

汪晓伟, 徐学义, 马中平, 等. 博格达造山带东段芨芨台子地区晚石炭世双峰式火山岩地球化学特征及其地质意义[J]. 中国地质, 2015, 42(3): 553-569.

Wang Xiaowei, Xu Xueyi, Ma Zhongping, et al. Geochemical characteristics of the Late Carboniferous bimodal volcanic rocks in Jijitai area, eastern Bogda orogenic belt, and their geological significance[J]. Geology in China, 2015, 42(3): 553-569(in Chinese with English abstract).

# 博格达造山带东段芨芨台子地区晚石炭世双峰式火山岩地球化学特征及其地质意义

汪晓伟<sup>1,2</sup> 徐学义<sup>1,2</sup> 马中平<sup>2</sup> 陈隽璐<sup>2</sup> 朱小辉<sup>2</sup> 孙吉明<sup>2</sup> 崔方磊<sup>1,2</sup>

(1. 长安大学地球科学与资源学院, 陕西 西安 710054; 2. 中国地质调查局西安地质调查中心, 陕西 西安 710054)

**摘要:** 博格达造山带东段芨芨台子地区出露大量晚石炭世早期双峰式火山岩组合, 岩石类型以亚碱性玄武岩为主, 含有少量的流纹岩, 属拉斑系列。其玄武岩富钠贫钾( $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}=2.84\sim 3.01$ ),  $\text{TiO}_2$  含量为 1.32%~1.43%, 略高于 N 型大洋中脊玄武岩, 高 Al( $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量为 19.81%~20.60%), 低 Mg( $\text{MgO}$  含量为 2.95%~3.25%,  $\text{Mg}^\#$  为 32.33~34.50), 表明其原始岩浆发生过明显的橄榄石和辉石的分离结晶作用。玄武岩具有近于平坦的稀土配分模式, 轻微正 Eu 异常( $\delta\text{Eu}=1.02\sim 1.10$ , 平均为 1.04), 富集 Rb、Ba、P 等大离子亲石元素, 亏损 Nb、Ta、Th、Sr、Ti 等高场强元素的特征; 其微量元素 Zr/Nb 比值 41.13~41.38, Zr/Y 比值 4.26~4.52(均大于 4.00), Rb/Sr 比值 0.02~0.04(均小于 0.05), Dy/Yb 比值 1.92~2.00, La/Nb 比值 2.42~2.49, Ba/Nb 比值 113.58~126.05, Ba/La 比值 47.02~50.62 以及火山岩 Zr-Nb-La/Yb-Dy/Yb 和 La/Nb-La/Ba 等判别图解, 表明玄武岩可能是亏损尖晶石相地幔橄榄岩向石榴石相地幔橄榄岩过渡相对较高程度部分熔融的产物, 且在其上升过程中受到一定程度的地壳物质混染, 显示了板内玄武岩的地球化学特征, 形成于陆内裂谷环境。流纹岩具有较高的  $\text{SiO}_2$ (76.54%~77.74%) 和全碱( $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}=6.70\%\sim 7.70\%$ ) 含量, 以及较低的  $\text{TiO}_2$ (0.15%~0.16%)、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ (10.70%~10.90%) 和  $\text{MgO}$ (0.17%~0.18%,  $\text{Mg}^\#$  为 13.93~14.52) 含量; 显示右倾负斜率稀土配分模式, 铕负异常明显( $\delta\text{Eu}$  为 0.32~0.33), 显著富集 Rb、Th、U 等大离子亲石元素, 相对亏损 Nb、Ta, 强烈亏损 Sr、Ti、P 等高场强元素, 指示流纹岩应来自于玄武岩浆上升过程中提供的热量对地壳物质重熔, 源区有斜长石残留。芨芨台子地区双峰式火山岩的地球化学特征表明该套火山岩应形成于大陆裂谷环境, 同时获得流纹岩锆石 U-Pb 年龄为  $(312\pm 1)$  Ma, 表明该套火山岩形成于晚石炭世早期。进一步的 Rb-Sr 地壳厚度网络图投影表明当时博格达地区地壳厚度为 20.0~30.0 km, 而且根据 Zr-Zr/Y 图解推断其地壳拉伸速率介于 2.0~5.0 cm/a, 表明早石炭世早期开始的博格达初始裂谷在晚石炭世早期进一步快速拉伸, 发展到鼎盛阶段, 也代表着博格达地区由碰撞挤压到伸展拉伸这个地球动力学环境的重大转折, 这一发现进一步证实了博格达造山带在石炭纪处于大陆裂谷演化的观点, 为进一步理解博格达地区晚古生代构造格局及板块构造体制提供了重要的地质依据。

**关键词:** 博格达造山带; 晚石炭世早期; 双峰式火山岩; 岩石成因; 大陆裂谷; 鼎盛阶段

**中图分类号:** P588.14 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3657(2015)03-0553-17

**收稿日期:** 2014-08-31; **改回日期:** 2014-11-21

**基金项目:** 中国地质调查项目(1212011220649)、国家自然科学基金(41202077、41272089、41202131)和中央高校基本科研业务费专项基金(2014G1271059)共同资助。

**作者简介:** 汪晓伟, 男, 1988 年生, 博士生, 从事矿物学、岩石学、矿床学方面的研究; E-mail: wxw04121555@163.com。

**通讯作者:** 徐学义, 男, 1966 年生, 博士, 研究员, 矿物、岩石、矿床学专业; E-mail: xuxueyi1030@163.com。

## Geochemical characteristics of the Late Carboniferous bimodal volcanic rocks in Jijitaizi area, eastern Bogda orogenic belt, and their geological significance

WANG Xiao-wei<sup>1,2</sup>, XU Xue-yi<sup>1,2</sup>, MA Zhong-ping<sup>2</sup>,  
CHEN Jun-lu<sup>2</sup>, ZHU Xiao-hui<sup>2</sup>, SUN Ji-ming<sup>2</sup>, CUI Fang-lei<sup>1,2</sup>

(1. College of Earth Science and Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 2. Xi'an Center of Geological Survey, China Geological Survey, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

**Abstract:** The genesis of the Late Carboniferous bimodal volcanic rocks in Jijitaizi area of eastern Bogda orogenic belt was revealed recently, which comprise mainly sub-alkaline basalts and subordinately rhyolite rocks, belonging mainly to the tholeiitic series. The basalts have high Al ( $Al_2O_3=19.81\%-20.60\%$ ), low Mg ( $MgO=2.95\%-3.25\%$ ,  $Mg^\# = 32.33-34.50$ ),  $Na_2O/K_2O$  ratios of 2.84–3.01 and  $TiO_2$  values of 1.32%–1.43%, slightly higher than values of N-MORB, indicating obvious fractional crystallization of olivine and pyroxene during basaltic magmatism and an evolution product of original magma's fractional crystallization. They have the following characteristics:  $Zr/Nb=41.13-41.38$ ,  $Zr/Y=4.26-4.52$  (all higher than 4.00),  $Rb/Sr=0.02-0.04$  (all less than 0.05),  $Dy/Yb=1.92-2.00$ ,  $La/Nb=2.42-2.49$ ,  $Ba/Nb=113.58-126.05$ ,  $Ba/La=47.02-50.62$ , slight enrichment of trace elements Rb, Ba and P, slight positive Eu anomalies ( $\delta Eu=1.02-1.10$ ), and relative depletion of Nb, Ta, Th, Sr and Ti. In addition, the Zr-Nb, La/Yb-Dy/Yb and La/Nb-La/Ba discrimination diagrams indicate that the basalts had geochemical features indicative of intraplate basalts formed within the continent, originated from high degree partial melting of the transition product from depleted spinel phase mantle peridotite to garnet phase mantle peridotite, and suffered a certain degree of crustal contamination during the rising process. The rhyolites of bimodal volcanic rocks have high  $SiO_2(76.54\%-77.74\%)$  and ALK ( $Na_2O+K_2O=6.70\%-7.70\%$ ), but low  $TiO_2(0.15\%-0.16\%)$ ,  $Al_2O_3(10.70\%-10.90\%)$  and  $MgO(0.17\%-0.18\%)$ ,  $Mg^\# = 13.93-14.52$ . Their trace elements generally have features of enrichment of Rb, Th and U, obvious depletion of Sr, P and Ti, and slight depletion of Ta and Nb; the REE distribution patterns are characterized by LREE enrichment, right-oblique form and obvious depletion of Eu ( $\delta Eu=0.32-0.33$ ), suggesting that the rocks originated from the melting of crustal material with plagioclase as an important relic mineral in the source. Geochemical characteristics of the bimodal volcanic rocks in Jijitaizi area indicate that the volcanic rocks were formed in a typical tectonic setting of continental rift. The rhyolites with LA-ICP-MS zircon U-Pb age of  $(312\pm 1)$  Ma suggest that this series of volcanic rocks were formed at the beginning of Late Carboniferous. According to these characteristics in combination with the Rb-Sr and Zr-Zr/Y diagrams, the crust thickness (20.0–30.0 kilometers) and extension speed (2.0 cm/a–5.0 cm/a) might suggest the fast development of Bogda rift, which started in the Early Carboniferous and reached its culmination at the beginning of Late Carboniferous, and also represent the transitional period of geodynamic environment from collision and compression to stretching and extension. The results achieved by the authors further confirm the view that the Carboniferous Bogda orogenic belt belongs to continental rift and it could provide evidence for understanding the tectonic evolution and plate system of the Bogda orogenic belt of the Late Paleozoic.

**Key words:** Bogda orogenic belt; the beginning of Late Carboniferous; bimodal volcanic rocks; petrogenesis; continental rift; prosperity stage

**About the first author:** WANG Xiao-wei, male, born in 1988, doctor candidate, majors in petrology and mineral deposits; E-mail: wxw04121555@163.com.

**About the corresponding author:** XU Xue-yi, male, born in 1966, doctor, professor, majors in petrology and mineral deposits; E-mail: xuxueyi1030@163.com.

“双峰式”火山岩指一组时空上紧密相伴生的、 $SiO_2$ 含量存在一定成分间断的火山岩组合<sup>[1-2]</sup>, 主要由镁铁质和长英质岩石组成(通常指玄武岩和流纹

岩的岩石组合)。其中玄武质岩石代表的是地幔端元, 而流纹岩与玄武质岩石的关系、它们之间岩浆成分间隔的意义、流纹岩的成因以及“双峰式”岩套

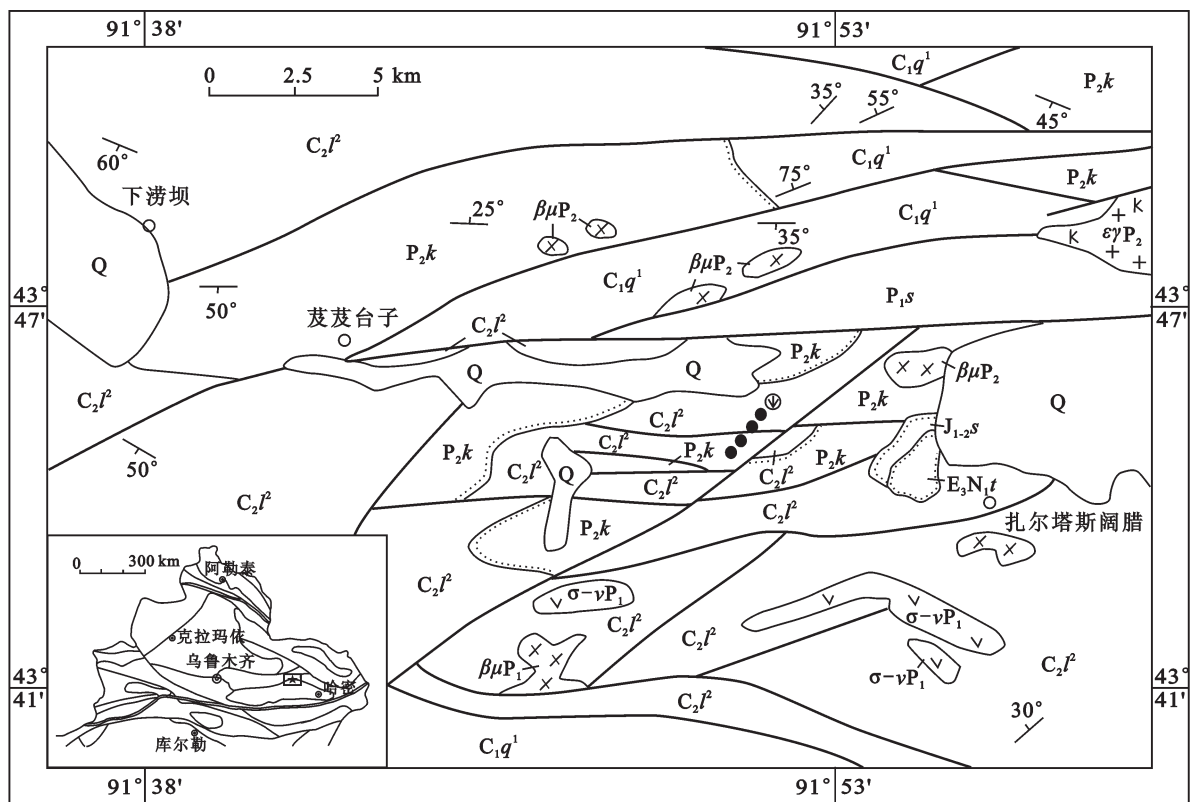
形成的地球动力学机制及其构造背景仍是一个经典的地质问题而备受国内外学者关注<sup>[2-3]</sup>。前人通常认为“双峰式”火山岩是形成于拉张的大陆裂谷环境中<sup>[4-6]</sup>,而随着研究的不断深入,发现“双峰式”火山岩也可形成在其他一些构造环境中,如洋岛<sup>[7]</sup>、大陆拉张减薄<sup>[6,8-10]</sup>、洋内岛弧<sup>[11-13]</sup>、活动大陆边缘<sup>[14]</sup>、弧后盆地<sup>[15-17]</sup>、成熟岛弧<sup>[10,18-19]</sup>以及造山后拉张<sup>[20-23]</sup>等各种不同的构造背景。双峰式火山岩形成环境的判别及其成因的探讨,对恢复其地球动力学演化历史具有重要意义。

博格达造山带位于北天山晚古生代造山带中部,是天山造山带的重要组成部分,其南北两侧分别被吐哈盆地和准噶尔盆地所夹持,东邻卡拉麦里—莫钦乌拉蛇绿岩带,大地构造位置十分重要,长期以来备受地质学家的广泛关注,是研究天山造山带运动学和动力学过程的理想场所。到目前为止,关于博格达造山带晚古生代构造属性的认识国内外学者尚有不同的看法,有人认为应为裂谷<sup>[24-30]</sup>,有人倾向于岛弧<sup>[31-32]</sup>,也有人认为应为弧后盆地<sup>[33-34]</sup>。然而越来越多的研究成果表明博格达造山带石炭纪的构造属性更倾向于裂谷环境<sup>[27-29,35-36]</sup>。近年来,许多学者在博格达山南北两侧发现了大量的双峰式火山岩<sup>[28-30,33,35-36]</sup>,这对研究博格达造山带晚古生代构造属性具有较全面的指示意义。王银喜等<sup>[27-28]</sup>报道了博格达山东段七角井地区发育有早石炭世双峰式火山岩,获得该双峰式火山岩之玄武岩和流纹岩的Rb-Sr等时线年龄分别为342 Ma和340 Ma,并认为博格达裂谷火山活动应始于早石炭世。王金荣等<sup>[29]</sup>在博格达造山带东段西地—伊齐—小红柳峡一带的地质调查过程中发现大量晚石炭世柳树沟组双峰式火山岩及早二叠世卡拉岗组酸性火山岩建造,并认为博格达山前身裂谷岩浆作用结束于晚石炭世末期(柳树沟组双峰式火山岩组合中流纹岩Rb-Sr等时线年龄为296 Ma),早二叠世为裂谷闭合造山作用,早二叠世末进入后造山伸展的演化阶段(卡拉岗组流纹岩Rb-Sr等时线年龄为278 Ma)。但是,前人的研究多集中在博格达裂谷开合阶段,对于晚石炭世初期裂谷双峰式火山岩组合以及该裂谷的发育程度等研究至今尚未见系统报道。笔者在博格达造山带东段芨芨台子一带的地质调查过程中,发现该地区发育大量双峰式火山岩,初步的锆石U-Pb年代学研究表

明该套火山岩形成于晚石炭世初期(312±1) Ma,在此基础上,笔者对该双峰式火山岩进行了详细的岩石学、岩石地球化学研究,进一步探讨其构造背景、岩石成因及其晚石炭世初期裂谷岩浆演化过程,以期为进一步了解博格达造山带石炭纪构造岩浆演化过程提供更为精确的地质与年代学依据。

## 1 地质概况及岩石学特征

研究区位于博格达造山带东段巴里坤县芨芨台子地区,北隔准噶尔盆地与西伯利亚陆块相望,南隔吐哈盆地和觉罗塔格石炭纪火山岩带相邻,东以红柳峡—苏吉断裂与克拉麦里—莫钦乌拉晚古生代蛇绿岩相接,是3个主要大地构造单元交汇的部位<sup>[32,37]</sup>。该区出露的地层有:下石炭统七角井组为一套海相火山岩及沉积岩建造;上石炭统柳树沟组为一套凝灰岩—玄武岩—沉积岩—流纹岩建造;下二叠统石人子沟组为浅海相碎屑沉积夹少量火山岩;中二叠统卡拉岗组为一套熔结凝灰岩—熔结角砾凝灰岩—杏仁状玄武岩建造;中下侏罗统水西沟群为一套砾岩—砂岩夹煤层建造,侵入岩以二叠纪中基性—中酸性岩石为主,大多呈岩株状广泛侵入石炭纪地层中(图1)。双峰式火山岩以巴里坤县芨芨台子地区柳树沟组南北向剖面为代表(图2),野外地质特征显示:火山活动由多以溢流相开始,以溢流—沉积相或溢流相结束,主要岩性为灰黑色玄武岩、砂岩、凝灰质砂岩、薄层状粉砂岩、泥质粉砂岩、钙质粉砂岩、凝灰岩,另有少量的流纹岩,以玄武岩和沉积岩多次不均匀互层以及夹少量的流纹岩为特征(图2)。该剖面上玄武岩与流纹岩的比例为5:1,且缺乏中间组分,从而构成双峰式火山岩。玄武岩呈灰黑色块状构造,斑状结构,斑晶含量较低,占岩石总体积的10%~15%,其成分主要为斜长石和辉石。其中斜长石大多为自形—半自形,呈短柱状或细长条状,聚片双晶发育,可见轻度绿泥石化,杂乱分布;普通辉石大多为自形—半自形,呈粒状,偶见辉石式解理,大多充填于斜长石格架之中。基质为间粒结构,由斜长石微晶和辉石、磁铁矿小颗粒组成,岩石后期发生显著蚀变,暗色矿物普遍发生绿泥石化,斜长石普遍粘土化。流纹岩呈灰色—灰白色,斑状结构,流纹构造或块状构造,定向构造明显,斑晶含量约岩石总体积的15%~20%,其成分主



Q 1 J<sub>1-2s</sub> 2 E<sub>3N1f</sub> 3 P<sub>2k</sub> 4 P<sub>1s</sub> 5 C<sub>2l2</sub> 6 C<sub>1q1</sub> 7 εγP<sub>2</sub> 8 βμP<sub>2</sub> 9 βμP<sub>1</sub> 10 σ-vP<sub>1</sub> 11 12 13

图1 博格达造山带东段芨芨台子地区地质略图<sup>①</sup>

1—第四纪冲洪积物；2—中下侏罗统水西沟群；3—渐新统桃树园组；4—中二叠统卡拉岗组；5—下二叠统石人子沟组；6—上石炭统柳树沟组；7—下石炭统七角井组；8—晚二叠世钾长花岗岩；9—晚二叠世辉绿岩；10—早二叠世辉绿岩；11—早二叠世橄辉岩—辉长岩；12—断层及角度不整合；13—采样位置

Fig.1 Schematic geological tectonic map of Jijitai area of Bogda suture zone<sup>①</sup>

1—Quaternary alluvial material; 2—Middle and Lower Jurassic Shuixigou Formation; 3—Oligocene Taoshuyuan Formation; 4—Middle Permian Kalagang Formation; 5—Lower Permian Shirenzigou Formation; 6—Upper Cambrian Liushugou Formation; 7—Lower Cambrian Qijiaoqing Formation; 8—Late Permian Moyite; 9—Late Permian Diabase; 10—Early Permian Diabase; 11—Early Permian peridotite and gabbro; 12—Fault and angular unconformity; 13—Sampling position

要为石英和斜长石。其中斜长石多为自形一半自形板条状，聚片双晶发育；石英呈它形粒状，多被溶蚀，可见波状消光。基质主要为长英质集合体，可见明显的矿物定向拉伸，普遍发育绿泥石化以及绢云母化等次级蚀变。

## 2 样品采集及分析测试

双峰式火山岩样品采集于博格达造山带东段巴里坤县芨芨台子地区东南部(图1)。对采集样品经表面杂质清除后，切割去除风化面，在玛瑙研钵

中无污染破碎研磨到200目供化学分析。全岩及微量元素测试分析由西安地质矿产研究所完成。主量元素除FeO和LOI采用标准湿化学法分析外，其他元素均采用PW4400型X荧光光谱仪XRF测定，分析误差低于5%；微量元素和稀土元素采用X-Series II型电感耦合等离子质谱仪ICP-MS测定，检测限优于 $5 \times 10^{-9}$ ，相对标准偏差也优于5%。

锆石样品在河北省地勘局廊坊实验室内完成处理。首先经过破碎，经淘洗、浮选和电磁选方法富集锆石，再在双目镜下用手工方法逐个挑选晶型

①底图据《新疆维吾尔自治区1:25万三道岭幅建造构造图》(2009)修改。

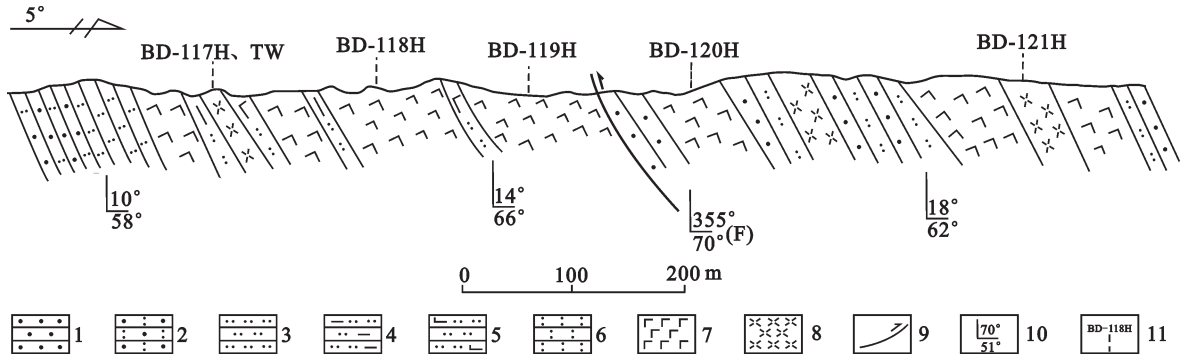


图2 博格达造山带芨芨台子地区上石炭统柳沟组火山岩剖面

1—砂岩; 2—凝灰质砂岩; 3—薄层粉砂岩; 4—泥质粉砂岩; 5—钙质粉砂岩; 6—凝灰岩; 7—玄武岩; 8—流纹岩; 9—断层;  
10—地层产状; 11—采样位置及编号

Fig.2 Geological section of volcanic rocks of the upper Carboniferous Liushugou Formation near Jijitai area of Bogda suture zone  
1—Sandstone; 2—Tuffaceous Sandstone; 3—Thin - bedded Siltstone; 4—Argillaceous siltstone; 5—Calcareous siltstone; 6—Tuff;  
7—Basalt; 8—Rhyolite; 9—Fault ; 10—Attitude; 11—Sampling position and its serial number

完好、无裂隙、干净透明的锆石颗粒制作样靶,用环氧树脂固定,固化后将靶上的锆石颗粒打磨至中心部位露出后,进行抛光并进行阴极发光(CL)研究和LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素组成分析。阴极发光在长安大学西部矿产资源与地质工程教育部重点实验室扫描电镜加载阴极发光仪上完成。锆石 U-Pb 同位素测定在天津地质矿产研究所分析测试中心完成。分析仪器采用德国 Microlas 公司生产的 GeoLas200M 激光剥蚀系统与 Elan6100DRC-ICP-MS 联机进行测定,分析采用的激光斑束直径为 30 μm,激光脉冲频率为 10 Hz,能量为 32~36 mJ,激光剥蚀样品的深度为 20~40 μm,锆石年龄测定采用国际标准锆石 91500 作为外部标准物质。所得数据用 Glitter(ver4.0, Mac Quarie University)程序进行计算和处理并对其进行普通铅校正。所有样品均采用 <sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U 年龄,年龄计算及谐和图采用 Isoplot (ver3.0)完成。单个数据点的误差均为 1σ,数据点加权平均值的置信度为 95%。

### 3 分析结果

#### 3.1 主量元素

研究区火山岩地球化学分析结果见表 1,可以看出,全区火山岩样品可明显分为基性和酸性两个端元,其 SiO<sub>2</sub> 含量分别为 50.41%~50.96%和 76.54%~77.74%,具有明显的 Daly 间断,在时空上构成经典的双峰式火山岩组合。据 Zr/TiO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub>图解(图 3-a)和 FeO<sup>T</sup>/MgO-SiO<sub>2</sub>图解(图 3-b),研究区火山岩主要

岩石类型为:亚碱性玄武岩和流纹岩,属拉斑系列。玄武岩 Na<sub>2</sub>O 含量为 3.86%~4.00%, K<sub>2</sub>O 含量为 1.32%~1.36%,总体上具有富钠贫钾的特点(Na<sub>2</sub>O/K<sub>2</sub>O=2.84~3.01); TiO<sub>2</sub> 含量为 1.32%~1.43%,总体上略高于 N-MORB<sup>[4]</sup>(TiO<sub>2</sub>≈1.15%); Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量(19.81%~20.60%)较高, MgO 含量较低,介于 2.95%~3.25%, Mg<sup>#</sup> 为 32.33~34.50,低于典型的 MORB 的 Mg<sup>#</sup>(Mg<sup>#</sup>=60.00); 岩石的 K<sub>2</sub>O/TiO<sub>2</sub> 和 K<sub>2</sub>O/P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 变化范围较大,分别介于 0.95~1.01 和 5.12~5.67,说明岩浆在演化过程中发生了一定程度的地壳混染<sup>[39]</sup>。流纹岩 Na<sub>2</sub>O 含量为 2.62%~2.63%, K<sub>2</sub>O 含量为 4.08%~5.07%,全碱含量(Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O=6.70%~7.70%)相对较高; TiO<sub>2</sub> 含量为 0.15%~0.16%, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量为 10.70%~10.90%,较基性火山岩含量低; MgO 含量为 0.17%~0.18%, Mg<sup>#</sup> 为 13.93~14.52,具有低镁的特征;其 K<sub>2</sub>O/TiO<sub>2</sub> 和 K<sub>2</sub>O/P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 比值明显高于与其伴生的玄武岩,分别介于 25.50~33.80 和 101.40~102.00。上述地球化学数据表明该区玄武岩与流纹岩地球化学差异较大,玄武岩浆受到一定的地壳混染,流纹岩可能是大陆地壳厚度较薄的下地壳基性物质部分熔融的产物,总体上有别于七角井地区双峰式火山岩之中的流纹岩,被认为是玄武岩结晶分异作用形成的<sup>[28]</sup>。

#### 3.2 稀土元素及微量元素地球化学

芨芨台子地区玄武岩稀土元素总量介于 57.17×10<sup>-6</sup>~60.45×10<sup>-6</sup>, ΣLREE/ΣHREE 为 2.67~2.87(表 1)。在稀土元素球粒陨石标准化配分模式图(图 4-a)上表现为 LREE 轻度富集,轻重稀土元素之间存

表1 博格达造山带芨芨台子地区晚石炭世双峰式火山岩主量元素(%)和微量元素( $10^{-6}$ )分析结果

Table 1 Major element (%) and trace element ( $10^{-6}$ ) analyses of the Late Carboniferous volcanic rocks in Jijiaataizi area of Bogda orogenic belt

样品号	13BD-118H	13BD-119H	13BD-120H	13BD-117H	13BD-121H
岩性	玄武岩	玄武岩	玄武岩	流纹岩	流纹岩
SiO <sub>2</sub>	50.56	50.96	50.41	77.74	76.54
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	20.11	19.81	20.60	10.70	10.90
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.78	1.74	1.60	0.71	0.70
FeO	6.28	5.60	6.31	1.05	1.06
CaO	7.18	7.37	6.87	1.76	1.75
MgO	3.00	2.95	3.25	0.17	0.18
K <sub>2</sub> O	1.32	1.33	1.36	4.08	5.07
Na <sub>2</sub> O	3.92	4.00	3.86	2.62	2.63
TiO <sub>2</sub>	1.37	1.32	1.43	0.16	0.15
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.24	0.26	0.24	0.04	0.05
MnO	0.12	0.11	0.10	0.04	0.05
LOI	4.13	4.57	3.96	0.93	0.94
TOTAL	100.01	100.02	99.99	100.00	100.02
Zn	61.50	61.20	66.10	4.76	4.61
Cr	178.00	164.00	179.00	14.80	14.20
Ni	37.80	40.00	42.30	3.80	3.68
Co	31.30	31.80	32.90	1.60	1.48
Li	7.91	8.13	8.15	6.93	6.86
Rb	16.90	9.81	12.70	51.16	50.14
Cs	0.32	0.33	0.34	0.20	0.21
Sr	469.00	458.00	404.00	80.10	80.40
Ba	329.00	276.00	314.00	130.10	143.80
Nb	2.61	2.43	2.65	11.20	12.00
Ta	0.21	0.19	0.20	0.94	0.98
Zr	108	100	109	570	580
Hf	2.42	2.29	2.48	13.30	13.60
U	0.08	0.11	0.096	1.93	1.95
Th	0.37	0.26	0.28	7.91	8.00
La	6.50	5.87	6.45	42.5	41.50
Ce	17.80	16.20	17.20	99.00	98.00
Nd	12.80	12.10	13.00	46.20	46.80
Sm	3.69	3.53	3.74	11.10	11.60
Eu	1.34	1.40	1.36	1.29	1.26
Gd	4.37	4.28	4.47	12.5	12.40
Tb	0.68	0.67	0.69	2.14	2.15
Dy	4.39	4.31	4.39	13.4	13.70
Ho	0.87	0.87	0.91	2.73	2.71
Yb	2.20	2.24	2.25	7.44	7.41

在微弱的分异现象,  $(La/Yb)_N$  为 1.77~1.99,  $(La/Sm)_N$  为 1.05~1.11,  $(Gd/Yb)_N$  为 1.54~1.60,  $\delta Eu$  为 1.02~1.10, 平均为 1.04, 轻微正异常, 整体上接近平坦型的配分模式, 其稀土配分模式(图 4-a)与世界上典型的大陆溢流玄武岩<sup>[4]</sup>、大陆裂谷玄武岩<sup>[4]</sup>以及中国东部新生代大陆裂谷玄武岩<sup>[40]</sup>稀土配分模式十分相似, 但其稀土总量( $57.17 \times 10^{-6} \sim 60.45 \times 10^{-6}$ )低于中国东部新生代大陆裂谷玄武岩<sup>[40]</sup>的稀土总量( $205.00 \times 10^{-6} \sim 409.00 \times 10^{-6}$ )。在微量元素原始地幔标准化蛛网图(图 5-a)上, 研究区玄武岩不相容元素 Rb、Ba、K、P 等相对富集, Th、U、Nb、Ta、Sr、Ti 等相对亏损, 这与许多地区大陆拉斑玄武岩<sup>[10, 42-45]</sup>特征一致, 并表明其玄武岩浆可能受到过一定程度的地壳混染, 或表明幔源岩浆在壳内次生岩浆房中曾发生过辉石和钛氧化物的分离结晶<sup>[10]</sup>, 样品具有一定的 Sr 亏损, 表明这些地段的岩浆可能受到过地壳物质的混染或曾经在低压下经历过斜长石的分离结晶。

流纹岩稀土元素总量相对于玄武岩较高且 LREE 相对富集, 稀土总量介于  $260.15 \times 10^{-6} \sim 260.59 \times 10^{-6}$ , 轻重稀土分异明显,  $\Sigma LREE/\Sigma HREE$  为 4.38~4.40,  $(La/Yb)_N$  为 3.78~3.85,  $(La/Sm)_N$  为 2.25~2.41,  $(Gd/Yb)_N$  为 1.35~1.36。在球粒陨石标准化稀土配分图上(图 4-b), 具有右倾负斜率稀土配分模式, LREE 相对富集, 具强烈的铕负异常( $\delta Eu$  为 0.32~0.33), 与典型的地壳重熔型花岗岩的稀土分配型式相似<sup>[40]</sup>。流纹岩微量元素原始地幔标准化蛛网图(图 5-b)显示 Sr、Nb、Ta、Ti 和 P 负异常, 且 Sr、P、Ti 谷深, 其微量元素分配模式和玄武岩完全不同, 反映了两者之间可能缺乏成因联系, 流纹岩具典型的 A 型花岗岩的地球化学特征, 表明其是在伸展拉张背景下岩浆作用的结果, 类似于陆内裂谷流纹岩<sup>[5, 47]</sup>。

### 3.3 锆石 CL 分析和 LA-ICP-MS 法 U-Pb 测年

笔者对芨芨台子地区双峰式火山岩中的流纹岩(样品号 BD-117)进行了锆石 U-Pb 定年。该岩石中的锆石大多无色透明, 颗粒较大, 呈短柱状, 长 60~150  $\mu m$ , 宽 30~90  $\mu m$ , 粒径比约为 2: 1, 晶面清晰, CL 图像(图 6)显示这些锆石均发育有清晰的岩浆震荡环带, 表明其为典型的岩浆锆石<sup>[49]</sup>。本次锆石 LA-ICP-MS 法 U-Pb 测年获得有效测试数据为 12 个, 具体分析结果见表 2。在一致曲线图中(图 7), 获得 12 个数据点的  $^{206}Pb/^{238}U$  加权平均年龄为

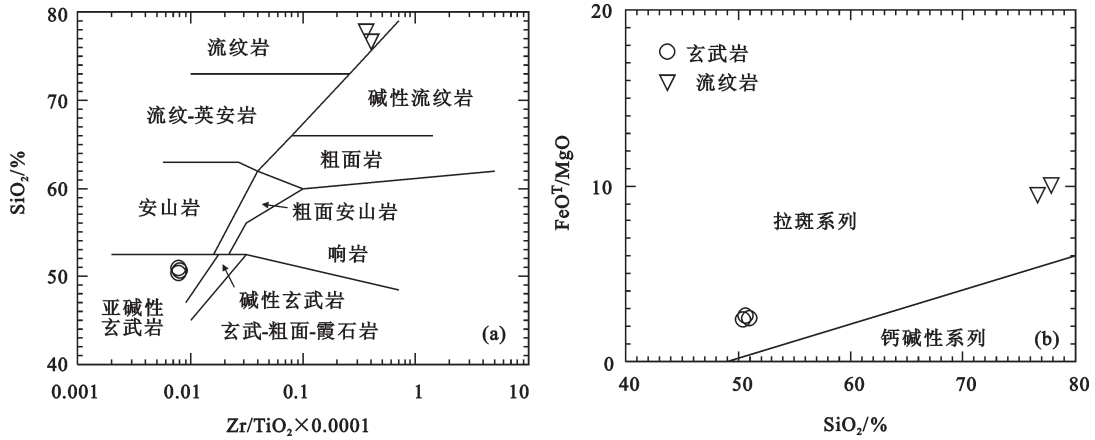


图3 芨芨台子火山岩 Zr/TiO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub>(a)和 SiO<sub>2</sub>-FeO<sup>7</sup>/MgO(b)图解  
(a 据文献[40]; b 据文献[41])

Fig.3 Zr/TiO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub>(a) and SiO<sub>2</sub>-FeO<sup>7</sup>/MgO(b) diagrams of the Jijitai volcanic rocks  
(a after reference [40]; b after reference [41])

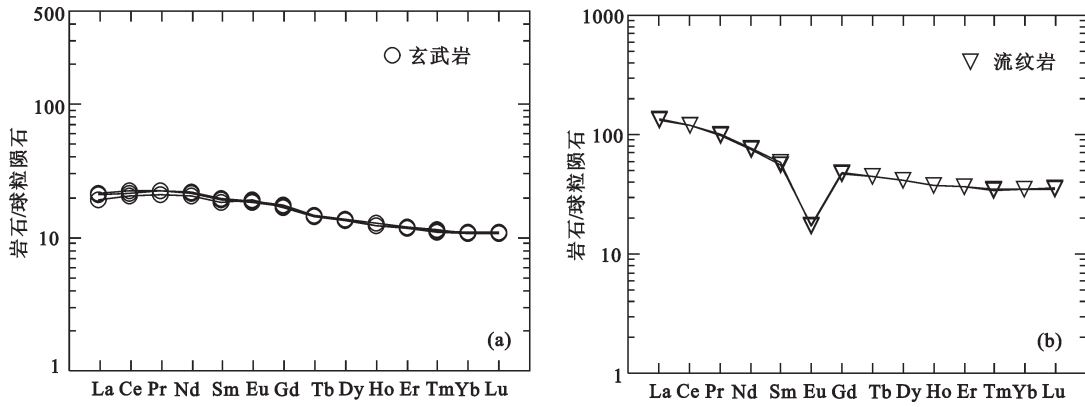


图4 芨芨台子火山岩稀土元素球粒陨石标准化配分曲线  
(球粒陨石标准化数据据文献[46])

Fig.4 Rare earth elements distribution patterns of the Jijitai volcanic rocks (chondrite normalized data after reference [46])

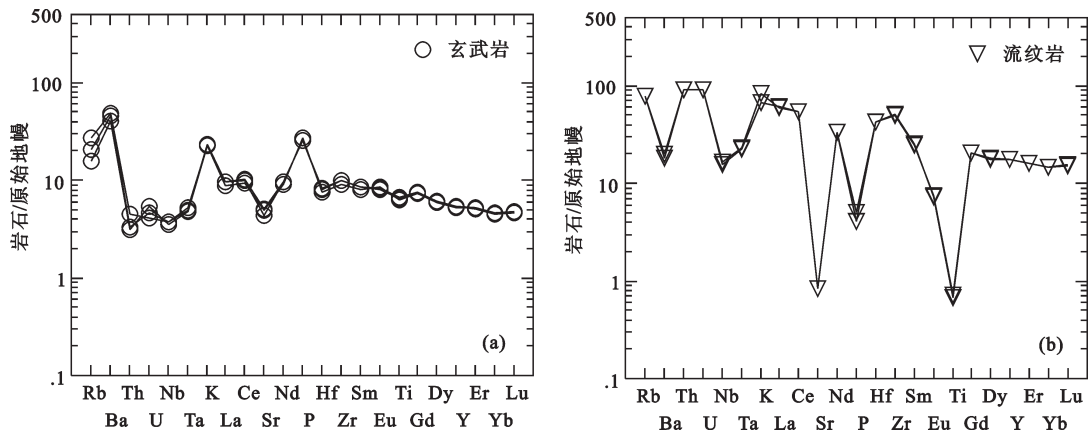


图5 芨芨台子火山岩微量元素原始地幔标准化蛛网图  
(原始地幔标准化值引自参考文献[48])

Fig.5 Primitive mantle normalized trace element spidergrams of the Jijitai volcanic rocks (primitive mantle normalized data after reference [48])

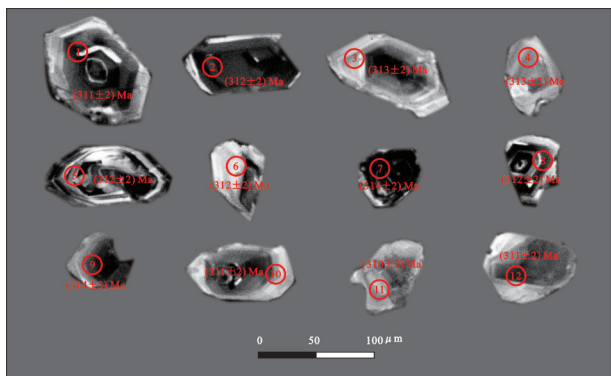


图6 芨芨台子地区流纹岩样品(样号BD-117)的锆石CL照片  
Fig.6 CL images diagram of the zircons from Jijitaizi rhyolite rocks (Sample No. BD-117)

(312±1) Ma(MSWD=0.35, 置信度95%), 代表了流纹岩的形成时代。野外剖面观察表明, 研究区玄武岩和流纹岩空间上紧密伴生, 具有相近的形成时代, 因此本套双峰式火山岩形成时代应属于晚石炭世早期。

## 4 讨论

### 4.1 岩石成因

双峰式火山岩的基性端元源自于地幔岩部分熔融的成因模式已基本得到学术界认同, 研究区双

峰式火山岩基性熔岩具有拉斑玄武岩特性, 其微量元素 Ni( $37.80 \times 10^{-6} \sim 42.30 \times 10^{-6}$ ) 和 Cr( $164.00 \times 10^{-6} \sim 179.00 \times 10^{-6}$ ) 均低于判别原始岩浆的参考数值<sup>[50]</sup> ( $\text{Ni} \approx 250.00 \times 10^{-6}$ ,  $\text{Cr} \approx 300.00 \times 10^{-6}$ ), 表明该玄武岩浆早期演化过程中可能发生过橄榄石、辉石的结晶分离作用, 这与该区玄武岩较低的  $\text{Mg}^\#$  值相吻合; 微量元素比值通常也是判别岩浆源区的常用手段之一, 该区玄武岩  $\text{Zr}/\text{Nb}$  为 41.13~41.38,  $\text{Zr}/\text{Y}$  为 4.26~4.52 ( $>4.00$ ), 显示板内玄武岩的特征<sup>[51]</sup>, 结合微量元素 Zr-Nb 图解(图 8)表明岩石源自于亏损地幔的部分熔融<sup>[52]</sup>。有研究表明, 来源于不同矿物相源区不同部分熔融程度形成的玄武岩浆具有不同的 Dy/Yb 比值<sup>[53]</sup>, 一般认为当  $\text{Dy}/\text{Yb} > 2.50$  时, 部分熔融发生在含石榴石地幔源区, 而当  $\text{Dy}/\text{Yb} < 1.50$  时则为尖晶石地幔源区<sup>[54]</sup>, 芨芨台子地区玄武岩 Dy/Yb 值为 1.92~2.00, 在 La/Yb-Dy/Yb 图解(图 9-a)中处于石榴石二辉橄榄岩熔融趋势线以下, 尖晶石二辉橄榄岩熔融趋势线以上, 部分熔融程度接近 20%。以上特征表明该区玄武岩可能是亏损尖晶石相橄榄岩向石榴石相橄榄岩过渡较高程度部分熔融的产物。另外值得注意的是, 由于地壳岩石或其熔融体中具有很低的  $\text{TiO}_2$  和较低的 Nb、Ta 含量, 因此地壳混染作

表2 博格达造山带芨芨台子地区晚石炭世双峰式火山岩 LA-ICP-MS U-Pb 测试结果

Table 2 LA-ICP-MS zircon U-Pb isotopic analyses of the Late Carboniferous volcanic rocks in Jijitaizi area of Bogda orogenic belt

点号	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		含量/ $10^{-6}$	
	比值	1 $\sigma$	比值	1 $\sigma$	比值	1 $\sigma$	年龄/Ma	1 $\sigma$	年龄/Ma	1 $\sigma$	年龄/Ma	1 $\sigma$	Pb	U
1	0.3595	0.0077	0.04945	0.0003	0.0187	0.0002	317	48	312	7	311	2	20	367
2	0.3595	0.0099	0.04953	0.0003	0.0239	0.0003	314	62	312	9	312	2	19	330
3	0.3606	0.0163	0.04973	0.0003	0.0206	0.0002	312	101	313	14	313	2	21	377
4	0.3593	0.0103	0.04969	0.0003	0.0145	0.0001	305	65	312	9	313	2	11	211
5	0.3608	0.0117	0.04962	0.0003	0.0174	0.0003	318	69	313	10	312	2	16	305
6	0.3608	0.0106	0.04955	0.0003	0.0164	0.0002	321	66	313	9	312	2	14	256
7	0.3608	0.0111	0.04985	0.0003	0.0158	0.0002	307	67	313	10	314	2	9	177
8	0.3597	0.0067	0.04954	0.0003	0.0142	0.0001	314	42	312	6	312	2	19	342
9	0.3611	0.0272	0.04990	0.0005	0.0133	0.0003	307	162	313	24	314	3	10	184
10	0.3608	0.0082	0.04935	0.0003	0.0137	0.0001	330	51	313	7	311	2	16	301
11	0.3594	0.0113	0.04929	0.0003	0.0139	0.0001	324	70	312	10	310	2	15	291
12	0.3604	0.0136	0.04945	0.0003	0.0143	0.0002	323	85	312	12	311	2	10	193



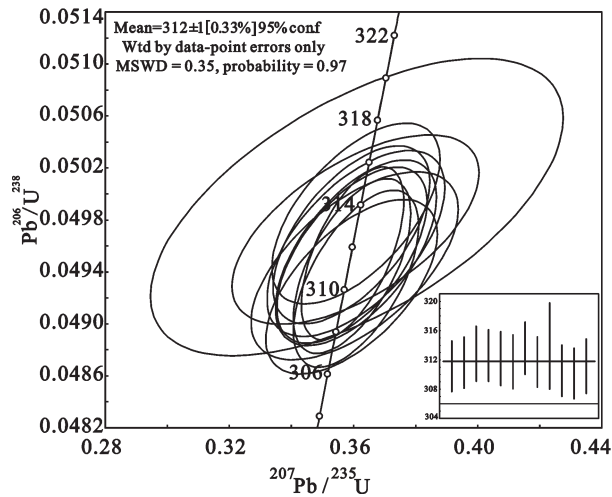


图7 芨芨台子地区流纹岩样品(样号BD-117)的LA-ICP-MS 锆石U-Pb年龄谱和图  
Fig.7 LA-ICP-MS zircon U-Pb concordia diagram of the Jijitaizi rhyolite rocks (Sample No. BD-117)

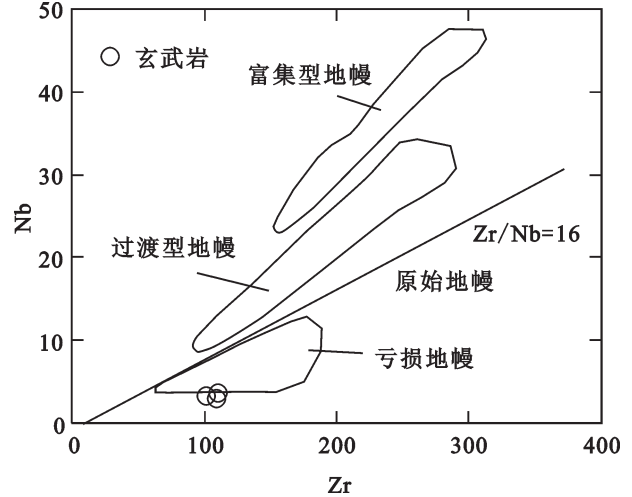


图8 芨芨台子地区玄武岩Zr-Nb图解  
Fig.8 Zr-Nb diagrams of the Jijitaizi basalt rocks

用会导致岩浆中的Ti、Nb、Ta等元素含量降低,从而给出明显的Nb、Ta、Ti负异常等信息。在微量元素原始地幔标准化蛛网图(图5-a)上,研究区玄武岩Nb、Ta、Ti等元素相对亏损,表明源区可能有地壳物质的加入<sup>[55-58]</sup>。此外,较高的La/Nb、Ba/Nb和Ba/La比值<sup>[59-60]</sup>,通常也是地壳混染作用的有效指标,如果幔源玄武质岩浆遭受到大陆地壳物质的混染,岩浆中的不相容元素如La或Ba就会相对于Nb明显增高,从而具有高的La/Nb、Ba/Nb和Ba/La值,研究区玄武岩La/Nb为2.42~2.49, Ba/Nb为113.58~126.05, Ba/La介于47.02~50.62,远大于原始地幔<sup>[61]</sup>(La/Nb≈0.94, Ba/Nb≈9.00, Ba/La≈9.60)和N-MORB<sup>[61]</sup>(La/Nb≈1.07, Ba/Nb≈4.30, Ba/La≈4.00),且在微量元素La/Nb-La/Ba对比图解(图9-b)中,样品所投区域均显示岩浆来自于受地壳混染的岩石圈地幔,表明幔源玄武质岩浆在后期上升过程中可能受到一定程度的地壳物质混染,这也与之前主量元素讨论得出的结果相吻合。

双峰式火山岩中酸性端元通常认为有两种成因,即基性岩浆分离结晶成因和地壳物质部分熔融成因。基性岩浆分离结晶成因是指酸性端元和基性端元具有共同的幔源母岩浆,在分离结晶过程中几乎没有陆壳物质的加入<sup>[62-63]</sup>,两个端元岩石具有相似的微量元素特征<sup>[64]</sup>,且基性端元比例较大;地壳物质部分熔融成因是指基性岩浆在侵入地壳的过程中,

使地壳物质发生部分熔融而产生酸性岩浆<sup>[65-66]</sup>,酸性端元通常比基性端元产出面积大的多<sup>[5, 67]</sup>。芨芨台子地区晚石炭世双峰式火山岩据野外实际观察,玄武岩分布面积明显大于流纹岩(分布比例约为5:1),在岩石地球化学方面,全区火山岩SiO<sub>2</sub>含量Daly缺口明显,未发现中间过渡性岩石,流纹岩K<sub>2</sub>O/TiO<sub>2</sub>=25.50~33.80、K<sub>2</sub>O/P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>=101.40~102.00明显高于与其伴生的玄武岩(K<sub>2</sub>O/TiO<sub>2</sub>=0.95~1.01、K<sub>2</sub>O/P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>=5.12~5.67),表明其源区性质与后者明显不同;两端元岩石微量元素含量及微量元素标准化曲线形态相差较大,玄武岩和流纹岩的Rb/Sr比值分别在0.02~0.04(<0.05)和0.62~0.64(>0.05),说明其分别来源于幔源和壳源,其成因存在明显差异;在微量元素原始地幔蛛网图(图5-b)上,流纹岩显示Sr、Nb、Ta、Ti和P负异常,且Sr、P、Ti谷深,其分配模式和玄武岩(图5-a)迥异。稀土元素方面,流纹岩稀土元素总量相对于玄武岩较高且LREE相对富集,具有显著的Eu负异常(δEu为0.32~0.33),而玄武岩Eu异常(δEu为1.02~1.10,平均为1.04)不明显,在球粒陨石标准化稀土配分图上(图4)也可以看出,流纹岩具有明显的右倾负斜率稀土配分模式,而玄武岩曲线形态较平缓,反映了两者之间缺乏明显的成因联系,玄武岩可能是亏损尖晶石相地幔橄榄岩向石榴石相地幔橄榄岩过渡相对较高程度部分熔融的产物,且在其上升过程中受到一定程度的地壳物质混染,而流纹岩应来自玄武岩浆上升过程中提供的热量对

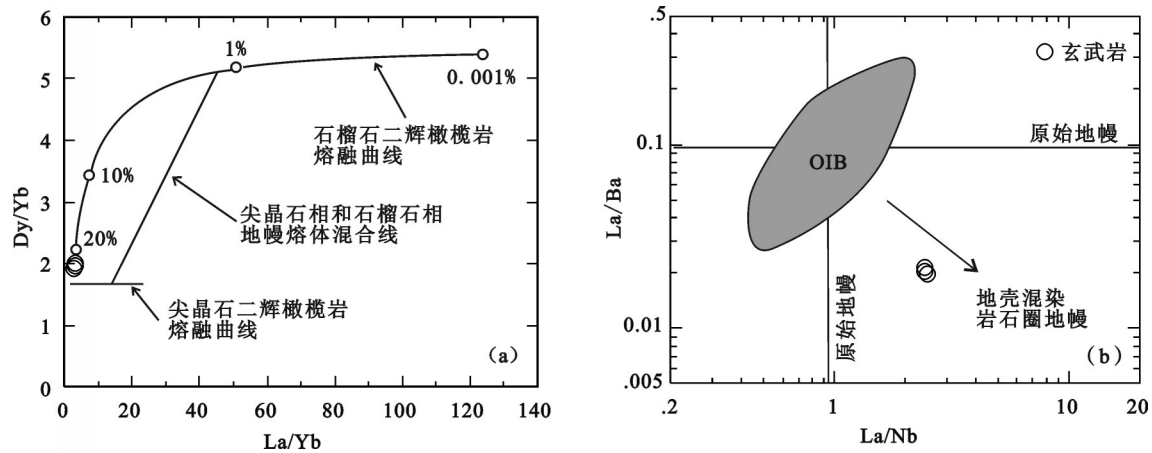


图9 芨芨台子地区玄武岩La/Yb-Dy/Yb图解(a)和La/Nb-La/Ba图(b)(a据文献[54])

Fig.9 La/Yb-Dy/Yb (a) and La/Nb-La/Ba (b) diagrams of the Jijitazi basalt rocks (a after reference [54])

地壳物质重熔, 岩浆源区存有斜长石的残留, 暗示当时的大陆地壳应处于拉张减薄的过渡型地壳结构特征。考虑到研究区晚石炭世双峰式火山岩形成在裂谷发育中后期, 地壳厚度减薄, 有利于岩浆快速上侵的断裂发育, 以及酸性岩浆在很大程度上以晶粥体<sup>[68]</sup>形成存在, 其发生分离结晶的可能性就大大降低<sup>[69]</sup>, 甚至是不大可能的<sup>[70-71]</sup>, 其流纹岩中大量的斜长石并非分离结晶作用产生的, 其应属于源岩部分熔融过程中残留下来的, 这也与其微量元素Sr、Eu等显著亏损及较低的Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>含量是一致的。在通常情况下, 这种成因的双峰式火山岩中流纹岩分布范围远大于玄武岩, 但是研究区玄武岩和流纹岩呈交替出现, 且前者分布范围大于后者(玄武岩与流纹岩比例为5:1), 不同于典型的异源双峰式火山岩流纹岩分布远大于玄武岩的分布规律<sup>[5, 72]</sup>, 这也与博格达造山带东段南缘的七角井早石炭世早期双峰式火山岩有明显不同, 后者被认为是同源岩浆演化的产物, 玄武岩来源于亏损地幔的部分熔融, 流纹岩形成于幔源玄武质岩浆分异作用, 分布比例流纹岩与玄武岩为1:7<sup>[28]</sup>, 这可能是由于博格达裂谷演化的不同阶段和不同地点, 岩浆演化具有差异性有关。

#### 4.2 构造环境

近代火山活动及其形成岩系的研究中人们认识到, 各种各样的火山岩及其共生组合在地球表面的分布具有很强的规律性。这种规律性首先决定于源岩的性质, 其次受构造环境的制约。不同的火山岩共生组合, 往往反映其生成的大地构造背景,

并代表着地壳演化的不同阶段。本文依据野外实际观察, 以及从主量、微量和稀土元素等方面进行的地球化学研究, 发现芨芨台子地区玄武岩和流纹岩在空间上紧密伴生, 且前者分布范围大于后者; 地球化学方面, SiO<sub>2</sub>含量存在明显的Daly间断, 各主要氧化物变化也都集中在2个区域, 微量和稀土元素含量特征也具有明显的不连续性。这些特征表明, 芨芨台子地区基性熔岩和酸性熔岩组合为一套典型的双峰式火山岩组合。然而, 酸性熔岩地球化学特征主要受控于其壳源性质, 不能较好地反映其成岩环境, 本文主要通过基性熔岩地球化学特征来确定该套双峰式火山岩的形成环境。以往的研究表明, 利用已知喷发环境的年轻火山岩的主量元素和微量元素特征来判别古老火山岩的形成环境已经成为非常有用的切实可行的方法, 尤其Ti、Zr、Y、Nb、REE等这些惰性元素已成功用于火山岩形成的构造环境判别。由主量元素特征可以看出, 研究区玄武岩富钠贫钾(Na<sub>2</sub>O/K<sub>2</sub>O=2.84~3.01), TiO<sub>2</sub>含量(1.32%~1.43%)总体上略高于N-MORB<sup>[4]</sup>(TiO<sub>2</sub>≈1.15%), 具高Al(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>含量为19.81%~20.60%)、低Mg(MgO含量为2.95%~3.25%, Mg<sup>#</sup>为32.33~34.50)的地球化学特征, 暗示着其明显不同于洋脊玄武岩和大陆裂谷碱性玄武岩, 而与大陆裂谷拉斑玄武岩十分相似<sup>[73]</sup>, 指示了这些基性熔岩具有裂谷演化中、晚期的岩浆成分特点, 可能反映当时地壳较薄、拉张速度较快, 岩浆部分熔融程度较高<sup>[74]</sup>。从表1可以看出, 研究区玄武岩微量元素La/Nb、Ba/Nb和Ba/

La 值远大于原始地幔和 N-MORB, 表明其岩浆组分可能受到一定程度的陆壳物质混染, 而陆壳物质混入通常会对基性熔岩 Ta、Nb 等元素的含量产生较大的影响, 并导致岩石出现明显的 Ta、Nb 负异常(图 5-a), 在构造环境恢复的过程中可能会误判为岛弧环境<sup>[75-76]</sup>。Zr、Y 等元素的含量受地壳物质混染影响不大, 可以较准确地反映玄武岩的形成环境<sup>[76]</sup>, 研究区玄武岩 Zr 含量为  $100.00 \times 10^{-6} \sim 108.00 \times 10^{-6}$ , Y 含量为  $23.50 \times 10^{-6} \sim 24.30 \times 10^{-6}$ , Zr/Y 值为 4.26~4.52, 在 Zr-Zr/Y 图解(图 10-a)中, 样品均落入板内玄武岩区域, 表明其形成于板内环境。流纹岩在 Rb-(Y+Nb) 构造环境判别图解(图 10-b)中均落入板内花岗岩区, 与玄武岩所显示的板内构造环境也完全一致。

前人研究表明, 双峰式火山岩不仅只是大陆裂谷环境的产物, 它还可以产生于洋内岛弧<sup>[11-13]</sup>、洋岛<sup>[7]</sup>、大陆拉张减薄<sup>[6, 8-10, 77-78]</sup>、活动大陆边缘<sup>[14]</sup>、弧后盆地<sup>[15-17]</sup>、成熟岛弧<sup>[10, 18-19]</sup>以及造山后拉张<sup>[20-23]</sup>等多种不同的构造背景下, 而且不同构造背景下形成的“双峰式”火山岩中的玄武岩在地球化学特征上存在着差别<sup>[2-3]</sup>。大洋岛屿玄武岩的碱度变化极大, 在岩性上可以分为洋岛拉斑玄武岩和洋岛碱性玄武岩, 通常以前者为主, 具有较高的 K<sub>2</sub>O、TiO<sub>2</sub> 和 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, 较低的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量<sup>[7]</sup>; 洋内岛弧玄武岩通常为拉斑质的, 富集 LILE、Th, 亏损 HFSE, LREE 从强烈亏损至轻微富集<sup>[11]</sup>, 研究区双峰式火山岩中流纹岩大量存在以及火山岩高铝、富含强不相容元素的特征, 表

明该岩系不是形成于洋岛或洋内岛弧环境。同时, 任何形成于陆壳基底上的岩浆弧, 其岩浆活动总是以安山岩类的大量出现为特征<sup>[80-82]</sup>, 而研究区火山岩具有明显的 Daly 成分间断, 缺乏安山质岩石。此外, 在研究区迄今还未发现晚古生代的大洋地壳和海沟沉积物、蛇绿混杂岩、双变质带和板块俯冲的其他证据, 北部的卡拉麦里洋在早石炭世或更早就已闭合<sup>[8, 26, 83-85]</sup>, 同时具有明显亏损高场强元素(Nb、Ta、Ti)、富集大离子亲石元素以及经常出现斜长石分离结晶作用和 Eu 负异常地球化学特征的陆缘弧玄武岩在该区并未出现。因此, 研究区双峰式火山岩亦可以排除形成于火山弧环境的可能。综上, 结合区域地质背景及该区双峰式火山岩岩石地球化学特征, 表明博格达造山带东段芨芨台子地区在晚石炭世不是处于岛弧环境, 而是以一个陆壳为基底的裂谷。林晋炎<sup>[86]</sup>所作的博格达造山带石炭系沉积层序的研究, 也与该区大陆裂谷环境的认识一致。

### 4.3 地质意义

新疆北部地区属中亚造山带在中国大陆的重要组成部分, 其古生代是以洋盆俯冲、闭合、陆块碰撞造山为特点的主造山期, 记录了古亚洲洋形成闭合的演化过程。在天山大部分地区, 广泛出露了一套石炭纪火山岩, 但其构造属性与博格达地区有所差异。朱永峰等<sup>[87-88]</sup>获得西天山大哈拉军山组石炭纪火山岩中玄武岩和粗面安山岩锆石 SHRIMP 年龄分别为(353.7±4.5) Ma 和(312.8±4.2) Ma, 分别属

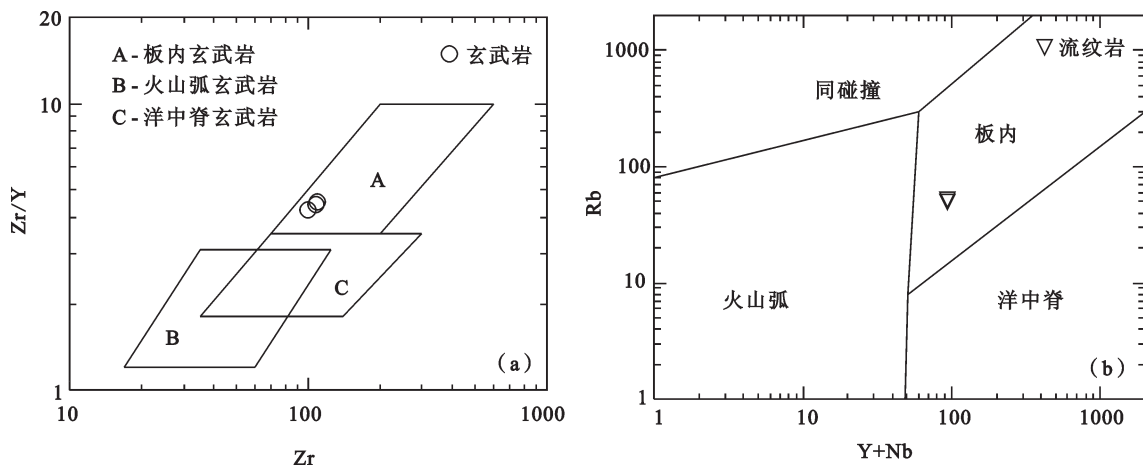


图 10 芨芨台子地区火山岩 Zr-Zr/Y(a)和 Rb-(Y+Nb)(b)构造环境判别图解  
(a 据文献[51]; b 据文献[79])

Fig.10 Zr-Zr/Y(a) and Rb-Y+Nb (b) tectonic environments discrimination diagram of Jijitaizi volcanic rocks  
(a after reference [51]; b after reference [79])

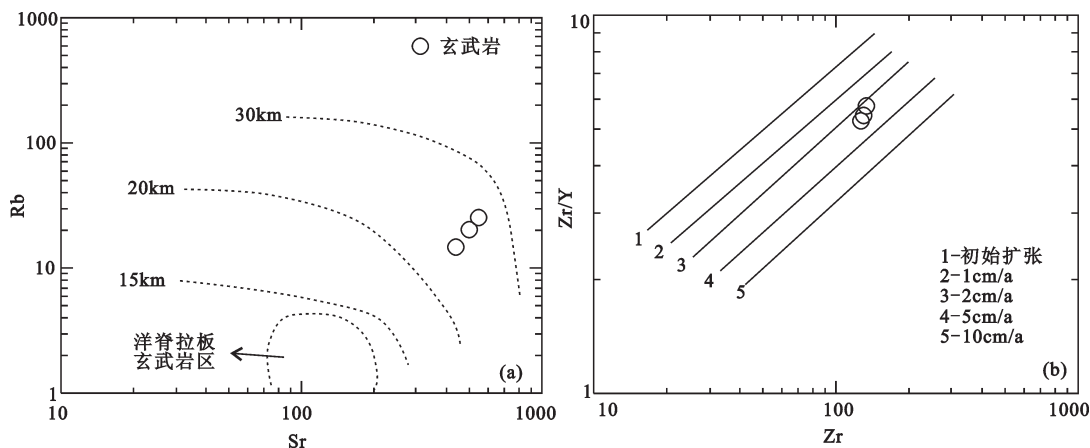


图 11 芨芨台子地区玄武岩 Sr-Rb 图解(a)和 Zr-Zr/Y 图解(b)  
Fig.11 Sr-Rb (a) and Zr-Zr/Y (b) diagrams of the Jijitaizi basalt rocks

于早石炭世早期和晚石炭世早期, 并被认为是代表古南天山洋的火山岛弧<sup>[87-89]</sup>, 并具有自西向东逐渐消亡, 至晚石炭世被碰撞后富钾岩浆喷发所替代<sup>[90]</sup>, 或被推测为大陆边缘弧后拉张的产物<sup>[91]</sup>。侯广顺<sup>[92]</sup>和李向民<sup>[93-94]</sup>等获得东天山企鹅山群石炭纪火山岩中安山岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为 334 Ma、玄武岩和酸性火山岩锆石 U-Pb 年龄分别为(322.6±2.0) Ma 和(319.9±1.6) Ma, 并被认为形成于大陆裂谷环境, 但最近开展的一系列火山岩和花岗岩研究表明, 早石炭世火山岩更倾向形成于岛弧环境, 与康古尔古大洋南北俯冲作用有关<sup>[95-96]</sup>。上述研究成果表明在天山大部分地区石炭纪火山岩倾向于俯冲流体参与下的岩浆作用的产物, 与研究区有所不同。

关于东天山博格达晚古生代陆内造山带(迄今为止在该造山带中未发现石炭纪洋壳的标志<sup>[97]</sup>)构造属性的认识国内外学者至今仍存在争议。有人认为应为裂谷<sup>[24-30]</sup>, 有人倾向于岛弧<sup>[31-32]</sup>, 还有人认为应为弧后盆地<sup>[33-34, 98]</sup>。近年来, 越来越多的岩石学、岩石地球化学和同位素地球化学证据表明, 博格达晚古生代陆内造山带是在裂谷基础上发展起来的<sup>[27-29, 35-36]</sup>, 并且也得到了横跨博格达造山带的重磁资料的支持。博格达裂谷火山活动始于早石炭世(七角井刺梅沟双峰式火山岩之玄武岩和流纹岩 Rb-Sr 等时线年龄分别为(342.0±3.2) Ma 和(340.3±3.4) Ma<sup>[27-28]</sup>), 早石炭世初期随着古亚洲洋壳向先存的准噶尔—吐哈地块斜向俯冲, 准噶尔南陆缘活动带开始扩张, 形成了博格达初始裂谷, 早石炭世晚期进一步拉张, 地壳伸展变形强烈, 早石炭世末期

一晚石炭世早期, 随着拉张应力的进一步加大, 岩石圈撕裂程度达到了最大, 博格达裂谷发育到鼎盛时期, 裂谷发生闭合碰撞并引起区域隆起发生在(307.1±1.3) Ma(大石头—色皮口流纹岩 Rb-Sr 等时线年龄<sup>[27]</sup>), 由碰撞挤压到伸展拉张的转折期是在(298.4±0.76) Ma(晚古生代辉绿岩及中酸性侵入体 Rb-Sr 等时线年龄<sup>[35]</sup>), 之后博格达造山带进入后造山演化阶段。尽管在研究区路线剖面内未见早石炭世裂谷火山岩分布, 但在测区西南部的七角井地区和东北部的萨尔乔克地区均分布有裂谷作用早期的双峰式火山岩组合。研究区(芨芨台子地区)晚石炭世双峰式火山岩组合的厘定, 是裂谷构造岩浆作用的结果, 表明博格达裂谷作用在晚石炭世早期仍在进行。进一步的 Rb-Sr 地壳厚度网络图(图 11-a)投影表明, 晚石炭世早期博格达地区地壳厚度为 20.0~30.0 km, 而且根据 Zr-Zr/Y 图(图 11-b)推断当时地壳拉张速率介于 2.0 cm/a~5.0 cm/a, 与现代大洋扩张速率(一般为 1.5 cm/a~5.0 cm/a)和现代红海及非洲埃塞俄比亚裂谷带的拉张速率(一般为 0.5 cm/a~1.2 cm/a)等相比较, 该速率反映了博格达地区当时处于快速拉张状态, 也标志着在晚石炭世早期博格达裂谷作用发展到鼎盛阶段。依据岩石地球化学、微量元素、稀土元素研究结果可知, 研究区晚石炭世双峰式火山岩组合中的玄武岩和流纹岩均属于拉斑系列, 其玄武岩是源于亏损地幔部分熔融的产物, 而流纹岩是由于玄武岩浆底侵作用引起下地壳物质部分熔融的结果, 它们均是在裂谷作用晚期的产物, 预示着博格达构造带即将进入区域隆起的构造演化阶段。

由此可见,芨芨台子地区晚石炭世早期双峰式火山岩的厘定进一步证实了博格达造山带在石炭纪时期处于大陆裂谷演化过程的观点,表明从早石炭世早期开始形成的博格达裂谷在晚石炭世初期发展到鼎盛时期,也代表着博格达地区由碰撞挤压到伸展拉张这个地球动力学环境的重大转折,随后,博格达构造带即将进入区域隆起的构造演化阶段。这与天山大部分地区以岛弧岩浆作用为特征的构造演化过程有显著差异,为进一步理解天山地区晚古生代构造格局及板块构造体制提供了重要的地质依据。

## 5 结 论

(1) 博格达造山带东段芨芨台子地区火山岩可明显分为基性和酸性两个端元,其SiO<sub>2</sub>含量分别为50.41%~50.96%和76.54%~77.74%,具有明显的Daly间断,在时空上构成经典的双峰式火山岩组合,通过精确的LA-ICP-MS锆石U-Pb方法,获得其流纹岩形成年龄为(312±1) Ma,属于晚石炭世初期。

(2) 根据详细的岩石学和地球化学研究,芨芨台子地区晚石炭世双峰式火山岩形成于大陆裂谷环境,具有板内成因特征,其玄武岩可能是亏损尖晶石相地幔橄榄岩向石榴石相地幔橄榄岩过渡相对较高程度部分熔融的产物,且在其上升过程中可能受到一定程度的地壳物质混染,而流纹岩应来自玄武岩浆上升过程中提供的热量对地壳物质重熔。

(3) 芨芨台子地区晚石炭世早期双峰式火山岩的厘定进一步证实了博格达造山带在石炭纪时期处于大陆裂谷演化的观点,表明从早石炭世初期开始形成的博格达裂谷在晚石炭世早期发展到鼎盛时期,也代表着博格达地区由碰撞挤压到伸展拉张这个地球动力学环境的重大转折,为进一步理解博格达地区晚古生代构造格局及板块构造体制提供了重要的地质依据。

**致谢:** 西安地质矿产研究所测试中心在地球化学测试及天津地质矿产研究所分析测试中心在同位素测试-处理等方面提供的帮助,主编、匿名审稿人及责任编辑杨艳老师对论文提出了宝贵修改意见,在此一并致以诚挚的谢意!

## 参考文献(References):

[1] Hildreth W. Gradients in silicic magma chambers: Implications for lithospheric magmatism[J]. *Journal of Geophysical Research*,

1981, 86(B11): 10153-10192.

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

Wang Yan, Qian Qing, Liu Liang, et al. Major geochemical characteristics of bimodal volcanic rocks in different geochemical environments[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2000, 16: 169-173 (in Chinese with English abstract).

[3] 钱青, 王焰. 不同构造环境中双峰式火山岩的地球化学特征[J]. *地质地球化学*, 1999, 27: 29-32.

Qian Qing, Wang Yan. Geochemical characteristics of bimodal volcanic suites from different tectonic settings[J]. *Geology Geochemistry*, 1999, 27: 29-32 (in Chinese with English abstract).

[4] Wilson M. *Igneous Petrogenesis*[M]. London: Unwin Hyman Press, 1989: 1-464.

[5] Davies G R, Macdonald R. Crustal influences in the petrogenesis of the Naivasha basalt-comendite complex: Combined trace element and Sr-Nd-Pb isotope constraints[J]. *Journal of Petrology*, 1987, 28(6): 1009-1031.

[6] 李献华, 周汉文, 李正祥, 等. 川西新元古代双峰式火山岩成因的微量元素和Sm-Nd同位素制约及其大地构造意义[J]. *地质科学*, 2002, 37: 264-276.

Li Xianhua, Zhou Hanwen, Li Zhengxiang, et al. Petrogenesis of Neoproterozoic bimodal volcanic in western Sichuan and its tectonic implications: geochemical and Sm-Nd isotopic constraints[J]. *Chinese Journal of Geology*, 2002, 37: 264-276 (in Chinese with English abstract).

[7] Geist D, Howard K A, Larson P. The generation of oceanic rhyolites by crustal fractionation: the basalt-rhyolite association at Volcano Alcedo, Galapagos Archipelago[J]. *Journal of Petrology*, 1995, 36: 965-982.

[8] Duncan A R, Erlank A J, Marsh J S. Regional geochemistry of the Karoo igneous province[J]. *Special Publication Geological Society of Africa*, 1984, 13: 355-388.

[9] Garland F, Hawkesworth C J, Mantovanim S M. Description and petrogenesis of the Parana rhyolites, southern Brazil[J]. *Journal of Petrology*, 1995, 36: 1193-1227.

[10] Pin C, Marini F. Early Ordovician continental break-up in Variscan Europe: Nd-Sr isotope and trace element evidence from bimodal igneous associations of the southern Massif Central, France[J]. *Lithos*, 1993, 29: 177-196.

[11] Brouxel M, Lapiere H, Michard A, et al. The deep layers of a Paleozoic arc: geochemistry of the Copley-Blaklala series, northern California[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1987, 85: 386-400.

[12] Jolly W T, Lidiak E G, Dickin A P. Bimodal volcanism in northeast Puerto Rico and the Virgin Islands (Greater Antilles Island Arc): Genetic links with Cretaceous subduction of the mid-Atlantic ridge Caribbean spur[J]. *Lithos*, 2008, 103: 393-414.

[13] 赖绍聪, 张国伟. 勉略结合带五里坝火山岩的地球化学研究及

- 其构造意义[J]. 大地构造与成矿学, 2002, 26: 43–50.
- Lai Shaocong, Zhang Guowei. Geochemistry of the volcanic rock association from Wuliba area in Mianlue suture zone, southern Qinling and its tectonic significance[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2002, 26: 43–50 (in Chinese with English abstract).
- [14] Donnelly T W, Rogers J J W. Igneous series in island arcs: the northeastern Caribbean compared with worldwide island-arc assemblages[J]. Bulletin Volcanologique, 1980, 43: 347–382.
- [15] Hochstaedter A G, Gill J B, Kusakabe M, et al. Volcanism in the Sumisu Rift: Element, Volatile and stable geochemistry[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1990, 100: 179–194.
- [16] Shinjo R, Kato Y. Geochemical constraints on the origin of bimodal magmatism at the Okinawa Trough, an incipient back-arc basin[J]. Lithos, 2000, 54: 117–137.
- [17] 申萍, 沈远超, 刘铁兵, 等. 新疆西北缘晚古生代金铜成矿作用与构造演化[J]. 岩石学报, 2008, 24: 1087–1100.
- Shen Ping, Shen Yuanchao, Liu Tiebing, et al. Late Paleozoic gold and copper mineralization and tectonic evolution in Xinjiang, China[J]. Acta Petrologica Sinica, 2008, 24: 1087–1100 (in Chinese with English abstract).
- [18] Frey F A, Geflach D C, Hickey R L, et al. Petrogenesis of the Laguna el Mauje volcanic complex, Chile(360S)[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1984, 88: 133–149.
- [19] 耿全如, 潘桂棠, 金振民, 等. 西藏冈底斯带叶巴组火山岩地球化学及成因[J]. 地球科学, 2005, 30: 747–760.
- Geng Quanru, Pan Guitang, Jin Zhenmin, et al. Petrogenesis and geochemistry of the volcanic rocks from the Yeba formation in the Gangdisi zone, Xizang[J]. Earth Science, 2005, 30: 747–760 (in Chinese with English abstract).
- [20] Coulon C, Maluski H, Bollinger C, et al. Mesozoic and Cenozoic volcanic rocks from central and southern Tibet:  $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$  dating, petrological characteristics and geodynamic significance[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1986, 79: 281–302.
- [21] Zhang X H, Zhang H F, Tang Y J, et al. 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[J]. Chemical Geology, 2008, 249: 262–281.
- [22] 陈培荣, 孔兴功, 王银喜, 等. 赣南燕山早期双峰式火山-侵入杂岩的Rb-Sr同位素定年及意义[J]. 高校地质学报, 1999, 5: 378–383.
- Chen Peirong, Kong Xinggong, Wang Yinxi, et al. Rb-Sr isotopic dating and significance of early Yanshan bimodal volcanic-intrusive complex from south Jiangxi Province[J]. Geological Journal of China University, 1999, 5: 378–383 (in Chinese with English abstract).
- [23] 章邦桐, 陈培荣, 孔兴功. 赣南临江盆地余田群双峰式火山岩的Rb-Sr年代学研究[J]. 中国地质, 2002, 29: 351–354.
- Zhang Bangtong, Chen Peirong, Kong Xinggong. Rb-Sr chronology of bimodal volcanic rocks of the Yutian group in the Lingjiang basin, southern Jiangxi[J]. Geology in China, 2002, 29: 351–354 (in Chinese with English abstract).
- [24] 王利利, 张凯, 高明远. 准噶尔盆地南缘的构造演化特征及含油气预测[J]. 新疆石油地质, 1986, 7(2): 1–9.
- Wang Lili, Zhang Kai, Gao Mingyuan. Characteristics of structural evolution and oil-gas potential prediction in southern margin area of Junggar basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 1986, 7(2): 1–9 (in Chinese with English abstract).
- [25] 吴庆福. 准噶尔盆地构造演化及含油气远景[J]. 新疆地质, 1986, 4(3): 1–19.
- Wu Qingfu. Structural evolution and prospects of Junggar basin[J]. Xinjiang Geology, 1986, 4(3): 1–19 (in Chinese with English abstract).
- [26] 何国琦, 李茂松, 刘德权, 等. 中国新疆古生代地壳演化及成矿[M]. 乌鲁木齐: 新疆人民出版社, 1994.
- He Guoqi Li Maosong, Liu Dequan, et al. Paleozoic Crustal Evolution and Mineralization in Xinjiang of China[M]. Urumiqi: Xinjiang People's Publishing House, 1994 (in Chinese with English abstract).
- [27] 王银喜, 顾连兴, 张遵忠, 等. 博格达裂谷闭合和区域隆起的同位素年代学证据及地质意义[J]. 地球学报, 2005, 26(增刊): 102–104.
- Wang Yinxi, Gu Lianxing, Zhang Zunzong, et al. Isotopic chronology evidence of Bogda rift closure and regional uplift and geological significance[J]. Acta Geoscientia Sinica, 2005, 26 (Suppl.): 102–104 (in Chinese with English abstract).
- [28] 王银喜, 顾连兴, 张遵忠, 等. 博格达裂谷双峰式火山岩地质年代学与Nd-Sr-Pb同位素地球化学特征[J]. 岩石学报, 2006, 22(5): 1215–1224.
- Wang Yinxi, Gu Lianxing, Zhang Zunzong, et al. Geochemistry and Nd-Sr-Pb isotopes of the bimodal volcanic rocks of the Bogda rift[J]. Acta Petrologica Sinica, 2006, 22(5): 1215–1224 (in Chinese with English abstract).
- [29] 王金荣, 李泰德, 田黎萍, 等. 新疆博格达造山带东段晚古生代构造-岩浆演化过程: 火山岩组合及其地球化学证据[J]. 岩石学报, 2010, 26(4): 1103–1115.
- Wang Jinrong, Li Taide, Tian Liping, et al. Late Paleozoic tectono-magmatic evolution in Bogda Orogenic Belt, Xinjiang: Evidence from geochemistry of volcanic rocks[J]. Acta Petrologica Sinica, 2010, 26(4): 1103–1115 (in Chinese with English abstract).
- [30] 田黎萍, 王金荣, 汤中立, 等. 新疆博格达山东段早石炭世火山岩地球化学特征及其构造意义[J]. 兰州大学学报, 2010, 46(4): 30–41.
- Tian Liping, Wang Jinrong, Tang Zhongli, et al. Geochemical characteristic and tectonic significance of the early Carboniferous volcanic rocks in eastern Bogda mountains of Xinjiang region[J]. Journal of Lanzhou University, 2010, 46(4): 30–41 (in Chinese with English abstract).

- [31] 方国庆. 博格达晚古生代岛弧的沉积岩石学证据[J]. 沉积学报, 1993, 11(3): 31–36.  
Fang Guoqing. Sedimentological evidence of late Paleozoic Bogda island arc[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1993, 11(3): 31–36 (in Chinese with English abstract).
- [32] 马瑞士, 舒良树, 孙家齐, 等. 东天山构造演化与成矿[M]. 北京: 地质出版社, 1997: 1–202.  
Ma Ruishi, Shu Liangshu, Sun Jiaqi, et al. Tectonic Evolution and Metallogeny of Eastern Tianshan Mountains[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1997: 1–202 (in Chinese with English abstract).
- [33] 李锦轶, 王克卓, 李文铅, 等. 新疆东部新元古代晚期和古生代构造格局及其演变[J]. 地质论评, 2004, 50(3): 304–322.  
Li Jinyi, Wang Kezhuo, Li Wenqian, et al. Late Neoproterozoic and Paleozoic framework and evolution of eastern Xinjiang, northwestern China[J]. Scientia Geologica Sinica, 2004, 50(3): 304–322 (in Chinese with English abstract).
- [34] 孙桂华, 李锦轶, 朱志新, 等. 新疆东部哈尔里克山南麓石炭纪砂岩碎屑锆石 SHRIMP U–Pb 定年及其地质意义[J]. 中国地质, 2007, 34(5): 778–789.  
Sun Guihua, Li Jinyi, Zhu Zhixin, et al. Detrital zircon SHRIMP U–Pb dating of Carboniferous sandstone from the southern foot of the Harlik Mountains, eastern Xinjiang and its geological implications[J]. Geology in China, 2007, 34(5): 778–789 (in Chinese with English abstract).
- [35] 顾连兴, 胡受奚, 于春水, 等. 博格达陆内碰撞造山带挤压–拉张构造转折期的侵入活动[J]. 岩石学报, 2001, 17(2): 187–198.  
Gu Lianxing, Hu Shouxi, Yu Chunshui, et al. Intrusive activities during compression–extension tectonic conversion in the Bogda intracontinental orogen[J]. Acta Petrologica Sinica, 2001, 17(2): 187–198 (in Chinese with English abstract).
- [36] 顾连兴, 胡受奚, 于春水, 等. 论博格达俯冲撕裂型裂谷的形成与演化[J]. 岩石学报, 2001, 17(4): 585–597.  
Gu Lianxing, Hu Shouxi, Yu Chunshui, et al. Initiation and evolution of the Bogda subduction–torn–type rift[J]. Acta Petrologica Sinica, 2001, 17(4): 585–597 (in Chinese with English abstract).
- [37] Shu L S, Chen Y T, Lu H F, et al. Paleozoic accretionary[J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 1999, 42(2): 113–119.
- [38] Rapp R P. Heterogeneous source regions for Archean granitoids[C]// Wit M J, Ashwal L D (ed.). Green Stone Belts. Oxford: Oxford University Press, 1997: 35–37.
- [39] Guo F, Fan W M, Wang Y J, et al. Petrogenesis and tectonic implication of Early Cretaceous high–K calc–alkaline volcanic rocks in the Laiyany basin of the Sulu belt, eastern China[J]. The Island Arc, 2005, 14: 69–90.
- [40] Winchester J A, Floyd P A. Geochemical discrimination of different magmas series and their differentiation products using immobile elements[J]. Chemical Geology, 1977, 20: 325–343.
- [41] Miyashiro A. Classification, characteristics and origin of ophiolites[J]. Journal of Geology, 1975, 83: 249–281.
- [42] Depuy C, Dostal J. Trace elements geochemistry of some continental tholeiites[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1984, 67: 61–69.
- [43] Holm P E. The Geochemical fingerprints of different tectono–magmatic environments using hydromagmatophile element abundances of tholeiitic basalts and basaltic andesites[J]. Chemical Geology, 1985, 51: 303–323.
- [44] Jolly W T. Geology and Geochemistry of Huronian rhyolites and low–Ti continental tholeiites from the Thessalon region, central Ontario. Can. J. Earth Science, 1987, 24: 1360–1385.
- [45] 李昌年. 火成岩微量元素岩石学[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1992: 1–195.  
Li Changnian. Trace Elements in Igneous Petrology[M]. Wuhan: Press of China University of Geosciences, 1992: 1–195 (in Chinese with English abstract).
- [46] Boynton W V. Cosmochemistry of the rare earth elements[J]. Meteorite Studies Dev., Geochemistry, 1984, 2: 63–114.
- [47] Condie K C. Geochemistry and tectonic setting of Early Proterozoic supercrustal rocks in the Southern United states[J]. Journal of Geology, 1986, 94: 845–864.
- [48] Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes[C]//Saunders A. D. and Norry M J(eds.). Magmatism in the Ocean Basins, Geological Society, Special Publication, 1989, 42: 313–345.
- [49] 吴元保, 郑永飞. 锆石成因矿物学研究及其对 U–Pb 年龄解释的制约[J]. 科学通报, 2004, 49(16): 1589–1604.  
Wu Yuanbao, Zhen Yongfei. Mineralogy of zircon petrogenesis and its constraints to explanation for U–Pb age [J]. Chinese Science Bulletin, 2004, 49(16): 1589–1604 (in Chinese).
- [50] Wendlandt R F, Altherr R, Neumann E R, et al. Petrology, geochemistry, isotopes[C]// Olsen K H(ed.). Continental Rifts: Evolution, Structure, Tectonics. Amsterdam: Elsevier, 1995: 47–60.
- [51] Pearce J A. Trace element characteristics of lavas from destructive plate boundaries[C]// Thorps R S(ed.). Andesites. New York: John Wiley and Sons, 1982: 525–548.
- [52] Condie K C. Geochemical changes in basalts and andesites across the Archean–Proterozoic boundary: Identification and significance[J]. Lithos, 1989, 23: 1–18.
- [53] Deniel C. Geochemical and isotopic (Sr–Nd–Pb) evidence for plume–lithosphere interactions in the genesis of Grande Comore magmas (Indian Ocean)[J]. Chem. Geol. 1998, 144: 281–303.
- [54] Miller C, Schuster R, Klötzli U, et al. Post–collisional potassic and ultrapotassic magmatism in SW Tibet: Geochemical and Sr–Nd–Pb–O isotopic constraints for mantle source characteristics and petrogenesis[J]. Journal of Petrology, 1999, 40: 1399–1424.
- [55] Rollinson H R. Using geochemical data: Evolution, presentation, interpretation[M]. Singapore Longman Singapore Publishers, 1993, 160–170.

- [56] Taylor S R, Mc L S M. The continental crust: Its composition and evolution[J]. Oxford: Blackwell Scientific, 1985: 1–312.
- [57] Rudnick R L, Land F D M. Nature and composition of the continental crust: A lower crustal perspective[J]. *Reviews in Geophysics*, 1995, 33: 267–309.
- [58] Caroline J, Stefan J, Edgar H, et al. Petrogenesis of Tertiary mafic alkaline magmas in the Hocheifel Germany[J]. *Journal of Petrology*, 2006, 47(8): 1637–1667.
- [59] Weaver B L, Tarney J. Empirical approach to estimating the composition of the continental crust[J]. *Nature*, 1984, 310: 575–577.
- [60] Wedepohl K H. The composition of the continental crust[J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1995, 59: 1217–1232.
- [61] Weaver B L. The origin of ocean island basalt end-member composition: Trace element and isotopic constrains[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1991, 104: 381–397.
- [62] Grove T L, Donnelly N J M. The evolution of young silicic lavas Medicine Lake Volcano, California: Implications for the origin of compositional gaps in calc-alkaline series lavas[J]. *Contrib. Mineral Petrol.*, 1986, 92: 281–302.
- [63] MacDonald R, Sparks R S J, Sigurdsson H, et al. The 1875 eruption of Askja volcano, Iceland: combined fractional crystallization and selective contamination in the generation of rhyolitic magma [J]. *Mineral. Mag.*, 1987, 51: 183–202.
- [64] Brouxel M, Lapiere H, Michard A, et al. The deep layers of a Paleozoic arc: geochemistry of the Copley–Blaklala series, northern California[J]. *Earth Planetary Science Letters*, 1987, 85: 386–400.
- [65] Holmes A. The problem of the association of acid and basic rocks in central complexes[J]. *Geol. Mag.*, 1931, 68: 241–255.
- [66] Sigurdsson H. Generation of Icelandic rhyolites by melting of plagiogranites in the oceanic layer[J]. *Nature*, 1997, 269: 26–28.
- [67] Huppert H E, Sparks R S J. The generation of granitic magmas by intrusion of basalt into continental crust[J]. *J. Petrol.*, 1988, 29: 599–624.
- [68] Pitcher W S. The nature and origin of granite, 2<sup>nd</sup> edition[J]. London: Chapman and Hall, 1997: 386.
- [69] 吴福元, 李献华, 杨进辉, 等. 花岗岩成因研究的若干问题[J]. *岩石学报*, 2007, 23(6): 1217–1238.  
Wu Fuyuan, Li Xianhua, Yang Jinhui, et al. Discussion on the petrogenesis of granites[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007, 23(6): 1217–1238 (in Chinese with English abstract).
- [70] 张琪, 潘国强, 李承东, 等. 花岗岩结晶分离作用——关于花岗岩研究的思考之二[J]. *岩石学报*, 2007, 23(6): 1239–1251.  
Zhang Qi, Pan Guoqiang, Li Chengdong, et al. Does fractional crystallization occur in granitic magma—some crucial questions on granite study[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007, 23(6): 1239–1251 (in Chinese with English abstract).
- [71] 张琪, 王焰, 熊小林, 等. 埃达克岩和花岗岩: 挑战与机遇[M]. 北京: 中国大地出版社, 2008, 179–256.  
Zhang Qi, Wang Yan, Xiong Xiaolin, et al. Adakite and Granite: Challenge and Opportunity[M]. Beijing: China Land Press, 2008: 179–256 (in Chinese with English abstract).
- [72] Cull J P, Oreilly S Y, Griffin W L. Xenolith geotherms and crustal models in eastern Australia[J]. *Tectonophysics*, 1991, 192: 359–366.
- [73] Hyndman D W. Petrology of igneous and metamorphic rocks[J]. New York: McGraw–Hill, 1985: 135–141.
- [74] 舒良树, 朱文斌, 王博, 等. 新疆博格达南缘后碰撞期陆内裂谷和下水滑塌构造[J]. *岩石学报*, 2005, 21(1): 25–36.  
Shu Liangshu, Zhu Wenbin, Wang Bo, et al. The post-collision intracontinental rifting and olistostrome on the southern slope of Bogda mountains, Xinjiang[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2005, 21(1): 25–36 (in Chinese with English abstract).
- [75] Ernst R E, Buchan K L, Campbell I H. Frontiers in large igneous province research[J]. *Lithos*, 2005, 79: 271–297.
- [76] 夏林圻, 夏祖春, 徐学义, 等. 利用地球化学方法判别大陆玄武岩和岛弧玄武岩[J]. *岩石矿物学杂志*, 2007, 26(1): 77–88.  
Xia Linqi, Xia Zuchun, Xu Xueyi, et al. The discrimination between continental basalt and island arc basalt based on geochemical method[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2007, 26(1): 77–88 (in Chinese with English abstract).
- [77] 徐通, 裴先治, 李瑞保, 等. 勉略构造带横现河地区张岩沟双峰式火山岩的地球化学特征、LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及其构造意义[J]. *中国地质*, 2013, 40(6): 1777–1792.  
Xu Tong, Pei Xianzhi, Li Ruibao, et al. Geochemical characteristics, LA-ICP-MS zircon U-Pb dating and tectonic significance of Zhangyangou bimodal volcanic rocks in Hengxianhe area, Mian-Lue tectonic zone[J]. *Geology in China*, 2013, 40(6): 1777–1792 (in Chinese with English abstract).
- [78] 刘飞, 杨经绥, 李天福, 等. 新疆北天山沙湾地区晚石炭世火山岩地球化学特征及地质意义[J]. *中国地质*, 2011, 38(4): 868–889.  
Liu Fei, Yang Jingsui, Li Tianfu, et al. Geochemical characteristics of Late Carboniferous volcanic rocks in northern Tianshan, Xinjiang, and their geological significance[J]. *Geology in China*, 2011, 38(4): 868–889 (in Chinese with English abstract).
- [79] Pearce J A. The role of sub-continental lithosphere in magma genesis at active continental margin[C]//Hawkesworth C J, Norry M J (eds.). *Continental Basalts and Mantle Xenoliths*. Cambridge: Shiva. Publ. Limited., 1984: 230–249.
- [80] Pin C, Paquette J L. A mantle-derived bimodal suite in the Hercynian belt: Nd isotope and trace element evidence for a subduction-related rift origin of the late Devonian Brevenne metavolcanics, Massif Central (France) [J]. *Contrib. Mineral Petrol.*, 1997, 129: 222–238.
- [81] Gill J B. Orogenic andesites and plate tectonics[J]. Springer-Verlag, 1981: 1–390.
- [82] 汪晓伟, 裴先治, 李瑞保, 等. 南秦岭勉略构造带中堂沟火山岩地球化学特征及其地质意义[J]. *中国地质*, 2014, 41(2): 361–377.  
Wang Xiaowei, Pei Xianzhi, Li Ruibao, et al. Geochemical characteristics of the volcanic rocks from Zhongtanggou area of Mianlue suture zone in South Qinling Mountains and their



- geological significance[J]. *Geology in China*, 2014, 41(2): 361–377(in Chinese with English abstract).
- [83] 李锦轶, 朱宝清, 冯益民, 等. 新疆东准噶尔卡拉麦里南明水组研究的新进展[J]. *新疆地质科学(第二辑)*, 1990, 2: 1–8.  
Li Jinyi, Zhu Baoqing, Feng Yimin, et al. The recent development of Nanmingshui formation in Kalamaili of east Junggar[J]. *Geoscience of Xinjiang*, 1990, 2: 1–8 (in Chinese with English abstract).
- [84] 李锦轶. 新疆东准噶尔蛇绿岩的基本特征和侵位历史[J]. *岩石学报*, 1995, 11(增刊): 73–84.  
Li Jinyi. Main characteristics and emplacement processes of the east Junggar ophiolites, Xinjiang, China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 1995, 11(Suppl.): 73–84 (in Chinese with English abstract).
- [85] 李锦轶, 肖序常. 对新疆地壳结构和构造演化几个问题的简要论评[J]. *地质科学*, 1999, 34: 405–419.  
Li Jinyi, Xiao Xuchang. Brief reviews on some issues of framework and tectonic evolution of Xinjiang crust, northwest China[J]. *Chinese Journal of Geology*, 1999, 34: 405–419 (in Chinese with English abstract).
- [86] 林晋炎. 博格达裂谷的沉积层序兼论新疆北部统一陆内盆地的形成和演化[D]. 西北大学地质系博士学位论文, 1993.  
Lin Jinyan. The sedimentary sequence of Bogda rift and the formation and evolution of the northern basin of Xinjiang unified land[D]. Doctor of Philosophy thesis, Department of Geology, Northwestern University, 1993 (in Chinese with English abstract).
- [87] 朱永峰, 张立飞, 古丽冰, 等. 西天山石炭纪火山岩 SHRIMP 年代学及其微量元素地球化学研究[J]. *科学通报*, 2005, 50(18): 2004–2014.  
Zhu Yongfeng, Zhang Lifei, Gu Libing, et al. Zircon SHRIMP age and geochemistry of Carboniferous volcanic rocks in western Tianshan[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2005, 50(18): 2004–2014 (in Chinese).
- [88] Zhu Y F, Guo X, Song B, et al. Petrology, Sr–Nd–Hf isotopic geochemistry and zircon chronology of the late Paleozoic volcanic rocks in the southwestern Tianshan mountains, Xinjiang, NW China[J]. *Journal of Geological Society*, 2009, 166: 1085–1099.
- [89] 龙灵利, 高俊, 钱青, 等. 西天山伊犁地区石炭纪火山岩地球化学特征及构造环境[J]. *岩石学报*, 2008, 24(4): 699–710.  
Long Lingli, Gao Jun, Qian Qing, et al. Geochemical characteristics and tectonic settings of Carboniferous volcanic rocks from Yili region, western Tianshan[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2008, 24(4): 699–710 (in Chinese with English abstract).
- [90] 朱永峰, 周晶, 郭旋, 等. 西天山石炭纪火山岩岩石学及 Sr–Nd 同位素地球化学研究[J]. *岩石学报*, 2006, 22(5): 1341–1350.  
Zhu Yongfeng, Zhou Jing, Guo Xuan, et al. Petrology and Sr–Nd isotopic geochemistry of the Carboniferous volcanic rocks in western Tianshan mountains[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2006, 22(5): 1341–1350 (in Chinese with English abstract).
- [91] 钱青, 高俊, 熊贤明, 等. 西天山昭苏北部石炭纪火山岩的岩石地球化学特征、成因及形成环境[J]. *岩石学报*, 2006, 22(5): 1307–1323.  
Qian Qing, Gao Jun, Xiong Xianming, et al. Petrogenesis and tectonic settings of Carboniferous volcanic rocks from north Zhaosu, western Tianshan mountains: Constrains from petrology and geochemistry[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2006, 22(5): 1307–1323 (in Chinese with English abstract).
- [92] 侯广顺, 唐红峰, 刘丛强, 等. 东天山土屋—延东斑岩铜矿围岩的同位素年代和地球化学研究[J]. *岩石学报*, 2005, 21(6): 1729–1736.  
Hou Guangshun, Tang Hongfeng, Liu Congqiang, et al. Isotopic–chronological and geochemical study on the wallrock of Tuwu–Yangdong porphyry copper deposits, eastern Tianshan mountains[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2005, 21(6): 1729–1736 (in Chinese with English abstract).
- [93] 李向民, 夏林圻, 夏祖春, 等. 东天山石炭纪企鹅山群火山岩锆石 U–Pb 年代学[J]. *地质通报*, 2004, 23(12): 1215–1220.  
Li Xiangmin, Xia Linqi, Xia Zuchun, et al. Zircon U–Pb geochronology of volcanic rocks of Qi’eshan group in the east Tianshan mountains[J]. *Geological Bulletin of China*, 2004, 23(12): 1215–1220 (in Chinese with English abstract).
- [94] 李向民, 夏林圻, 夏祖春, 等. 东天山石炭纪企鹅山群火山岩岩石成因[J]. *吉林大学学报: 地球科学版*, 2006, 36(3): 336–341.  
Li Xiangmin, Xia Linqi, Xia Zuchun, et al. Petrogenesis of the Carboniferous Qi’eshan group volcanic rocks in the east Tianshan[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2006, 36(3): 336–341 (in Chinese with English abstract).
- [95] 侯广顺, 唐红峰, 刘丛强, 等. 东天山觉罗塔格构造带晚古生代火山岩地球化学特征及意义[J]. *岩石学报*, 2006, 22(5): 1167–1177.  
Hou Guangshun, Tang Hongfeng, Liu Congqiang, et al. Geochemical characteristics of the late Paleozoic volcanic rocks in Jueluotage tectonic belt, eastern Tianshan and its implications[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2006, 22(5): 1167–1177 (in Chinese with English abstract).
- [96] 李文铅, 夏斌, 王克卓, 等. 新疆东天山彩中花岗岩体锆石 SHRIMP 年龄及地球化学特征[J]. *地质学报*, 2006, 80(1): 43–52.  
Li Wenqian, Xia Bin, Wang Kezhao, et al. Zircon SHRIMP age and geochemistry of Caizhong granite from east Tianshan, Xinjiang, China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2006, 80(1): 43–52 (in Chinese with English abstract).
- [97] Gao J, Li M S, Xiao X C, et al. Paleozoic tectonic evolution of the Tianshan Orogen, northwestern China[J]. *Tectonophysics*, 1998, 287: 213–231.
- [98] 熊发挥, 杨经绥, 贾毅, 等. 新疆博格达白杨沟的枕状熔岩: 岩石地球化学和 Sr–Nd–Pb 同位素特征[J]. *中国地质*, 2011, 38(4): 838–854.  
Xiong Fahui, Yang Jingsui, Jia Yi, et al. The pillow lava of Baiyanggou in Bogda, Xinjiang: geochemical and Sr–Nd–Pb isotopic characteristics[J]. *Geology in China*, 2011, 38(4): 838–854(in Chinese with English abstract).