https://doi.org/10.3799/dqkx.2018.325



东天山觉罗塔格构造带石炭纪弧后盆地: 来自基性火山岩的证据

罗 婷^{1,2},陈继平^{2,3},廖群安⁴,王国灿⁴,张雄华⁴,张随安^{1,2},康琴琴^{1,2}

1. 陕西省地质调查实验中心,陕西西安 710054
2. 陕西省地质调查院,陕西西安 710054
3. 陕西省水工环地质调查中心,陕西西安 710054

4. 中国地质大学地球科学学院,湖北武汉 430074

摘 要:中亚造山带西南缘东天山觉罗塔格造山带广泛发育石炭纪火山岩,这些石炭纪火山岩的成因和构造历史一直是该区 域地质问题争论的焦点.通过对东天山觉罗塔格造山带石炭纪基性火山岩详细的岩石学、地球化学、锆石 U-Pb年代学和 Sr-Nd 同位素研究,获得了如下认识:(1)东天山觉罗塔格造山带石炭纪基性火山岩分为两期爆发,早期爆发时间为 336 Ma,晚期 爆发时间为 320 Ma.早期 336 Ma基性火山岩由玄武岩、玄武安山岩及同成分的火山碎屑岩组成,显示出弧火山岩属性;晚期 320 Ma基性火山岩主要由玄武岩和玄武安山岩组成,包括 I型火山岩和 II型火山岩,I型显示出大洋中脊玄武岩属性,II型显 示出弧玄武岩特征.(2)石炭纪基性火山岩中发现的大量捕获锆石(371~3 106 Ma)年龄谱系与中天山地块显示为相似的特 征,表明它们在石炭纪之前可能同属一个板块,也指示早古生代地壳可能参与了成岩过程.(3)该区域石炭纪火山岩与现今存 在的 Okinawa Trough和 Mariana Trough弧后盆地玄武岩(BABB)很相似,从弧玄武岩向洋中脊玄武岩的演变,反映了石炭纪 中天山北部弧后盆地的发展.因此推断早石炭世火山岩为弧后盆地初始裂开阶段的产物,而晚石炭世火山岩为弧后盆地弧后 扩张阶段的产物.早石炭世晚期的初始裂开和晚石炭世早期的弧后扩张表明天山洋的俯冲最终结束于晚石炭世末期,包括主 大洋和弧后盆地最终关闭,而最终关闭的位置很可能位于中天山以南.

关键词:火山岩;石炭纪;岩石成因;弧后盆地;东天山;岩石学. 中图分类号: P581 文章编号: 1000-2383(2020)01-194-17

收稿日期:2018-09-04

A Back-Arc Basin in Eastern Tianshan, Central Asia: Evidence from Geochronology and Geochemistry of Carboniferous Basalts

Luo Ting^{1,2}, Chen Jiping^{2,3}, Liao Qun'an⁴, Wang Guocan⁴, Zhang Xionghua⁴, Zhang Suian^{1,2}, Kang Qinqin^{1,2}

- 1. Shaanxi Experimentation Center of Geological Survey, Xi'an 710054, China
- 2. Shaanxi Institute of Geological Survey, Xi'an 710054, China
- 3. Shaanxi Hydrogeology Engineering and Environment Geology Survey Center, Xi'an 710054, China
- 4. School of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract: Carboniferous volcanic rocks are widely distributed in the Jueluotage belt of eastern Tianshan, located in the southern Central Asian Orogenic Belt. The petrogenesis and tectonic history of this region have long been a matter of debate. Data on major and trace elements and Sr-Nd isotopes of whole rocks, and in-situ U-Pb age of zircons are reported for Carboniferous volcanic

基金项目:中国地质调查局区域地质调查项目(Nos. 12120114042801,1212011120503,1212011120509,DD20160006).

作者简介:罗婷(1987-),女,博士,从事岩浆岩及其相关矿产研究工作. ORCID: 0000-0002-0916-9860. E-mail: 179175768@qq.com

引用格式:罗婷,陈继平,廖群安,等,2020.东天山觉罗塔格构造带石炭纪弧后盆地:来自基性火山岩的证据.地球科学,45(1):194-210.

rocks in the Juluotage area in this paper. The main results are obtained as follows: (1) These volcanic rocks erupted in two episodes, with zircon U-Pb ages of ca. 336 Ma and ca. 320 Ma respectively. The ca. 336 Ma volcanic rocks are dominated by arclike igneous rocks. They show enrichment of light rare earth elements (LREEs) and large-ion lithophile elements (LILEs), and depletion of high field-strength elements (HFSEs) according to the N-MORB-normalized and chondrite-normalized diagrams. However, the ca. 320 Ma volcanic rocks mainly consist of MORB-like igneous rocks that show nearly flat REE patterns. They are also slightly enriched in LILEs and LREEs according to the N-MORB-normalized and chondrite-normalized diagrams. (2) The inherited zircon ages of volcanic rocks from the Jueluotage belt show similar trends and features to those of the Central Tianshan Block, suggesting they shared the same basement, at least before the Early Carboniferous. (3) These Carboniferous volcanic rocks reflects the development of the back-arc basin in the northern Central Tianshan Block during the Carboniferous. The subduction of the Tianshan Ocean ended at the end of the Late Carboniferous period. The final closure of the main ocean and back-arc basins is likely to be south of the Central Tianshan mountain.

Key words: volcanic rocks; Carboniferous; petrogenesis; back-arc basin; eastern Tianshan; petrology.

0 引言

中亚造山带北邻西伯利亚克拉通,南倚华北克 拉通和塔里木克拉通,由岛弧、蛇绿岩、洋岛、海山、 增生楔、洋底高原和微陆块等增生拼贴而成(Jahn et al., 2000). 它经历了复杂的地球动力学演化过 程,包括大洋板块俯冲、弧后裂陷、大陆碰撞、地壳 增厚和造山后伸展(Buslov et al., 2004).作为中亚 造山带的重要组成部分,东天山保存了大量的石炭 纪火山岩和花岗岩,它们记录了从俯冲、弧后裂解 到大陆增生、造山后伸展的整个或部分构造循环 (图 1a; Charvet et al., 2011; 罗婷等, 2018). 了解东 天山造山带的形成和演化,对于重建中亚造山带西 南缘古生代构造格架具有重要意义.然而,东天山 造山带的构造性质尚不清楚.前人根据石炭纪火山 岩所显示出的不同地球化学特征和年龄对东天山 石炭纪构造史给出了不同解释,前人研究表明(研 究位置如图1b所示),这些石炭纪火山岩形成于多 种构造环境下,包括大洋板块俯冲(Xiao et al., 2010)、地幔柱岩浆作用、陆内裂解、后碰撞拆沉和 弧后裂解(Shu et al., 2010),争论的焦点在于东天 山觉罗塔格构造带石炭纪时期是否发育一个主大 洋或者弧后裂解系统.

本文以东天山觉罗塔格构造带出露的基性火 山岩为研究对象,通过对火山岩的LA-ICP-MS 错 石U-Pb年代学、全岩主微量元素及 Sr-Nd同位素地 球化学特征研究,以期获得:(1)基性火山岩形成时 代;(2)岩石成因及探讨地球动力学意义;(3)更好 地约束石炭纪时期觉罗塔格构造带与中天山板块 的关系.本文研究表明,东天山觉罗塔格构造带石 炭纪时处于弧后盆地构造环境,出露的基性火山岩 形成于弧后盆地演化过程中的不同阶段.

1 区域地质概况及火山地质特征

中亚造山带(又称为乌拉尔-蒙古巨型古生 代复合造山系)是显生宙以来最大的增生造山系 统,它西接乌拉尔,东邻太平洋,北部为西伯利亚 板块,南部为塔里木和华北板块,它的演化始于中 元古代晚期Rodinia超大陆的裂解(Khain, 2003), 并以晚古生代到早中生代库米什和索伦缝合带的 出现为结束的标志(Xiao et al., 2010).该研究区 位于东天山中部的觉罗塔格构造带,4条近东西 向展布的深大断裂构成了觉罗塔格构造带的基本 格架(图1a),从南到北依次为阿其克库都克断裂、 雅满苏断裂、康古尔塔格断裂和大草滩断裂,南边 以阿其克库都克断裂与中天山地块分界,北边以 大草滩断裂为界与哈尔里克造山带相邻,东南以 星星峡断裂与北山分界.区内出露的石炭纪火山 岩为早石炭世雅满苏组(C₁y)火山岩,晚石炭世梧 桐窝子组(C2w)火山岩以及晚石炭世土古土布拉 克组(C₂tg)火山岩(图 1b).

东天山觉罗塔格构造带南带为雅满苏火山弧, 位于雅满苏断裂与阿其克库都克断裂之间,与中天 山相邻,带内发育大量石炭纪火山岩,主要由下石 炭统雅满苏组(C₁y)和上石炭统土古土布拉克组 (C₂tg)组成(图1c),雅满苏组(C₁y)火山岩分布于雅 满苏火山弧带内,夹在晚石炭统梧桐窝子组(C₂w)、 早石炭统干墩组(C₁g)和上石炭土古土布拉克组 (C₂tg)之间,呈整合过渡或断裂相接,东西向延伸, 由玄武岩(图2a)、安山岩、英安岩、流纹岩以及火山





图 2 东天山觉罗塔格构造带石炭纪火山岩典型基性火山岩野外照片 Fig.2 Field photos of Carboniferous volcanic rocks from eastern Tianshan a. 雅满苏组玄武岩;b. 土古土布拉克组玄武岩;c. 梧桐窝子组玄武岩

碎屑岩组成,以钙碱性系列为主,该组中英安岩LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 335.9±2.4 Ma,整体形 成于早石炭世(罗婷等,2012).该组以火山机构链状 分布,显示以裂隙一中心式喷发及中酸性侵入岩为 特征.据区域资料显示,该区域石炭系火山岩发育 较齐全,存在有序和无序两套地层系统,大面积分 布雅满苏组和少量出露的土古土布拉克组构成了 火山熔岩、火山碎屑岩和火山质碎屑沉积岩夹碳酸 盐岩沉积.有学者提出雅满苏带火山岩形成于拉张 背景,具有裂谷特征,推断其为石炭纪时的裂谷.

土古土布拉克组火山岩(C₂tg)主要分布于阿其 克库都克断裂两侧,北与雅满苏组相接,南连中天 山古陆,东西向延伸,岩石以中基性的熔岩(图 2b) 和中酸性的火山碎屑岩为主,岩石组合为岛弧拉斑 玄武岩、钙碱性(高铝)玄武岩、高铝玄武安山岩、英 安岩和流纹岩.宋安江等(2006)报道了其中花岗闪 长斑岩砾石的 SHIRMP U-Pb 年龄为 314±4.2 Ma, 形成时代为晚石炭世.

梧桐窝子组(C₂w)火山岩分布于康古尔塔 格断裂与雅满苏断裂之间,东西向延伸,与硅质 岩伴生,为一套深海相火山岩(图 2c),与雅满苏 组呈断层接触,以玄武岩为主,少量玄武安山 岩,在野外呈断片产出,分布相对局限,曹锐等 (2012)认为其为蛇绿混杂岩带,可能由亏损的 软流圈地幔部分熔融而形成.

2 岩相学特征

雅满苏组(C₁y)典型基性火山岩岩相学特征描述如下:

玄武岩:斑状结构,气孔一杏仁构造,气孔不规则排列,呈圆形或不规则状,内壁光滑,局部被方解石、石英或绿脱石充填.斑晶为橄榄石、斜长石和辉石.橄榄石可见弧形裂理,发育伊丁石暗化边,中心

可见磁铁矿颗粒;辉石斑晶为斜方辉石和单斜辉石 (图 3a、3b).基质具间粒间隐结构,斜长石微晶呈细 条状无规则排列,辉石微粒、磁铁矿微粒、玻璃质及 显微隐晶质充填其中.

玄武安山岩:斑状结构,气孔一杏仁构造,气孔 形态不规则,多被方解石、沸石、石英充填.斑晶为 斜长石、少量单斜辉石(图 3c).基质为玻基交织结 构,由斜长石微晶、辉石微晶、磁铁矿微粒、玻璃质 和显微隐晶质组成.

晚石炭世土古土布拉克组(C₂tg)典型基性火山 岩的岩相学特征描述如下:

玄武岩:斑状结构-无斑隐晶质结构,多为块 状构造,部分具气孔构造.斑晶为斜长石、辉石和 橄榄石.橄榄石自形,多已伊丁石化,可见残核,辉 石斑晶为普通辉石,岩石中有时可见辉石和斜长 石的聚斑.基质由微晶斜长石、含钛普通辉石、磁 铁矿、赤铁矿和火山玻璃组成,部分样品基质中可 见伊丁石或橄榄石.

玄武安山岩:斑状结构,杏仁状构造、气孔状构造,部分层位具块状构造.斑晶为斜长石和普通辉石,局部二者可成聚斑产出,少量角闪石,可见暗化边.基质具交织结构一玻基交织结构,由定向一半定向的斜长石微晶组成,含少量的粒状普通辉石微晶、磁铁矿和火山玻璃质.

晚石炭世梧桐窝子组(C₂w)典型基性火山岩的 岩相学特征描述如下:

玄武岩:斑状结构或少斑结构(I型,图3d), 气孔构造.斑晶主要为单斜辉石(图3e)、橄榄石 (图3f),和少量的斜长石.基质中斜长石微晶、辉 石雏晶及磁铁矿微粒呈交织结构,纤维状隐晶钠 长石呈帚状和羽状.



图 3 东天山觉罗塔格构造带石炭纪典型基性火山岩显微照片 Fig.3 Photomicrographs (cross-polarized light) of Carboniferous volcanic rocks from eastern Tianshan OI.橄榄石; Px. 辉石; Opx.斜方辉石; Cpx. 单斜辉石; Pl. 斜长石; Mt. 磁铁矿; Chl. 绿泥石

3 样品与分析方法

本文共选择3件样品进行年代学测定,26件 样品进行全岩主微量元素测试,5件样品进行Sr-Nd同位素测试.

3.1 锆石 U-Pb 测年

3件样品的粉碎加工、锆石分离、挑选及制靶由 河北廊坊诚信地质服务公司完成.锆石的透反射照 片在中国地质大学(武汉)岩矿实验室的电子显微 镜下完成,锆石的阴极发光图像(CL图像)在中国 地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实 验室的电子探针显微分析系统 JXA-8100 上完成, 锆石年龄的测定在西北大学大陆动力学国家重点 实验室的激光剥蚀-电感耦合等离子体质谱仪LA-ICP-MS上测定.分析仪器为为ELAN6100DRC型 四级杆质谱仪和Geolas 200M型激光剥蚀系统,激 光器为193 nm ArF 准分子激光器,单脉冲能量 210 mJ;最高重复频率20 Hz,平均功率4 W;经光学 系统匀光和聚焦,到达样品表面的激光束具有平顶 (fat top)的特点,对不同斑束可以提供相同的能量 密度,最高能量密度可达20 J/cm².锆石年龄计算采 用国际标准锆石 91500 作为外标,元素含量采用美 国国家标准物质局人工合成硅酸盐玻璃 NIST SRM610作为外标,²⁹Si作为内标进行计算.测试结 果通过 ICPMSDataCal 软件计算得出²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb、 ²⁰⁷Pb/²⁰⁵Pb、²⁰⁶Pb/²³⁸U这3组同位素比值、年龄及其 误差. 锆石样品的 U-Pb 年龄谐和图绘制和年龄权 重平均计算均采用 Isoplot 完成. 同位素比值误差为 2, 加权平均年龄均具有 95% 以上的置信度.

3.2 主微量元素

在野外实测剖面和路线地质调查基础上,作 者尽可能选择了较新鲜,气孔和杏仁体较少的 样品.对于一些杏仁体较多的样品,先在颚式刚 玉对滚机上粉碎到厘米级大小,剔除含杏仁的 部分,部分含细小方解石的样品用盐酸浸泡后 再清洗干净用于分析.

26件样品的全岩主量、微量及稀土元素分析 测试由广州澳实矿物实验室完成,主量元素采用 硼酸锂熔融消解,X荧光光谱法(ME-XRF12)测 定;微量元素采用四酸消解,质谱/光谱仪综合分 析(ME-MS61);稀土元素采用硼酸锂熔融、等离 子质谱定量(ME-MS81)分析;亚铁分析采用酸消 解,重铬酸钾滴定测量.

3.3 Sr-Nd 同位素

5件样品的Sr-Nd同位素样品测试工作在中国 地质大学(武汉)国家重点实验室完成,采用Finnigan公司的MAT261进行比值测量,准确度通过标 样NBS987和La Jolla国际标样进行监测,Sr同位素 的质量分馏用⁸⁶Sr/⁸⁸Sr=0.1194校正,Nd同位素质 量分馏用¹⁴⁶Nd/¹⁴⁴Nd=0.7219校正.

4 结果

4.1 火山岩形成时代

东天山觉罗塔格构造带早石炭世雅满苏组 火山岩的形成时代目前仍有争议.Hou et al. (2014)从该组玄武岩中挑选7颗锆石,获得了 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 324±1 Ma;然而 CL 图像显示这7颗锆石不仅颗粒小且具有核幔 结构,可能说明 324±1 Ma并不能准确地代表雅 满苏组火山岩锆石的结晶年龄.晚石炭世土古土 布拉克组火山岩的年龄尚未报道,吴春伟等 (2008)报道了该套火山岩地层中所发现的晚石 炭世珊瑚和蜓化石分子,而宋安江等(2006)报道 了其中花岗闪长斑岩砾石的 SHIRMP U-Pb 年龄 为314±4 Ma,形成时代为晚石炭世.

本次研究对该区域石炭纪火山岩3件锆石样品 进行了测年分析,分别为早石炭世雅满苏组玄武安 山岩样品1050-2,晚石炭世土古土布拉克组玄武岩 样品 CN03-39 和玄武安山岩样品 CN02-55. 锆石分 析结果见附表1,锆石阴极发光图像和U-Pb年龄谐 和图如图4所示.3个样品的锆石形态为半自形一自 形,颜色多为无色-黄褐色,透明至半透明,四方双 锥至短柱状(长宽比1.0~2.4),阴极发光图像显示 清晰的岩浆锆石振荡环带.另外,本文在火山岩年 龄测试中发现了大量年龄较大的捕获锆石,U-Pb同 位素年龄谐和图、阴极发光(CL)照片及测点位置见 图 5, 锆石晶形发育, 具有明显的岩浆结晶环带和核 幔结构,核部为磨圆状,核部与幔部发育不同的结 晶环带,这类锆石为继承性锆石;本文共分析了155 测点,133点Th/U值大于0.4,仅有2点小于0.1(附 表1),Th/U值大于0.4的锆石点数占总数的86%, 因此笔者推测这些继承锆石主要为岩浆成因锆石.

分析结果显示,早石炭世雅满苏组玄武安山 岩样品 1050-2 锆石²⁰⁶Pb/²³⁸U 加权平均年龄为 336±2 Ma(MSWD=0.85)(图 4c),而晚石炭世 土古土布拉克组玄武岩样品 CN03-39 和玄武安 山岩样品 CN02-55 锆石²⁰⁶Pb/²³⁸U 加权平均年龄 分别为 321±2 Ma(MSWD=0.59)和 319±2 Ma (MSWD=0.27)(图 4d、4e).

捕获的继承锆石年龄分布范围大,介于371~ 3106 Ma,暗示这批继承锆石的多源性.年龄分布曲 线分别在约545±8 Ma、488±10 Ma、440±2 Ma、 401±3 Ma、371±4 Ma形成较好的加权平均年龄, 并且年龄分布曲线在约600 Ma、1000 Ma、 1400 Ma、2200 Ma和2600 Ma出现峰值(图5).谐 和年龄频率图显示最大峰值出现于545 Ma、 440 Ma,1000 Ma次之(图6),1400 Ma、2200 Ma、 2600 Ma峰值亦可见.东天山觉罗塔格构造带是否 存在前寒武的基底长期以来存在争议.而本文研究 中所发现的继承错石的年龄范围与中天山陆块和 塔里木克拉通碎屑锆石所记录的岩浆事件具有相 似的特征(图6).这可能暗示了东天山觉罗塔格构 造带与中天山陆块及塔里木克拉通经历了相同的 构造岩浆演化事件(Ma et al., 2012).本文的研究也 进一步说明了东天山觉罗塔格构造带与中天山地 块和塔里木克拉通至少在石炭纪时为一个整体,继 承锆石的年龄700~1000 Ma可能代表了Rodinia超 大陆裂解时的岩浆事件.

4.2 全岩主、微量元素组成

东天山觉罗塔格构造带石炭纪火山岩主量元 素、微量元素及稀土元素分析结果见附表2.该带 内火山岩具有不同程度的蚀变,岩石化学分析结 果具相对较高的烧失量和CO₂含量,Na₂O和K₂O 容易受到后期蚀变矿物的影响,而Nb/Y比值相 对比较稳定,在火山岩分类命名时本文选用Nb/ Y-SiO₂图解,在图7a中,早石炭世雅满苏组(C₁y) 火山岩和晚石炭世的梧桐窝子组(C₂w)火山岩及 土古土布拉克组(C₂tg)火山岩Nb/Y比值都小于 0.8,属于亚碱性系列.在AFM 图解上可以看出, 雅满苏组火山岩具有典型的钙碱性序列演化趋 势,属于中钾-高钾钙碱性系列(图7b).而晚石炭 世梧桐窝子组火山岩和土古土布拉克组火山岩主 体为拉斑玄武系列,少量为钙碱性系列.

早石炭世火山岩样品 SiO₂含量在44.93%~ 54.10%之间,具有较高的 K₂O(1.67%~2.57%)、 Na₂O(1.16%~3.92%)、Al₂O₃(14.88%~19.24%) 以及TiO₂(0.64%~1.44%)含量,中等大小的 MgO (3.03%~7.75%)、FeO(5.90%~8.53%)及CaO (4.42%~6.10%)含量,在Zr/TiO₂-Nb/Y分类命名 图解上分别落在了亚碱性玄武岩、玄武安山岩(图 7).这些火山岩随SiO₂含量增加,TiO₂、FeO与其呈 负相关关系,其余氧化物的相关关系不明显.Na₂O 和 K₂O 与 SiO₂相关性较差,可能与后期的蚀变有 关,与镜下所观察到的蚀变对应.原始地幔标准化 微量元素蛛网图显示,这套火山岩富集 Rb、Ba、Th、 U、Sr 而相对亏损 Nb、Ta 和Ti,样品 SQ4-1和 SQ4-





Fig.4 LA-ICP-MS zircon U-Pb age concordia diagrams, weighted mean ages, and CL images of zircon for the Carboniferous volcanic rocks from eastern Tianshan

3显示为Sr正异常,且具有较高的CaO含量(图8a). 其球粒陨石标准化稀土配分图显示该套火山岩富 集轻稀土元素,(La/Yb)_N值介于2.99~5.30,Eu异 常不明显(Eu*=0.93~1.03)(图 8b).

晚石炭世火山岩具有较低的SiO₂含量 (41.18%~50.78%),低K₂O(0.09%~1.57%)和



图 5 东天山觉罗塔格构造带石炭纪火山岩捕获继承锆石 LA-ICP-MS U-Pb 谐和年龄图及锆石阴极发光照片

Fig.5 LA-ICP-MS zircon U-Pb age concordia diagrams and CL images of the inherited zircons for the Carboniferous volcanic rocks from eastern Tianshan



图6 东天山觉罗塔格构造带石炭纪火山岩捕获继承锆石 年龄分布频率图(a),中天山变质基底锆石年龄分布频 率图(b)

Fig.6 Relative probability diagrams (a) of the inherited zircon ages for the Carboniferous volcanic rocks from eastern Tianshan, combining probability density distributions and histograms; distribution of zircon U-Pb ages of central Tianshan (b)

图b据Maetal.(2012)

Na₂O(2.19%~5.54%)含量,高TiO₂(0.96%~ 2.31%) 含量,还具有分布范围较大的 MgO $(2.93\% \sim 8.34\%)$, FeO, $(1.75\% \sim 10.42\%)$, CaO $(5.94\% \sim 16.41\%)$ 及Al₂O₃(12.63% ~18.12%)含 量.晚石炭世这套火山岩在AFM图解上分别落入 拉斑玄武岩系列和钙碱性系列两个区域(图7b), 在球粒陨石标准化稀土配分图上也显示出两种不 同的配分模式(图 8d),一种显示为平坦的稀土配 分模式,无明显的轻稀土富集((La/Yb)_N=0.75~ 2.12),与N-MORB很相似,另一部分为轻稀土富 集型((La/Yb)_N=4.07~6.26),据此本文将晚石 炭世火山岩分为两种类型:I型和II型,I型火山 岩具有与N-MORB相似的特征,而II型具有与岛 弧玄武岩相似的特征.原始地幔标准化微量元素 蛛网图显示II型火山岩具有比I型更加富集的 Ra、Ba、Th、U、Nb、Ta、Zr及Hf, 且Nb、Ta亏损 不明显,I型火山岩主要显示为Nb、Ta、Zr及Hf 的相对亏损(图 8c).

4.3 全岩 Sr-Nd 同位素组成

该区域石炭纪火山岩全岩 Sr-Nd 同位素分析结 果见附表 3,本文分别将早石炭世火山岩形成年龄 336 Ma 和晚石炭世火山岩形成年龄 320 Ma代入计 算同位素初始值.早石炭世火山岩样品具有一致的 $\epsilon_{Nd}(t)值(+5.30~+6.22),但^{87}Sr/^{86}Sr 初始值变化$ 范围较大,介于0.703 234~0.704 337.从前人已发表的数据来看,该套早石炭世火山岩⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 初始 $值变化范围很大,而 <math>\epsilon_{Nd}(t)$ 值较一致,说明该套火山 岩在岩浆演化过程中遭受到了不同程度的地壳混 染. 而晚石炭世火山岩 I 型和 II 型具有相似



图7 东天山觉罗塔格构造带石炭纪火山岩 Nb/Y vs. Zr/TiO2命名图解(a)和AFM分类图解(b)

Fig.7 Nb/Y vs. Zr/TiO₂ diagram (a) and AFM (Na₂O+K₂O-FeO_t-MgO) diagram (b) for classification for the Carboniferous volcanic rocks from eastern Tianshan



图 8 东天山觉罗塔格构造带石炭纪火山岩微量元素原始地幔标准化配分图解及稀土元素球粒陨石标准化配分图解 Fig.8 N-MORB-normalized spidergram and REE distributions for the Carboniferous volcanic rocks from eastern Tianshan 标准化值据 Sun and McDonough (1989); Okinawa Trough BABB、Mariana 弧、Mariana Trough BABB来自于 Shinjo *et al.* (1999)、 Pearce *et al.* (2005)



图 9 东天山觉罗塔格构造带石炭纪火山岩初始 Sr-Nd 同位 素图解

Fig.9 Initial Sr-Nd isotope data for the Carboniferous volcanic rocks from eastern Tianshan

二叠纪塔里木玄武岩数据来自 Tang et al.(2011);东西准噶尔和阿尔泰数据来自 Su et al.(2012)、王方正等(2002)

的 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 初始值(I型:(⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_i=07047~ 0.7052;II型:(⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_i=0.7038~0.7058),不一 致的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值(I型: $\epsilon_{Nd}(t)$ =+9.2~+9.4;II型: $\epsilon_{Nd}(t)$ =+2.6~+5.6),I型火山岩 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值较高,源 区更靠近MORB,II型火山岩 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值较低,源区相 对富集一些.在 $\epsilon_{Nd}(t)$ -(⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_i图解中,早石炭世 火山岩样品落入亏损地幔端元,均显示为亏损地幔 的源区特征,但⁸⁷Sr/⁸⁶Sr初始值变化较大,反映地壳 混染的信息(图9).晚石炭世I型火山岩 $\epsilon_{Nd}(t)$ 与 MORB一致,显示为非常亏损的同位素信息,但可 能遭受了地壳的同化混染作用;II型火山岩样品落 入亏损地幔端元,显示为亏损地幔的源区特征.

5 讨论

5.1 觉罗塔格构造带石炭纪火山岩岩石成因

5.1.1 同化混染与分离结晶 该区域火山岩捕获的大量继承锆石显示早石炭世火山岩和晚石炭世火山岩在岩浆演化过程中均遭受到了不同程度的地壳混染,少量的地壳混染会导致 Nb、Ta 负异常但同时也会显示出 Zr-Hf 正异常(Zhao and Zhou, 2007),早石炭世火山岩微量元素蛛网图上显示 3个样品出现了明显的 Nb、Ta 负异常与 Zr-Hf 正异常,说明这几个火山岩遭受到了地壳混染.幔源岩浆岩石具有较低的 Th/Ce(0.02~0.05)和 Th/La(约0.12;Sun and McDonough, 1989),而大陆地壳具有较高的 Th/Ce(约0.15)和 Th/La(约0.3;Plank, 2005),这 3个火山岩样品 Th/Ce(0.08~0.19)和 Th/La(0.17~0.29)介于二者之间也说明该套火山

岩在岩浆演化过程中有适度的地壳混染.变化范围 较大的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr初始值和个别基性火山岩(SQ3-2 和1274-3)具有较高的K₂O含量也支持这一观点. 与早石炭世火山岩不同的是,晚石炭世火山岩Zr-Hf正异常并不明显,具有与幔源岩石相似的低Th/ Ce(<0.06)和Th/La(0.04~0.14),暗示晚石炭世火 山岩在岩浆演化过程中地壳混染并不明显.

早石炭世火山岩较低的 Mg[#](43.7~67.1,原始 岩浆 Mg[#]在 70~80)和 Cr、Ni含量,说明他们并不是 原始岩浆,而是经过了分离结晶作用形成的岩浆. SiO₂含量与 TiO₂、FeO 明显的负相关关系以及负的 Eu 异常说明 Ti-Fe 氧化物和斜长石的分离结晶作 用,Sr 正异常的差异可能暗示了斜长石分离结晶作 用强弱不同,而镜下所观察到的单斜辉石和橄榄石 斑晶和 SiO₂与 Cr、Ni的负相关关系也说明了少量的 橄榄石和单斜辉石的分离结晶作用.晚石炭世 I型 火山岩具有高的 Mg[#](61~84)和 Cr、Ni含量说明他 们来自于原始岩浆,在岩浆演化过程中没有发生明 显的结晶分异作用,各氧化物与 SiO₂也未表现出明 显的相关关系也说明了这一点.而 II型火山岩 Mg[#] 较低(43~49)显示其并不是原始岩浆而是来自于经 过了分离结晶作用形成的岩浆.

5.1.2 火山岩源区特征 早石炭世火山岩属于钙碱性系列,富集大离子亲石元素和轻稀土元素,相对亏损高场强元素(图8a、8b),显示为岛弧玄武岩特征,同位素特征显示该套火山岩的源区来自于亏损地幔,因此其源区可能来自于俯冲带被俯冲物质交代过的地幔楔.除此之外,该套火山岩还具有较高的Th/Zr比值和较低的Nb/Zr比值,在Th/Zr-Nb/Zr图解上,显示为流体富集趋势(图10a);在Th/Yb-Ta/Yb图解上,该套火山岩

落入钙碱性玄武岩区域,并且与Okinawa海槽玄 武岩区域重合(图10b),暗示其源区来自于俯冲 带之上被流体交代过的地幔楔.

晚石炭世火山岩I型属于拉斑玄武系列,微量 元素蛛网图显示其轻微富集大离子亲石元素,而 稀土元素配分图解显示其为 N-MORB 型稀土配 分模式,Sr-Nd同位素特征也显示其来源于更亏损 的地幔;II型火山岩属于钙碱性系列,富集大离子 亲石元素,亏损高场强元素,与早石炭世火山岩相 似,显示出与岛弧玄武岩相似的特征,Sr-Nd同位 素特征显示其来源于亏损地幔源区.晚石炭世I 型和II型火山岩的共同存在,可能暗示了一个比 较复杂的岩浆源区.在Th/Zr-Nb/Zr图解上,晚石 炭世 I 型火山岩具有高 Nb/Zr、低 Th/Zr 特征,显 示为熔体交代趋势(图 10a);而晚石炭世 II 型火山 岩具有低 Nb/Zr、高 Th/Zr 的特征,显示为流体交 代趋势.在Th/Yb-Ta/Yb图解上,I型火山岩落入 MORB区域,与Mariana弧后玄武岩相似,显示为 亏损的源区特征,而II型火山岩落入其上方Okinawa 海槽玄武岩与 Mariana 弧后玄武岩过渡区 域,显示为比较富集的源区特征(图 10b).

前人研究认为,弧后盆地玄武岩具有 MORB 和 IAB两种特征的玄武岩,他们是在减压并且在有俯 冲流体加入的条件下,地幔不同程度的熔融所形 成,它既不同于 MORB 单纯式的减压熔融,也不同 于 IAB 有大量的流体加入的熔融(Taylor and Martinez, 2003).在Ba/Yb-Nb/Yb 图解中(图 11a),弧后 盆地玄武岩(BABB)一般落入区域上的 MORB 和 其相邻的岛弧的过渡区域,例如 Mariana BABB (Gribble *et al.*, 1998)、Okinawa BABB(Shinjo *et al.*, 1999)、Lau BABB(Falloon and Danyushevsky,



Fig.10 Nb/Zr vs. Th/Zr (a) and Th/Yb vs. Ta/Yb (b) for the Carboniferous volcanic rocks from eastern Tianshan Mariana Trough BABB, Okinawa Trough BABB 区域来源于 Pearce *et al.*(2005), Shinjo *et al.*(1999)



Fig.11 Plots of Ba/Yb vs. Nb/Yb (a) and Ba/Nb vs. Th/Nb (b) for the Carboniferous volcanic rocks from eastern Tianshan Okinawa Trough BABB, Mariana 弧、Mariana Trough BABB区域来自于 Shinjo *et al.*(1999)和 Pearce *et al.*(2005)

2000)以及 Manus BABB(Johnson et al., 1979).在 Ba/Nb-Th/Nb图解中(图11b), 觉罗塔格构造带石 炭纪火山岩落入了 MORB 和弧火山岩的过渡区域. 早石炭世火山岩与Okinawa海槽 BABB 相似,具有 比晚石炭世火山岩更高的 Ba/Yb 比值.晚石炭世 I 型火山岩全部投入 Mariana BABB 区域, 而 II 型火 山岩投入 Okinawa BABB 和 Mariana BABB 的过渡 区域.一般来说,如果玄武岩样品来自于弧后盆地 的扩张中心,他们就会投入到 MORB 阵列;如果弧 后扩张轴捕获了弧物质或者来自于曾经受俯冲影 响的地幔,这样的火山岩样品就会投入到弧玄武岩 的区域(Pearce et al., 2005).一些不受结晶分离作 用影响的元素比值能够区别出这种俯冲组分,例如 Ba/Th、Ba/Nb(浅俯冲物质)、Th/Nb(深俯冲物质) (Fretzdorff et al., 2002). 在 Ba/Nb-Th/Nb 图 解中 (图11b),早石炭世火山岩既受到浅部俯冲物质的 影响又受到深部俯冲物质的影响,而晚石炭世火山 岩仅仅受到了深部俯冲物质的影响.这种不同的趋 势可能说明了早石炭世火山岩继承了早期岛弧火 山岩的成分,而晚石炭世火山岩来源于更深的部位. 在La/Yb-Sm/Yb图解中,觉罗塔格构造带早石炭 世火山岩数据落在尖晶石一石榴石橄榄岩相区域, 部分熔融程度大概在5%~20%,岩浆来自尖晶石 二辉橄榄岩和石榴石二辉橄榄岩过渡带(图12),岩 浆源深度约为80km.而晚石炭世火山岩主体落在



图 12 东天山觉罗塔格构造带石炭纪火山岩 Sm/Yb-Sm 变 化图解

Fig.12 Plots of Sm/Yb-Sm diagram for the Carboniferous volcanic rocks from eastern Tianshan

尖晶石-石榴石橄榄岩相区域,部分熔融程度大概 在10%~30%;少数火山岩落在尖晶石橄榄岩相 区,部分熔融程度大概在5%~10%,其岩浆源区深 度小于80 km.

总体而言,早石炭世火山岩来自于被俯冲流体交代过的地幔物质,并且受到的浅部俯冲物质和深部俯冲物质的共同改造,而晚石炭世火山岩来自于被熔体和流体都作用过的并且和N-MORB相似的地幔源区.

5.2 觉 罗 塔 格 构 造 带 石 炭 纪 火 山 岩 形 成 的 构 造 背 景

前人研究资料表明,弧后盆地玄武岩具有从 MORB向岛弧玄武岩过渡的性质(Saunders and Tarney, 1984),例如 Mariana、East Scotia、Lau、 Manus 盆地和 Okinawa 海槽(Fretzdorff *et al.*, 2002; Sinton *et al.*, 2003).弧后盆地玄武岩(BABB)的地 幔源区由于受到俯冲流体的影响而不同程度地富 集大离子亲石元素和轻稀土元素,亏损高场强元素. 一般来说,弧后盆地的打开分为两个阶段,初始的 裂开和后期的洋底扩张,弧后盆地玄武岩的类型则 取决于该岩石产生于弧后盆地演化的哪个阶段 (Abu El-Enen, 2008).弧后盆地扩张的早期阶段以 产生似岛弧玄武岩为特征,海底扩张阶段则以产生 MORB型玄武岩为特征,陆缘弧后盆地玄武岩一般 显示出 E-MORB 的特征,比如 Okinawa Trough BABB(Shinjo *et al.*, 1999),而发育在大洋岛弧之上 的弧后盆地玄武岩显示为 N-MORB 的特征,比如 Mariana Trough BABB(Hawkins, 1995).

觉罗塔格构造带早石炭世火山岩与弧火山岩 很相似,而晚石炭世火山岩则以MORB型(I型) 为主,且具有与陆缘弧BABB相似的特征(图8). 在Th/Yb-Ta/Yb图解中,早石炭世火山岩落入与 Okinawa Trough BABB相似的源区,晚石炭世火 山岩落入与 MORB源区,与 Mariana Trough BABB相似(图10b).在Y/15-La/10-Nb/8图解和 Hf/3-Th-Nb/16图解中,早石炭世火山岩落入陆 缘弧玄武岩区域(CAB),而晚石炭世火山岩落入 I型 MORB区域,II型落入陆缘弧玄武岩区域 (CAB)(图13).早石炭世火山岩具有比晚石炭世 火山岩更高的大离子亲石元素和轻稀土元素丰度,并且从早石炭世到晚石炭世存在着由 CAB 向 MORB 过渡的趋势,这种岩浆源区的不同可能源 于岩浆源区对俯冲组分捕获的量级差异.

区域上来说,前人研究表明,泥盆纪发育典型 的岛弧火山岩(早泥盆世大南湖组火山岩、中泥盆 世头苏泉组火山岩及晚泥盆世康古尔塔格组火山 岩)和侵入岩组合(镜儿泉岩体、四顶黑山岩体及碱 水泉岩体等),年龄分布在389~369 Ma之间,指示 本区在泥盆纪时期存在明显的岛弧岩浆活动;而晚 泥盆世至早石炭世之交发育一套具有岛弧特征并 局部区域具有埃达克岩特征的岩石(小热泉子组火 山岩及阿奇山组火山岩)(苏春乾等,2009)以及土 屋埃达克质的花岗斑岩体(王强等,2006),这些埃 达克质岩来源于天山洋向北俯冲的洋壳部分熔融 交代地幔楔橄榄岩所产生.早石炭世晚期至晚石炭 世早期发育具有岛弧特征的这套火山岩(雅满苏组 火山岩、土古土布拉克组火山岩),被认为形成于弧 后盆地初期;到了晚石炭世中晚期的这套 MORB 型 火山岩(梧桐窝子组火山岩、晚石炭世I型火山岩), 较多的学者认为其形成于弧后盆地环境,也有学者 认为该带为天山洋闭合后的缝合带(曹锐等, 2012),白云来(1994)认为其形成于被动陆缘之上 的有限的洋盆.除此之外,该组火山岩地层与康古 尔塔格韧性剪切带形影相随呈近东西向的条带状 分布,该韧性剪切带主体形成时间为290 Ma左右.



Fig.13 Tectonic discriminant diagrams of La/10-Nb/8-Y/15 (a) and Hf/3-Th-Nb/16 (b) for the Carboniferous volcanic rocks from eastern Tianshan

N-MORB. N型大洋中脊玄武岩; E-MORB. E型大洋中脊玄武岩和板内玄武岩; WPA. 板内碱性玄武岩; CAB. 钙碱性玄武岩; IAB. 岛弧拉斑 玄武岩; BABB. 弧后盆地玄武岩; WPB. 板内玄武岩 这条带的一个突出特点是韧性剪切、岩浆活动、变质作用、混合岩化和成矿作用的密切耦合,东西延伸可达1000km.弧后盆地闭合带是造山带中的岩石圈薄弱地带,剪切带的形成与生长可以发生在那些比较热而年轻的岩石上.野外剪切构造和其形成的年龄关系表明,该套MORB型的火山岩浆活动主体发生在大规模韧性剪切之前,并一直持续到剪切变形之后(顾连兴等,2000),期间伴随着一系列韧性剪切带型金矿的成矿作用(石英滩金矿,288 Ma; 西凤山金矿,272 Ma;马庄山金矿,298 Ma);而在二叠纪其主体显示为后碰撞特征,区域上发育碱性火山岩及侵入岩组合均有报道.

结合觉罗塔格构造带前人已取得资料和石炭 纪火山岩的地球化学特征及野外关系,笔者认为, 该区域至少泥盆纪至早石炭世早期为陆缘弧环境, 早石炭世中期进入弧后盆地早期伸展阶段(约 336 Ma,弧火山岩为特征),至晚石炭世早期弧后 盆地初步打开(约320 Ma,弧火山岩与MORB型火 山岩共存为特征),晚石炭世晚期到早二叠世弧后 盆地逐渐闭合(约291 Ma,以发育大型的韧性剪切 带,伴随岩浆作用、变质作用及大规模的成矿作用 为特征).而在早二叠世中晚期,整个区域上逐渐进 入后碰撞环境,以大量的碱性火山岩和侵入岩组合 为特征.由此可见,天山洋的闭合时间大致在晚石 炭世前后,这与区域上的研究成果(约310 Ma蛇绿 岩,Qin et al., 2011)一致.

觉罗塔格构造带的基底属性一直是该区域地 质问题争论的焦点.本文在觉罗塔格构造带石炭 纪火山岩中发现的大量捕获锆石的年龄谱系与中 天山地块显示为相似的特征(图6).这可能暗示了 觉罗塔格构造带与中天山地块至少在晚古生代时 期经历了同样的构造-岩浆演化事件(Ma et al., 2012).并且,徐学义等(2014)报道了觉罗塔格构造 带内双岔沟花岗岩包体云母片麻岩的年龄区间为 1.8~2.5 Ga;苏春乾等(2008)也报道了阿其克库都 克断裂以北 922 Ma 的变质核杂岩的年龄.这些地 质事实都说明觉罗塔格构造带与中天山是一个整 体,也具有较老的结晶基底,且在后期经历了同样 的构造一岩浆事件,且阿其克库都克并不具有板块 划分的意义,野外也可观察到石炭世火山岩是分布 在阿其克库都克断裂两侧而不是仅出露于断裂以 北. 而 700~1 000 Ma 的锆石年龄可能代表了与 Rodinia超大陆裂解的有关事件.

因此本文认为在晚古生代(至少不早于泥盆 纪)中天山陆块为天山洋向北俯冲消减的活动大 陆边缘,石炭纪中天山的陆缘弧上发育了一个不 成熟的弧后盆地并且于晚石炭世晚期到早二叠世 早期闭合.可能是为了回应天山洋闭合末期应力 松弛下的一系列俯冲板片折返,在石炭纪觉罗塔 格弧后盆地有两个主要形成阶段:即早石炭世晚 期的初始裂开和晚石炭世早期的弧后扩张.这表 明天山洋的俯冲最终结束阶段可能为晚石炭世末 期,包括主大洋和弧后盆地最终关闭,而最终关闭 的位置很可能位于中天山以南.

6 结论

中亚造山带西南缘东天山觉罗塔格造山带 广泛发育石炭纪火山岩,这些石炭纪火山岩的成 因和构造历史一直是该区域地质问题争论的焦 点.了解东天山造山带的形成和演化,对于重建 中亚造山带西南缘古生代构造格架具有重要意 义.本文通过对东天山觉罗塔格造山带石炭纪基 性火山岩详细的岩石学、地球化学、锆石 U-Pb 年 代学和 Sr-Nd 同位素研究,结合区域上已有的研 究成果,获得了如下认识:

(1)东天山觉罗塔格造山带石炭纪基性火山 岩分为两期爆发,早期爆发时间为336 Ma,晚期 爆发时间为320 Ma.早期336 Ma基性火山岩由 玄武岩、玄武安山岩及同成分的火山碎屑岩组 成,显示出弧火山岩属性;晚期320 Ma基性火山 岩主要由玄武岩和玄武安山岩组成,包括I型火 山岩和II型火山岩,I型显示出大洋中脊玄武岩 属性,II型显示出弧玄武岩特征.

(2)石炭纪基性火山岩中发现的大量的捕获锆石(371~3106 Ma)年龄谱系与中天山地块显示为相似的特征,表明它们在石炭纪之前可能同属一个板块,也指示早古生代地壳可能参与了成岩过程.

(3)该区域石炭纪火山岩与现今存在的Okinawa Trough 和 Mariana Trough 弧 后 盆 地 玄 武 岩 (BABB)很相似,从弧玄武岩向洋中脊玄武岩的演 变,反映了石炭纪中天山北部弧后盆地的发展.因 此笔者推断早石炭世火山岩为弧后盆地初始裂开 阶段的产物,而晚石炭世火山岩为弧后盆地弧后扩 张阶段的产物,可晚石炭世火山岩为弧后盆地弧后扩 般阶段的产物,可晚石炭世水山岩为弧后盆地弧后扩 终关闭,而最终关闭的位置很可能位于中天山以南.

致谢: 衷心感谢两位审稿人及编委对本文提出 的修改建议以及地质过程与矿产资源实验室的老 师在样品测试中给予的帮助!

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

References

- Abu El-Enen, M. M., 2008. Geochemistry and Metamorphism of the Pan-African Back-Arc Malhaq Volcano-Sedimentary Neoproterozoic Association, W. Kid Area, SE Sinai, Egypt. Journal of African Earth Sciences, 51(4): 189– 206. https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2008.01.004
- Bai, Y.L., 1994. Geotectonic Setting of Wutongwozi Group and Its Geochemical Proofs in Eastern Xinjiang. *Xinjiang Geol*ogy, 12(2):106-114 (in Chinese with English abstract).
- Buslov, M. M., Watanabe, T., Fujiwara, Y., et al., 2004. Late Paleozoic Faults of the Altai Region, Central Asia: Tectonic Pattern and Model of Formation. *Journal of* Asian Earth Sciences, 23(5): 655-671. https://doi.org/ 10.1016/s1367-9120(03)00131-7
- Cao, R., Muhetaer, Z., Chen, B., et al., 2012. Geochemistry and Sr-Nd Isotopic Characteristics of the Carboniferous Volcanic Rocks from the Eastern Tianshan Suture Zone and Tectonic Implications. *Journal of Jilin University* (*Earth Science Edition*), 42(2): 400-409 (in Chinese with English abstract).
- Charvet, J., Shu, L. S., Laurent-Charvet, S., et al., 2011. Palaeozoic Tectonic Evolution of the Tianshan Belt, NW China. Science China Earth Sciences, 54(2): 166– 184. https://doi.org/10.1007/s11430-010-4138-1
- Falloon, T. J., Danyushevsky, L.V., 2000. Melting of Refractory Mantle at 1.5, 2.0 and 2.5 GPa under Anhydrous and H₂O-Undersaturated Conditions: Implications for the Petrogenesis of High-Ca Boninites and the Influence of Subduction Components on Mantle Melting. *Journal of Petrology*, 41(2): 257–283. https://doi.org/10.1093/petrology/41.2.257
- Fretzdorff, S., Livermore, R.A., Devey, C.W., et al., 2002. Petrogenesis of the Back-Arc East Scotia Ridge, South Atlantic Ocean. *Journal of Petrology*, 43(8): 1435– 1467. https://doi.org/10.1093/petrology/43.8.1435
- Gribble, R. F., Stern, R. J., Newman, S., et al., 1998. Chemical and Isotopic Composition of Lavas from the Northern Mariana Trough: Implications for Magmagenesis in Back - Arc Basins. *Journal of Petrology*, 39(1): 125-154. https://doi.org/10.1093/petroj/39.1.125
- Gu, L.X., Hu, S.X., Yu, C.S., et al., 2000. Carboniferous

Volcanites in the Bogda Orogenic Belt of Eastern Tianshan: Their Tectonic Implications. *Acta Petrologica Sinica*, 16(3):305-316 (in Chinese with English abstract).

- Hawkins, J. W., 1995. The Geology of the Lau Basin, In: Taylor, B., ed., Back-Arc Basins: Tectonics and Magmatism. Plenum Press, New York.
- Hou, T., Zhang, Z. C., Santosh, M., et al., 2014. Geochronology and Geochemistry of Submarine Volcanic Rocks in the Yamansu Iron Deposit, Eastern Tianshan Mountains, NW China: Constraints on the Metallogenesis. *Ore Geology Reviews*, 56: 487-502. https://doi.org/ 10.1016/j.oregeorev.2013.03.008
- Jahn, B. M., Griffin, W. L., Windley, B., 2000. Continental Growth in the Phanerozoic: Evidence from Central Asia. *Tectonophysics*, 328(1-2): 7-10. https://doi.org/ 10.1016/s0040-1951(00)00174-8
- Johnson, R. W., Mutter, J. C., Arculus, R. J., 1979. Origin of the Willaumez - Manus Rise, Papua New Guinea. *Earth and Planetary Science Letters*, 44(2): 247-260. https://doi.org/10.1016/0012-821x(79)90173-0
- Khain, E., 2003. The Palaeo-Asian Ocean in the Neoproterozoic and Early Palaeozoic: New Geochronologic Data and Palaeotectonic Reconstructions. *Precambrian Research*, 122(1-4): 329-358. https://doi.org/10.1016/ s0301-9268(02)00218-8
- Luo, T., Chen, J.P., Liao, Q.A., et al., 2018. Geochronology, Geochemistry and Geological Significance of the Late Carboniferous Bimodal Volcanic Rocks in the Balikun Area, Eastern Tianshan. *Earth Science*, 43(9): 3018-3035 (in Chinese with English abstract).
- Luo, T., Liao, Q.A., Chen, J.P., et al., 2012. LA-ICP-MS Zircon U-Pb Dating of the Volcanic Rocks from Yamansu Formation in the Eastern Tianshan, and Its Geological Significance. *Earth Science*, 37(6): 1338-1352 (in Chinese with English abstract).
- Ma, X. X., Shu, L. S., Santosh, M., et al., 2012. Detrital Zircon U - Pb Geochronology and Hf Isotope Data from Central Tianshan Suggesting a Link with the Tarim Block: Implications on Proterozoic Supercontinent History. *Precambrian Research*, 206-207: 1-16. https:// doi.org/10.1016/j.precamres.2012.02.015
- Pearce, J. A., Stern, R. J., Bloomer, S. H., et al., 2005. Geochemical Mapping of the Mariana Arc-Basin System: Implications for the Nature and Distribution of Subduction Components. *Geochemistry*, *Geophysics*, *Geosystems*, 6 (7): 1-27. https://doi.org/10.1029/2004gc000895
- Plank, T., 2005. Constraints from Thorium/Lanthanum on Sediment Recycling at Subduction Zones and the Evolu-

tion of the Continents. *Journal of Petrology*, 46(5): 921-944. https://doi.org/10.1093/petrology/egi005

- Qin, K. Z., Su, B. X., Sakyi, P. A., et al., 2011. SIMS Zircon U-Pb Geochronology and Sr-Nd Isotopes of Ni-Cu-Bearing Mafic-Ultramafic Intrusions in Eastern Tianshan and Beishan in Correlation with Flood Basalts in Tarim Basin (NW China): Constraints on a Ca. 280 Ma Mantle Plume. American Journal of Science, 311(3): 237-260. https://doi.org/10.2475/03.2011.03
- Saunders, A. D., Tarney, J., 1984. Geochemical Characteristics of Basaltic Volcanism within Back-Arc Basins. *Geological Society*, *London*, Special Publications, 16(1): 59-76. https://doi.org/10.1144/gsl.sp.1984.016.01.05
- 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: Solid Earth*, 104(B5): 10591-10608. https://doi. org/ 10.1029/1999jb900040
- Shu, L. S., Wang, B., Zhu, W. B., et al., 2010. Timing of Initiation of Extension in the Tianshan, Based on Structural, Geochemical and Geochronological Analyses of Bimodal Volcanism and Olistostrome in the Bogda Shan (NW China). International Journal of Earth Sciences, 100(7): 1647-1663. https://doi.org/10.1007/ s00531-010-0575-5
- Sinton, J. M., Ford, L.L., Chappell, B., et al., 2003. Magma Genesis and Mantle Heterogeneity in the Manus Back-Arc Basin, Papua New Guinea. *Journal of Petrology*, 44(1): 159-195. https://doi.org/10.1093/petrology/44.1.159
- Song, A.J., Zhu, Z.X., Shi, Y., et al., 2006. SHRIMP U-Pb Dating of Zircons from the Tugutubulake Formation in the Western Segment of the Aqikekuduke Fault in the East Tianshan, Xinjiang, China. *Geological Bulletin of China*, 25(8): 953-956 (in Chinese with English abstract).
- Su, C. Q., Jiang, C. Y., Xia, M. Z., et al., 2008. Zircon SHRIMP U-Pb Dating from Granite of the Metamorphic Core Complex System in Jueluotage Tectonic Belt and Its Geological Significance. *Acta Petrologica Sinica*, 24 (12):2789-2799 (in Chinese with English abstract).
- Su, C.Q., Jiang, C.Y., Xia, M.Z., et al., 2009. Geochemistry and Zircons SHRIMP U-Pb Age of Volcanic Rocks of Aqishan Formation in the Eastern Area of North Tianshan, China. Acta Petrologica Sinica, 25(4): 901-915 (in Chinese with English abstract).
- Su, Y. P., Zheng, J. P., Griffin, W. L., et al., 2012. Geochemistry and Geochronology of Carboniferous Volcanic

Rocks in the Eastern Junggar Terrane, NW China: Implication for a Tectonic Transition. *Gondwana Research*, 22(3-4): 1009-1029. https://doi.org/10.1016/j.gr.2012.01.004

- 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
- Tang, D.M., Qin, K.Z., Li, C.S., et al., 2011.Zircon Dating, Hf-Sr-Nd-Os Isotopes and PGE Geochemistry of the Tianyu Sulfide-Bearing Mafic-Ultramafic Intrusion in the Central Asian Orogenic Belt, NW China. *Lithos*, 126(1-2): 84-98. https://doi. org/10.1016/j. lithos.2011.06.007
- Taylor, B., Martinez, F., 2003. Back-Arc Basin Basalt Systematics. *Earth and Planetary Science Letters*, 210 (3-4): 481-497. https://doi.org/10.1016/s0012-821x (03)00167-5
- Wang, F.Z., Yang, M.Z., Zheng, J.P., 2002. Geochemical Characteristics and Geological Environment of Basement Volcanic Rocks in Luliang, Central Region in Junggar Basin. Acta Petrologica Sinica, 18(1):9-16 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Q., Zhao, Z.H., Xu, J.F., et al., 2006. Carboniferous Adakite-High-Mg Andesite-Nb-Enriched Basaltic Rock Suites in the Northern Tianshan Area: Implications for Phanerozoic Crustal Growth in the Central Asia Orogenic Belt and Cu-Au Mineralization. Acta Petrologica Sinica, 22(1):11-30 (in Chinese with English abstract).
- Wu, C. W., Liao, Q.A., Li, Q.X., et al., 2008. The Late Carboniferous Volcanic Arc Rocks in Jueluotage Area, Eastern Tianshan, China. *Geological Science and Technology Information*, 27(6):29-36 (in Chinese with English abstract).
- Xiao, W. J., Huang, B. C., Han, C. M., et al., 2010. A Review of the Western Part of the Altaids: A Key to Understanding the Architecture of Accretionary Orogens. Gondwana Research, 18(2-3): 253-273. https://doi.org/10.1016/j.gr.2010.01.007
- Xu, X.Y., Li, R.S., Chen, J.L., et al., 2014. New Constrains on the Paleozoic Tectonic Evolution of the Northern Xinjiang Area. Acta Petrologica Sinica, 30(6):1521-1534 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, J. H., Zhou, M. F., 2007. Geochemistry of Neoproterozoic Mafic Intrusions in the Panzhihua District (Sichuan Province, SW China): Implications for Subduction-Related Metasomatism in the Upper Mantle. *Precambrian Research*, 152(1-2): 27-47. https://doi.org/10.1016/

j.precamres.2006.09.002

Zhang, Y., Pe-Piper, G., Piper, D.J.W., et al., 2013. Early Carboniferous Collision of the Kalamaili Orogenic Belt, North Xinjiang, and Its Implications: Evidence from Molasse Deposits. *Geological Society of America Bulle*tin, 125(5-6): 932-944.

附中文参考文献

- 白云来,1994. 新疆东部梧桐窝子群的大地构造背景及其地 球化学论证. 新疆地质,12(2):106-114.
- 曹锐,木合塔尔·扎日,陈斌,等,2012.东天山板块缝合带石炭纪火山岩地球化学和Sr-Nd同位素特征及其大地构造意义.吉林大学学报(地球科学版),42(2):400-409.
- 顾连兴, 胡受奚, 于春水, 等, 2000. 东天山博格达造山带石炭纪火山岩及其形成地质环境. 岩石学报, 16(3): 305-316.
- 罗婷, 陈继平, 廖群安, 等, 2018. 东天山巴里坤地区晚石炭 世双峰式火山岩年代学、地球化学及其构造意义. 地球 科学, 43(9): 3018-3035.
- 罗婷,廖群安,陈继平,等,2012.东天山雅满苏组火山岩LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年及其地质意义.地球科学,37

(6): 1338-1352.

- 宋安江,朱志新,石莹,等,2006.东天山阿其克库都克断裂西 段土古土布拉克组锆石 SHRIMP U-Pb测年.地质通 报,25(8):953-956.
- 苏春乾,姜常义,夏明哲,等,2008.新疆觉罗塔格构造带新元 古代变质核杂岩锆石 U-Pb 年龄与地质意义.岩石学 报,24(12):2789-2799.
- 苏春乾,姜常义,夏明哲,等,2009. 北天山东段阿奇山组火山 岩的地球化学特征及锆石 U-Pb 年龄. 岩石学报,25(4): 901-915.
- 王方正,杨梅珍,郑建平,2002. 准噶尔盆地陆梁地区基底火 山岩的岩石地球化学及其构造环境. 岩石学报,18(1): 9-16.
- 王强,赵振华,许继峰,等,2006.天山北部石炭纪埃达克岩一 高镁安山岩一富Nb岛弧玄武质岩:对中亚造山带显生 宙地壳增生与铜金成矿的意义.岩石学报,22(1): 11-30.
- 吴春伟,廖群安,李奇祥,等,2008.东天山觉罗塔格地区晚石 炭世岛弧火山岩.地质科技情报,27(6):29-36.
- 徐学义,李荣社,陈隽璐,等,2014.新疆北部古生代构造演化 的几点认识.岩石学报,30(6):1521-1534.