

https://doi.org/10.3799/dqkx.2018.021



东准噶尔南缘两套泥盆纪火山岩地球化学特征 对比及其地质意义

赵浩¹, 廖群安^{1*}, 罗婷², 田锦明¹, 张孟¹, 王良玉³, 刘鸿飞¹

1. 中国地质大学地球科学学院, 湖北武汉 430074

2. 陕西省地质调查中心, 陕西西安 710054

3. 核工业二四三大队, 内蒙古赤峰 024006

摘要: 东准噶尔一直以来都是研究新疆北部古生代洋陆格局和构造演化热点地区之一。前人对东准噶尔南缘火山岩的研究较为薄弱, 关注点多在石炭纪火山岩源区及构造属性上, 对泥盆纪火山岩构造背景和岩浆演化过程缺乏认识。对卡拉麦里蛇绿岩北侧的泥盆系北塔山组和乌鲁巴斯套组火山岩的岩石学、地球化学和年代学特征进行了详细研究, 结果表明: 卡拉麦里北塔山组火山岩形成于早泥盆世晚期—中泥盆世早期(404 Ma), 具有一高钾、中钛、中铁和低铝的特征, 微量元素显示其富集LREE、LILE和亏损Nb、Ta, 推测其形成于洋壳俯冲的陆缘弧环境, 源区为受过俯冲沉积物熔体和流体交代的亏损地幔楔; 而莫钦乌拉中泥盆统乌鲁巴斯套组火山岩具贫碱、低钾、低钛、高铝等特征, 显示为典型的岛弧火山岩特征, 同位素和微量元素特征显示其来源于俯冲消减板片流体交代的亏损地幔楔。综合两套火山岩的差异特征和区域地质背景, 推测中泥盆纪卡拉麦里山北向俯冲经历了由陆缘弧到岛弧的转变过程。

关键词: 东准噶尔; 卡拉麦里; 莫钦乌拉; 泥盆纪; 岛弧火山岩; 陆缘弧; 地球化学; 地质年代学。

中图分类号: P581; P588

文章编号: 1000-2383(2018)02-0371-18

收稿日期: 2017-10-13

Geochemistry and Geological Implications of Two Sets of Devonian Volcanic Rocks in South Margin of East Junggar

Zhao Hao¹, Liao Qun'an^{1*}, Luo Ting², Tian Jinming¹, Zhang Meng¹, Wang Liangyu³, Liu Hongfei¹

1. School of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. Geological Survey Center of Shaanxi Province, Xi'an 710054, China

3. No.243 Geological Party of Nuclear Industry, CNNC, Chifeng 024006, China

Abstract: The East Junggar has always been one of study hotspots on the Paleozoic ocean-continent transformation and tectonic evolution of the northern Xinjiang. However, studies of volcanic rocks in the south margin of the East Junggar are relatively weak since studies focus more on the origin and structural attributes of Carboniferous volcanic rocks, resulting in a lack of understanding of the tectonic setting and magmatic evolution of the Devonian volcanic rocks. Here we report a detailed petrologic, geochemical and geochronologic analyses on the Devonian volcanic rocks from the Beitashan and Wulubasitao Formations in the northern of the Karamaili ophiolite, to examine its formation environment and magma origin. Combining with the previous works in this region, our study reveals that the volcanic rocks of the Beitashan Formation from the Karamaili formed during the Early Devonian to Middle Devonian (404 Ma), which is characterized by intermediate-high K, Ti and Fe, low Al₂O₃ levels, enriched in LREE and LILE, and relatively depleted in HFSE (Nb, Ta). These rocks was probably formed in a continental mar-

基金项目: 中国地质调查局项目(Nos.12120114042801, DD20179607)。

作者简介: 赵浩(1993-), 男, 硕士研究生, 主要从事矿物学、岩石学、矿床学研究。ORCID: 0000-0002-4748-698X. E-mail: 1115155190@qq.com

*** 通讯作者:** 廖群安, ORCID: 0000-0003-1588-1309. E-mail: qanliao@cug.edu.cn

引用格式: 赵浩, 廖群安, 罗婷, 等, 2018. 东准噶尔南缘两套泥盆纪火山岩地球化学特征对比及其地质意义. 地球科学, 43(2): 371-388.

ginal arc construction environment and the magma is originated from a depleted mantle wedge metasomatized by melt and fluid from subduction sediment. For the Wulubasitao Formation, the volcanic rocks formed during the Middle Devonian (MoQinulla), characterized by poor alkali, low K, Ti, Fe and high Al, indicating typical island arc volcanic rocks. Isotope and trace element characteristics show it was derived from depleted mantle wedge metasomatized by fluid from subducted plate. According to the differences of two volcanic rocks features as well as regional geology, we speculate that the subduction of the Karamaili ocean transformed from continental marginal arc to island arc during the Middle Devonian.

Key words: East Junggar; Karamaili; MoQinulla; Devonian; island arc volcanic rock; continental marginal arc; geochemistry; geochronology.

0 引言

东准噶尔造山带位于准噶尔盆地东北缘,是衔接阿尔泰山和天山造山带的重要构造单元(肖序常等, 2006)。东准噶尔造山带内分布着两条重要的蛇绿岩带,即北部的扎乌河—阿尔曼泰蛇绿岩和南部的卡拉麦里蛇绿岩(何国琦和李茂松, 2001; 王宗秀等, 2003; 董连慧等, 2010),此外区内广泛出露有泥盆纪岛弧岩浆岩系和石炭纪一二叠纪后碰撞型火山岩和侵入岩(张招崇等, 2007; Zhang *et al.*, 2009; Su *et al.*, 2012; 王富明等, 2014; Liang *et al.*, 2016a)。一直以来,东准噶尔都是研究新疆北部古生代洋陆格局和构造演化热点地区之一。目前关于东准噶尔争论的焦点主要在于其构造属性、俯冲作用的时限和极性、岛弧岩浆类型等。大部分学者认为东准噶尔造山带主要是由晚古生代卡拉麦里洋盆的俯冲碰撞造山形成,主体由泥盆—石炭系岛弧火山岩和侵入岩构成(Xiao *et al.*, 2004)。近年来一些证据表明准噶尔造山带可能由早古生代和晚古生代两个不同时期的造山带组成(何国琦等, 2001; 李锦轶等, 2009; Long *et al.*, 2012; 徐学义等, 2014)。Xu *et al.* (2013) 和 Xu (2016) 对纸房地区奥陶纪—泥盆纪岩浆岩做了系统的研究,认为东准噶尔奥陶纪—泥盆纪发生一系列北向岛弧增生作用,并在早泥盆世发生一次弧后裂解,岛弧岩浆作用由安第斯型陆缘弧转变为大陆岛弧。而对于古洋盆的俯冲极性前人主要有北向俯冲(Zhang *et al.*, 2006, 2009; Xiao *et al.*, 2008; Yang *et al.*, 2011; Xu *et al.*, 2013; Li *et al.*, 2016)、南向俯冲(张海祥等, 2004; Long *et al.*, 2012)、双向俯冲(Su *et al.*, 2012; Liang *et al.*, 2016a)的观点。

东准噶尔 NWW 向卡拉麦里—莫钦乌拉断裂带北侧出露大量泥盆纪火山岩。前人对该火山岩的研究多集中在东准噶尔北缘老山口一带,为一套较为连续的岛弧火山岩系(袁超等, 2006; Zhang *et al.*, 2006, 2008, 2009; 柴凤梅等, 2012; Liang

et al., 2016a, 2016b)。而学者们对东准噶尔南缘火山岩研究较为薄弱,关注点多在石炭纪火山岩源区及构造属性上(Su *et al.*, 2010, 2012; Xiao *et al.*, 2011; Luo *et al.*, 2016; 罗婷等, 2016),对泥盆纪火山岩构造背景和岩浆演化过程缺乏认识。

本文对出露在东准噶尔卡拉麦里和莫钦乌拉地区两套泥盆纪火山岩进行了野外地质调查、全岩主微量、锆石 U-Pb 年代学和 Sr-Nd-Pb 同位素的研究,通过对比两套火山岩的差异探讨其所代表的构造环境和岩浆过程,从而初步探讨俯冲过程中岩浆的形成和演化。

1 区域地质概况及火山地质特征

中亚造山带是全球显生宙以来碰撞增生最强烈的地区之一,其北邻西伯利亚克拉通,南邻塔里木和华北克拉通(图 1a),是一系列大洋开启、板块俯冲消减、碰撞、大陆地壳的增厚和造山期后拉张的结果,由一系列岛弧、蛇绿岩、洋岛、增生楔和微陆块等构成(Sengor *et al.*, 1993; Buslov *et al.*, 2004; Jahn, 2004; Windley *et al.*, 2007; Xiao *et al.*, 2008; Jian *et al.*, 2010; Xiao and Santosh, 2014)。研究区位于中亚造山带西南部东准噶尔造山带南缘,卡拉麦里蛇绿岩以北(图 1b),泥盆纪火山岩归属于北塔山—野马泉岛弧火山岩带,该火山岩带呈 NWW-SNN 向产出,形成于卡拉麦里洋盆闭合阶段。卡拉麦里蛇绿岩沿 NWW 向卡拉麦里断裂展布,具有典型的 MORB 型蛇绿岩特征,根据蛇绿岩带内辉长岩、斜长花岗岩及沉积岩系的记录基本限定该蛇绿岩年龄在志留世—晚泥盆世(舒良树和王玉净, 2003; 唐红峰等, 2007; 胡朝斌等, 2014; Xu *et al.*, 2015)。洋盆在早泥盆世从拉张转为收缩,泥盆纪卡拉麦里蛇绿岩带以北为活动陆缘,以南为被动陆缘环境(李锦轶等, 1990, 2009),指示了卡拉麦里洋北向俯冲的特点。东准噶尔北缘—阿尔泰山南缘出露一套下泥盆

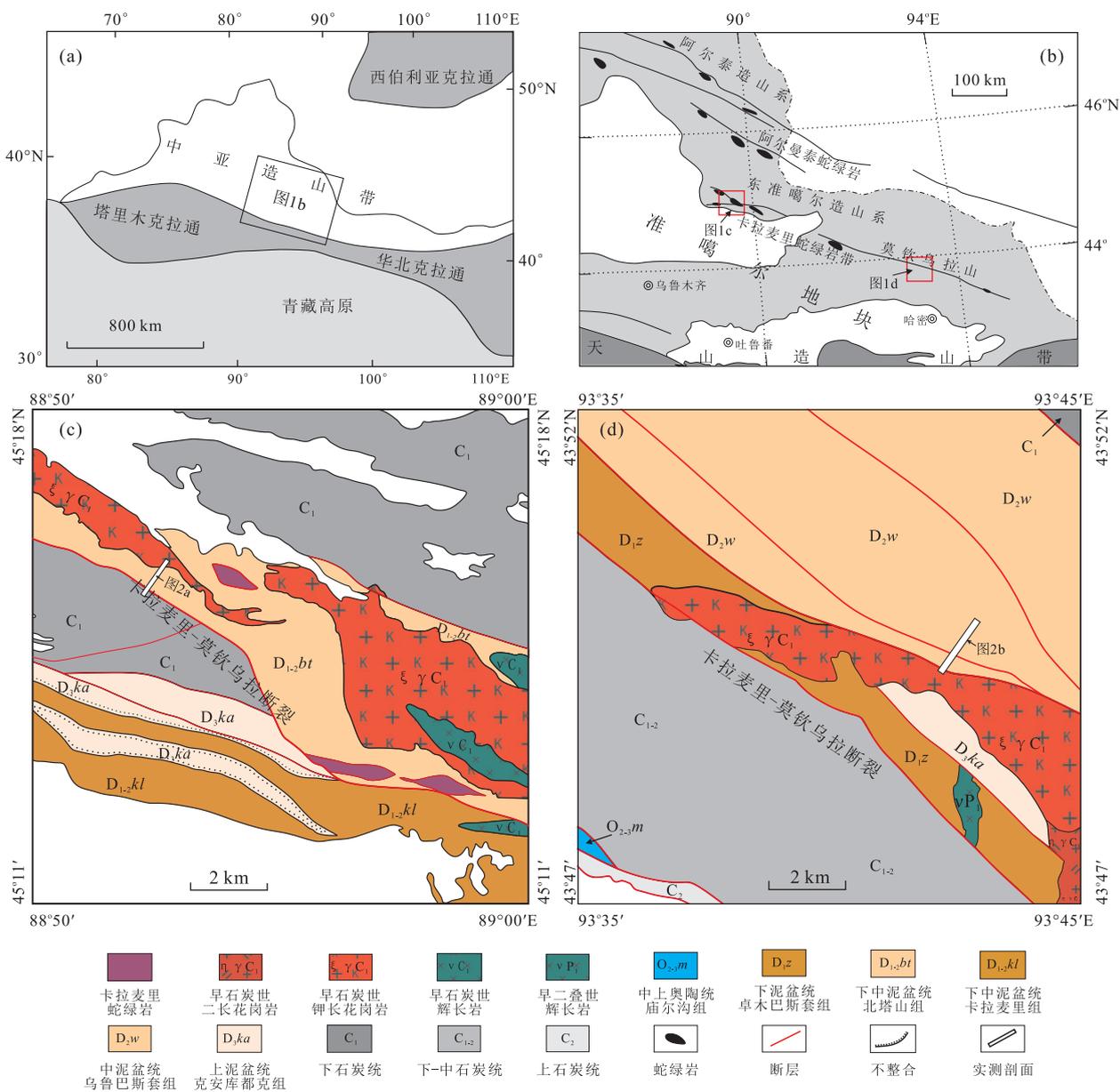


图 1 中亚造山带构造简图(a)、东准噶尔地区构造简图(b)、卡拉麦里地区地质简图(c)和莫钦乌拉地区地质简图(d)

Fig.1 Tecton sketch of Central Asia and adjacent regions (a), tecton sketch of the East Junggar (b), geological sketch of the Karamaili (c) and the MoQinulla (d)

图 a 据 Jahn(2004);图 b 据 Xiao *et al.*(2008);图 c 据 1 : 50 000 滴水泉幅;图 d 据 1 : 50 000 板房沟幅

统让格克都克组、中泥盆统北塔山组、蕴都喀拉组和上泥盆统江孜尔库都克组岛弧火山岩(张招崇等, 2007)。在东准噶尔南缘西部卡拉麦里断裂北侧出露中泥盆统北塔山组海相火山岩地层, 卡拉麦里蛇绿岩构造侵入于其中(胡朝斌等, 2014), 晚石炭世花岗岩侵入(田健等, 2016), 断裂南侧出露稳定的下一中泥盆统卡拉麦里组和上泥盆统克安库都克组, 克安库都克组为一套角度不整合在卡拉麦里组之上的含火山岩的陆相磨拉石建造, 表明卡拉麦里洋在石炭纪之前已经闭合(Zhang *et al.*, 2013; 王富

明等, 2014)(图 1c)。东部莫钦乌拉山北侧出露下泥盆统卓木巴斯套组和中泥盆统乌鲁巴斯套组海相火山岩, 火山熔岩主要集中在乌鲁巴斯套组(图 1d), 早石炭世花岗岩侵入其中, 断裂以南为中-上石炭统妖魔梁组稳定滨浅海碎屑沉积和晚石炭世二道沟组双峰式火山岩。

卡拉麦里地区北塔山组分为上、下两段, 火山岩主要产于下段。下段的底部为一套玄武安山岩、安山岩、流纹质火山角砾岩与凝灰质砂岩(图 2a), 中上部为灰绿-浅灰色凝灰质粉砂岩、硅质泥岩夹流纹

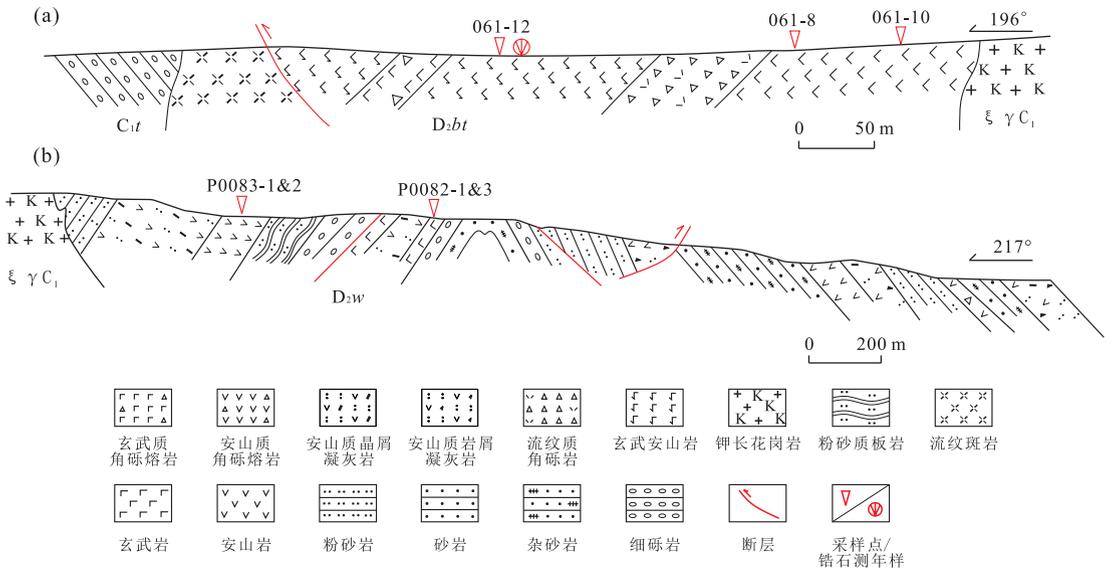


图 2 东准噶尔卡拉麦里地区北塔山组火山岩实测剖面(a)和莫钦乌拉地区乌鲁巴斯套组火山岩实测剖面(b)

Fig.2 The geological sections of volcanic rocks from the Beitashan Formation in the Karamaili area (a) and the Wulubasitao Formation in the MoQinulla area (b) of East Junggar

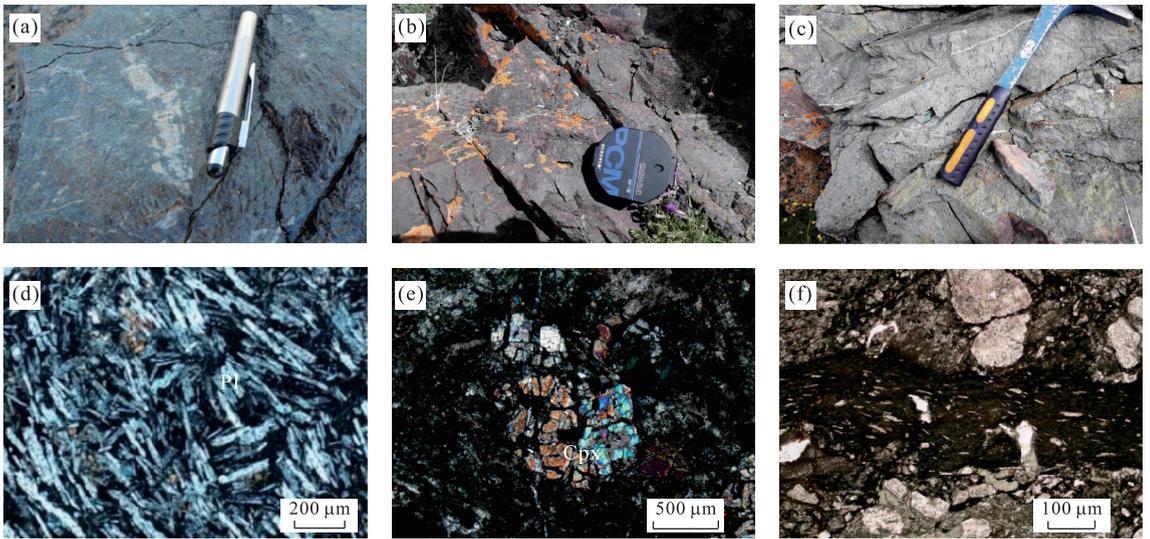


图 3 东准噶尔中泥盆世火山岩野外露头照片和岩相学特征

Fig.3 Outcrop photograph and petrological features of the Devonian volcanic rocks of East Junggar

图 a、d 为北塔山组玄武安山岩(+),图 b、e 为乌鲁巴斯套组玄武粗安岩(+),图 c、f 为安山质角砾熔岩(-);Pl.斜长石,Cpx.单斜辉石

质凝灰岩;上段为灰绿色含砾砂岩、硅质粉砂岩、凝灰质砂岩。下段火山岩以中基性熔岩为主、含少量的酸性火山碎屑岩,为近源火山喷发的产物;而上段主要为晶屑凝灰岩和以正常碎屑为主,含凝灰级火山碎屑的火山碎屑沉积岩,火山碎屑物质主要来自远源火山。总的来看,北塔山组火山岩具由下向上由基性向酸性演化、火山活动强度减弱的趋势。北塔山组下段火山岩主要岩石类型有玄武安山岩、安山岩、玄武质角砾熔岩、流纹质火山角砾岩和流纹质凝

灰岩。其中玄武安山岩具斑状结构,基质为交织结构;斑晶为斜长石,部分发育熔蚀麻点结构,基质由条状斜长石微晶、单斜辉石微粒、磁铁矿颗粒等构成,具明显的定向性(图 3a,3d)。

莫钦乌拉地区乌鲁巴斯套组主要为一套灰绿色中酸性海相火山岩及粉砂岩和含砾杂砂岩(图 2b),分为两个岩性段,下段为一套火山岩地层,主要为灰绿色安山岩和安山质角砾熔岩夹少量安山质、流纹质凝灰岩,以发育大套火山熔结角砾岩和碎屑岩为

特征;上段由灰绿色粉砂质板岩、凝灰质砂岩、含砾杂砂岩及晶屑凝灰岩等组成,见少量床板珊瑚。发育递变层理、平行层理,常见有鲍马序列。乌鲁巴斯套组下段火山岩以爆发式酸性火山碎屑岩为主,中基性火山熔岩以夹层形式出现,说明中泥盆世莫钦乌拉山火山活动以爆发式为主,有从早到晚由中基性向酸性演化的趋势,火山岩主要岩石类型有玄武粗安岩、粗安岩、安山岩、安山质熔结角砾岩和安山质晶屑凝灰岩等(图 3b, 3c, 3e, 3f)。其中本次研究所测玄武粗安岩样品为斑状结构,斑晶由单斜辉石和斜长石组成,约占总含量的 35%。辉石斑晶呈自形短柱状,长可达 5 mm,大部分已蚀变为绿泥石而仅保留外形或仅中心有残余,个别新鲜者发育薄的蚀变边;斜长石斑晶呈自形长板状,大小为 0.3~1.0 mm,多已发生钠黝帘石化蚀变;基质中微晶斜长石杂乱排列、辉石微粒及隐晶质和磁铁矿充填其中。安山岩样品为斑状结构,斑晶占 40%~50%,主要为斜长石和单斜辉石,基质为玻基交织结构。斑晶斜长石呈自形一半自形长条状,长度可达 0.5~1.0 mm,斑晶单斜辉石为浅绿色,半自形短柱状,粒径为 0.5~1.0 mm;基质主要由微晶的斜长石、辉石和磁铁矿等组成。

2 样品采集和分析方法

用于测试的火山岩样品均是在实测剖面测制和野外路线的基础上系统采集的,样品分别采自卡拉麦里滴水泉东 10 km 处和莫钦乌拉山北坡三道白杨沟。笔者共获得一件锆石 U-Pb 测年样、10 个全岩化学分析样以及 3 个 Sr-Nd-Pb 同位素样。锆石样 061-10 采样位置为 45°15'23"N, 88°53'52"E。

年龄样品的粉碎加工、锆石分离和挑选在河北省廊坊市诚信地质服务有限公司完成,锆石制靶、显微照相及年龄测定是在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室(GRMR)完成,选取无裂纹、无包裹体、岩浆环带清楚的样品用于测试,激光剥蚀系统为 GeoLas 2005, ICP-MS 等离子质谱仪为 Agilent 7500a, 激光斑束直径为 32 μm 。样品分析流程如下:在测量开始和测定结束后分别测定标样 Nist610、91500、GJ-1,每测定 4~8 个样品点测定 2 次锆石标样 91500,测试结果通过 ICPMSDataCal 软件处理。详细的处理流程和数据处理方法参考 Liu *et al.* (2008, 2010)。样品锆石 U-Pb 谐和图的绘制和年龄加权平均值的计算均采用 Isoplot 软件(Ludwig, 2003)完成。

10 件化学分析样由澳实分析检测(广州)有限公司测试,均选取杏仁体和裂隙较少的新鲜岩石标本,主量元素采用硼酸锂熔融消解、X 荧光光谱法(ME-XRF26d)测定,分析精度小于 1%;微量元素采用四酸消解、等离子质谱综合分析(ME-MS61);稀土元素采用硼酸锂熔融、等离子质谱(ME-MS81)定量分析;亚铁分析采用酸消解、重铬酸钾滴定测量。3 件 Sr-Nd-Pb 同位素样品的分离和测试均在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室(GRMR)完成。Sr、Nd 同位素测试采用 Finnigan 公司的 MAT 261 进行比值测量,准确度通过 NBS987 和 La Jolla 国际标样监测,质量分馏分别用⁸⁸Sr/⁸⁶Sr=8.375 209、¹⁴⁶Nd/¹⁴⁴Nd=0.721 900 校正(Zhang *et al.*, 2002);Pb 同位素应用高分辨多接收等离子体质谱仪(Nu Plasma HR)测试,用 NBS981 标准校定和监测仪器,测试过程中采用 NBS 997 Tl 作为内标进行质量分馏校正,在标准测试程序的基础上分析精度在 95%置信度下优于 0.05%。

3 分析结果

3.1 年代学

本文对卡拉麦里滴水泉西北塔山组火山岩底部的玄武安山岩(061-10)进行了锆石 LA-ICP-MS 测年,用于测试的锆石除个别较破碎外,大多数自形程度高、岩浆震荡环带清楚,较为透明,部分具继承核,长宽比值介于 2~3 之间,测点位置尽量避开锆石内部的裂隙、包裹体和重结晶部分(图 4b),锆石 Th/U 值均大于 0.2,具岩浆锆石特征,分析结果见表 1。

最年轻的锆石年龄为 389 Ma,为中泥盆世早期,年轻锆石的²⁰⁶Pb/²³⁸U 加权平均年龄为 404±6 Ma(图 4)。该年龄值属早泥盆世晚期,考虑到卡拉麦里地区北塔山组火山岩堆积厚度巨大,其底部的火山岩有可能跨入了下泥盆统,上部沉积岩中产出灌木孔珊瑚(*Thamnopora* sp.)、新疆槽珊瑚(*Xinjiang golites* sp.)、刺无洞贝(*Spinatrypa* sp.)等化石(1:50 000 青河县幅),本研究将北塔山组火山岩归入中泥盆世早期。此外,样品中出现的年龄为 420~509 Ma 锆石可能为早古生代岩浆活动的产物;而新元古代 641 Ma 和 816 Ma 的锆石年龄与准噶尔古生代岩浆岩 Nd 模式年龄较为接近,其来源尚不清楚。

莫钦乌拉地区乌鲁巴斯套组火山岩样品中锆石发育较差,未获得可靠的锆石年龄。其下段正常沉积

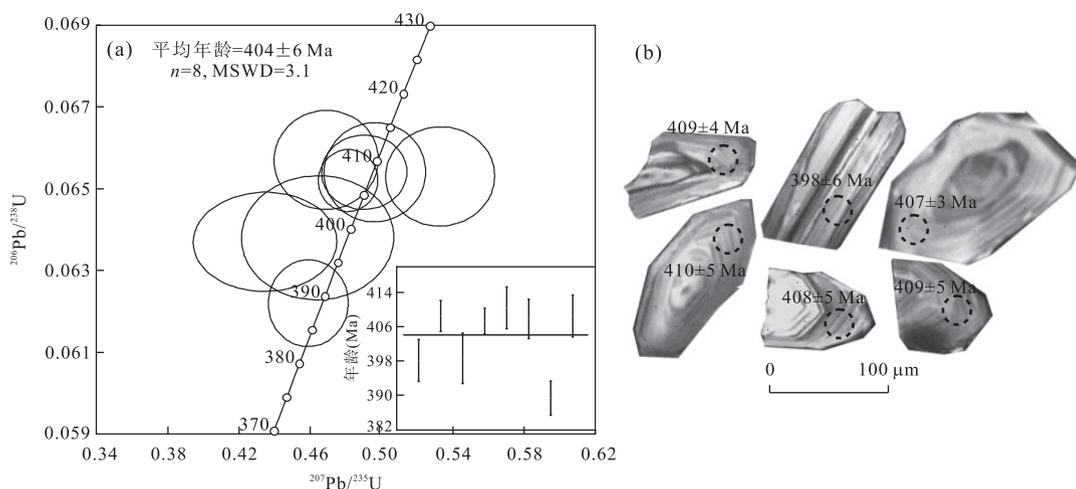


图 4 东准噶尔卡拉麦里北塔山组下段玄武安山岩的锆石 U-Pb 谐和图(a)和阴极发光图像(b)

Fig.4 Zircon U-Pb concordia diagram (a) and CL images (b) of the basaltic andesite from the Beitashan Formation in the Kar-amaili area, East Junggar

岩中产出床板珊瑚 *Xinjiangolites rarus* (未发表), 珊瑚呈块状复体, 为原地埋藏, 显示乌鲁巴斯套组为中泥盆统。该珊瑚产出层位与火山岩层位较近, 初步限定了其火山岩形成于中泥盆世。

3.2 岩石地球化学

火山岩全岩主、微量元素分析结果见表 2, 1.71%~4.32% 的烧失量值显示了中泥盆世火山岩均遭受一定的后期低温蚀变, 因此, 文中所用的主量元素图均为去除烧失量后作图, 讨论中尽量使用不活泼的微量元素。两套火山岩均属亚碱性系列, 北塔山组为玄武安山岩和玄武粗安岩, 乌鲁巴斯套组火山岩为玄武粗安岩、玄武安山岩和安山岩(图 5)。两套火山岩样品均具富钠贫钾的特征, 北塔山组火山岩 K_2O/Na_2O 比值介于 0.24~0.70, 属中钾钙碱性系列, 乌鲁巴斯套组火山岩 K_2O/Na_2O 比值介于 0.05~0.22, 属低钾拉斑系列(图 6a)。此外, 北塔山组火山岩与乌鲁巴斯套组火山岩主量元素特征上差异明显(图 6)。北塔山组火山岩 SiO_2 含量为 50.48%~54.74%, 具中等含量的 K_2O (0.86%~2.16%)、 CaO (6.09%~7.02%)、 FeO^T (8.96%~10.96%), 相对较低的 Al_2O_3 含量 (14.47%~15.72%); 北塔山组火山岩具相对较高的 TiO_2 含量 (1.93%~2.48%), 位于高钛—中钛玄武岩范围。而乌鲁巴斯套组火山岩 SiO_2 含量为 50.78%~59.44%, 具较低含量的 K_2O (0.19%~1.12%)、 CaO (3.28%~5.56%)、 FeO^T (5.04%~9.52%) 和 TiO_2 (0.41%~0.61%); 较高的 Al_2O_3 含量 (16.31%~18.82%) 指示乌鲁巴斯套组火山岩具高铝玄武岩的

特征。两套火山岩均具较低的 MgO 含量 (3.30%~5.23%) 和 $Mg^\#$ 值 (43.6~63.8), 均明显低于幔源原始岩浆 ($Mg^\#$ 值下限约 65)。

北塔山组火山岩和乌鲁巴斯套组火山岩在稀土总量上差异明显, 前者稀土总量明显比后者高, $\Sigma REE(D_2b) = 125.6 \times 10^{-6} \sim 166.7 \times 10^{-6}$, $\Sigma REE(D_2w) = 46.2 \times 10^{-6} \sim 81.9 \times 10^{-6}$, 轻稀土含量上北塔山火山岩接近或高于大陆地壳, 而乌鲁巴斯套组火山岩轻稀土含量明显低于大陆地壳。在稀土元素球粒陨石标准化图(图 7a)上, 二者稀土配分曲线形态相似, 均为右倾型, $LREE/HREE$ 比值均在 3.34~5.72, $(La/Yb)_N$ 值均为 2.58~5.50, 北塔山组火山岩 δEu 约为 0.87, 具弱的铕负异常, 乌鲁巴斯套组火山岩 δEu 为 0.94~1.05, 无明显铕异常。

二者在微量元素特征上均富集大离子亲石元素 Ba、U、Pb, 亏损高场强元素 Nb 和 Ta, Rb 丰度显示出较大的变化范围, 应和后期较强的蚀变作用有关。北塔山组火山岩各微量元素丰度相对乌鲁巴斯套组火山岩均较高, 且北塔山组火山岩大离子亲石元素相对更富集, 而 Nb、Ta 的亏损程度相对较弱, Zr、Hf 具弱的正异常, 而乌鲁巴斯套组火山岩 Nb、Ta 明显亏损, Zr、Hf 轻微亏损(图 7b)。微量元素整体特征上北塔山组火山岩较乌鲁巴斯套组火山岩表现出相对富集的趋势, 显示了二者源区性质存在一定差异。

3.3 Sr-Nd-Pb 同位素

全岩 Sr-Nd-Pb 同位素分析结果见表 3, 取 380 Ma 为基准计算乌鲁巴斯套组火山岩初始 Sr、Nd 和 Pb 比值。乌鲁巴斯套组火山岩 ($^{87}Sr/^{86}Sr$) 初

表 1 东准噶尔卡拉麦里北塔山组火山岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 测试结果
Table 1 Zircon LA-ICP-MS U-Pb dating results of volcanic rocks from the Beitashan Formation in the Karamaili area, eastern Junggar terrane

分析点	Th/U	元素含量(10^{-6})				同位素比值										年龄(Ma)			
		Pb	Th	U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ			
1	1.4	173	504	356	0.057 7	0.003 2	0.536 1	0.030 5	0.067 3	0.000 9	517	122	436	20	420	6			
3	2.7	285	1 164	430	0.049 0	0.003 0	0.434 6	0.026 6	0.063 7	0.000 8	150	137	367	19	398	5			
5	1.5	412	1 448	959	0.054 0	0.001 7	0.490 3	0.015 8	0.065 4	0.000 6	372	70	405	11	409	4			
6	1.4	112	413	293	0.053 0	0.003 2	0.464 1	0.028 2	0.063 8	0.001 0	332	137	387	20	399	6			
7	0.9	571	1 819	1 955	0.053 3	0.001 2	0.481 2	0.011 0	0.065 2	0.000 5	339	54	399	8	407	3			
11	1.3	360	1 288	1 000	0.051 2	0.002 0	0.468 9	0.019 3	0.065 7	0.000 8	250	86	390	13	410	5			
12	0.8	137	397	482	0.055 5	0.002 4	0.527 1	0.022 3	0.069 2	0.001 0	432	98	430	15	431	6			
13	0.3	138	271	797	0.059 3	0.002 4	0.532 9	0.020 2	0.065 3	0.000 8	589	89	434	13	408	5			
14	1.3	681	2 118	1 597	0.062 8	0.002 0	0.579 0	0.020 1	0.066 0	0.000 8	702	69	464	13	412	5			
15	1.1	935	1 414	1 269	0.071 0	0.002 2	1.323 0	0.039 5	0.134 2	0.001 5	958	63	856	17	812	8			
16	0.2	527	434	2 253	0.062 1	0.001 7	0.902 0	0.024 1	0.104 5	0.001 1	680	64	653	13	641	6			
18	1.8	708	2 784	1 522	0.053 2	0.001 8	0.458 9	0.014 8	0.062 2	0.000 7	345	74	384	10	389	4			
19	1.4	332	1 031	726	0.058 5	0.002 4	0.597 5	0.025 5	0.073 7	0.001 2	550	89	476	16	458	7			
20	0.6	167	416	6 796	0.058 1	0.002 5	0.581 7	0.025 1	0.072 3	0.000 9	600	96	466	16	450	6			
22	1.0	1 426	3 355	3 515	0.070 1	0.002 0	0.800 3	0.022 5	0.082 1	0.000 9	932	57	597	13	509	5			
23	1.3	333	1 174	919	0.054 7	0.002 1	0.496 2	0.018 8	0.065 4	0.000 8	398	81	409	13	409	5			

表 2 东准噶尔泥盆纪火山岩的主量元素(%)、微量元素(10^{-6})、稀土元素(10^{-6})分析结果Table 2 Major elements (%), trace elements (10^{-6}) and rare earth elements (10^{-6}) results from the Devonian volcanic rocks of East Junggar

样品号	卡拉麦里北塔山组			莫钦乌拉乌鲁巴斯套组						
	061-8-1H 玄武安山岩	061-12-1H 玄武安山岩	061-10-1H 玄武安山岩	P0082-1H 玄武粗安岩	P0082-3H 玄武粗安岩	D8101-4H 粗安岩	P0083-1H 安山岩	D8109-1H 安山岩	D8101-2H 安山岩	P0083-2H 安山岩
SiO ₂	50.48	52.27	54.74	50.78	52.45	54.65	57.12	57.63	58.93	59.44
TiO ₂	2.48	1.93	1.96	0.67	0.65	0.53	0.46	0.47	0.48	0.41
Al ₂ O ₃	14.47	15.72	15.72	18.78	18.82	18.40	18.52	17.59	16.31	17.64
FeO ^T	10.96	9.51	8.96	9.52	8.78	8.13	5.78	5.92	7.02	5.04
MnO	0.19	0.18	0.15	0.18	0.16	0.15	0.14	0.16	0.14	0.12
MgO	5.23	3.65	3.30	4.27	3.82	4.21	4.36	3.60	3.76	4.23
CaO	7.02	6.09	6.44	5.56	4.47	3.38	4.39	4.89	3.65	3.28
Na ₂ O	4.12	3.59	3.07	5.25	6.10	5.09	4.90	4.49	4.94	5.29
K ₂ O	1.40	0.86	2.16	0.27	0.19	1.12	0.44	0.82	0.49	0.43
P ₂ O ₅	0.38	0.40	0.42	0.20	0.20	0.15	0.16	0.12	0.13	0.21
LOI	1.71	4.32	1.82	3.19	2.68	3.08	3.04	3.20	3.00	2.93
Total	98.44	98.52	98.74	98.67	98.32	98.89	99.31	98.89	98.85	99.02
Mg [#]	50.02	44.58	43.57	48.47	47.70	52.07	61.28	56.04	52.91	63.77
K ₂ O/Na ₂ O	0.34	0.24	0.70	0.05	0.03	0.22	0.09	0.18	0.10	0.08
Sc	35.6	22.6	24.0	21.9	23.4	22.9	19.5	17.5	23.7	15.9
V	295.2	220.8	231.5	302	334	295	149	158	248	125
Cr	71.2	24.2	24.5	20	20	20	50	30	10	40
Co	35.2	33.2	33.0	28.9	25.8	24.2	23.1	17.9	21.9	19.6
Ni	15.9	27.0	26.9	9.2	8.4	8.9	14.8	8.6	8.3	12.7
Cs	1.77	2.09	2.89	0.23	0.19	0.43	0.21	0.37	0.27	0.19
Rb	35.5	20.2	61.5	3.8	2.7	18.6	8.0	14.3	8.0	7.9
Ba	292.9	415.9	589.6	144.5	132.0	304	198.0	223	141.5	199.0
Th	5.24	5.21	6.17	1.51	1.43	1.27	1.53	0.83	1.23	1.42
U	1.07	1.11	1.37	0.62	0.59	0.45	0.56	0.37	0.44	0.53
Nb	8.0	10.2	10.8	1.2	1.3	0.9	1.4	1.5	1.0	1.4
Ta	0.8	0.9	0.9	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
Pb	6.9	9.2	9.2	4.1	3.4	3.0	3.1	2.0	4.4	2.1
Sr	402	449	734	521	413	486	509	466	567	356
Y	37.6	34.1	35.7	19.4	19.2	14.2	14.7	17.0	12.8	15.1
Zr	221.8	269.4	283.1	70	70	53	82	81	48	75
Hf	5.7	5.7	7.4	2.2	2.0	1.6	2.3	2.3	1.4	2.0
La	17.6	28.1	27.9	12.2	11.2	9.6	10.3	6.3	8.0	10.1
Ce	41.1	61.5	61.5	29.7	27.9	21.8	24.9	15.2	18.6	24.1
Pr	5.72	7.65	7.86	3.95	3.81	2.77	3.33	2.05	2.43	3.22
Nd	26.3	32.5	33.6	17.1	17.0	12.2	14.2	8.9	10.6	13.8
Sm	6.78	7.40	7.57	3.90	3.80	2.76	3.07	2.29	2.48	3.13
Eu	1.99	2.06	2.17	1.29	1.31	0.93	0.99	0.78	0.76	0.98
Gd	7.05	7.04	7.49	3.87	3.73	2.63	2.91	2.67	2.37	2.78
Tb	1.18	1.15	1.22	0.52	0.51	0.37	0.41	0.40	0.33	0.38
Dy	7.15	6.70	7.04	3.47	3.17	2.42	2.53	2.74	2.17	2.52
Ho	1.42	1.31	1.37	0.78	0.68	0.56	0.55	0.63	0.49	0.54
Er	4.19	3.76	3.98	2.27	2.04	1.56	1.51	1.83	1.39	1.52
Tm	0.59	0.53	0.56	0.34	0.32	0.23	0.23	0.28	0.21	0.23
Yb	3.99	3.67	3.87	2.19	1.99	1.53	1.54	1.81	1.36	1.53
Lu	0.58	0.56	0.58	0.34	0.30	0.24	0.24	0.29	0.22	0.24
ΣREE	125.6	163.9	166.7	81.9	77.8	59.6	66.7	46.2	51.4	65.1
(La/Yb) _N	3.16	5.17	5.48	4.00	4.04	4.50	4.80	2.50	4.22	4.74
δEu	0.87	0.87	0.86	1.00	1.05	1.04	1.00	0.96	0.94	0.99

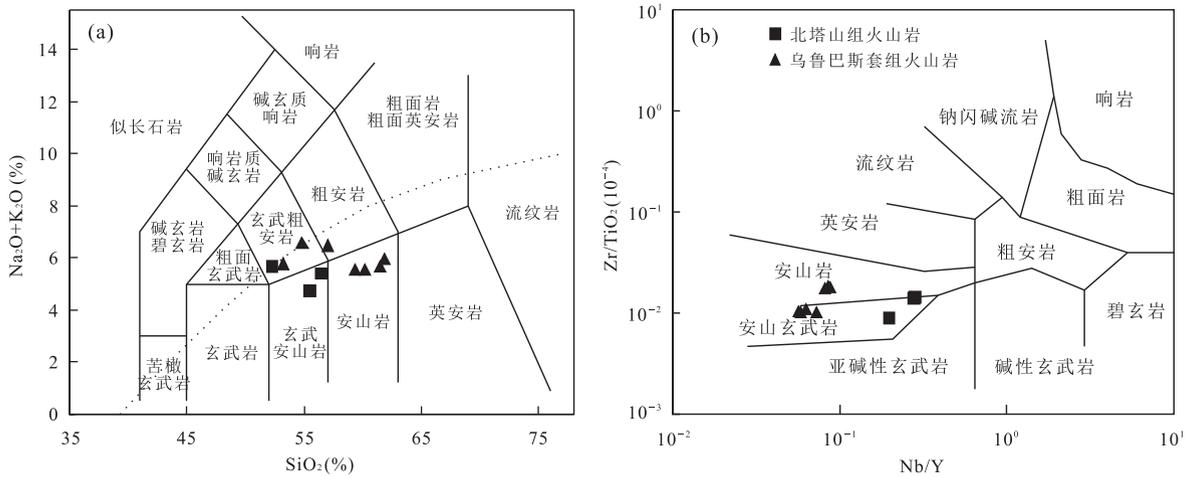


图 5 东准噶尔泥盆纪火山岩 TAS 图解(a)和 Zr/TiO₂-Nb/Y 图解(b)

Fig.5 TAS diagram (a) and Zr/TiO₂-Nb/Y diagram (b) of the Devonian volcanic rocks of East Junggar

图 a 据 le Maitre(1989);图 b 据 Winchester and Floyd (1977)

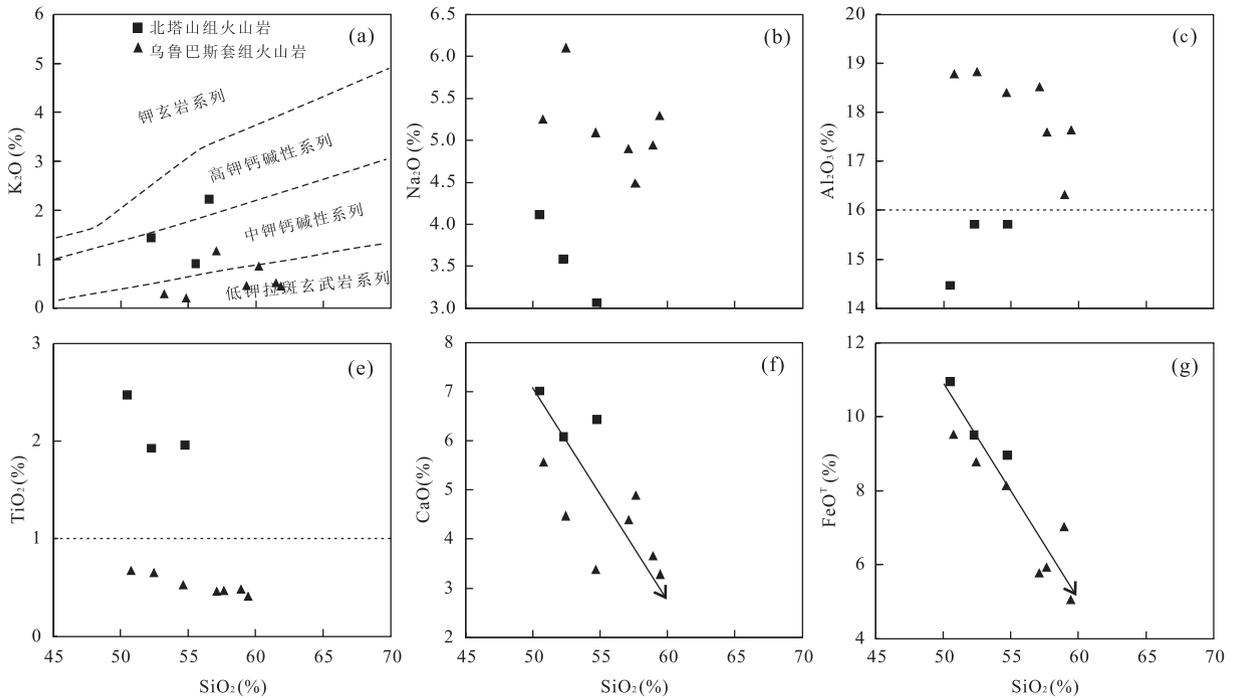


图 6 东准噶尔泥盆纪火山岩硅钾图(a)和哈克图解(b~g)

Fig.6 K₂O vs. SiO₂ diagram (a) and Harker diagrams (b-g) of the Devonian volcanic rocks of East Junggar

图 a 据 Peccerillo and Taylor (1976)

始值,即 (⁸⁷ Sr/⁸⁶ Sr)_i 为 0.703 794 ~ 0.703 916, ε_{Nd}(*t*)为 +6.15 ~ +7.24; 而 Luo *et al.* (2016) 获得的北塔山组玄武岩 (⁸⁷ Sr/⁸⁶ Sr)_i 为 0.703 277 ~ 0.704 326, ε_{Nd}(*t*)为 +6.43 ~ +7.32. 两套火山岩均处在原始地幔附近, 显示了较为一致的源区特征, 表明中泥盆世火山岩来源于相对亏损的地幔源区 (图 8a). 火山岩二阶段 Nd 模式年龄值为 0.53 ~

0.64 Ga, 暗示了岩浆具相对年轻的源区 (图 8b). 此外, 乌鲁巴斯套组火山岩 (²⁰⁶ Pb/²⁰⁴ Pb)_i 比值为 17.480 6 ~ 17.642 2, (²⁰⁷ Pb/²⁰⁴ Pb)_i 比值为 15.415 2 ~ 15.437 9, (²⁰⁸ Pb/²⁰⁴ Pb)_i 比值为 37.224 9 ~ 37.413 4, 中泥盆世火山岩均落在 DM 内及附近 (图 8c, 8d), 同样显示了来自亏损地幔的特征.

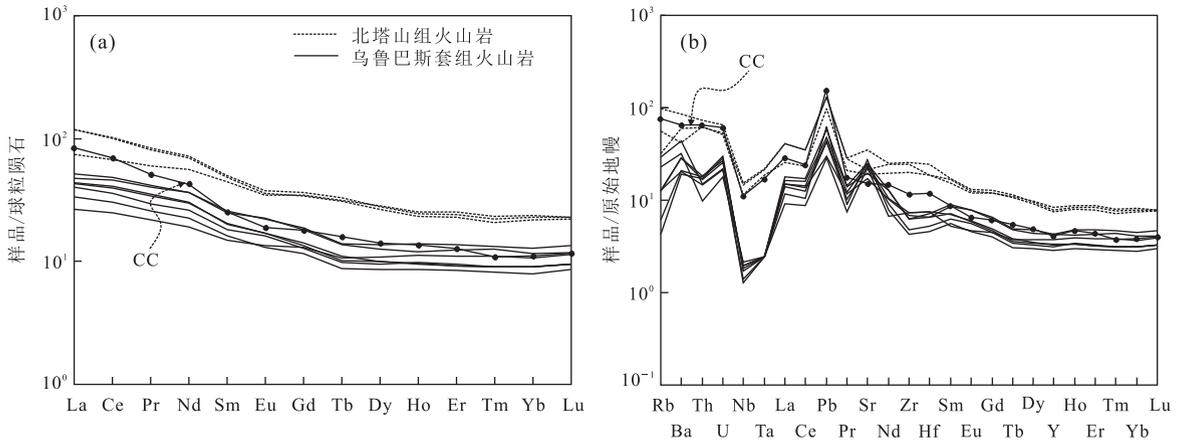


图 7 东准噶尔泥盆纪火山岩球粒陨石标准化稀土元素配分图(a)和原始地幔标准化微量元素蛛网图(b)

Fig.7 The chondrite-normalized REE pattern (a) and PM-normalized trace element spider diagram (b) of the Devonian volcanic rocks of East Junggar

标准化数据引自 Sun and McDonough (1989); CC.大陆地壳

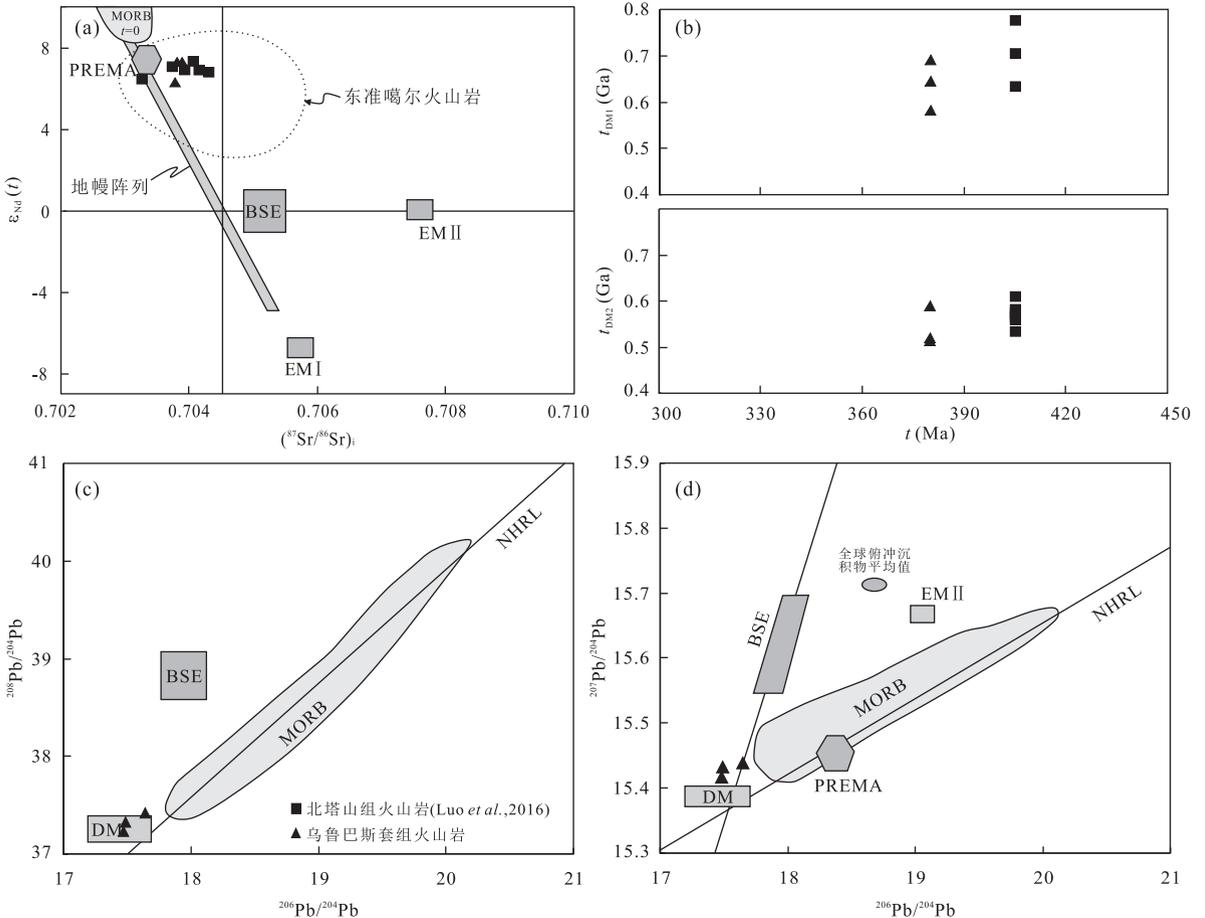


图 8 东准噶尔泥盆纪火山岩初始 Sr-Nd-Pb 同位素源区图解

Fig.8 Initial Sr-Nd-Pb isotopic source diagrams of the Devonian volcanic rocks of East Junggar

图 a 中 MORB、EM I、EM II 数据据 Zimmer *et al.* (1995), 东准噶尔火山岩数据据 Su *et al.* (2012) 和 Zhang *et al.* (2009); 图 d 中 EM II 据 Zindler and Hart (1986), MORB 和 NHRL 据 White *et al.* (1987); MORB, 洋中脊玄武岩, DM, 亏损地幔, PREMA, 普通地幔, BSE, 总硅酸盐地球, EM I, I 型富集地幔, EM II, II 型富集地幔, NHRL, 北半球参考线

表 3 东准噶尔泥盆纪火山岩 Sr-Nd-Pb 同位素分析结果

Table 3 Sr-Nd-Pb isotopic results of the Devonian volcanic rocks of East Junggar

来源	样号	岩性	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}(\pm 2\sigma)$	$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}(\pm 2\sigma)$	$(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_i$
莫钦乌拉	P0082-3H	玄武粗安岩	0.018 915	0.703 907(± 6)	0.703 798	0.136 077	0.512 854(± 4)	0.512 493
乌鲁巴斯套组	D8109-1H	安山岩	0.088 789	0.704 396(± 5)	0.703 884	0.156 640	0.512 909(± 5)	0.512 494
乌鲁巴斯套组	P0083-2H	安山岩	0.064 206	0.704 141(± 5)	0.703 771	0.138 074	0.512 807(± 3)	0.512 441

$\epsilon_{\text{Nd}}(t)$	$t_{\text{DM1}}(\text{Ga})$	$t_{\text{DM2}}(\text{Ga})$	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}(\pm 2\sigma)$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}(\pm 2\sigma)$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}(\pm 2\sigma)$	$(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i$	$(^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i$	$(^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i$
7.36	0.58	0.53	18.139 1(± 5)	15.451 0(± 5)	37.740 4(± 13)	17.480 6	15.415 2	37.224 9
7.37	0.64	0.53	18.348 4(± 12)	15.476 2(± 12)	37.925 1(± 32)	17.642 2	15.437 9	37.413 4
6.34	0.69	0.60	18.457 8(± 10)	15.484 0(± 10)	38.157 3(± 25)	17.489 8	15.431 5	37.319 6

注: $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i = (^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_{\text{样品}} + (^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})(e^{\lambda t} - 1)$, $\lambda_{\text{Rb}} = 1.42 \times 10^{-11} \text{ a}^{-1}$; $\epsilon_{\text{Nd}}(t) = [(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{样品}} / (^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{CHUR}}(t) - 1] \times 10^4$, $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{CHUR}}(t) = (^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{CHUR}} - (^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{CHUR}}(e^{\lambda t} - 1)$, $\lambda_{\text{Sm}} = 6.54 \times 10^{-12} \text{ a}^{-1}$; 乌鲁巴斯套组火山岩 Sr、Nd、Pb 同位素初始值以 380 Ma 为基准计算, 亏损地幔的 Sm-Nd 同位素组成采用 $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{CHUR}} = 0.512 638$, $(^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{CHUR}} = 0.196 7$.

4 讨论

4.1 地壳混染和分离结晶

地壳混染会导致火山岩微量元素和同位素组成的改变, 少量的地壳混染会使岩石具 Nb、Ta 负异常和 Zr、Hf 正异常的特征 (Zhao *et al.*, 2010). 乌鲁巴斯套组火山岩无 Zr、Hf 正异常 (图 7b), Sr-Nd-Pb 同位素值较一致, 表明火山岩受到地壳混染的程度较弱; 此外, 幔源岩浆具有较低的 Th/Ce (0.02~0.05) 和 Th/La 值 (约 0.12; Sun and McDonough, 1989), 大陆地壳具有较高的 Th/Ce 值 (约 0.15; Taylor and McLennan, 1995) 和 Th/La 值 (约 0.30; Plank, 2005). 乌鲁巴斯套组火山岩 Th/Ce 值 (0.05~0.07) 和 Th/La 值 (0.12~0.15) 与幔源岩浆较接近, 同样说明火山岩基本未遭受地壳混染; 而北塔山组火山岩具弱的 Zr、Hf 正异常, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初始值有一定波动 (0.703 277~0.704 326), 表明地壳混染对火山岩成分的改造较强; 火山岩较高的 Th/Ce 值 (0.08~0.13) 和 Th/La 值 (0.19~0.30) 说明其岩浆成分遭受了地壳混染.

两套火山岩均具相对较低的 MgO 含量 (3.30%~5.23%), $\text{Mg}^\#$ (43.6~63.8) 明显低于幔源原始岩浆 ($\text{Mg}^\#$ 值下限约 65), 相容元素 Ni (8.3×10^{-6} ~ 27.0×10^{-6}) 和 Cr (10.0×10^{-6} ~ 71.2×10^{-6}) 含量均明显低于原始岩浆参考值, 说明了中泥盆世火山岩均经历了明显的分异演化作用. SiO_2 与 CaO、 FeO^T 等的负相关关系 (图 6f, 6g) 和低 Cr、Ni 值指示了火山岩橄榄石和单斜辉石的分离结晶作用. 北塔山组火山岩具弱的钕负异常 (δEu 约为 0.87), 暗示存在一定的斜长石结晶分离; 乌鲁巴斯套组火山岩无明显钕异常 (δEu 为 0.94~1.05), 表明岩浆演化过程中斜长石的分离结晶程度较弱.

4.2 源区特征

两套泥盆纪火山岩具有较为一致的 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) 初始值 (分别为 0.703 8~0.703 9, 0.703 3~0.704 3) 和 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值 (+6.15~+7.32), 均接近亏损地幔端元, Pb 同位素组成也落在亏损地幔附近, 同位素特征表明火山岩均来源于亏损地幔 (图 8a). 火山岩的 $(\text{Th}/\text{Nb})_N (>4.27)$ 和 $\text{Zr}/\text{Nb} (>26.3)$ 均高于软流圈地幔的 $(\text{Th}/\text{Nb})_N$ (小于 1; Saunders *et al.*, 1992) 和 Zr/Nb (5.8). 图 9a 显示样品均来源于受俯冲交代岩石圈地幔, 而不是软流圈地幔.

北塔山组火山岩总体上具中一高钾、中 TiO_2 、富集大离子亲石元素和轻稀土元素、亏损高场强元素 Nb、Ta 等特征, 主要显示为岛弧钙碱性系列玄武岩的特征, 但同时又显示出较高的 $\text{FeO}^\text{T}/\text{MgO}$ 比值, 具与拉斑玄武岩相似的富 FeO^T 的演化趋势, 因此化学成分上具有岛弧拉斑玄武岩与岛弧钙碱性玄武岩的过渡性质. 岩石具有较高的 Nb 含量 (8.01×10^{-6} ~ 10.23×10^{-6}), 明显高于 N-MORB (2.3×10^{-6}), $(\text{La}/\text{Nb})_N$ 比值均小于 3.0, 岩石的整体特征与典型的富铌岛弧玄武岩相近 (Sajona *et al.*, 1996). 火山岩的地幔源区曾发生过明显的俯冲组分的富集作用, 北塔山组火山岩的 Nb/Zr 比值中等, 图 9b 显示出熔体交代和流体交代的共同作用特征, 同时在图 9c 中北塔山组火山岩样品落入钙碱性陆缘弧范围. 火山岩较低的 Ce/Th 比值 (7.85~11.8) 和 Ba/Th 比值 (55.9~95.6) 接近俯冲沉积物熔体值 (分别约为 8 和 111; Plank and Langmuir, 1998), 且图 9d 显示源区存在俯冲沉积物的改造. 因此, 笔者推测北塔山组火山岩源区为受俯冲沉积物熔体和流体交代的地幔楔.

乌鲁巴斯套组火山岩具贫碱、低钾、低 TiO_2 、高铝, 富集 LILE 和 LREE、亏损 Nb、Ta 等特征, 具有

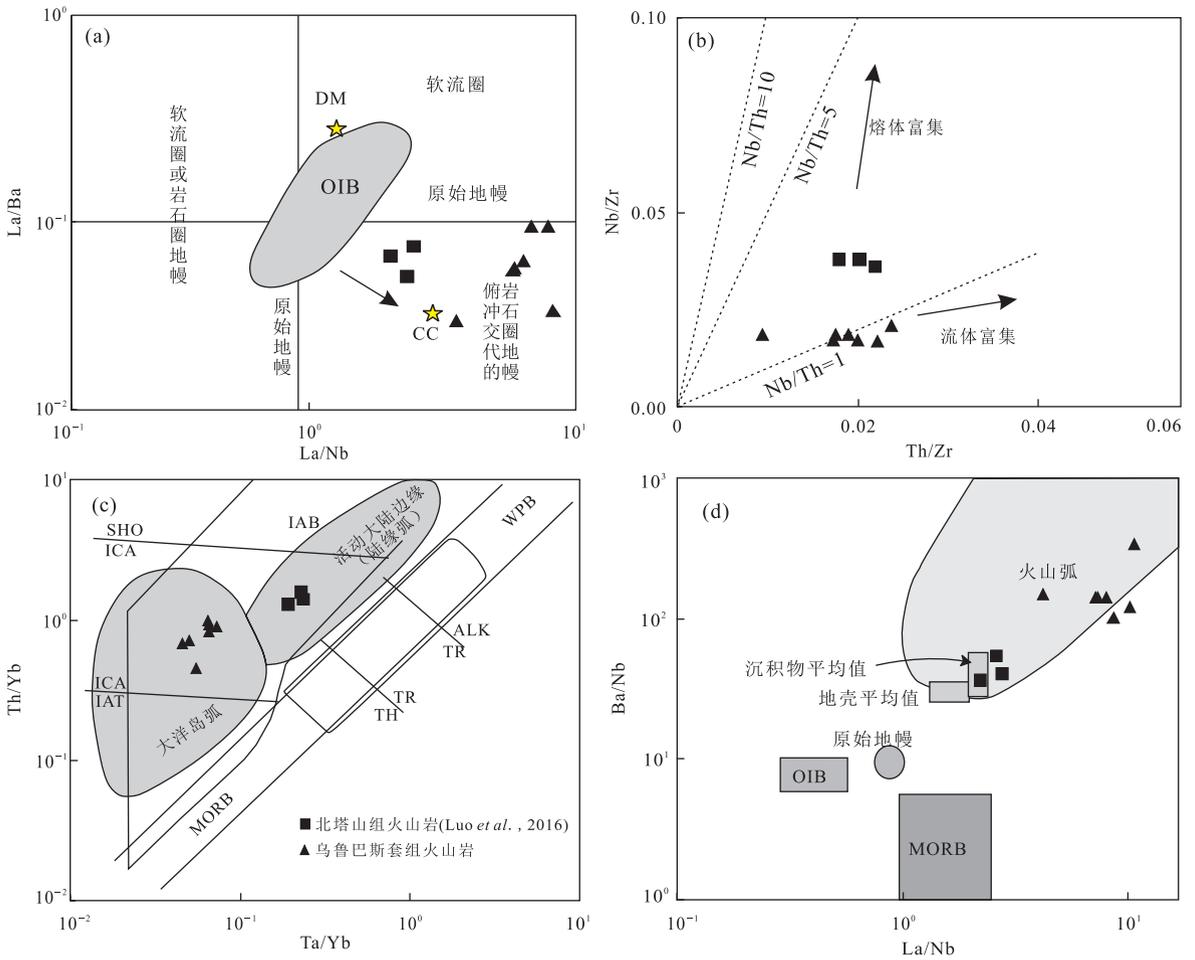


图 9 东准噶尔泥盆纪火山岩源区判别图解

Fig.9 Source discrimination diagrams of the Devonian volcanic rocks of East Junggar

图 a 据 Saunders *et al.* (1992) 和夏林圻等 (2007); 图 c 据 Pearce (1982); 图 d 据 Jahn *et al.* (1999); DM. 亏损地幔, CC. 大陆地壳, OIB. 洋岛玄武岩, WPB. 板内玄武岩, MORB. 洋中脊玄武岩, IAB. 岛弧玄武岩, IAT. 岛弧拉斑系列, ICA. 岛弧钙碱性系列, SHO. 岛弧橄榄玄粗岩系列

岛弧拉斑系列玄武岩和高铝玄武岩的特征,其地幔源区曾受明显的俯冲交代作用改造,低的 Nb/Zr 比值和高的 Th/Zr 比值指示其源区被流体改造 (图 9b). 在图 9c 中乌鲁巴斯套组火山岩落入大洋岛弧范围内,图 9d 也显示了典型火山弧的岩浆源区特征,样品具有不同于板内岩石极低的 TiO_2 含量 ($<1\%$) 和 LILE 含量. 火山岩具有低 Th 含量 ($0.83 \times 10^{-6} \sim 1.53 \times 10^{-6}$)、高 Ce/Th 比值 (15.1~19.7) 和 Ba/Th 比值 (92.3~269), 并缺乏 Ce 的负异常, 表明源区没有俯冲沉积物熔体的加入 (Hole *et al.*, 1984). 而火山岩相对较低的 Nb 含量 ($0.9 \times 10^{-6} \sim 1.4 \times 10^{-6}$) 和低 Nb/Zr 值 (约 0.02) 显示岩浆源区受到了俯冲板片流体的交代作用改造. 火山岩高的 Sr/Nd 比值 (24.3~53.5) 和低的 Th/Yb 比值 (0.46~0.93) 进一步证实流体作用来自改造后洋壳而不是俯冲沉积物 (Zhang *et al.*, 2008). 以上特征表明了乌鲁巴斯套组火山岩来

源于俯冲消减板片流体交代的地幔楔。

稀土元素 (REE) 在地幔橄榄岩熔融的过程中主要受地幔组成和部分熔融程度的控制, 因而被用于识别岩浆源区和熔融程度 (Aldanmaz *et al.*, 2000; Zhao and Zhou, 2009). 随着部分熔融程度的增加, Sm 含量会逐渐减小 (Aldanmaz *et al.*, 2000), Yb 含量主要受石榴石的控制, 尖晶石橄榄岩部分熔融不会明显改变 Sm/Yb 比值, 而石榴石二辉橄榄岩部分熔融则会明显改变 Sm/Yb 比值. 通过部分熔融模拟 Sm/Yb-Sm 图解, 北塔山组火山岩主要来源于橄榄石二辉橄榄岩—尖晶石二辉橄榄岩地幔源区 5%~10% 程度的部分熔融, 乌鲁巴斯套组火山岩主要来源于橄榄石二辉橄榄岩—尖晶石二辉橄榄岩地幔源区 15%~25% 程度的部分熔融 (图 10).

总的来说, 北塔山组火山岩源区可能为受俯冲沉积物熔体和流体交代的地幔楔, 其部分熔融程度较

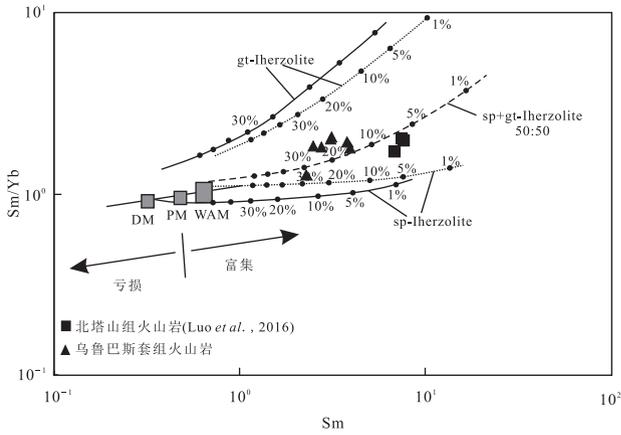


图 10 东准噶尔泥盆纪火山岩 Sm/Yb-Sm 图解

Fig.10 Sm/Yb vs. Sm diagram of the Devonian volcanic rocks of East Junggar

DM, 亏损地幔, PM, 原始地幔, WAM, 西安纳托尼亚地幔, gt-Iherzolite, 石榴石二辉橄榄岩, sp-Iherzolite, 尖晶石二辉橄榄岩; 底图据 Aldanmaz *et al.* (2000)

低; 乌鲁巴斯套组火山岩可能来源于俯冲消减板片流体交代的地幔楔, 其地幔源区熔融程度相对较高。

4.3 泥盆纪俯冲过程的岩浆活动响应

东准噶尔南缘卡拉麦里蛇绿岩带是区域上一条重要的构造界线, 蛇绿岩时代为中志留世一晚泥盆世, 蛇绿岩南侧上志留统一下泥盆统红柳沟组 (S₄D_{1h}) 至下一中泥盆统卡拉麦里组 (D_{1-2kl}) 为一套连续的浅海相—斜坡相的陆缘碎屑沉积建造, 缺少火山岩, 变形较弱, 总体上表现了被动陆缘特征 (胡朝斌等 2014; 徐学义等, 2014)。而蛇绿岩北侧泥盆纪地层具有弧—盆体系的形成背景, 岛弧岩浆发育, 时代与蛇绿岩年龄一致 (Zhang *et al.*, 2009; 柴

凤梅等, 2012), 为典型活动陆缘沉积, 指示卡拉麦里洋盆只发生向北的单向俯冲 (李锦轶等, 2009)。与俯冲作用相关的东准噶尔地区存在大量泥盆纪岛弧花岗岩的侵入 (Zhang *et al.*, 2006; Liang *et al.*, 2016a, 2016b)。泥盆纪末蛇绿岩侵位到北侧岛弧火山岩之中 (胡朝斌等, 2014), 俯冲作用结束, 石炭纪东准噶尔大量发育后碰撞火山岩和花岗岩 (Su *et al.*, 2012; Luo *et al.*, 2016; 田健等, 2016)。本次研究的东准噶尔南缘两套泥盆纪火山岩正是在卡拉麦里洋壳北向俯冲作用下、在西伯利亚南缘增生陆壳之上形成的弧岩浆产物, 归属于北塔山—野马泉岛弧火山岩带。火山岩样品在图 11 中均位于火山弧区, 但两套火山岩在岩石系列、源区等特征上又显示了相对差异的特征, 反映了它们形成于不同的俯冲环境。

卡拉麦里北塔山组中上部的火山—沉积组合中, 出现大量的远源中酸性火山碎屑组分, 并有多层沉酸性火山碎屑岩夹层产出, 具活动陆源火山沉积建造的特征, 火山岩相对较高的 K₂O 和 CaO 含量及中钛的特征区别于岛弧低钾玄武岩, 在图 9c 中火山岩落入陆缘弧范围, 在图 11 中北塔山火山岩具一定的板内火山岩特征, 较高的 LREE 和 LILE 含量也显示了明显的陆壳特征。据此笔者认为北塔山组形成于陆源弧环境, 是卡拉麦里洋向北俯冲、在西伯利亚南缘古增生陆壳之上形成的陆缘弧环境下的产物。而莫钦乌拉乌鲁巴斯套组火山岩显示了岛弧拉斑玄武岩 (IAT) 和岛弧高铝玄武岩的特征, 在各构造环境判别图解中均很好地显示与火山弧玄武岩相似的特征 (图 9c, 9d 和图 11), 高铝、低钛、低 REE

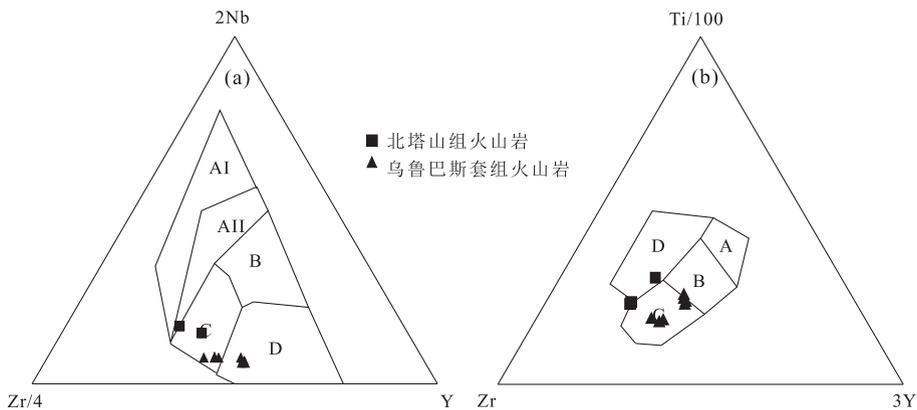


图 11 东准噶尔泥盆纪火山岩构造环境判别图解

Fig.11 Tectonic setting discrimination diagrams of the Devonian volcanic rocks of East Junggar

图 a 据 Meschede (1986), AI, AII, 板内碱性玄武岩, B, P-MORB, C, 板内拉斑玄武岩和钙碱性玄武岩, D, N-MORB; 图 b 据 Pearce (1982), A, 岛弧拉斑玄武岩, B, 岛弧拉斑玄武岩和钙碱性玄武岩, C, 岛弧钙碱性玄武岩, D, 板内玄武岩

含量, Nb、Ta 和 Ti 的负异常以及交代地幔楔源区等特征指示其形成于相对成熟的大洋岛弧环境, 是卡拉麦里洋北向俯冲到西伯利亚活动陆缘上的大洋岛弧产物。

综合区域地质背景和泥盆纪火山岩特征, 笔者推断由于晚古生代卡拉麦里洋盆的收缩挤压, 准噶尔与阿尔泰碰撞造山形成了东准噶尔造山带。早泥盆纪卡拉麦里洋盆开始发生北向俯冲, 从早泥盆世到中泥盆世俯冲作用表现为由陆缘弧向成熟岛弧过渡的特征。从早泥盆纪到中泥盆纪早期, 俯冲深度不大, 俯冲洋壳上部的沉积岩和火山岩发生脱碳酸和脱水作用, 产生的沉积物流体上升进入上覆地幔楔中, 使其发生部分熔融, 从而形成了卡拉麦里地区早泥盆世—中泥盆世早期中钾中钛富铈火山岩, 在西伯利亚南缘形成陆缘弧。中泥盆世俯冲带北部发生弧后裂解, 同时俯冲深度增大, 消减板片下部蛇纹岩等脱水产生的流体上升进入上部榴辉岩区或地幔楔中, 使其发生部分熔融形成莫钦乌拉地区低钾高铝的岛弧火山岩, 至晚泥盆世—早石炭世俯冲作用结束、洋盆闭合。

5 结论

(1) 东准噶尔南缘卡拉麦里和莫钦乌拉地区两套泥盆纪火山岩均以中基性火山熔岩和酸性火山碎屑岩为组合, 火山岩形成与卡拉麦里洋北向俯冲有关。

(2) 北塔山组火山岩时代为中泥盆世早期, 岩浆来源于受过俯冲沉积物熔体和流体交代的亏损地幔楔, 橄榄石—尖晶石二辉橄榄岩相 5%~10% 程度的部分熔融, 并在岩浆上升过程中遭受了地壳混染。乌鲁巴斯套组火山岩属中泥盆世, 岩浆源区为俯冲消减板片流体交代的亏损地幔楔, 橄榄石—尖晶石二辉橄榄岩相 15%~25% 程度的部分熔融, 演化过程中经历了橄榄石和单斜辉石的分离结晶。

(3) 北塔山组火山岩具中—高钾、中钛及大量中酸性火山岩等特征, 显示其形成于陆缘弧环境; 乌鲁巴斯套组火山岩具低钾、低钛、高铝的特征, 表明其形成于相对成熟的大洋岛弧环境, 推测卡拉麦里洋北向俯冲经历了由陆缘弧到大洋岛弧的转变过程。

致谢: 文章编写过程中得到项目各老师和同学的指导与帮助; 测试工作得到了地质过程与矿产资源实验室老师帮助; 审稿专家及编辑对文章提出了宝贵的修改意见; 在此一并表示诚挚的感谢!

References

- Aldanmaz, E., Pearce, J. A., Thirlwall, M. F., et al., 2000. Petrogenetic Evolution of Late Cenozoic, Post-Collision Volcanism in Western Anatolia, Turkey. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 102 (1-2): 67-95. [https://doi.org/10.1016/s0377-0273\(00\)00182-7](https://doi.org/10.1016/s0377-0273(00)00182-7)
- 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](https://doi.org/10.1016/s1367-9120(03)00131-7)
- Chai, F. M., Yang, F. Q., Liu, F., et al., 2012. Geochronology and Genesis of Volcanic Rocks in Beitashan Formation at the Northern Margin of the Junggar, Xinjiang. *Acta Petrologica Sinica*, 28 (7): 2183-2198 (in Chinese with English abstract).
- Dong, L. H., Zhu, Z. X., Qu, X., et al., 2010. Spatial Distribution, Geological Features and Latest Research Progress of the Main Ophiolite Zones in Xinjiang, NW China. *Acta Petrologica Sinica*, 26 (10): 2894-2904 (in Chinese with English abstract).
- He, G. Q., Li, M. S., 2001. Significance of Paleogeography and Paleogeography of Ordovician-Silurian Rock Associations in Northern Xinjiang, China. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 37 (1): 99-110 (in Chinese with English abstract).
- He, G. Q., Li, M. S., Jia, J. D., et al., 2001. A Discussion on Age and Tectonic Significance of Ophiolite in East Junggar, Xinjiang. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 37 (6): 852-858 (in Chinese with English abstract).
- Hole, M. J., Saunders, A. D., Marriner, G. F., et al., 1984. Subduction of Pelagic Sediments: Implications for the Origin of Ce-Anomalous Basalts from the Mariana Islands. *Journal of the Geological Society*, 141 (3): 453-472. <https://doi.org/10.1144/gsjgs.141.3.0453>
- Hu, C. B., Liao, Q. A., Fan, G. M., et al., 2014. Discovery of MOR-Type Ophiolites from the Dishuiquan Region, East Junggar. *Chinese Science Bulletin*, 59 (22): 2213-2222 (in Chinese with English abstract).
- Jahn, B. M., 2004. The Central Asian Orogenic Belt and Growth of the Continental Crust in the Phanerozoic. *Geological Society, London, Special Publications*, 226 (1): 73-100. <https://doi.org/10.1144/gsl.sp.2004.226.01.05>
- Jahn, B. M., Wu, F. Y., Lo, C. H., et al., 1999. Crust-Mantle Interaction Induced by Deep Subduction of the Continen-

- tal Crust: Geochemical and Sr-Nd Isotopic Evidence from Post-Collisional Mafic-Ultramafic Intrusions of the Northern Dabie Complex, Central China. *Chemical Geology*, 157 (1–2): 119–146. [https://doi.org/10.1016/s0009-2541\(98\)00197-1](https://doi.org/10.1016/s0009-2541(98)00197-1)
- Jian, P., Kröner, A., Windley, B. F., et al., 2010. Zircon Ages of the Bayankhongor Ophiolite Mélange and Associated Rocks: Time Constraints on Neoproterozoic to Cambrian Accretionary and Collisional Orogenesis in Central Mongolia. *Precambrian Research*, 177(1–2): 162–180. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2009.11.009>
- le Maitre, R. W., 1989. A Classification of Igneous Rocks and Glossary of Terms; Recommendations of the International Union of Geological Sciences Subcommittee on the Systematics of Igneous Rocks. Blackwell, Oxford.
- Li, D., He, D. F., Tang, Y., 2016. Reconstructing Multiple Arc-Basin Systems in the Altai-Junggar Area (NW China): Implications for the Architecture and Evolution of the Western Central Asian Orogenic Belt. *Journal of Asian Earth Sciences*, 121: 84–107. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2016.02.010>
- Li, J. Y., Xiao, C., Tang, Y. Q., et al., 1990. Main Characteristics of Late Paleozoic Plate Tectonics in the Southern Part of East Junggar, Xinjiang. *Geological Review*, 36 (4): 305–316 (in Chinese with English abstract).
- Li, J. Y., Yang, T. N., Li, Y. P., et al., 2009. Geological Features of the Karamaili Faulting Belt, East Junggar Region, Xinjiang, China and Its Constraints on the Reconstruction of Late Paleozoic Ocean Continental Framework of the Central Asian Region. *Geological Bulletin of China*, 28(12): 1817–1826 (in Chinese with English abstract).
- Li, Y. P., Li, J. Y., Sun, G. H., et al., 2009. Determination of the Early Devonian Granite in East Junggar, Xinjiang, China and Its Geological Implications. *Geological Bulletin of China*, 28 (12): 1885–1893 (in Chinese with English abstract).
- Liang, P., Chen, H. Y., Hollings, P., et al., 2016a. The Paleozoic Tectonic Evolution and Metallogenesis of the Northern Margin of East Junggar, Central Asia Orogenic Belt: Geochronological and Geochemical Constraints from Igneous Rocks of the Qiaoxiahala Fe-Cu Deposit. *Journal of Asian Earth Sciences*, 130: 23–45. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2016.08.001>
- Liang, P., Chen, H. Y., Hollings, P., et al., 2016b. Geochronology and Geochemistry of Igneous Rocks from the Laoshankou District, North Xinjiang: Implications for the Late Paleozoic Tectonic Evolution and Metallogenesis of East Junggar. *Lithos*, 266–267: 115–132. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2016.08.021>
- Liu, Y. S., Gao, S., Hu, Z. C., et al., 2010. Continental and Oceanic Crust Recycling-Induced Melt-Peridotite Interactions in the Trans-North China Orogen: U-Pb Dating, Hf Isotopes and Trace Elements in Zircons from Mantle Xenoliths. *Journal of Petrology*, 51(1–2): 537–571. <https://doi.org/10.1093/petrology/egp082>
- Liu, Y. S., Hu, Z. C., Gao, S., et al., 2008. In Situ Analysis of Major and Trace Elements of Anhydrous Minerals by LA-ICP-MS without Applying an Internal Standard. *Chemical Geology*, 257 (1–2): 34–43. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2008.08.004>
- Long, X. P., Yuan, C., Sun, M., et al., 2012. Geochemistry and U-Pb Detrital Zircon Dating of Paleozoic Graywackes in East Junggar, NW China: Insights into Subduction-Accretion Processes in the Southern Central Asian Orogenic Belt. *Gondwana Research*, 21(2–3): 637–653. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2011.05.015>
- Ludwig, K. R., 2003. User's Manual for Isoplot 3.00: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. Berkeley Geochronology Center Special Publication, Berkeley.
- Luo, T., Chen, S., Liao, Q. A., et al., 2016. Geochronology, Geochemistry and Geological Significance of the Late Carboniferous Bimodal Volcanic Rocks in the East Junggar. *Earth Science*, 41(11): 1845–1862 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2016.128>
- Luo, T., Liao, Q. A., Chen, J. P., et al., 2016. A Record of Post-Collisional Transition: Evidence from Geochronology and Geochemistry of Palaeozoic Volcanic Rocks in the East Junggar, Central Asia. *International Geology Review*, 59(10): 1256–1275. <https://doi.org/10.1080/00206814.2016.1160800>
- Meschede, M., 1986. A Method of Discriminating between Different Types of Mid-Ocean Ridge Basalts and Continental Tholeiites with the Nb-Zr-Y Diagram. *Chemical Geology*, 56 (3–4): 207–218. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(86\)90004-5](https://doi.org/10.1016/0009-2541(86)90004-5)
- Pearce, J. A., 1982. Trace Element Characteristics of Lavas from Destructive Plate Boundaries. In: Thorpe, R. S., ed., *Orogenic Andesites*. Wiley, New York.
- Peccerillo, A., Taylor, S. R., 1976. Geochemistry of Eocene Calc-Alkaline Volcanic Rocks from the Kastamonu Area, Northern Turkey. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 58 (1): 63–81. <https://doi.org/10.1007/bf00384745>
- Plank, T., 2005. Constraints from Thorium/Lanthanum on Sediment Recycling at Subduction Zones and the Evolution of the Continents. *Journal of Petrology*, 46 (5):

- 921—944. <https://doi.org/10.1093/petrology/egi005>
- Plank, T., Langmuir, C. H., 1998. The Chemical Composition of Subducting Sediment and Its Consequences for the Crust and Mantle. *Chemical Geology*, 145(3—4): 325—394. [https://doi.org/10.1016/s0009-2541\(97\)00150-2](https://doi.org/10.1016/s0009-2541(97)00150-2)
- Sajona, F. G., Maury, R. C., Bellon, H., et al., 1996. High Field Strength Element Enrichment of Pliocene-Pleistocene Island Arc Basalts, Zamboanga Peninsula, Western Mindanao (Philippines). *Journal of Petrology*, 37(3): 693—726. <https://doi.org/10.1093/petrology/37.3.693>
- Saunders, A. D., Storey, M., Kent, R. W., et al., 1992. Consequences of Plume-Lithosphere Interactions. *Geological Society, London, Special Publications*, 68(1): 41—60. <https://doi.org/10.1144/gsl.sp.1992.068.01.04>
- Sengör, A. M. C., Natal'in, B. A., Burtman, V. S., 1993. Evolution of the Altaid Tectonic Collage and Paleozoic Crustal Growth in Eurasia. *Nature*, 364(6435): 299—307. <https://doi.org/10.1038/364299a0>
- Shu, L. S., Wang, Y. J., 2003. Late Devonian-Early Carboniferous Radiolarian Fossils from Siliceous Rocks of the Kalamaili Ophiolite, Xinjiang. *Geological Review*, 49(4): 408—412 (in Chinese with English abstract).
- Su, Y. P., Zheng, J. P., Griffin, W. L., et al., 2010. Zircon U-Pb and Hf Isotopes of Volcanic Rocks from the Batamayneishan Formation in the East Junggar Basin. *Chinese Science Bulletin*, 55(36): 4150—4161. <https://doi.org/10.1007/s11434-010-4151-y>
- Su, Y. P., Zheng, J. P., Griffin, W. L., et al., 2012. Geochemistry and Geochronology of Carboniferous Volcanic Rocks in the East 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, H. F., Su, Y. P., Liu, C. Q., et al., 2007. Zircon U-Pb Age of the Plagiogranite in Kalamaili Belt, Northern Xinjiang and Its Tectonic Implications. *Geotectonica et Metallogenia*, 31(1): 110—117 (in Chinese with English abstract).
- Taylor, S. R., McLennan, S. M., 1995. The Geochemical Evolution of the Continental Crust. *Reviews of Geophysics*, 33(2): 241—265. <https://doi.org/10.1029/95rg00262>
- Tian, J., Liao, Q. A., Fan, G. M., et al., 2016. Mantle Underplated Pluton and Stitching Granite Pluton from South Side of the Karamaili Fault in East Junggar: Geochronological, Geochemical and Sr-Nd Isotopic Constraints on Their Petrogenesis and Tectonic Implications. *Acta Petrologica Sinica*, 32(6): 1715—1730 (in Chinese with English abstract).
- Wang, F. M., Liao, Q. A., Fan, G. M., et al., 2014. Geological Implications of Unconformity between Upper and Middle Devonian, and 346.8 Ma Post-Collision Volcanic Rocks in Karamili, Xinjiang. *Earth Science*, 39(9): 1243—1257 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2014.107>
- Wang, Z. X., Zhou, G. Z., Li, T., 2003. The Consideration on Ophiolite and Interrelated Issue in Northern Xinjiang, Northwestern China. *Acta Petrologica Sinica*, 19(4): 683—691 (in Chinese with English abstract).
- White, W. M., Hofmann, A. W., Puchel, H., 1987. Isotopic Geochemistry of Pacific Midocean Ridge Basalt. *Journal of Geophysical Research*, 92(B6): 4881—4893. <https://doi.org/10.1029/jb092ib06p04881>
- Winchester, J. A., Floyd, P. A., 1977. Geochemical Discrimination of Different Magma Series and Their Differentiation Products Using Immobile Elements. *Chemical Geology*, 20: 325—343. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(77\)90057-2](https://doi.org/10.1016/0009-2541(77)90057-2)
- Windley, B. F., Alexeiev, D., Xiao, W. J., et al., 2007. Tectonic Models for Accretion of the Central Asian Orogenic Belt. *Journal of the Geological Society*, 164(1): 31—47. <https://doi.org/10.1144/0016-76492006-022>
- Xia, L. Q., Xia, Z. C., Xu, X. Y., et al., 2007. The Discrimination between Continental Basalt and Island Arc Basalt Based on Geochemical Method. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 26(1): 77—89 (in Chinese with English abstract).
- Xiao, W. J., Han, C. M., Yuan, C., et al., 2008. Middle Cambrian to Permian Subduction-Related Accretionary Orogenesis of Northern Xinjiang, NW China: Implications for the Tectonic Evolution of Central Asia. *Journal of Asian Earth Sciences*, 32(2—4): 102—117. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2007.10.008>
- Xiao, W. J., Santosh, M., 2014. The Western Central Asian Orogenic Belt: A Window to Accretionary Orogenesis and Continental Growth. *Gondwana Research*, 25(4): 1429—1444. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2014.01.008>
- Xiao, W. J., Windley, B. F., Badarch, G., et al., 2004. Palaeozoic Accretionary and Convergent Tectonics of the Southern Altai: Implications for the Growth of Central Asia. *Journal of the Geological Society*, 161(3): 339—342. <https://doi.org/10.1144/0016-764903-165>
- Xiao, X. C., He, G. Q., Xu, X., et al., 2006. Crustal Structure and Tectonic Evolution in Xinjiang, China. *Geological*

Publishing House, Beijing (in Chinese).

- Xiao, Y., Zhang, H. F., Shi, J. A., et al., 2011. Late Paleozoic Magmatic Record of East Junggar, NW China and Its Significance: Implication from Zircon U-Pb Dating and Hf Isotope. *Gondwana Research*, 20(2-3): 532-542. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2010.12.008>
- Xu, X. W., 2016. Tectonic Evolution of the East Junggar Terrane, CAOBE, EGU General Assembly, Vienna.
- Xu, X. W., Jiang, N., Li, X. H., et al., 2013. Tectonic Evolution of the East Junggar Terrane: Evidence from the Taheir Tectonic Window, Xinjiang, China. *Gondwana Research*, 24(2): 578-600. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2012.11.007>
- Xu, X. W., Jiang, N., Li, X. H., et al., 2015. Spatial-Temporal Framework for the Closure of the Junggar Ocean in Central Asia: New SIMS Zircon U-Pb Ages of the Ophiolitic Mélange and Collisional Igneous Rocks in the Zhifang Area, East Junggar. *Journal of Asian Earth Sciences*, 111: 470-491. <https://doi.org/10.1016/j.jgr.2012.11.007>
- 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).
- Yang, G. X., Li, Y. J., Wu, H. E., et al., 2011. Geochronological and Geochemical Constrains on Petrogenesis of the Huangyangshan A-Type Granite from the East Junggar, Xinjiang, NW China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 40(3): 722-736. <https://doi.org/10.1016/j.jseae.2010.11.008>
- Yuan, C., Xiao, W. J., Chen, H. L., et al., 2006. Zhaheba Potassic Basalt, East Junggar (NW China): Geochemical Characteristics and Tectonic Implications. *Acta Geologica Sinica*, 80(2): 254-263 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, H. F., Gao, S., Zhong, Z. Q., et al., 2002. Geochemical and Sr-Nd-Pb Isotopic Compositions of Cretaceous Granitoids: Constraints on Tectonic Framework and Crustal Structure of the Dabieshan Ultrahigh-Pressure Metamorphic Belt, China. *Chemical Geology*, 186(3-4): 281-299. [https://doi.org/10.1016/s0009-2541\(02\)00006-2](https://doi.org/10.1016/s0009-2541(02)00006-2)
- Zhang, H. X., Niu, H. C., Hiroaki, S., et al., 2004. Late Paleozoic Adakite and Nb-Enriched Basalt from Northern Xinjiang: Evidence for the Southward Subduction of the Paleo-Asian Ocean. *Geological Journal of China Universities*, 10(1): 106-113 (in Chinese with English abstract).
- 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 Bulletin*, 125(5-6): 932-944. <https://doi.org/10.1130/b30779.1>
- Zhang, Z. C., Mao, J. W., Cai, J. H., et al., 2008. Geochemistry of Picrites and Associated Lavas of a Devonian Island Arc in the Northern Junggar Terrane, Xinjiang (NW China): Implications for Petrogenesis, Arc Mantle Sources and Tectonic Setting. *Lithos*, 105(3-4): 379-395. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2008.05.013>
- Zhang, Z. C., Yan, S. H., Chen, B. L., et al., 2006. SHRIMP Zircon U-Pb Dating for Subduction-Related Granitic Rocks in the Northern Part of East Junggar, Xinjiang. *Chinese Science Bulletin*, 51(8): 952-962. <https://doi.org/10.1007/s11434-008-0952-7>
- Zhang, Z. C., Zhou, G., Kusky, T. M., et al., 2009. Late Paleozoic Volcanic Record of the East Junggar Terrane, Xinjiang, Northwestern China: Major and Trace Element Characteristics, Sr-Nd Isotopic Systematics and Implications for Tectonic Evolution. *Gondwana Research*, 16(2): 201-215. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2009.03.004>
- Zhang, Z. C., Zhou, G., Yan, S. H., et al., 2007. Geology and Geochemistry of the Late Paleozoic Volcanic Rocks of the South Margin of the Altai Mountains and Implications for Tectonic Evolution. *Acta Geologica Sinica*, 81(3): 344-358 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, J. H., Zhou, M. F., 2009. Secular Evolution of the Neoproterozoic Lithospheric Mantle underneath the Northern Margin of the Yangtze Block, South China. *Lithos*, 107(3-4): 152-168. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2008.09.017>
- Zhao, J. H., Zhou, M. F., Zheng, J. P., 2010. Metasomatic Mantle Source and Crustal Contamination for the Formation of the Neoproterozoic Mafic Dike Swarm in the Northern Yangtze Block, South China. *Lithos*, 115(1-4): 177-189. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2008.09.017>
- Zimmer, M., Kroner, A., Jochum, K. P., et al., 1995. The Gabal Gerf Complex: A Precambrian N-MORB Ophiolite in the Nubian Shield, NE Africa. *Chemical Geology*, 123(1): 29-51. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(95\)00018-H](https://doi.org/10.1016/0009-2541(95)00018-H)
- Zindler, A., Hart, S. R., 1986. Chemical Geodynamics. *Annual Review of Earth Planetary Sciences*, 14: 493-517. <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.14.1.493>

附中文参考文献

- 柴凤梅, 杨富全, 刘铎, 等, 2012. 新疆准噶尔北缘北塔山组火山岩年龄及岩石成因. *岩石学报*, 28(7): 2183-2198.
- 董连慧, 朱志新, 屈迅, 等, 2010. 新疆蛇绿岩带的分布、特征及研究新进展. *岩石学报*, 26(10): 2894-2904.

- 何国琦,李茂松,2001.中国新疆北部奥陶—志留系岩石组合的古构造、古地理意义.北京大学学报(自然科学版),37(1):99—110.
- 何国琦,李茂松,贾进斗,等,2001.论新疆东准噶尔蛇绿岩的时代及其意义.北京大学学报(自然科学版),37(6):852—858.
- 胡朝斌,廖群安,樊光明,等,2014.东准噶尔滴水泉地区发现洋中脊型蛇绿岩.科学通报,59(22):2213—2222.
- 李锦轶,肖序常,汤耀庆,等,1990.新疆东准噶尔卡拉麦里地区晚古生代板块构造的基本特征.地质论评,36(4):305—316.
- 李锦轶,杨天南,李亚萍,等,2009.东准噶尔卡拉麦里断裂带的地质特征及其对中亚地区晚古生代洋陆格局重建的约束.地质通报,28(12):1817—1826.
- 罗婷,陈帅,廖群安,等,2016.东准噶尔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,41(11):1845—1862.<https://doi.org/10.3799/dqkx.2016.128>
- 舒良树,王玉净,2003.新疆卡拉麦里蛇绿岩带中硅质岩的放射虫化石.地质论评,49(4):408—412.
- 唐红峰,苏玉平,刘丛强,等,2007.新疆北部卡拉麦里斜长花岗岩的锆石 U-Pb 年龄及其构造意义.大地构造与成矿学,31(1):110—117.
- 田健,廖群安,樊光明,等,2016.东准噶尔卡拉麦里断裂以南幔源底侵体、“钉合花岗岩体”的发现及其地质意义.岩石学报,32(6):1715—1730.
- 王富明,廖群安,樊光明,等,2014.新疆卡拉麦里上—中泥盆统间角度不整合和 346.8 Ma 后碰撞火山岩的意义.地球科学,39(9):1243—1257.<https://doi.org/10.3799/dqkx.2014.107>
- 王宗秀,周高志,李涛,2003.对新疆北部蛇绿岩及相关问题的思考和认识.岩石学报,19(4):683—691.
- 夏林圻,夏祖春,徐学义,等,2007.利用地球化学方法判别大陆玄武岩和岛弧玄武岩.岩石矿物学杂志,26(1):77—89.
- 肖序常,何国琦,徐新,等,2006.中国新疆地壳结构和构造演化.北京:地质出版社.
- 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.
- 袁超,肖文交,陈汉林,等,2006.新疆东准噶尔扎河坝钾质玄武岩的地球化学特征及其构造意义.地质学报,80(2):254—263.
- 张海祥,牛贺才, Hiroaki, S., 等,2004.新疆北部晚古生代埃达克岩、富铋玄武岩组合:古亚洲洋板块南向俯冲的证据.高校地质学报,10(1):106—113.
- 张招崇,周刚,闫升好,等,2007.阿尔泰山南缘晚古生代火山岩的地质地球化学特征及其对构造演化的启示.地质学报,81(3):344—358.