艳, 李才, 万渝生, 等, 2011. 西藏羌塘龙木错—双湖缝合带南侧奥陶纪温泉石英岩碎屑锆石年龄分布模式: 构造归属及物源区制约. *中国科学: 地球科学*, 41(3): 299-308.

董昕, 张泽明, 2015. 青藏高原东南部寒武纪花岗岩类: 岩石学和锆石 Hf 同位素研究. *岩石学报*, 31(5): 1183-1199.

高顺宝, 郑有业, 王进寿, 等, 2011. 西藏班戈地区侵入岩年代学和地球化学: 对班公湖—怒江洋盆演化时限的制约. *岩石学报*, 27(7): 1973-1982.

计文化, 陈守建, 赵振明, 等, 2009. 西藏冈底斯构造带申扎一带寒武系火山岩的发现及其地质意义. *地质通报*, 28

(9): 1350-1354.

李才, 吴彦旺, 王明, 等, 2010. 青藏高原泛非—早古生代造山事件研究重大进展: 冈底斯地区寒武系和泛非造山不整合的发现. *地质通报*, 29(12): 1733-1736.

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.

田坎, 郑有业, 高顺宝, 等, 2018. 西藏冈底斯西段帮布勒 Pb-Zn-Cu 矿床晚白垩世岩浆岩成因及意义. *地球科学*, 44(6): 1905-1922.

许志琴, 杨经绥, 梁凤华, 等, 2005. 喜马拉雅地体的泛非—早古生代造山事件年龄记录. *岩石学报*, 21(1): 1-12.

翟庆国, 王军, 李才, 等, 2010. 青藏高原羌塘中部中奥陶世变质堆晶辉长岩锆石 SHRIMP 年代学及 Hf 同位素特征. *中国科学: 地球科学*, 40(5): 565-573.

郑永飞, 陈伊翔, 戴立群, 等, 2015. 发展板块构造理论: 从洋壳俯冲带到碰撞造山带. *中国科学: 地球科学*, 45(6): 711-735.

郑有业, 次琼, 吴松, 等, 2017. 西藏班公湖—怒江成矿带荣嘎斑岩型钼矿床的发现及意义. *地球科学*, 42(9): 1441-1453.