

doi:10.3799/dqkx.2013.000

新疆塔什库尔干塔阿西一带 火山岩成因及地质意义

高晓峰^{1,2}, 校培喜^{1,2}, 康磊^{1,2}, 朱海平³, 过磊^{1,2}, 奚仁刚^{1,2}, 董增产^{1,2}

1. 中国地质调查局西安地质调查中心造山带地质研究中心, 陕西西安 710054

2. 中国地质调查局西安地质调查中心岩浆作用成矿与找矿重点实验室, 陕西西安 710054

3. 陕西省地质调查院, 陕西西安 710065

摘要: 通过岩石学、地球化学和同位素年代学研究, 从原划“布伦阔勒岩群”中识别出一套“双峰式”火山岩, 英安岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄结果显示该套岩石形成年龄为 521.3 ± 3.3 Ma, 为早寒武世产物。在岩石类型上, 玄武岩和英安岩属于低钾岩石系列, 玄武岩相对富集 Rb、Ba、K、LREE, 而亏损 Nb-Ta、Th, 源于受早期俯冲洋/陆壳流体交代的亏损地幔熔融源区。英安岩表现出富集 LILE、Th, 亏损 Nb-Ta、Sr 和 Ti。两类岩石表现出不同的稀土元素配分模式和微量元素特征, 并缺乏分异演化的趋势, 反映二者的成因存在差别。结合其地球化学特征和实验岩石学资料, 认为英安岩为玄武岩底侵提供热, 基性下地壳在相对低压条件下部分熔融形成的。这套“双峰式”火山岩组合证实区域上早古生代存在一次大陆拉张环境下的构造—岩浆事件。结合区域上研究资料, 古元古代布伦阔勒岩群至少包含以下 3 个组成部分: (1) 古元古代布伦阔勒岩群; (2) 印支期高压变质岩体; (3) 早古生代火山—沉积岩组合。

关键词: 岩石成因; 火山岩; 布伦阔勒岩群; 塔什库尔干地区; 锆石; 地球化学。

中图分类号: P581

文章编号: 1000-2383(2013)06-1169-14

收稿日期: 2012-11-29

Origin of the Volcanic Rocks from the Ta'axi Region, Taxkorgan Xinjiang and Its Geological Significance

GAO Xiao-feng^{1,2}, XIAO Pei-xi^{1,2}, KANG Lei^{1,2}, ZHU Hai-ping³, GUO Lei^{1,2},
XI Ren-gang^{1,2}, DONG Zeng-chan^{1,2}

1. Research Center for Orogenic Geology, Xi'an Center of Geological Survey, China Geological Survey, Xi'an 710054, China

2. Key Laboratory for the Study of Focused Magmatism and Giant Ore Deposits, Xi'an Center of Geological Survey,

China Geological Survey, Xi'an 710054, China

3. Shaanxi Geological Survey, Xi'an 710065, China

Abstract: This paper presents petrological and geochemical features and zircon U-Pb age of a suite of bimodal volcanic rocks in the Bulunkuole Group from the Taishuihai Massif, NW China. The zircon U-Pb dating results yield a mean $^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$ age of 521.3 ± 3.3 Ma, representing the extrusion time of the dacites in the Middle Cambrian, which indicates that the previously defined Paleoproterozoic Bulunkuole Group also includes early Paleozoic volcanic rocks. The basalts and dacites belong to low-K affinities. The basalts show enrichment in Rb, Ba, K and LREE, and depletion in Nb-Ta and Th, suggesting that they were derived from a previously metasomatized depleted mantle. The dacites also show more enrichment in LILE and Th, and larger depletion in Nb-Ta, Sr and Ti in comparison with the basalts. Different REE patterns and trace element features between the two rock types, and the absence of differentiation trend from the basalts to dacites, argue against the origin for the dacites as the differentiates of the basalts. Combining the dacites geochemical features and the experimental data suggest that they are melts of lower crustal mafic protoliths heated by contemporaneous underplating basaltic magmas at relatively low pressure con-

基金项目: 国家自然科学基金(No. 41002020); 陕西省自然科学基金(No. 2011JQ5008); 中国地质调查局国土资源大调查研究项目(No. 1212011085034)。

作者简介: 高晓峰(1979-), 男, 副研究员, 从事岩石学和岩石地球化学研究。E-mail: xfgao2000@163.com

ditions. The occurrence of the bimodal volcanic rocks reflects that the region experienced an extensional tectonic-magmatic event during early Paleozoic. The new data suggests that the previously defined "Paleoproterozoic Bulunkuole Group" includes at least three components: (1) the Paleoproterozoic khondalite series; (2) the Indo-Sinian high-pressure metamorphic complexes and (3) the early Paleozoic volcano-sedimentary associations.

Key words: petrogenesis; volcanic rocks; bulunkuole Group; taxkorgan region; zircon; geochemistry.

0 引言

青藏高原西北缘的塔什库尔干地区是研究喀喇昆仑—西昆仑地质演化的重要地区之一,由于自然地理条件恶劣研究程度较低,尤其是该区地层系统研究比较薄弱,进而导致构造单元划分、归属以及区域对比的分歧(潘裕生, 1989, 2000; Pan *et al.*, 1996; 姜春发等, 2000; 陆松年等, 2002; 潘桂棠等, 2004; 梁银平等, 2010; Yang *et al.*, 2010; Ji *et al.*, 2011; 江军华等, 2011). 目前关于布伦阔勒岩群出露的塔什库尔干地区构造归属主要有 3 种观点: 其一是认为它属于甜水海地块的基底组成部分, 是康西瓦—瓦恰结合带以南, 乔戈里峰结合带以北羌塘地块的西部延伸, 向西与中帕米尔相接(Ducea *et al.*, 2003; 潘桂棠等, 2004; Ji *et al.*, 2011; Xiao *et al.*, 2011); 其二是认为属于松潘—甘孜带的西部延伸, 在早中生代拼贴到西昆仑南部边缘(Pan *et al.*, 1996; Xiao *et al.*, 2005); 其三是认为属于南昆仑地体的组成部分(姜春发等, 2000; Yuan *et al.*, 2003; Zhang *et al.*, 2007). 上述分歧主要表现在对布伦阔勒岩群的形成时代、物质组成和形成环境的不同认识: (1) 认为其属于喀喇昆仑地层的基底单元, 为一套以碎屑岩为主的副变质(孔兹岩系)岩石地层单位, Xiao *et al.* (2011) 根据碎屑锆石同位素测年结果其归为古元古代, 并夹有古元古代双峰式火山岩(Ji *et al.*, 2011); (2) 根据新藏公路沿线路线地质调查, 特别是赛力亚克达坂一带混杂岩带组成研究, 认为其主体属于三叠系, 为一套变质增生楔杂岩, 同时在构造上将西部的塔什库尔干塔吉克自治县(塔县)一带布伦阔勒岩群也归入其中(Xiao *et al.*, 2000, 2005); (3) 通过在塔县附近的 2 个泥质片麻岩样品的继承性碎屑锆石测年结果(540~2 200 Ma 之间), 认为它是一套火山—沉积岩系, 沉积于新元古代晚期—早古生代早期, 在加里东期增生到南昆仑地体南缘(Zhang *et al.*, 2007). 另外, Yang *et al.* (2010) 研究认为塔县城以东矽线石榴黑云片麻岩的原岩沉积时代不早于 253 ± 2 Ma, 石榴角闪片麻岩的原岩形成时代约为 $480 \pm$

8 Ma, 并且两者变质年龄均为 220 Ma 左右, 进而提出塔什库尔干地区“布伦阔勒岩群”中的矽线石榴片岩—石英岩岩石组合单元的形成时代不是古元古代, 应从中解体出来. 上述研究表明, 区域上布伦阔勒岩群时空分布、物质组成及构造属性的复杂性, 我们通过塔什库尔干塔阿西一带布伦阔勒岩群中双峰式火山岩的岩石学、岩石地球化学和同位素年代学的研究, 探讨了该双峰式火山岩成因, 为区域上“布伦阔勒岩群”进一步划分、形成时代、构造属性的研究提供了新的证据.

1 区域地质概况和岩相学特征

研究区位于苏巴什—康西瓦—瓦恰构造带以南的甜水海地块(新疆维吾尔自治区地质矿产局, 1993; Ducea *et al.*, 2003; 潘桂棠等, 2004; Ji *et al.*, 2011; Xiao *et al.*, 2011)(图 1), 布伦阔勒岩群作为甜水海地块基底岩系, 根据其岩性组合可分为含铁岩段、(含石榴)斜长角闪片麻岩段、夕线石榴片麻岩—石英岩段、大理岩段等 4 套变质建造组合(1: 25 万塔什库尔干县幅; Yang *et al.*, 2010; Ji *et al.*, 2011): (1) 含铁岩段主要岩性组合层状一条带状磁铁矿、磁铁石英岩、(含磁铁)黑云斜长片麻岩夹斜长角闪片(麻)岩等, 具典型的沉积—变质型磁铁矿特征, 分布于塔县西北; (2) 斜长角闪片麻岩段主要岩性组合为斜长角闪片麻岩、石榴角闪片麻岩夹少量石榴黑云石英片岩以及二云斜长片麻岩. 该段局部可见残余杏仁状、气孔状构造, 具火山熔岩外貌特征, 横向延伸稳定, 纵向表现出从下至上深色调岩石与浅色调岩石韵律性重复出现, 反映出火山多次喷发的韵律特征分布于塔县中南部达布达尔等地; (3) 矽线石榴片岩—石英岩段: 岩石富含石榴石、矽线石等特征变质矿物, 含量高者可达 20%~30%. 主要岩石组合为含石榴黑云石英片岩、含矽线石榴斜长黑云石英片岩、含石榴石英岩、含石榴石大理岩、含矽线石的石榴黑云斜长片麻岩, 夹少量角闪片岩和斜长角闪片岩等, 局部出现矽线石片岩及石榴石岩, 石榴石、矽线石结晶粗大, 石榴石大者可达

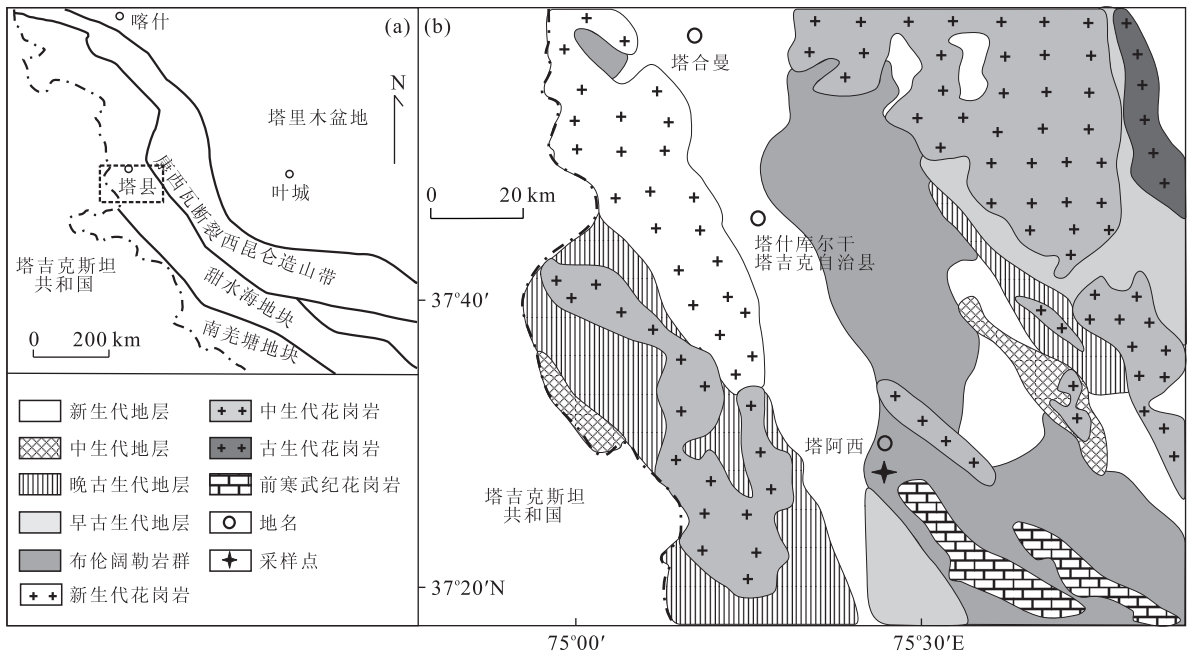


图 1 新疆塔什库尔干地区地质

Fig. 1 Geological sketch map of Taxkorgan region in Xinjiang

4 cm, 颜色多呈玫瑰红色; (4) 大理岩段: 主要岩性组合为黑云母大理岩、透闪石大理岩, 夹石榴黑云石英片岩、片麻岩等。砂线石榴片岩—石英岩和大理岩单元主体分布在塔县城以东地区。

塔县东南塔阿西一带布伦阔勒岩群由一套变质玄武岩(玄武质安山岩)和英安岩组成, 玄武岩与英安岩互层产出, 中间夹大理岩、变质砂岩, 并发育磁铁矿体(图 2, 3), 本文分析样品为塔县地区布伦阔勒岩群的变质玄武岩和变质英安岩(地理坐标为 37°28'39.0"N, 75°26'06.1"E), 玄武岩为变余斑状结构, 块状构造, 岩石主要有斑晶和基质组成, 斑晶主要由绿帘石化基性斜长石(50%~55%)、次闪石化角闪石(45%~50%)、次生绿帘石(2%~3%), 总量约为 20%。基质成分主要为绿泥石、绿帘石和钠黝帘石化基性斜长石, 含少量石英。斑晶斜长石为他形粒状, 粒径为 0.02~0.20 mm, 长轴定向, 粒间镶嵌状, 表面较干净, 少量具绿帘石化, 一般聚片双晶较少见, 长石的集合体呈近半自形板状, 零散定向分布。角闪石近半自形—他形柱状、粒状, 蓝绿色, 粒径为 0.02~1.00 mm, 近平行定向分布。绿帘石为他形粒状, 粒径小于 0.3 mm, 零散分布。

英安岩为变余斑状结构, 平行定向构造, 岩石主要有斑晶和基质组成, 斑晶由钠—更长石(10%~15%)和角闪石(~5%)组成, 粒径为 0.2~2.0 mm, 零散定向分布。钠—更长石为半自形—近半自形板

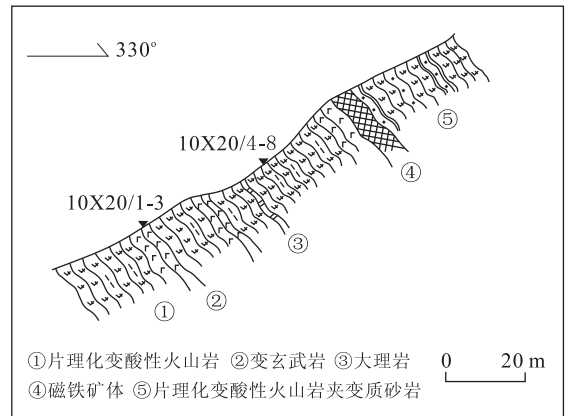


图 2 塔阿西一带布伦阔勒岩群火山岩地质剖面

Fig. 2 A profile of the volcanic rocks from the Bulunkuoole Group in Ta'axi region

状, 少量显他形粒状, 粒内见有鳞片状黑云母星散分布。角闪石为柱、粒状, 呈绿色, 局部被绿泥石、鳞片状黑云母交代。基质由长英质(75%~80%)和变质矿物(5%)组成, 长英质成分包括钠长石、石英, 粒径 < 0.05 mm, 少部分为 0.05~0.20 mm, 主要为他形粒状, 少部分钠长石具近半自形板状晶形, 钠长石表面较干净。变质矿物为黑云母, 细长鳞片状, 棕褐色, 片径 < 0.4 mm, 零散定向分布, 少量集合体呈线纹状, 局部绿帘石化。副矿物为一些不透明矿物、磷灰石和榍石组成。

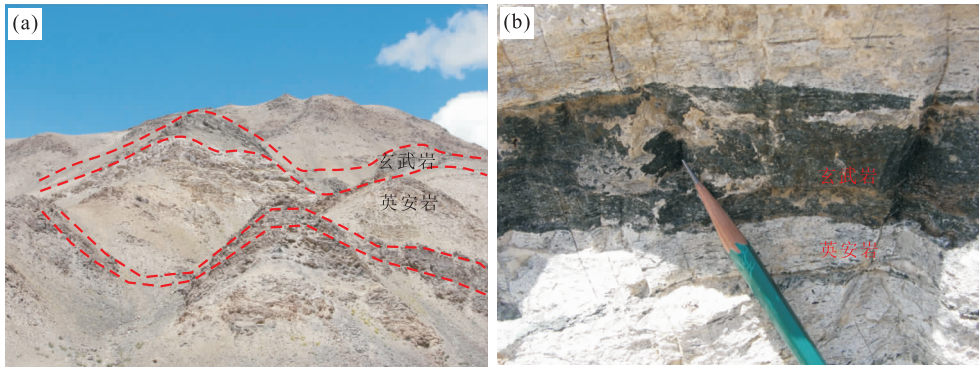


图 3 布伦阔勒岩群玄武岩与英安岩互层产出特征

Fig. 3 The characteristic of basalt interbedded with dacite of the Bulunkuole Group

2 分析测试方法

主、微量元素在西安地质矿产研究所实验测试中心 X 荧光光谱(X-Ray Fluorescence, XRF)和等离子光谱质谱法(Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry, ICP-MS)测定,主量元素的分析测试误差小于 1%,其中 FeO 含量通过湿化学方法测定,微量元素的分析测试误差在 5%左右。

锆石样品是从英安岩(10X20-8)通过人工重砂、电磁选和双目镜下挑选,锆石的 CL 图像和 LA-ICP-MS 法单颗粒锆石微区 U-Pb 年龄测定是在西北大学大陆动力学国家重点实验室完成,其中 CL 发光仪为加载于扫描电镜上的英国 Gatan 公司的 Mono CL3+型阴极荧光探头,LA-ICP-MS 分析采用 Agilent 7500 型 ICP-MS 和德国 LambdaPhysik 公司的 ComPex102 ArF 准分子激光器(工作物质 ArF,波长 193 nm)以及 MicroLas 公司的 GeoLas 200 M 光学系统联机进行。激光束斑直径为 30 μm ,激光剥蚀样品的深度为 20~40 μm 。实验中采用 He 作为剥蚀物质的载气,用美国国家标准技术研究院研制的人工合成硅酸盐玻璃标准参考物质 NIST SRM610 进行仪器最佳化,采样方式为单点剥蚀,数据采集选用一个质量峰一点的跳峰方式,每完成 4~5 个测点的样品测定,加测标样一次。在所测锆石样品分析 15~20 个点前后各测 2 次 NIST SRM610。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, ^{29}Si 作为内标。测试结果通过 GLITTER (ver4.0, Mac-quarie University) 软件计算得出,用 LAM-ICPMS Common Lead Correction (ver3.15) 对其进行了普通铅校正,年龄计算及谐和图采用 Isoplot (ver3.0) 完成(Ludwig, 1991)。详细分析步骤和数据处理方法参见文献(Gao *et al.*, 2002; Yuan *et*

al., 2003)。

3 主、微量元素地球化学特征

布伦阔勒岩群的变质玄武岩和英安岩均发生了较强的变质变形作用,考虑到岩石在上述过程中,一些活泼元素(如 K, Ba, Rb, U, Pb)将产生严重影响,因此本文的地球化学特征描述和讨论中,我们避免使用这些元素及比值讨论岩石成因,而主要讨论在变质作用中受影响较小的 REE 和高场强元素(HFSE)地球化学变化特征。

布伦阔勒岩群火山岩主、微量元素分析结果见表 1,所有的样品具有较小的烧失量,采用主量元素划分岩石类型是可行的。经过无烧失量 100% 标准化后,在 $\text{SiO}_2\text{-K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ 、 Nb/Y-SiO_2 和 $\text{SiO}_2\text{-FeO}^{\text{T}}/\text{MgO}$ 图上(图 4a, 4b, 4c),布伦阔勒岩群火山岩为拉斑玄武岩(玄武安山岩)和拉斑系列的英安岩,在 A/CNK-A/NK 图上(图 4d)上,玄武岩为准铝质系列,英安岩为强准铝质—弱过铝质系列。其中玄武岩的 SiO_2 的含量为 50.97%~52.75%,MgO 含量为 5.86%~6.11%, FeO^{T} 的含量为 10.38%~11.53%, Na_2O 的含量为 3.17%~4.60%, K_2O 的含量为 0.42%~0.83%, $\text{Mg}^{\#}$ 为 0.49~0.50。英安岩的 SiO_2 的含量为 68.98%~69.48%,MgO 含量为 0.72%~1.10%, FeO^{T} 的含量为 4.72%~5.79%, Na_2O 的含量为 5.16%~7.49%, K_2O 的含量为 0.36%~2.43%, $\text{Mg}^{\#}$ 为 0.22~0.26。整体上,布伦阔勒岩群的玄武岩和英安岩 MgO 与 SiO_2 、 FeO^{T} 、CaO、 TiO_2 以及不相容元素 Cr、Ni、Sc 和 Co 并没有表现出线性演化特征(图 5),暗示玄武岩和英安岩不具有同源演化的特征。

玄武岩总体低 REE ($\sum \text{REE} = 73.60 \times 10^{-6} \sim$

表 1 布伦阔勒岩群火山岩主量元素(%)和微量元素(10^{-6})分析结果

Table 1 Major (%) and trace element (10^{-6}) compositions of the Bulunkuole Group volcanic rocks

| 样号岩 石类型 | 10X20-1 玄武岩 | 10X20-2 玄武岩 | 10X20-3 玄武岩 | 10X20-4 英安岩 | 10X20-5 英安岩 | 10X20-6 英安岩 | 10X20-7 英安岩 | 10X20-8 英安岩 |
|--------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| SiO ₂ | 52.02 | 50.28 | 51.80 | 68.57 | 68.52 | 69.10 | 68.32 | 68.54 |
| Al ₂ O ₃ | 14.87 | 15.54 | 14.69 | 14.30 | 14.22 | 14.55 | 14.45 | 14.13 |
| Fe ₂ O ₃ | 3.74 | 4.78 | 3.76 | 2.96 | 2.69 | 2.70 | 2.95 | 3.80 |
| FeO | 6.87 | 7.07 | 7.29 | 2.30 | 2.80 | 2.39 | 2.01 | 2.33 |
| CaO | 8.43 | 7.95 | 9.35 | 2.06 | 1.68 | 1.09 | 2.23 | 0.96 |
| MgO | 5.78 | 6.03 | 5.84 | 0.94 | 0.96 | 0.96 | 0.71 | 1.09 |
| K ₂ O | 0.74 | 0.41 | 0.82 | 2.13 | 2.41 | 0.37 | 1.40 | 0.36 |
| Na ₂ O | 4.21 | 4.54 | 3.13 | 5.12 | 5.07 | 7.45 | 5.94 | 7.36 |
| TiO ₂ | 1.43 | 1.49 | 1.41 | 0.61 | 0.60 | 0.59 | 0.61 | 0.59 |
| P ₂ O ₅ | 0.22 | 0.22 | 0.22 | 0.18 | 0.18 | 0.21 | 0.18 | 0.16 |
| MnO | 0.31 | 0.34 | 0.37 | 0.05 | 0.05 | 0.04 | 0.04 | 0.04 |
| LOI | 1.79 | 1.86 | 1.81 | 1.27 | 1.33 | 0.83 | 1.92 | 1.03 |
| Total | 100.41 | 100.51 | 100.49 | 100.49 | 100.51 | 100.28 | 100.76 | 100.39 |
| FeO ^T | 10.38 | 11.53 | 10.82 | 5.00 | 5.26 | 4.85 | 4.72 | 5.79 |
| MgO [#] | 0.50 | 0.49 | 0.50 | 0.25 | 0.25 | 0.26 | 0.22 | 0.25 |
| La | 10.20 | 9.90 | 11.00 | 15.70 | 16.40 | 15.40 | 15.40 | 14.50 |
| Ce | 22.10 | 21.20 | 24.10 | 31.00 | 31.90 | 32.30 | 30.20 | 29.10 |
| Pr | 3.27 | 3.15 | 3.50 | 3.98 | 4.16 | 3.93 | 3.87 | 3.78 |
| Nd | 15.10 | 14.60 | 16.20 | 16.60 | 17.20 | 16.00 | 16.00 | 16.10 |
| Sm | 4.37 | 4.00 | 4.49 | 3.53 | 3.71 | 3.30 | 3.55 | 3.51 |
| Eu | 1.47 | 1.42 | 1.61 | 1.04 | 1.07 | 1.02 | 0.94 | 1.15 |
| Gd | 4.90 | 4.72 | 5.26 | 3.54 | 3.57 | 3.34 | 3.39 | 3.67 |
| Tb | 0.84 | 0.81 | 0.87 | 0.57 | 0.53 | 0.50 | 0.55 | 0.58 |
| Dy | 5.48 | 5.47 | 5.80 | 3.39 | 3.28 | 2.98 | 3.17 | 3.44 |
| Ho | 1.21 | 1.20 | 1.30 | 0.72 | 0.68 | 0.65 | 0.71 | 0.74 |
| Er | 3.30 | 3.12 | 3.39 | 1.92 | 1.87 | 1.69 | 1.95 | 1.88 |
| Tm | 0.54 | 0.50 | 0.52 | 0.32 | 0.30 | 0.26 | 0.32 | 0.29 |
| Yb | 3.22 | 3.07 | 3.34 | 1.97 | 1.91 | 1.62 | 1.86 | 1.89 |
| Lu | 0.51 | 0.47 | 0.51 | 0.32 | 0.31 | 0.27 | 0.29 | 0.29 |
| Y | 30.70 | 29.90 | 31.90 | 18.80 | 17.70 | 17.20 | 18.70 | 18.90 |
| Pb | 14.30 | 24.40 | 13.40 | 40.00 | 12.40 | 6.20 | 15.10 | 18.20 |
| Cr | 122.00 | 156.00 | 128.00 | 9.10 | 6.80 | 7.30 | 11.70 | 7.10 |
| Ni | 30.00 | 33.50 | 32.60 | 3.10 | 3.30 | 2.80 | 4.50 | 3.10 |
| Co | 35.40 | 35.30 | 39.20 | 3.60 | 3.60 | 2.00 | 2.80 | 2.60 |
| Rb | 21.20 | 7.40 | 25.10 | 23.70 | 27.80 | 9.10 | 17.00 | 9.20 |
| Sr | 200.00 | 232.00 | 280.00 | 54.00 | 47.00 | 56.00 | 64.00 | 53.00 |
| Ba | 291.00 | 124.00 | 277.00 | 1 140.00 | 1 260.00 | 198.00 | 730.00 | 181.00 |
| V | 301.00 | 311.00 | 301.00 | 69.00 | 70.00 | 71.00 | 67.00 | 73.00 |
| Sc | 39.10 | 40.50 | 39.80 | 18.70 | 20.90 | 16.60 | 17.30 | 20.00 |
| Nb | 4.51 | 4.89 | 4.37 | 4.71 | 4.80 | 4.85 | 4.92 | 4.87 |
| Ta | 0.60 | 0.58 | 0.57 | 0.44 | 0.43 | 0.41 | 0.40 | 0.44 |
| Zr | 91.00 | 86.00 | 89.00 | 131.00 | 134.00 | 134.00 | 127.00 | 128.00 |
| Hf | 1.98 | 1.77 | 1.85 | 2.73 | 2.78 | 2.90 | 2.75 | 2.91 |
| Ga | 18.30 | 20.10 | 19.70 | 17.70 | 17.80 | 15.80 | 16.60 | 16.60 |
| U | 0.46 | 0.44 | 0.44 | 1.28 | 1.27 | 1.3 | 1.32 | 1.21 |
| REE | 76.51 | 73.60 | 81.89 | 84.60 | 86.89 | 83.26 | 82.20 | 80.92 |
| (La/Sm) _N | 1.47 | 1.55 | 1.54 | 2.80 | 2.78 | 2.94 | 2.73 | 2.60 |
| (La/Yb) _N | 2.14 | 2.17 | 2.23 | 5.39 | 5.80 | 6.42 | 5.59 | 5.18 |
| (Dy/Yb) _N | 1.11 | 1.16 | 1.13 | 1.12 | 1.12 | 1.20 | 1.11 | 1.18 |
| Eu/Eu* | 0.97 | 1.00 | 1.01 | 0.89 | 0.89 | 0.93 | 0.82 | 0.97 |
| La/Nb | 2.30 | 2.00 | 2.50 | 3.30 | 3.40 | 3.20 | 3.10 | 3.00 |
| Zr/Nb | 20.10 | 17.60 | 20.30 | 27.80 | 27.90 | 27.60 | 25.80 | 26.30 |
| Th/Nb | 0.09 | 0.17 | 0.12 | 0.94 | 0.95 | 0.88 | 0.92 | 0.93 |
| Th/La | 0.04 | 0.09 | 0.05 | 0.28 | 0.28 | 0.28 | 0.30 | 0.31 |

81.89 $\times 10^{-6}$),在 REE 配分模式图上(图 6a),无论是玄武岩和英安岩均表现出 LREE 富集右倾的配

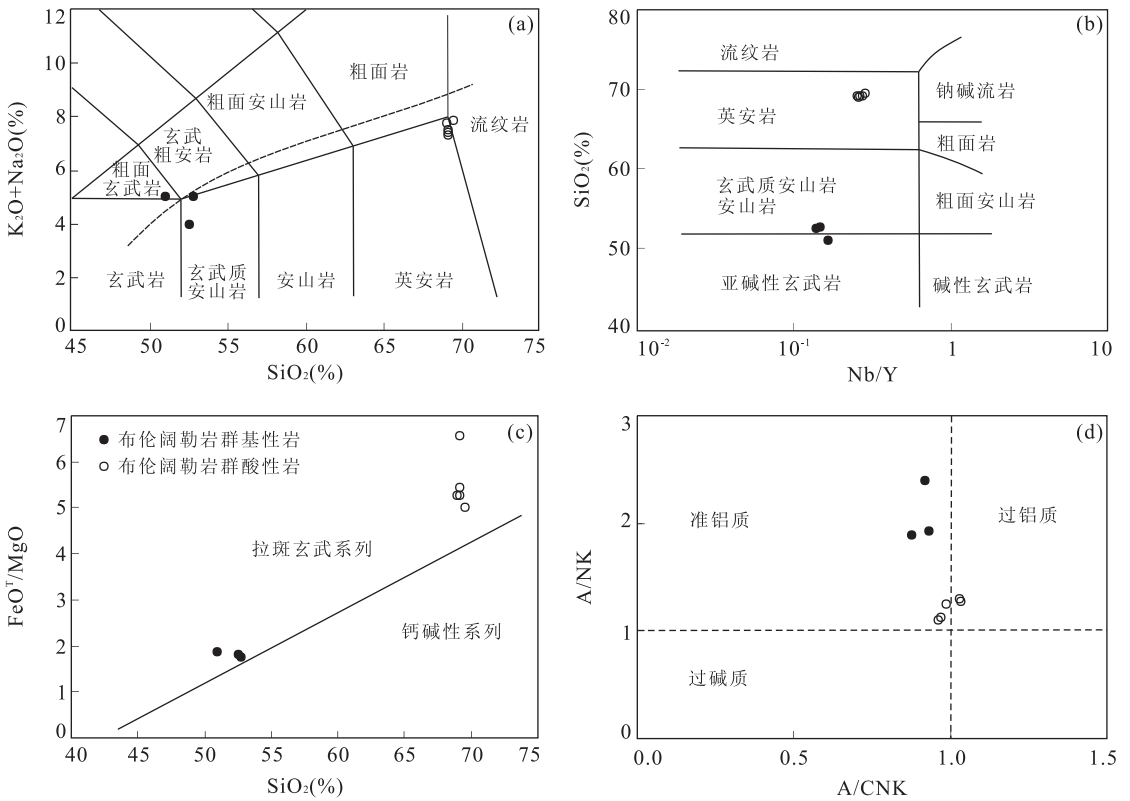


图 4 布伦阔勒岩群火山岩 $K_2O+Na_2O-SiO_2$ (a), SiO_2-Nb/Y (b), $FeO^T/MgO-SiO_2$ (c) and $A/NK-A/CNK$ (d) 图解
 Fig. 4 K_2O+Na_2O vs. SiO_2 (a), SiO_2 vs. Nb/Y (b), FeO^T/MgO vs. SiO_2 (c) and $A/NK-A/CNK$ (d) diagrams of the Bulunkuo Group volcanic rocks

分的模式,其中玄武岩的, $(La/Sm)_N=1.47\sim 1.55$, $(La/Yb)_N=2.14\sim 2.23$, $(Dy/Yb)_N=1.11\sim 1.16$, 并无 Eu 异常 ($Eu^*/Eu=0.97\sim 1.01$). 英安岩的 $\sum REE=80.92\times 10^{-6}\sim 86.89\times 10^{-6}$, $(La/Sm)_N=2.60\sim 2.94$, $(La/Yb)_N=5.18\sim 6.42$, $(Dy/Yb)_N=1.11\sim 1.20$, 并表现出弱 Eu 负异常 ($Eu^*/Eu=0.82\sim 0.97$).

在不相容元素原始地幔标准化蛛网图上(图 6b),玄武岩表现出富集 LILE(如 Rb、Ba),而亏损高场强元素(Th、Zr-Hf)和 Nb-Ta,略亏损 Ti. 英安岩表现出富集 LILE、Th,亏损 Nb-Ta、Sr 和 Ti,类似于岛弧火山岩的地球化学特征. 总体上,玄武岩和英安岩交叉的稀土元素配分模式和不同的微量元素特征,证实两者来源于不同的熔融源区.

4 锆石特征及 LA-ICP-MS U-Pb 同位素定年结果

英安岩(10X20-8)的锆石粒度较小,粒径等于或小于 $100\ \mu m$,阴极发光图像(CL)显示大部分锆

石具有较好的晶形,呈现岩浆结晶环带,内部无残留核,外部无变质边,具有岩浆锆石的特征(图 7a). 一般认为岩浆锆石的 Th/U 比值 >0.4 ,接近 1,且 Th、U 具有良好的正相关关系(Hermann *et al.*, 2001),从表 2 可以看出 16 个有效数据点的 Th 的含量在 $355\times 10^{-6}\sim 765\times 10^{-6}$,U 的含量在 $855\times 10^{-6}\sim 1369\times 10^{-6}$ 之间,Th/U 比值变化较小($Th/U=0.37\sim 0.61$),Th、U 具有良好的正相关关系,显示了岩浆锆石的特征,与阴极发光图像的分析结果是一致的. LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年结果显示 10 个测点 $t(^{206}Pb/^{238}U)$ 在 520~524 Ma 之间(表 2),10 个点给出了 $521.3\pm 3.3\ Ma$ ($n=10$, $MSWD=0.17$)的 $^{206}Pb/^{238}U$ 谐和年龄(图 7b),10 个点均接近于谐和线说明测试结果是可靠的,代表了英安岩的结晶年龄.

5 岩石成因及构造意义

5.1 结晶分异和地壳混染

布伦阔勒岩群玄武岩和英安岩野外剖面上表现出“双峰式”火山岩特征,“双峰式”火山岩指一组时

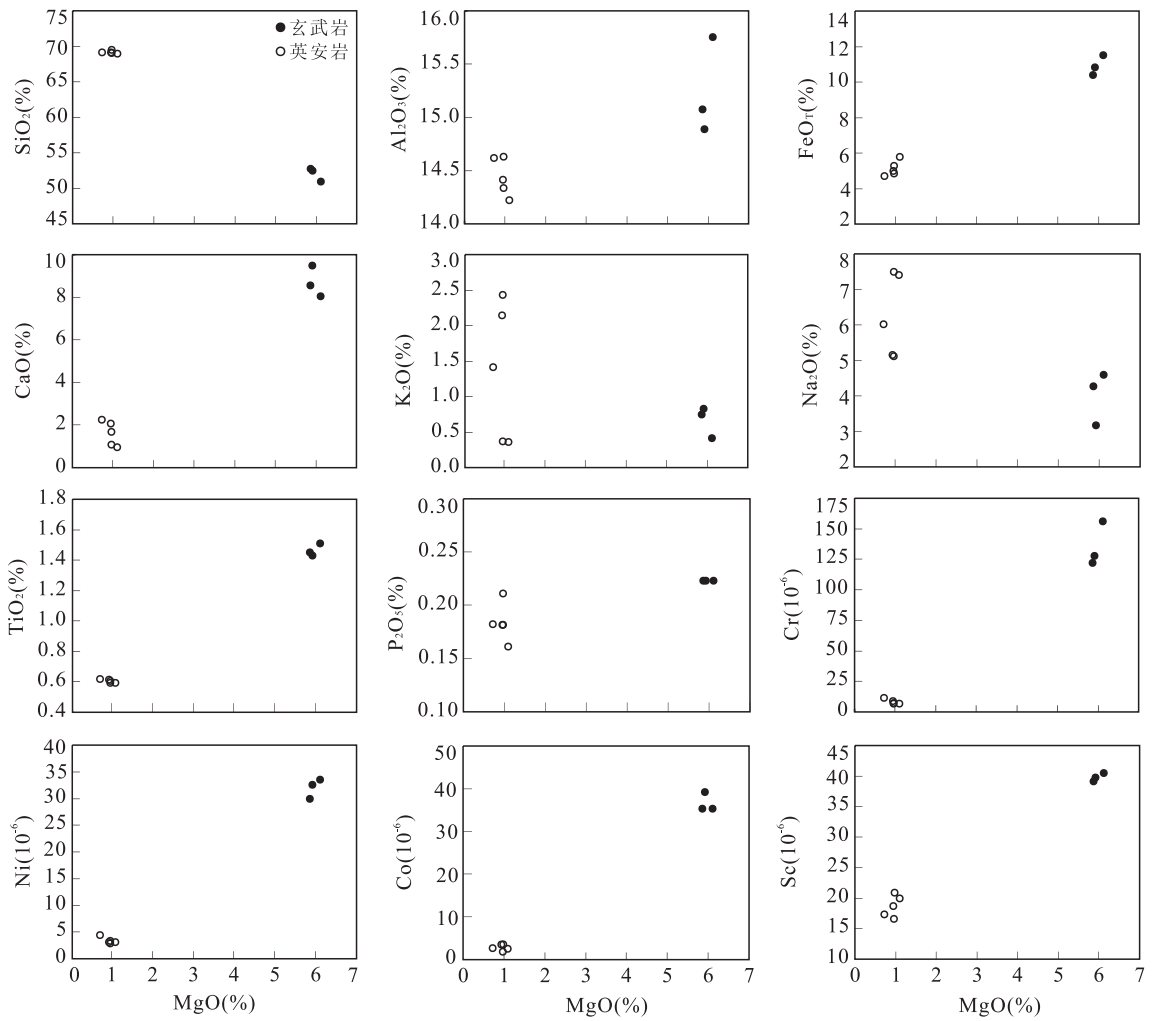


图 5 布伦阔勒岩群火山岩 MgO 对主、微量元素变化图

Fig. 5 MgO vs. major element and trace element plots of the volcanic rocks in the Bulunkuole Group

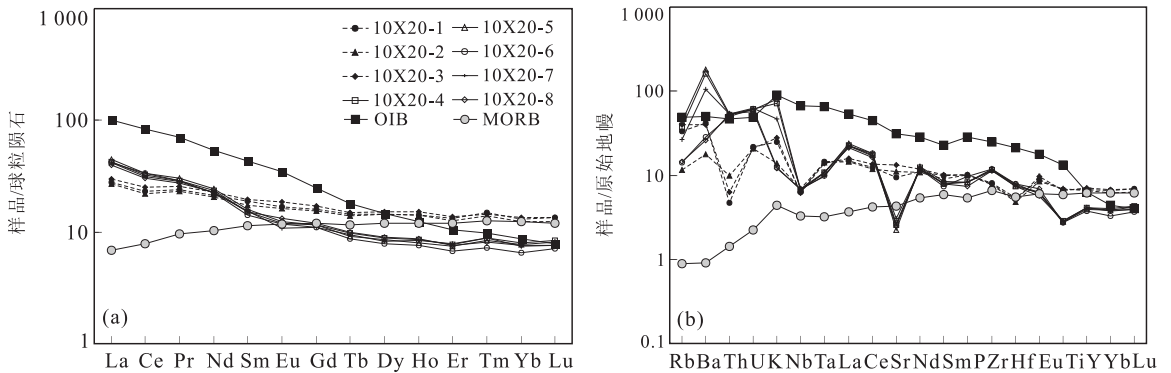


图 6 布伦阔勒岩群火山岩稀土元素配分模式(a)和微量元素蛛网图(b).

Fig. 6 Chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive mantle (PM) normalized spidergrams (b)
球粒陨石引自 Taylor and McLennan (1985);原始地幔标准化值、OIB 和 MORB 数据引自 Sun and McDonough (1989)

空上紧密相伴生的、SiO₂ 含量存在一定成分间断的火山岩组合 (Hildreth, 1981; 王焰等, 2000; 郭锋等, 2001; 高晓峰等, 2005), 主要由玄武岩和酸性火山岩组成, “双峰式”火山岩中玄武岩来源于地幔

岩石部分熔融已为研究者公认, 然而玄武岩的成因受到多种地质因素的制约, 如源区性质 (软流圈、岩石圈地幔) 和岩浆过程 (结晶分异、地壳混染), 如何确定熔融源区性质和岩浆过程是玄武岩研究的关键

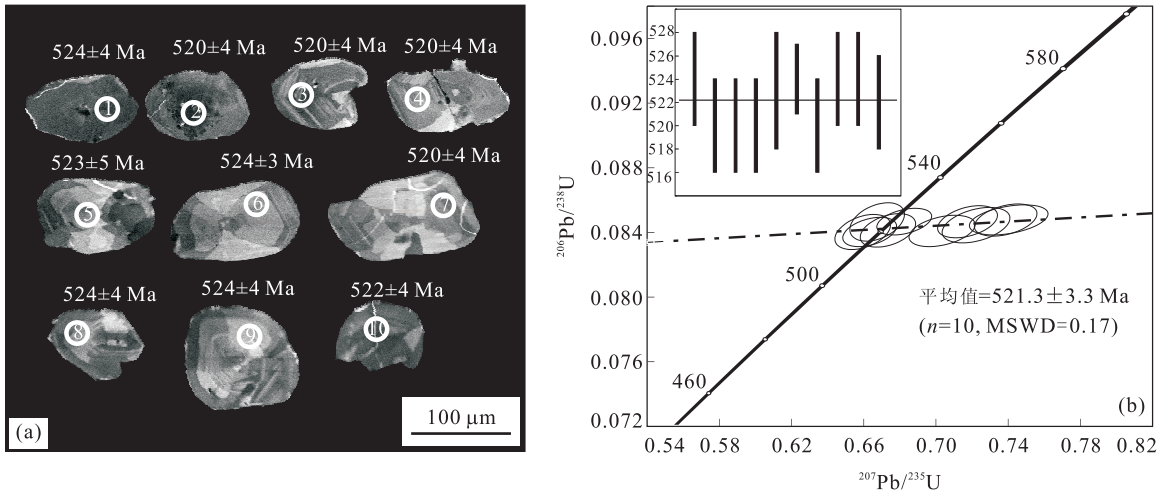


图 7 布伦阔勒岩群英安岩锆石 CL 图像和 U-Pb 谐和图(10X20-8)

Fig. 7 CL images of zircons and U-Pb concordia diagram from a dacite sample in the Bulunkuole Group (10X20-8)

表 2 布伦阔勒岩群英安岩(10X20-8)锆石 U-Pb 定年结果

Table 2 Zircon U-Pb dating results of 10X20-8 dacite of the Bulunkuole Group

| 样品点 | Th (10 ⁻⁶) | U (10 ⁻⁶) | Th/ U | ²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb | | ²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U | | ²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U | | ²⁰⁸ Pb/ ²³² Th | | ²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U | | ²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U | | ²⁰⁸ Pb/ ²³² Th | |
|------------|---------------------------|--------------------------|----------|--------------------------------------|--------|-------------------------------------|--------|-------------------------------------|--------|--------------------------------------|--------|-------------------------------------|----|-------------------------------------|----|--------------------------------------|-----|
| | | | | 比值 | 1σ | 比值 | 1σ | 比值 | 1σ | 比值 | 1σ | 年龄(Ma) | 1σ | 年龄(Ma) | 1σ | 年龄(Ma) | 1σ |
| 10X20-1-1 | 613 | 1361 | 0.45 | 0.0633 | 0.0010 | 0.7384 | 0.0115 | 0.0847 | 0.0007 | 0.5002 | 0.0283 | 561 | 7 | 524 | 4 | 8198 | 381 |
| 10X20-1-2 | 355 | 855 | 0.42 | 0.0607 | 0.0011 | 0.7031 | 0.0121 | 0.0841 | 0.0006 | 0.4404 | 0.0255 | 541 | 7 | 520 | 4 | 7375 | 357 |
| 10X20-1-3 | 723 | 1194 | 0.61 | 0.0581 | 0.0008 | 0.6728 | 0.0101 | 0.0841 | 0.0007 | 0.5357 | 0.0251 | 522 | 6 | 520 | 4 | 8671 | 330 |
| 10X20-1-4 | 423 | 1151 | 0.37 | 0.0569 | 0.0008 | 0.6588 | 0.0103 | 0.0840 | 0.0007 | 0.5502 | 0.0268 | 514 | 6 | 520 | 4 | 8860 | 350 |
| 10X20-1-5 | 600 | 1369 | 0.44 | 0.0572 | 0.0008 | 0.6668 | 0.0100 | 0.0846 | 0.0008 | 0.6201 | 0.0269 | 519 | 6 | 523 | 5 | 9752 | 335 |
| 10X20-1-6 | 765 | 1251 | 0.61 | 0.0583 | 0.0008 | 0.6819 | 0.0100 | 0.0846 | 0.0006 | 0.4467 | 0.0275 | 528 | 6 | 524 | 3 | 7463 | 384 |
| 10X20-1-7 | 746 | 1424 | 0.52 | 0.0571 | 0.0008 | 0.6626 | 0.0098 | 0.0840 | 0.0006 | 0.4816 | 0.0258 | 516 | 6 | 520 | 4 | 7945 | 351 |
| 10X20-1-8 | 548 | 1048 | 0.52 | 0.0632 | 0.0012 | 0.7401 | 0.0145 | 0.0847 | 0.0006 | 0.3750 | 0.0280 | 562 | 8 | 524 | 4 | 6437 | 412 |
| 10X20-1-9 | 489 | 1165 | 0.42 | 0.0614 | 0.0009 | 0.7171 | 0.0110 | 0.0846 | 0.0007 | 0.5087 | 0.0284 | 549 | 6 | 524 | 4 | 8312 | 380 |
| 10X20-1-10 | 733 | 1345 | 0.54 | 0.0619 | 0.0010 | 0.7220 | 0.0124 | 0.0844 | 0.0007 | 0.5033 | 0.0286 | 552 | 7 | 522 | 4 | 8240 | 385 |

(Sun and McDonough, 1989; 徐义刚, 1999; Guo *et al.*, 2007; 秦秀峰等, 2008; 高晓峰等, 2010). 布伦阔勒岩群玄武岩受到了蚀变和低级变质作用影响, 详细讨论其岩浆过程非常困难, 但其具有低的 MgO 含量(5.86%~6.11%)、Mg[#] (0.49~0.50) 和 Cr(122×10⁻⁶~156×10⁻⁶)、Ni(33.0×10⁻⁶~33.5×10⁻⁶)的丰度, 已非地幔原始岩浆, 而是经历了不同程度的分异结晶作用(图 5).

布伦阔勒岩群拉斑玄武岩轻度富集 LREE 和亏损 Nb-Ta 等地球化学特征可能与地壳物质的贡献有关, 但其相对均一的元素地球化学性质和变化较小的 La/Sm 比值(2.33~2.47)表明地壳混合作用在岩浆演化过程中的影响微弱(徐义刚, 1999; 郭锋等, 2001), 因此其元素地球化学特征主要反映了其熔融源区的性质.

5.2 玄武岩的熔融源区特征

拉斑玄武岩的成因一般认为主要有 4 种成因模

式:(1)软流圈来源, 其岩石性质主要取决于岩浆源区和深度. 地幔橄榄岩的无水熔融实验已证明, 亚碱性岩浆(如拉斑玄武岩)一般是在不含挥发份的低压(<10 kbar)条件下, 经大程度部分熔融而成(Jaques and Green, 1980; Takahashi *et al.*, 1993; Kushiro, 2001);(2)富集岩石圈地幔来源(Song *et al.*, 1990; Zhi *et al.*, 1990);(3)软流圈来源岩浆受到地壳混染的影响(Hooper and Hawkesworth, 1993);(4)软流圈与岩石圈地幔之间的相互作用(Hoang and Flower, 1998).

前面的讨论说明, 本次研究的拉斑玄武岩不是原始地幔岩浆受到地壳混染或 AFC 作用形成的; 因此, 其地球化学特征主要反映了其熔融源区的性质. 布伦阔勒岩群拉斑玄武岩轻度富集 LREE 和 Nb-Ta、Zr-Hf 亏损, 并且表现出与典型 OIB 和 MORB 明显不同的稀土元素和微量元素的配分模式(图 6), 说明其不可能直接来源于软流圈地幔. 布伦阔勒

岩群拉斑玄武岩的 Th/Nb 和 Th/La 比值接近于 MORB 范围,但在微量元素配分图上表现出略微富集 LREE 和 Nb-Ta、Zr-Hf 亏损的地球化学特征以及其高的 La/Nb、Zr/Nb 和 Zr/Y 比值,则暗示富集组分参与了其熔融源区(表 1),是否来源于亏损地幔的熔体和橄榄岩相互作用形成了该类玄武岩? 为了进一步限定玄武岩熔融源区的性质,我们通过 Th/Nb-Zr/Nb 比值模拟软流圈(以 N-MORB 为代表)与富集地幔(EM 型地幔)两端元混合以及与地壳物质 AFC 过程(各单元组分如表 3),结果显示约 40%左右富集地幔物质加入到软流圈熔体中可以很好地拟合拉斑玄武岩的地球化学特征(图 8),但地幔主要由橄榄岩组成,如此大比例的混染会导致玄武岩具有高 MgO 含量和存在大量地幔橄榄岩包体,研究表明 Cr、Ni 等元素只有在熔体—橄榄岩的相互反应过程中才会表现出不相容元素的性质(Xu *et al.*, 2005; Zhang, 2005). 而布伦阔勒岩群基性岩为低 MgO 拉斑玄武岩,并且野外观察中没有橄榄岩包体存在和 Cr、Ni 等元素与 MgO 呈正相关关系,说明其不可能来源于软流圈与岩石圈地幔相互作用的熔融源区,而很可能为富集岩石圈地幔熔融源区。

对于岩石圈地幔,俯冲交代和板内交代作用都可以形成相对亏损 HFSE 而富集 LILE、LREE 的地幔源区. 板内地幔交代作用过程主要包括 2 种类型:(1)富 CO₂ 流体/熔体交代作用(Menzies *et al.*, 1987; Dupuy *et al.*, 1992),形成的地幔源区以高度富集 LREE 为特征,且在微量元素蛛网图上显示出明显的 Zr-Hf 相对 Sm、Eu 的亏损;(2)小比例富碱熔体交代作用(Menzies *et al.*, 1987; Foley, 1992),形成的岩石圈地幔则富集 LILE,如 Rb、K 和高 Rb/Sr 比值,这类交代作用形成的地幔源区 HFSE 亏损不明显,甚至不亏损,并且富碱熔体交代地幔形成的岩浆主要为碱性玄武岩. 布伦阔勒岩群的基性组分为低钾拉斑玄武岩,其所表现出的略微富集 LREE、亏损 Nb-Ta 特征反映单一的板内交代过程,无论是富碳酸岩还是富碱熔体/流体都难以解释这套岩石元素地球化学特征。

布伦阔勒岩群拉斑玄武岩表现出岛弧火山岩的微量元素地球化学特征,可能与地壳物质的再循环或流体交代作用有关,如在板块俯冲过程中,随着被俯冲洋壳或陆壳达到含水矿物相的脱水条件,被俯冲作用带入的沉积物和板片随即发生脱水反应,从而析出相对亏损 HFSE 而富集 LILE 和 LREE 的

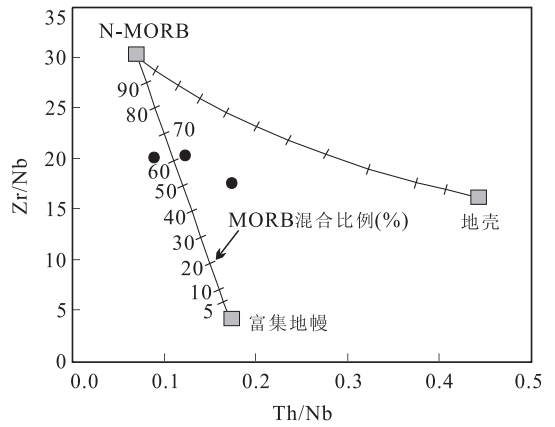


图 8 布伦阔勒岩群玄武岩 Th/Nb-Zr/Nb 图解
Fig. 8 Th/Nb vs. Zr/Nb diagram of basalts from the Bulunkuole Group

表 3 N-MORB、富集地幔和地壳各单元比值组成

Table 3 The composition of N-MORB, enrichment mantle and crust

| 端元组分 | Zr/Nb 比值 | Th/Nb 比值 |
|--------|----------|-----------|
| N-MORB | 30 | 0.07 |
| 富集地幔 | 3.5~13.1 | 0.09~0.17 |
| 大陆地壳 | 16.2 | 0.44 |

注:数据来源于来源于徐义刚(1999).

流体/熔体,对上覆的地幔楔或亏损地幔进行交代作用(Gallagher and Hawkesworth, 1992). 由于 K、Rb 等元素相对于 LREE 活动性更强,更容易进入到熔体或流体中,因此由板片析出的交代介质将能同时满足这些基性火山岩所要求的地幔源区同时具有亏损 HFSE 和略富集 LREE 的要求. 综上所述,我们认为拉斑玄武岩岩浆起源于早期俯冲过程中流体交代改造的亏损地幔熔融源区. 值得一提的是布伦阔勒岩群拉斑玄武岩轻重稀土分异较弱((La/Yb)_N=2.14~2.23),重稀土高于典型 OIB 且呈平稳变化((Dy/Yb)_N=1.11~1.16),表明岩浆来源于尖晶石二辉橄榄岩源区(秦秀峰等, 2008).

5.3 双峰式火山作用成因

目前关于塔什库尔干地区早古生代构造演化格局和岩石圈属性还不是很清楚,已有的研究资料表明(潘裕生, 1989, 2000; 姜春发等, 2000),西昆仑及邻区在早古生代整体上处于伸展构造背景下,而在岩石圈伸展和减薄的背景下,被俯冲流体交代的岩石圈地幔由于其固相线较低而发生减压部分熔融作用形成基性岩浆,在经历了深部岩浆房分异作用后形成了一套低钾和 MgO 的拉斑玄武岩,地幔富集过程很可能为前寒武纪超大陆(如 Rodinia 超大

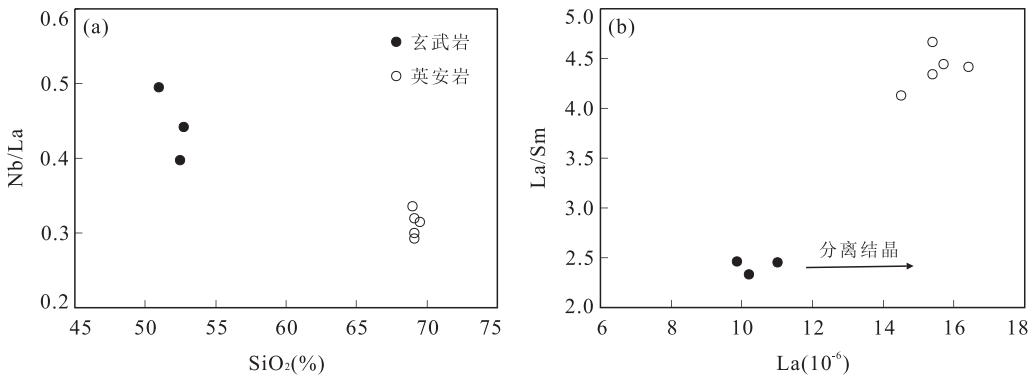


图 9 布伦阔勒岩群火山岩 SiO₂-Nb/La 和 La-La/Sm 图

Fig. 9 SiO₂ vs. Nb/La and La vs. La/Sm diagrams of the volcanic rocks in the Bulunkuole Group

陆)裂解和拼合过程中地质响应(潘裕生, 1989, 2000; Pan *et al.*, 1996; 姜春发等, 2000).

关于“双峰式”火山岩组合中酸性火山岩的特征和成因,有以下几种模型:(1)酸性火山岩和玄武岩可以是同源的(Grove and Donnelly-Nolan, 1986; Brophy, 1991; Geist *et al.*, 1995),酸性火山岩是玄武岩浆演化的产物(玄武岩浆分离结晶);(2)酸性火山岩和玄武岩是不同源的,即酸性火山岩与玄武岩来自不同的源区,酸性火山岩是由玄武岩浆热量的传导而导致地壳深熔作用形成的(Doe *et al.*, 1982; Huppert and Sparks, 1988; 郭锋等, 2001);(3)酸性火山岩还可以是玄武质岩浆和地壳混合作用的结果,其地球化学特征具有玄武岩与地壳的过渡性质,并表现出 A 型花岗岩的特征(Zhang *et al.*, 2008). 布伦阔勒岩群玄武岩与英安岩表现出完全不同的稀土和微量元素的特征,并且在 MgO 与主、微量元素图上(图 4)不具有连续演化的特征以及明显不同的 La/Sm 和 Nb/La 比值(图 9),说明英安岩不可能由玄武质岩浆分异和/或与地壳物质混染产物. 来自镁铁质岩石的部分熔融实验岩石学资料显示(Rapp *et al.*, 1991; Rapp and Watson, 1995; Wilhelm and Hans, 1997; Susana and Antonio, 2001; Xiong *et al.*, 2005),镁铁质岩石在压力大于 1.5 GPa 条件下部分熔融,由于源岩中的斜长石不稳定向石榴石转变,它们的 HREE 和 Y 进入到石榴石等残留相中,其熔融形成的中酸性岩浆具有高 Sr、低 HREE 和 Y 的类似于现代俯冲带 adakite 岩或太古代 TTG 岩石的特征(Defant and Drummond, 1990; Petford and Atherton, 1996); 镁铁质岩石在下地壳压力条件下(如 $P=1.0$ GPa)条件下熔融出的中酸性熔体主要为富钠特征. 布伦阔勒岩群英安岩并没有表现出 adakite 岩地球化学

特征(表 1 和 2),因此我们认为其很可能为玄武质岩浆底侵提供热,导致基性下地壳物质在相对低压条件下部分熔融形成的.

5.4 构造意义

布伦阔勒岩群中解体出的“双峰式”火山岩组合证实了塔什库尔干地区在早古生代处于伸展构造背景下,结合区域上同期的中酸性侵入岩,我们推测区域上早古生代早期存在一次较大规模构造一岩浆事件. 总结前人资料的基础上,将布伦阔勒岩群至少可以划分为 3 个部分:(1)古元古代布伦阔勒岩群:包括原划分的含铁岩段、大理岩段以及从斜长角闪片麻岩段解体出古元古代火山岩(Ji *et al.*, 2011),Xiao *et al.* (2011)根据碎屑锆石测年确定布伦阔勒岩群原岩沉积年龄可能要晚于 2.1 Ga 早于 1.7 Ga,形成时代为古元古代晚期;(2)印支期高压变质地体:塔县以东地区的矽线石榴片岩一石英岩段(原岩年龄为 480~253 Ma,变质年龄为 220 Ma)(Yang *et al.*, 2010)和班迪尔一带的麻粒岩、尖晶石橄榄岩和石榴石辉石岩以及塔县托兰乡呈透镜体状出露于布伦阔勒岩群中的尖晶石方辉橄榄岩(第二期退变质时代为 (203 ± 4) Ma)(课题组内部资料)共同构成印支期高压变质地体;(3)早古生代火山岩组合:从斜长角闪片麻岩段中解体出早古生代大陆拉张环境下“双峰式”火山岩,形成时代为 521.3 ± 3.3 Ma,为寒武纪火山活动的产物.

6 结论

古元古代布伦阔勒岩群解体出一套早古生代大陆拉张环境下拉斑玄武岩和英安岩组合,为寒武纪产物(形成时代为 521.3 ± 3.3 Ma). 拉斑玄武岩为伸展构造背景下,早期俯冲洋/陆壳流体交代的亏损

地幔减压部分熔融并经历一定程度分离结晶作用形成的. 英安岩为基性岩浆上升过程中提供热, 基性下地壳物质在相对低压条件下部分熔融形成的. 布伦阔勒岩群至少可以划分为 3 个组成部分: (1) 古元古代布伦阔勒岩群; (2) 印支期高压变质岩体; (3) 早古生代火山岩组合.

致谢: 在野外工作中得到刘良教授、王超博士等指导和帮助以及成文过程中得到匿名审稿人和编辑老师的建设性意见和建议, 深表感谢!

References

- Brophy, J. G., 1991. Composition Gaps, Critical Crystallinity and Fractional Crystallization in Orogenic (Calc-Alkaline) Magmatic Systems. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 109 (2): 17 - 382. doi: 10. 1007/BF00306477
- Bureau of Geology and Mineral Resources of Xinjiang Uygur Autonomous Region, 1993. Regional Geology of Xinjiang Uygur Autonomous Region. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Defant, M. J., Drummond, M. S., 1990. Derivation of Some Modern Arc Magmas by Melting of Young Subducted Lithosphere. *Nature*, 347: 662 - 665. doi: 10. 1038/347662a0
- Doe, B. R., Leeman, W. P., Christiansen, R. L., et al., 1982. Lead and Strontium Isotopes and Related Trace Elements as Genetic Tracers in the Upper Cenozoic Rhyolite-Basalt Association of the Yellowstone Plateau Volcanic Field. *Journal of Geophysical Research*, 87 (B6): 4785 - 4806. doi: 10. 1029/JB087iB06p04785
- Ducea, M. N., Lutkov, V., Minaev, V. T., et al., 2003. Building the Pamirs; The View from the Underside. *Geology*, 31(10): 849 - 852. doi: 10. 1130/G19707. 1 v. 31 No. 10 p. 849 - 852
- Dupuy, C., Liotard, J. M., Distal, J., 1992. Zr/Hf Fractionation in Intraplate Basaltic Rocks; Carbonate Metasomatism in the Mantle Source. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 56: 2417 - 2423. doi: 10. 1016/0016 - 7037(92) 90198 - R
- Foley, S., 1992. Vein-Plus-Wall-Rock Melting Mechanisms in the Lithosphere and the Origin Potassic Alkaline Magmas. *Lithos*, 28 (3 - 6): 435 - 453. doi: 10. 1016/0024 - 4937(92)90018 - T
- Gallagher, K., Hawkesworth, C., 1992. Dehydration Melting and the Generation of Continental Flood Basalts. *Nature*, 358: 57 - 59. doi: 10. 1038/358057a0
- Gao, S., Liu, X. M., Yuan, H. L., et al., 2002. Analysis of Forty-Two Major and Trace Elements of USGS and NISTSRM Glasses by LA-ICP-MS. *Geostandard Newsletters*, 26: 181 - 195.
- Gao, X. F., Guo, F., Fan, W. M., et al., 2005. Origin of Late Mesozoic Intermediate-Felsic Volcanic Rocks from Southern Da Hinggan Mountain, NE China. *Acta Petrologica Sinica*, 21(3): 737 - 748 (in Chinese with English abstract).
- Gao, X. F., Li, W. Y., Ye, M. F., et al., 2010. Geochemistry of the Amphibolites of Hualong Group in the Eastern Segment of Middle-Qilian Massif and Its Tectonic Significance. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 29 (5): 507 - 515 (in Chinese with English abstract).
- Geist, D., Howard, K. A., Larson, P., 1995. The Generation of Oceanic Rhyolites by Crustal Fractionation; The Basalt-Rhyolite Association at Volcano Alcedo, Galapagos Archipelago. *Journal of Petrology*, 36(4): 965 - 982. doi: 10. 1093/petrology/36. 4. 965
- Grove, T. L., Donnelly-Nolan, J. M., 1986. The Evolution of Young Silicic Lavas at Medicine Lake Volcano-California; Implications for the Origin of Compositional Gaps in Calc-Alkaline Series Lavas. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 92: 281 - 302. doi: 10. 1007/BF00572157
- Guo, F., Fan, W. M., Wang, Y. J., et al., 2001. Petrogenesis of the Late Mesozoic Bimodal Volcanic Rocks in the Southern Da Hinggan Mts, China. *Acta Petrologica Sinica*, 17(1): 161 - 168 (in Chinese with English abstract).
- Guo, F., Nakamura, E., Fan, W. M., et al., 2007. Generation of Palaeocene Adakitic Andesites by Magma Mixing, Yanji Area, NE China. *Journal of Petrology*, 48(4): 661 - 692. doi: 10. 1093/petrology/egl077
- Hermann, J., Rubatto, D., Korsakov, A., et al., 2001. Multiple Zircon Growth during Fast Exhumation of Diamondiferous, Deeply Subducted Continental Crust (Kokchetav Massif, Kazakhstan). *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 141(1): 66 - 82. doi: 10. 1007/s004100000218
- Hildreth, W., 1981. Gradients in Silicic Magma Chambers; Implications for Lithospheric Magmatism. *Journal of Geophysical Research*, 86: 10153 - 10192.
- Hoang, N., Flower, M., 1998. Petrogenesis of Cenozoic Basalts from Vietnam; Implication of Origin of A "Diffusion Igneous Province". *Journal of Petrology*, 39(3): 369 - 395. doi: 10. 1093/petroj/39. 3. 369
- Hooper, P. R., Hawkesworth, C. J., 1993. Isotopic and Geochemical Constraints on the Origin and Evolution of Co-

- lumbia River Basalt. *Journal of Petrology*, 34 (6): 1203—1246. doi:10.1093/petrology/34.6.1203
- Huppert, H. E., Sparks, R. S. J., 1988. The Generation of Granitic Magmas by Intrusion of Basalt into Continental Crust. *Journal of Petrology*, 29(3): 599—624. doi:10.1093/petrology/29.3.599
- Jaques, A. L., Green, D. H., 1980. Anhydrous Melting of Peridotite at 0—15 kb Pressure and the Genesis of Tholeiitic Basalts. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 73(3): 287—310. doi:10.1007/BF00381447
- Ji, W. H., Li, R. S., Chen, S. J., et al., 2011. The Discovery of Palaeoproterozoic Volcanic Rocks in the Bulunkuoler Group from the Tianshuihai Massif in Xinjiang of Northwest China and Its Geological Significance. *Science China Earth Sciences*, 54 (1): 61—72. doi:10.1007/s11430-010-4043-7
- Jiang, C. F., Wang, Z. Q., Li, J. Y., et al., 2000. Opening and Closing Tectonics of Central Orogenic Belt. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Jiang, J. H., Wang, R. J., Qu, X. M., et al., 2011. Crustal Extension of the Banggong Lake Arc Zone, Western Tibetan Plateau, after the Closure of the Tethys Oceanic Basin. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 36(6): 1021—1032 (in Chinese with English abstract).
- Kushiro, I., 2001. Partial Melting Experiments on Peridotite and Origin of Mid-Ocean Ridge Basalt. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 29: 71—107. doi:10.1146/annurev.earth.29.1.71
- Liang, Y. P., Zhu, J., Ci, Q., et al., 2010. Zircon U-Pb Ages and Geochemistry of Volcanic Rock from Linzizong Group in Zhunuo Area in Middle Gangdise Belt, Tibet Plateau. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 35(2): 211—223 (in Chinese with English abstract).
- Lu, S. N., Yu, H. F., Zhao, F. Q., 2002. Preliminary Study of Precambrian Geology in the North Tibet-Qinghai Plateau. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Ludwig, K. R., 1991. Isoplot: A Plotting and Regression Program for Radiogenic-Isotope Data. Open File Report, U. S. G. S., 88—557.
- Menzies, M. A., Rogers, N., Tindle, A. G., et al., 1987. Metasomatic and Enrichment Processes in Lithospheric Peridotites, an Effect of Asthenosphere-Lithosphere Interaction. In: Menzies, M. A., Hawkesworth, C. J., eds., *Mantle Metasomatism*. Academic Press, London, UK, 313—361.
- Pan, G. T., Wang, L. Q., Yin, F. G., et al., 2004. Charm of Landing of Plate Tectonics on the Continent as Viewed from the Study of the Archipelagic Arc-Basin System. *Geological Bulletin of China*, 23(9—10): 933—939 (in Chinese with English abstract).
- Pan, Y. S., Zhou, W. M., Xu, R. H., et al., 1996. Geological Characteristics and Evolution of the Kunlun Mountains Region during the Early Paleozoic. *Science in China (Series D)*, 39: 337—347.
- Pan, Y. S., 1989. A Preliminary Study on the Regionalization of the Structures in the Kunlun Mountains Region. *Journal of Nature Resource*, 4(3): 196—203 (in Chinese with English abstract).
- Pan, Y. S., 2000. Geological Evolution of the Karakorum-Kunlun Mountains. Science Press, Beijing, 21—98 (in Chinese).
- Petford, N., Atherton, M., 1996. Na-Rich Partial Melts from Newly Underplated Basaltic Crust; The Cordillera Blanca Batholith, Peru. *Journal of Petrology*, 37 (6): 1491—1521. doi:10.1093/petrology/37.6.1491
- Qin, X. F., Xu, Y. G., Zhang, H. H., et al., 2008. Petrogenetic Diversity of Continental Subalkaline Volcanic Rocks: An Example from the Dunhua-Mishan-Dongning Volcanic Belt. *Acta Petrologica Sinica*, 24(11): 2501—2514 (in Chinese with English abstract).
- Rapp, R. P., Watson, E. B., 1995. Dehydration Melting of Metabasalt at 8—32 kbar; Implications for Continental Growth and Crust-Mantle Recycling. *Journal of Petrology*, 36(4): 891—931. doi:10.1093/petrology/36.4.891
- Rapp, R. P., Watson, E. B., Miller, C. F., 1991. Partial Melting of Amphibolite/Eclogite and the Origin of Archean Trondhjemite and Tonalities. *Precambrian Research*, 51: 1—25.
- Song, Y., Frey, F. A., Zhi, X. C., 1990. Isotopic Characteristics of Hannouba Basalts, Eastern China; Implications for Their Petrogenesis and the Composition of Subcontinental Mantle. *Chemical Geology*, 85: 35—52.
- Sun, S. S., McDonough, W. F., 1989. Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts; Implication for Mantle Composition and Processes. In: Saunderson, A. D., Norry, M. J., eds., *Magmatism in the Ocean Basins*. *Geological Society, London, Special Publications*, 42: 313—345. doi:10.1144/GSL.SP.1989.042.01.19
- Susana, L., Antonio, C., 2001. Determination of the Fluid-Absent Solidus and Supersolidus Phase Relationships of MORB-Derived Amphibolites in the Range 4—14 kbar. *American Mineralogist*, 86: 1396—1403.
- Takahashi, E., Shimazaki, T., Tsuzaki, Y., et al., 1993.

- Melting Study of a Peridotite KLB-1 and the Origin of Basaltic Magmas. *Philos. Trans. R. Soc. Lond. A*, 342 (1663):105—120. doi:10. 1098/rsta. 1993. 0008
- Taylor, S. R., McLennan, S. M., 1985. The Continental Crust: Its Composition and Evolution. Blackwell Scientific Publication, California, (1):312.
- Wang, Y., Qian, Q., Liu, L., et al., 2000. Major Geochemical Characteristics of Bimodal Volcanic Rocks in Different Geochemical Environments. *Acta Petrologica Sinica*, 16 (2):169—173 (in Chinese with English abstract).
- Wilhelm, S., Hans, A. S., 1997. Partial Fusion of Basic Granulites at 5 to 15 kbar: Implications for the Origin of TTG Magmas. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 127 (1—2): 30—45. doi: 10. 1007/s004100050263
- Xiao, P. X., Gao, X. F., Kang, L., et al., 2011. Redefine Bulunkuole Group in Eastern Pamirs Syntaxis and Its Signification from the Evidence of LA-ICP-MS Isotope Dating of Detrital Zircon. Goldschmidt Conference Abstracts, Prague, 2190.
- Xiao, W. J., Hou, Q. L., Li, J. L., et al., 2000. Tectonic Facies and the Archipelago-Acretion Process of the West Kunlun, China. *Science in China (Series D)*, 43 (S1): 134—143.
- Xiao, W. J., Windley, B. F., Liu, D. Y., et al., 2005. Paleozoic Accretionary Tectonics of the Western Kunlun Range, China: New SHRIMP Zircon Ages from the Kudi Ophiolite and Associated Granites, and Implications for the Crustal Growth of Central Asia. *Journal of Geology*, 113:687—705.
- Xiong, X. L., Adam, J., Green, T. H., 2005. Rutile Stability and Rutile/Melt HFSE Partitioning during Partial Melting of Hydrous Basalt: Implications for TTG Genesis. *Chemical Geology*, 218 (3—4): 339—359. doi: 10. 1016/j. chemgeo. 2005. 01. 014
- Xu, Y. G., Ma, J. L., Feigenson, M. D., et al., 2005. Role of Lithosphere-Asthenosphere Interaction in the Genesis of Quaternary Tholeiitic and Alkali Basalts from Datong, Western North China Craton. *Chemical Geology*, 224 (4): 247—271. doi: 10. 1016/j. chemgeo. 2005. 08. 004
- Xu, Y. G., 1999. Continental Basaltic Magmatism in Extensional Setting: Nature and Dynamic Processes. In: Zheng, Y. F., ed., *Advances in Chemical Geodynamics*. Science Press, Beijing, 119—167 (in Chinese).
- Yang, W. Q., Liu, L., Cao, Y. T., et al., 2010. Geochronological Evidence of Indosinian (High-Pressure) Metamorphic Event and Its Tectonic Significance in Taxkorgan Area of the Western Kunlun Mountains, NW China. *Science China Earth Science*, 53 (10): 1445—1459. doi: 10. 1007/s11430—010—4081—1
- Yuan, C., Sun, M., Zhou, M. F., et al., 2003. Absence of the Archean Basement for the South Kunlun Block: Nd-Sr-O Isotopic Evidence from Granitoids. *The Island Arc*, 12 (1): 13—21. doi: 10. 1046/j. 1440—1738. 2003. 00376. x
- Yuan, H. L., Wu, F. Y., Gao, S., et al., 2003. Determination of U-Pb Age and Rare Earth Element Concentrations of Zircons from Cenozoic Intrusions in Northeastern China by Laser Ablation ICP-MS. *Chinese Science Bulletin*, 48 (22): 2411—2421.
- Zhang, C. L., Lu, S. N., Yu, H. F., et al., 2007. Tectonic Evolution of Western Kunlun Orogenic Belt in Northern Qinghai-Tibet Plateau: Evidence from Zircon SHRIMP and LA-ICP-MS U-Pb Geochronology. *Science in China (Series D)*, 50 (6): 825—835.
- Zhang, H. F., 2005. Transformation of Lithospheric Mantle through Peridotite-Melt Reaction: A Case of Sino-Korean Craton. *Earth and Planetary Science Letters*, 237 (3—4): 768—780. doi: 10. 1016/j. epsl. 2005. 06. 041
- Zhang, X. H., Zhang, H. F., Tang, Y. J., et al., 2008. Geochemistry of Permian Bimodal Volcanic Rocks from Central Inner Mongolia, North China: Implication for Tectonic Setting and Phanerozoic Continental Growth in Central Asian Orogenic Belt. *Chemical Geology*, 249 (3—4): 262—281. doi: 10. 1016/j. chemgeo. 2008. 01. 005
- Zhi, X. C., Song, Y., Frey, F. A., et al., 1990. Geochemistry of Hannouba Basalts, Eastern China: Constraints in the Origin of Continental Alkali and Tholeiitic Basalt. *Chemical Geology*, 88 (1—2): 1—33. doi: 10. 1016/0009—2541(90)90101—C

附中文参考文献

- 高晓峰, 李文渊, 叶美芳, 等, 2010. 中祁连东段化隆群中斜角闪岩地球化学特征及构造意义. *岩石矿物学杂志*, 29 (5): 507—515.
- 高晓峰, 郭锋, 范蔚茗, 等, 2005. 南兴安岭晚中生代中酸性火山岩的岩石成因. *岩石学报*, 21 (3): 737—748.
- 郭锋, 范蔚茗, 王岳军, 等, 2001. 大兴安岭南段晚中生代双峰式火山作用. *岩石学报*, 17 (1): 161—168.
- 姜春发, 王宗起, 李锦轶, 2000. 中央造山带开合构造. 北京: 地质出版社.
- 江军华, 王瑞江, 曲晓明, 等, 2011. 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. *地球科学——中国地质大学学报*, 36 (6): 1021—1032.
- 梁银平, 朱杰, 次邛, 等, 2010. 青藏高原冈底斯带中部朱诺地

区林子宗群火山岩锆石 U-Pb 年龄和地球化学特征. 地球科学——中国地质大学学报, 35(2): 211—223.

陆松年, 于海峰, 赵凤清, 2002. 青藏高原北部前寒武纪地质初探. 北京: 地质出版社.

潘桂棠, 王立全, 尹福光, 等, 2004. 从多岛弧盆系研究实践看板块构造登陆的魅力. 地质通报, 23(9—10): 933—939.

潘裕生, 1989. 昆仑山区构造区划初探. 自然资源学报, 4(3): 196—203.

潘裕生, 2000. 喀喇昆仑山—昆仑山地区地质演化. 北京: 科学出版社.

秦秀峰, 徐义刚, 张辉煌, 等, 2008. 大陆亚碱性火山岩的成因多样性: 以敦化—密山和东宁火山岩带为例. 岩石学报, 24(11): 2501—2514.

王焰, 钱青, 刘良, 等, 2000. 不同构造环境中双峰式火山岩的主要特征. 岩石学报, 16(2): 169—173.

新疆维吾尔自治区地质矿产局, 1993. 新疆维吾尔自治区区域地质志. 北京: 地质出版社.

徐义刚, 1999. 拉张环境中的大陆玄武岩浆作用: 性质和动力学过程. 见: 郑永飞编, 化学地球动力学. 北京: 科学出版社, 119—167.

祝贺本刊入选“全国百强科技期刊”

近日, 国家新闻出版广电总局“百强报刊”推荐名单正式揭晓, 《地球科学——中国地质大学学报》(以下简称《地球科学》) 入选首届“全国百强科技期刊”。

这次全国“百强报刊”推荐评选活动是国家新闻出版广电总局从 2013 年初开展的, 目的是为深入贯彻落实党的十八大精神, 建立完善报刊评价体系和引导激励机制, 重点培育和推出一批具有较强舆论引导能力、市场竞争力和传播能力的优秀品牌报刊, 促进报刊业繁荣发展. 此次活动经过各省(区、市)新闻出版局、中央报刊主管单位认真推荐, 国家新闻出版广电总局组织有关专家严格评审, 确定了百强报纸、百强社科期刊及百强科技期刊推荐名单.

《地球科学》学报多年来围绕“创精品期刊”的目标, 按照“瞻前顾后抓选题, 通天彻地抓队伍”的办刊方略, 不断提升期刊的核心竞争力, 荣获国家省部级奖励 20 余项, 连续三届荣获“国家期刊奖”; 2009 年获得首届“湖北出版政府奖”、“新中国 60 年有影响力的期刊”; 2012 年获得“湖北十大名刊成就奖”; 连续四届获得“中国高校精品科技期刊奖”; 并被国际权威检索系统《Ei Compendex》数据库收录.

站在高起点, 树立新目标, 《地球科学》学报编辑部将继续往开来, 深化改革, 努力将《地球科学》办成具有国际影响的地学学术期刊而奋斗.