

doi: 10.12029/gc20180613

刘阁, 舍建忠, 杨文龙, 王庆军, 贾健, 邸晓辰. 2018. 西准噶尔巴音达拉地区卡拉岗组火山岩锆石 U-Pb 年代学、地球化学及其地质意义[J]. 中国地质, 45(6): 1241-1250.

Liu Ge, She Jianzhong, Yang Wenlong, Wang Qinjun, Jia Jian, Di Xiao Chen. 2018. Zircon U-Pb chronology and geochemistry of the Kalagang Formation volcanic rocks in Bayindala area, West Junggar, and their geological significance[J]. Geology in China, 45(6): 1241-1250(in Chinese with English abstract).

西准噶尔巴音达拉地区卡拉岗组火山岩 锆石 U-Pb 年代学、地球化学及其地质意义

刘阁¹ 舍建忠¹ 杨文龙² 王庆军¹ 贾健¹ 邸晓辰¹

(1. 新疆地质调查院, 新疆 乌鲁木齐 830000; 2. 核工业二一六大队, 新疆 乌鲁木齐 830011)

摘要: 西准噶尔巴音达拉地区发育一套酸性火山岩, 被称为卡拉岗组, 岩石组合以流纹岩、英安岩、流纹质熔结凝灰岩等酸性火山岩为主。本文对卡拉岗组火山岩进行高精度锆石 LA-ICP-MS U-Pb 测年, 获得英安岩和流纹岩的加权平均 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄分别为 $(294.4 \pm 1.3) \text{ Ma}$ ($n=9$, MSWD=0.8) 和 $(298.4 \pm 2.5) \text{ Ma}$ ($n=9$, MSWD=3.4), 其形成于早二叠世。岩石地球化学特征表明, 卡拉岗组火山岩岩具有高硅 (66.69%~75.21%), 富碱 ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$: 6.98%~8.35%), 低 MgO (0.18%~1.32%), 贫钙 (0.24%~2.49%) 的特征, 均属过铝质 (A/CNK: 1.14~1.33) 及高钾钙碱性系列。微量元素数据显示, 稀土总量为 ΣREE 为 $83.82 \times 10^{-6} \sim 197.61 \times 10^{-6}$, $(\text{La}/\text{Yb})_N = 3.15 \sim 12.50$, 轻、重稀土元素分馏比较明显, 轻稀土元素 (LREE) 较为富集, 重稀土元素分布相对平坦, 球粒陨石标准化配分模式为右倾型。微量元素富集大离子亲石元素 (LILE) Rb、Th、U、K, 并亏损高场强元素 (HFSE) Nb、Ta、P、Ti。综合最新区域资料及本文研究成果, 文章认为研究区早二叠世卡拉岗组火山岩岩浆来源于壳源物质不同程度的部分熔融, 残留相中有少量斜长石和角闪石, 为后碰撞伸展阶段的产物。

关键词: 卡拉岗组; 火山岩; 岩石成因; 后碰撞; 西准噶尔

中图分类号: P597.3; P588.14

文献标志码: A

文章编号: 1000-3657(2018)06-1241-10

Zircon U-Pb chronology and geochemistry of the Kalagang Formation volcanic rocks in Bayindala area, West Junggar, and their geological significance

LIU Ge¹, SHE Jianzhong¹, YANG Wenlong², WANG Qinjun¹, JIA Jian¹, DI Xiaochen¹

(1. Geological Research Academy of Xinjiang, Urumqi 830000, Xinjiang, China; 2. No. 216 Geological Party of CNNC, Urumqi 830011, Xinjiang, China)

Abstract: Silicic volcanic rocks are developed in Bayindala area of West Junggar. The Kalagang Formation volcanic rocks are mainly composed of rhyolite, dacite, rhyolitic tuff and ignimbrite. This paper reports the results of high-precision zircon LA-ICP-MS U-Pb dating of the Kalagang Formation volcanic rocks, which yielded weighted mean $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ ages of $(294.4 \pm 1.3) \text{ Ma}$ ($n=9$,

收稿日期: 2016-10-04; 改回日期: 2017-02-03

基金项目: 中国地质调查局“新疆区域地质调查片区总结与服务产品开发”项目 (DD20160345-04) 资助。

作者简介: 刘阁, 男, 1988 年生, 硕士, 工程师, 主要从事区域地质调查研究工作; E-mail: 119317049@qq.com。

MSWD = 0.8, dacite) and (298.4 ± 2.5) Ma ($n=9$, MSWD = 3.4, rhyolite), corresponding to the Early Permian. Petrogeochemical analyses suggest that the Kalagang Formation volcanic rocks are characterized by high silica (SiO_2 : 66.69%–75.21%) and alkali ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$: 6.98%–8.35%), and low magnesium and calcium (MgO 0.18%–1.32%, CaO 0.24%–2.49%). They belong to peraluminous (A/CNK : 1.14–1.33) and high-K calc-alkaline series. The rocks are poor in rare earth elements with ΣREE being 83.82×10^{-6} – 197.61×10^{-6} , enriched in LREE [$(\text{La}/\text{Yb})_n=3.15$ –12.50] and LILEs (Rb,Th,U,K) and depleted in HFSE, especially Nb, Ta, P and Ti. In combination with previous studies, the authors hold that the Kalagang Formation volcanic rocks in a post-collisional extensional setting were formed by varying degrees of crust partial melting and the residua had a little plagioclase and hornblende.

Key words: Kalagang Formation; volcanic rock; petrogenesis; post-collision; West Junggar

About the first author: LIU GE, male, born in 1988, master, engineer, majors in regional geological survey; E-mail: 119317049@qq.com.

Fund support: Supported by Regional Geological Survey Project of China Geological Survey (No. 12120113040800).

1 引 言

西准噶尔位于西伯利亚、哈萨克斯坦和塔里木三大板块的交汇处,是中亚造山带的核心地带(肖文交等,2008),主要由一系列的增生杂岩带、古生代岩浆弧构成,由北至南依次为西准噶尔增生杂岩带、博什库尔—成吉斯岩浆弧、扎尔玛—萨吾尔岩浆弧、额尔齐斯—斋桑缝合带(Windley et al., 2007)(图1a)。晚古生代是准噶尔盆地构造体制的重要转折阶段(尹继元等,2011;徐新等,2010),发生了多期陆相火山喷发、大规模的富碱岩浆侵入;西准噶尔地区出露大量的A型花岗岩,被认为是后碰撞地壳垂向生长记录者(Chen et al., 2004;韩宝福等, 2006),前人对西准噶尔晚古生代侵入岩研究中积累了大量的锆石U-Pb年龄数据、地球化学数据(尹继元等, 2013)。二叠纪火山作用是西准噶尔地区晚古生代最晚的火山作用,卡拉岗组火山岩在西准噶尔北部及南部广泛分布,南部地区托里一带为一套酸性火山熔岩及碎屑岩,形成于早二叠世(298 ± 3) Ma(高翔等,2014);在北部地区集中产于萨吾尔山及沙尔布尔山一带,萨吾尔山一带为一套陆相酸性—中性—基性火山岩,具双峰式火山岩特征,形成于早二叠世(283~280) Ma(周涛发等,2006)。综上所述,前人对托里地区及萨吾尔山一带卡拉岗组火山岩有较为深入的研究,沙尔布尔山一带巴音达拉地区卡拉岗组火山岩研究较为薄弱,木合塔尔(1994)对该组火山岩进行了岩相学及少量地球化学研究,沙尔布尔山巴音达拉地区卡拉岗组火山岩在年代

学、岩石地球化学具有怎样的特征,显示何种构造背景。基于此,本文对沙尔布尔山西段巴音达拉地区下二叠统卡拉岗组火山岩进行较详尽的岩石学、同位素年代学、地球化学研究,并对其形成的构造环境进行探讨,完善西准噶尔地区二叠纪火山作用特征,为研究西准噶尔北部地区后碰撞的演化及古生代地壳增生作用和动力学背景等提供新的证据。

2 地质背景

西准噶尔北部由南向北依次分布着近北东—南西走向的吾尔喀什尔山,近东西走向的谢米斯台山、赛尔山、沙尔布尔山、塔尔巴哈台山和萨吾尔山(图1a)。

研究区位于西准噶尔地区北东段、沙尔布尔山西部巴音达拉地区,卡拉岗组酸性火山岩近北东向展布,该火山岩与中奥陶统布鲁克其组、沙尔布尔组呈断层接触关系,与下伏地层哈尔加乌组呈整合接触关系,上覆新近系独山子组石英砾岩及第四系松散堆积层(图1b)。

区内主要出露奥陶纪至二叠纪地层,侵入岩不发育,仅见少量酸性岩脉。地层由老到新有中奥陶统布鲁克其组(O_2b),主要岩性为安山岩、火山角砾岩、凝灰质砂岩;中志留统沙尔布尔组(S_3s),主要岩性为凝灰质砂岩、砂岩、粉砂岩;上一顶志留统克克雄呼都克组(S_3-4kk),主要岩性为砂岩、条带状粉砂岩、泥质粉砂岩;下二叠统哈尔加乌组(P_1h),主要岩性为玄武岩、安山岩、安山质凝灰岩;卡拉岗组(P_1k)火山岩主要岩性为英安岩、流纹岩。沙尔布尔组角

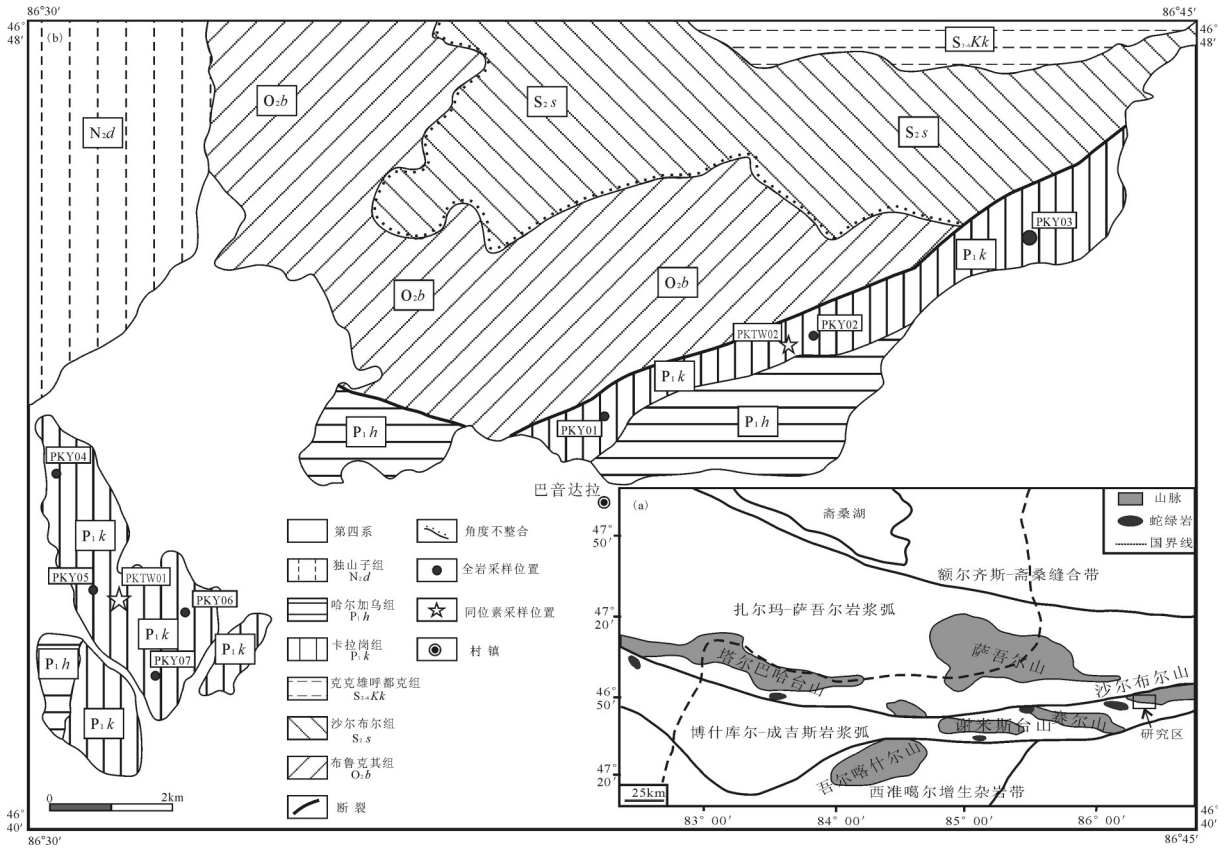


图1 区域构造及地理位置简图(a,据 Chen Jiafu et al., 2010 修改)和巴音达拉地区地质简图(b)

Fig.1 Tectonic setting and location map (a, modified after Chen et al., 2010) and simplified geological map of Bayindala area (b)

度不整合于布鲁克其组之上,与卡拉岗组呈断层接触关系。

3 岩石学特征

卡拉岗组火山岩主要岩性为英安岩、流纹岩夹少量的霏细岩及流纹质熔结凝灰岩夹少量中性火山岩。

流纹岩呈灰白-浅褐色,略显流纹构造,具有斑状结构,斑晶由正长石组成,斑晶含量3%,粒度0.2~2 mm不等,含少量斜长石。正长石具高岭土化,大部分正长石斑晶环边分布有微粒石英,斜长石具高岭土化、轻度绢云母化,基质则主要由微晶长石和石英组成。

英安岩呈褐灰色-深灰色,具斑状结构,斑晶含量较少,约占5%,主要为石英、钾长石,含少量黑云母,石英呈溶蚀港湾状分布,基质主要由长英质组成,长英质呈球粒包含微晶结构,并有绢云母化,在长英质集合体之间分布有少部分细粒石英、斜长石

及蚀变鳞片状绢云母。

流纹质玻屑熔结凝灰岩,颜色呈褐红色,熔结凝灰结构,岩石主要由塑变玻屑组成,含量约占92%,分布少部分晶屑、浆屑,分别占5%及3%。玻屑呈假流纹构造,由隐晶长英质、微晶石英组成,在塑变玻屑中分布有钾长石晶屑及酸性熔岩浆屑,浆屑具高岭土化。

4 样品特征与分析方法

本文在野外路线调查和剖面测制基础上共采集了2件新鲜无蚀变的样品,进行锆石U-Pb同位素测年分析,英安岩(PKTW01)地理坐标: 86°31'04" E, 46°42'27"N;流纹岩(PKTW02)地理坐标: 86°39'07"E, 46°44'58"N。每件样品重约20 kg,样品破碎、锆石挑选由河北省区域地质矿产调查研究所完成,阴极发光显微照相由北京锆年领航科技有限公司完成,锆石U-Pb同位素分析由中国科学院广州地球化学研究所实验室的激光剥蚀电感耦合等离子

质谱仪(LA-ICP-MS)上进行,同位素组成用国际标准锆石 91500 作为外标,激光光束束斑直径 32 μm 。锆石测定点的 Pb 同位素比值、U-Pb 表面年龄和 U-Th-Pb 含量采用 ICPMSDataCal 程序和 Isoplot 程序进行数据处理(Liu et al.,2008)。

主微量元素样品采集时尽量避开接触带、蚀变带和断裂破碎带等,样品 PKY01~03 沿构造线方向采集,PKY04~06 垂直于构造线方向采集,确保样品具有代表性,选择较新鲜、气孔和杏仁体较少的样品进行测试。对于一些有杏仁体的样品,先在颚式刚玉对滚机上将其粉碎到厘米级大小,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后,用于分析。地球化学分析的样品岩性主要为流纹岩、英安岩。岩石样品主量元素与微量元素测试由新疆矿产实验研究所完成,主量元素测试方法为 X 射线荧光光谱分析(XRF),主量元素分析精度和准确度优于 5%,微量元素测试方法为 X 系列电感耦合离子质谱仪分析(ICP-MS),微量元素的分析精度和准确度优于 5%。

5 分析结果

5.1 锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄

从卡拉岗组火山岩中英安岩、流纹岩选取的锆石为浅黄色-无色透明呈长柱状自形晶体,柱状长宽比为 1:1~3:1,阴极发光图像(图 2a、b)显示锆石韵律环带结构清晰,具有典型的岩浆成因锆石的特征。

英安岩 9 颗锆石 Th 含量变化范围为 $197.0 \times 10^{-6} \sim 316.0 \times 10^{-6}$,U 含量变化为 $200.5 \times 10^{-6} \sim 378.4 \times 10^{-6}$,样品锆石均具有较高的 Th/U 比值为 0.69~1.21,属于

典型岩浆成因锆石的范围(Hoskin et al., 2000)(表 1)。英安岩 9 颗锆石的年龄均落在谐和线上或其附近, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 $(294.4 \pm 1.3) \text{ Ma}$ (MSWD=0.80)(图 3a)。

流纹岩 9 颗锆石 Th 含量变化范围为 $87.2 \times 10^{-6} \sim 227.9 \times 10^{-6}$,U 含量变化为 $89.7 \times 10^{-6} \sim 217.9 \times 10^{-6}$,样品锆石均具有较高的 Th/U 比值,为 0.72~1.05,属于典型岩浆成因锆石(Hoskin et al., 2000)(表 1)。流纹岩 9 颗锆石的年龄均落在谐和线上或其附近, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 $(298.4 \pm 2.5) \text{ Ma}$, (MSWD=3.4)(图 3b)。

锆石 U-Pb 年龄一致性较差,可能为岩石遭受了轻微的蚀变,导致锆石中放射成因铅发生了不同程度的丢失。

5.2 主量元素特征

从卡拉岗组火山岩样品的主微量元素地球化学分析结果(表 2)可以看出:卡拉岗组火山岩主要由英安岩和流纹岩组成,其中英安岩主量元素具有较高的 SiO_2 含量(66.69%~68.29%),高铝($\text{Al}_2\text{O}_3=15.98\% \sim 16.32\%$),相对较低的 MgO (0.84%~1.32%)、 TFe_2O_3 (2.62%~3.14%),富碱($\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}=6.98\% \sim 8.35\%$),富钠($\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}=0.66 \sim 0.89$),相对贫钙(1.10%~2.49%)的特征。流纹岩主量元素具有高硅($\text{SiO}_2=74.85\% \sim 75.21\%$),低钛($\text{TiO}_2=0.22\% \sim 0.27\%$),相对较高铝($\text{Al}_2\text{O}_3=13.47\% \sim 14.27\%$),低 MgO (0.18%~0.29%)、 TFe_2O_3 (0.66%~0.84%);富碱($\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}=7.57\% \sim 8.08\%$),富钾($\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}=1.51 \sim 1.76$),贫钙(0.24%~0.57%)的特征。

卡拉岗组火山岩在 $\text{SiO}_2-(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$ 图解中,

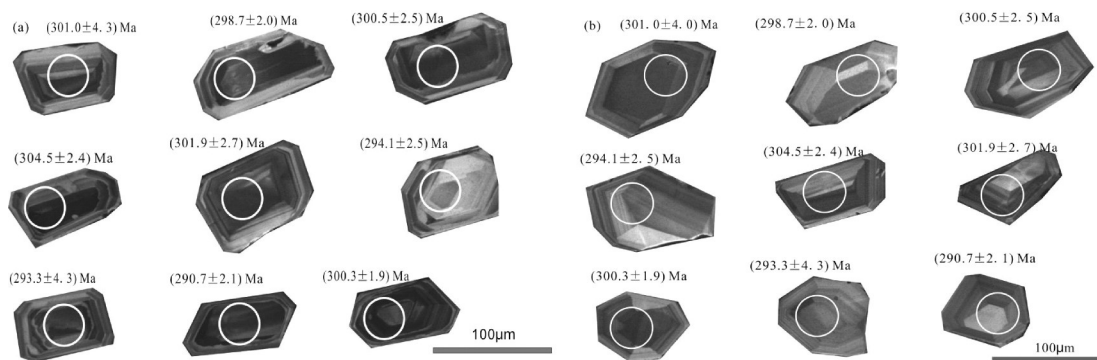


图 2 西准噶尔卡拉岗组火山岩英安岩锆石阴极发光图像(a)流纹岩锆石阴极发光图像(b)

Fig.2 Dacite CL images (a) and rhyolite CL images (b) from the Kalagang volcanic rocks in West Junggar

表1 西准噶尔卡拉岗组火山岩锆石LA-ICP-MS U-Pb 定年数据
Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Pb dating results for Kalagang volcanic rocks in West Junggar

岩性及测点号	含量/ 10^{-6}			同位素比值				年龄/Ma				谐和度
	Th	U	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	
英安岩												
PKTW01-01	197.0	228.2	0.86	0.3726	0.0164	0.0478	0.0006	327.3	5.4	291.1	3.2	90%
PKTW01-02	200.0	290.9	0.69	0.4498	0.0094	0.0474	0.0003	305.3	4.7	293.4	1.8	96%
PKTW01-12	214.5	272.0	0.79	0.3748	0.0110	0.0477	0.0004	322.9	9.8	294.2	3.6	91%
PKTW01-14	225.1	200.9	1.12	0.4105	0.0152	0.0484	0.0004	328.0	6.1	298.7	2.4	91%
PKTW01-16	316.0	356.5	0.89	0.3752	0.0087	0.0479	0.0004	297.2	4.5	292.6	1.8	98%
PKTW01-17	276.7	318.1	0.87	0.4176	0.0128	0.0467	0.0004	309.2	4.3	294.7	1.5	96%
PKTW01-19	243.1	200.5	1.21	0.3745	0.0330	0.0465	0.0007	316.1	5.2	294.4	2.0	93%
PKTW01-21	242.8	247.5	0.98	0.3547	0.0067	0.0461	0.0003	311.5	5.5	294.2	1.9	94%
PKTW01-22	296.4	378.4	0.78	0.3569	0.0068	0.0477	0.0003	327.6	5.6	295.9	1.9	90%
流纹岩												
PKTW02-03	96.6	122.9	0.79	0.3726	0.0164	0.0478	0.0006	321.6	12.1	301.0	4.0	93%
PKTW02-04	179.2	186.0	0.96	0.4498	0.0094	0.0474	0.0003	377.2	6.6	298.7	2.0	80%
PKTW02-05	69.7	89.7	0.78	0.3748	0.0110	0.0477	0.0004	323.2	8.1	300.5	2.5	92%
PKTW02-14	71.9	97.5	0.74	0.4105	0.0152	0.0484	0.0004	349.3	11.0	304.5	2.4	86%
PKTW02-15	88.6	123.7	0.72	0.3752	0.0087	0.0479	0.0004	323.5	6.4	301.9	2.7	93%
PKTW02-21	87.2	106.8	0.82	0.4176	0.0128	0.0467	0.0004	354.4	9.2	294.1	2.5	83%
PKTW02-24	159.1	175.4	0.91	0.3745	0.0330	0.0465	0.0007	323.0	24.4	293.3	4.3	92%
PKTW02-26	186.2	188.7	0.99	0.3547	0.0067	0.0461	0.0003	308.2	5.0	290.7	2.1	94%
PKTW02-30	227.9	217.9	1.05	0.3569	0.0068	0.0477	0.0003	309.9	5.1	300.3	1.9	96%

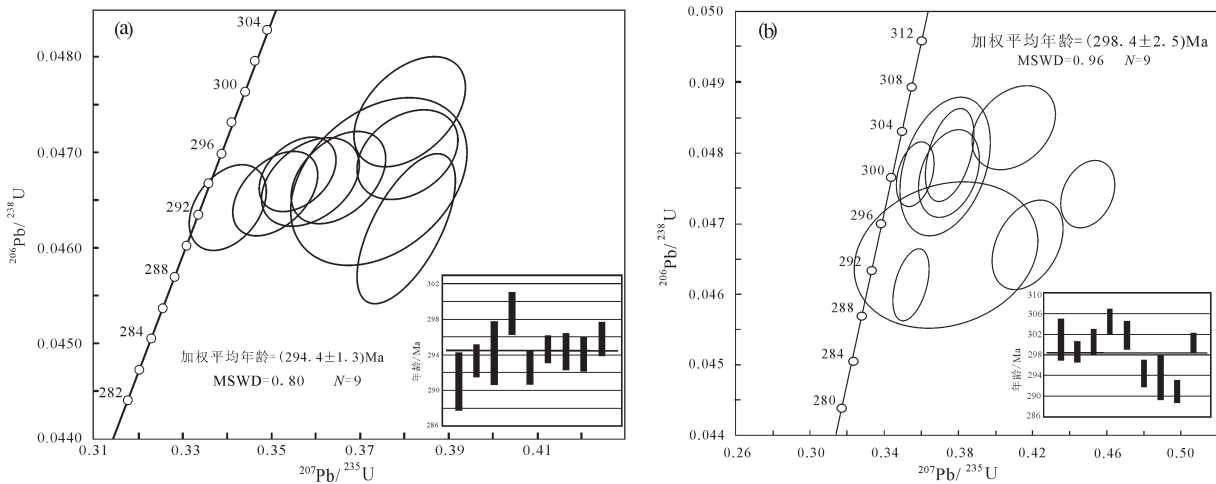


图3 西准噶尔卡拉岗组火山岩英安岩锆石U-Pb年龄谐和图(a)、流纹岩锆石U-Pb年龄谐和图(a)

Fig.3 U-Pb concordia plots of zircons from dacite (a) and U-Pb concordia plots of zircons from rhyolite(b) of Kalagang volcanic rocks in West Junggar

样品主要落在英安岩-流纹岩区域内(图4a), 总体属于亚碱性系列岩石; 铝饱和指数 $A/CNK=1.14\sim 1.33$, 属于过铝质系列, 具有壳源岩石过铝的特点, 里特曼指数(σ)为 $1.79\sim 2.72$ (平均 2.16), 属于钙碱性岩系; 在 $\text{SiO}_2\text{-K}_2\text{O}$ 判别图解上(图4b), 岩石样品均落在高钾钙碱性系列。

5.3 稀土元素特征

卡拉岗组火山岩可分为英安岩与流纹岩两类, 流纹岩较英安岩有较高的稀土总量, ΣREE 流纹岩为 $193.51\times 10^{-6}\sim 197.61\times 10^{-6}$, 英安岩为 $83.82\times 10^{-6}\sim 92.64\times 10^{-6}$; 两者在稀土元素球粒陨石标准化配分模式图上都具有轻稀土元素富集的右倾特征(图5a), 轻重稀土元素比值(LREE/HREE)为 $4.59\sim 8.91$ 、 $8.91\sim 11.23$, 分馏系数 $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 为 $3.15\sim 9.36$ 、 $8.47\sim$

表2 卡拉岗组火山岩主量元素(%)与微量元素(10^{-6})分析结果
Table 2 Major elements (%) and rare earth elements (10^{-6}) of Kalagang Formation volcanic rocks

样品号	PKY01	PKY02	PKY03	PKY04	PKY05	PKY06	PKY07
SiO ₂	75.21	74.85	66.69	67.14	67.94	68.24	68.29
TiO ₂	0.27	0.22	0.35	0.33	0.29	0.28	0.29
Al ₂ O ₃	13.47	14.27	16.17	16.12	16.11	15.98	16.32
TFe ₂ O ₃	0.84	0.66	3.14	3.06	2.69	2.74	2.62
MnO	0.02	0.01	0.12	0.08	0.08	0.08	0.08
MgO	0.18	0.29	1.26	1.32	0.84	1.21	0.99
CaO	0.24	0.57	2.49	1.82	1.64	1.32	1.10
Na ₂ O	3.22	2.74	3.81	4.14	3.91	4.72	4.75
K ₂ O	4.86	4.83	3.17	3.00	3.48	3.10	3.60
P ₂ O ₅	0.07	0.03	0.16	0.14	0.15	0.15	0.14
LOI	1.18	1.13	2.38	2.84	2.51	1.78	1.64
Total	99.56	99.60	99.74	99.99	99.64	99.60	99.82
Na ₂ O+K ₂ O	8.08	7.57	6.98	7.14	7.39	7.82	8.35
K ₂ O/Na ₂ O	1.51	1.76	0.83	0.72	0.89	0.66	0.76
Mg [#]	29.79	46.52	44.32	46.07	38.21	46.65	42.80
A/CNK	1.28	1.47	1.67	1.60	1.58	1.44	1.39
σ43	2.02	1.79	2.01	2.07	2.15	2.39	2.72
La	47.1	38.7	18.8	19.5	21.4	22.2	21.6
Ce	81.60	75.80	38.70	32.50	38.60	32.60	37.10
Pr	12.30	9.50	4.40	4.20	4.60	4.50	4.40
Nd	30.80	29.00	16.70	15.60	16.80	16.00	15.70
Sm	5.20	5.30	2.90	2.70	2.80	2.60	2.70
Eu	0.66	0.58	0.88	0.86	0.80	0.82	0.80
Gd	5.20	4.80	2.40	2.30	2.30	2.20	2.10
Tb	0.80	0.73	0.40	0.36	0.34	0.33	0.34
Dy	5.20	8.10	2.20	2.10	1.80	1.90	1.80
Ho	1.00	2.20	0.41	0.42	0.38	0.36	0.36
Er	3.20	7.70	1.30	1.30	1.20	1.10	1.10
Tm	0.57	1.40	0.23	0.22	0.20	0.20	0.21
Yb	3.40	8.30	1.50	1.50	1.20	1.20	1.20
Lu	0.58	1.40	0.27	0.26	0.22	0.24	0.22
Σ REE	197.61	193.51	91.09	83.82	92.64	86.25	89.63
LREE/HREE	8.91	4.59	9.46	8.91	11.13	10.45	11.23
(La/Yb) _N	9.36	3.15	8.47	8.78	12.05	12.50	12.16
(La/Sm) _N	5.70	4.59	4.08	4.54	4.81	5.37	5.03
(Gd/Yb) _N	1.23	0.47	1.29	1.24	1.55	1.48	1.41
δEu	0.38	0.35	0.99	1.03	0.94	1.02	0.99
Cr	5.78	5.43	6.41	12.20	3.82	2.24	3.44
Co	6.56	5.96	6.22	6.04	4.60	4.50	4.18
Ni	8.34	7.65	7.34	14.80	5.52	4.17	3.72
Rb	99.90	112.00	73.61	66.91	73.32	66.59	77.80
Ba	414	348	1222	1044	1316	1200	1232
Th	12.29	14.90	4.60	4.90	5.60	4.90	4.80
U	3.70	2.20	1.70	1.30	1.80	1.10	1.40
Nb	24.86	23.02	8.66	8.38	8.17	8.33	8.39
Ta	1.80	1.69	0.56	0.66	0.68	0.57	0.70
Sr	71.9	55.0	555.0	373.0	398.0	372.0	424.0
Zr	232.0	224.0	162.0	165.0	159.0	161.0	164.0
Hf	6.47	6.32	3.70	4.30	4.30	4.20	4.28
Y	27.00	23.30	12.60	12.10	12.00	11.00	11.30
La/Ta	26.17	22.90	33.57	29.55	31.47	38.95	30.86
Nb/Ta	13.81	13.62	15.46	12.70	12.01	14.61	11.99
Ti/Zr	6.98	5.89	13.06	11.99	10.93	10.43	10.60

注: TFe₂O₃以Fe₂O₃表示的总铁量; (La/Yb)_N为球粒陨石标准化比值。

12.50,反映两类火山岩均相对富集轻稀土元素,亏损重稀土元素,而英安岩则发生了更明显的轻重稀土元素分异。流纹岩(La/Sm)_N、(Gd/Yb)_N分别为4.59~5.70、0.47~1.23,英安岩(La/Sm)_N、(Gd/Yb)_N分

别为4.08~5.37和1.24~1.55,说明两者轻稀土元素之间存在较强的分馏,重稀土元素之间分馏不明显。此外流纹岩具有较明显负Eu异常(δEu值为0.35~0.38),英安岩无明显负Eu异常(δEu值为0.94~1.03),反映了随着岩浆演化,酸性程度增大,斜长石发生了分离结晶或部分熔融作用。

5.4 微量元素特征

由微量元素原始地幔标准化蛛网图(图5b)可见,不同岩石类型的微量元素质量分数差距较小,蛛网图形态基本相似,代表了不同岩石类型同源演化的特点。均相对富集大离子亲石元素(LILE)、Rb、Th、U、K,相对亏损Nb、Ta、Ti等高场强元素,流纹岩具有更亏损Ba、Sr、Ti的特征。Nb和Ta的相对亏损指示其岩浆可能来源于地壳重熔,也可能经历了富Nb、Ta矿物的结晶分异作用。Sr负异常指示岩体在形成过程中,岩浆发生了斜长石的分离结晶作用,或岩浆源区残留有斜长石。P、Ti偏低可能与磷灰石、钛铁氧化物的结晶分异有关。

6 讨论

6.1 卡拉岗组酸性火山岩形成时代

卡拉岗组火山岩在邻区和本区不整合于克克雄库度克组(S_{3-4kk})、洪古勒楞组(D₃C_{1h})之上,被第四系覆盖。研究区卡拉岗组酸性火山岩具有特殊的球泡构造,此特征是西准噶尔地区早二叠世卡拉岗组火山岩具有代表性的典型特征。前人在沙尔布尔提山东部乌兰哈达地区卡拉岗组沉凝灰岩中发现匙叶*Noeggerathiopsis* sp.、瓦契杉*Walchia* sp.、鳞木*Lepidodendron* sp.、车轴介*Whippella* sp等化石而认为其形成于早二叠世(木合塔尔等,1994)。

谭绿贵等(2007)在西准噶尔萨吾尔地区卡拉岗组英安岩、流纹岩进行了⁴⁰Ar-³⁹Ar精确测年,获得英安岩坪年龄为(283±2) Ma(2σ),流纹岩坪年龄为(280±2) Ma,高翔等(2014)西准噶尔托里地区卡拉岗组火山岩中的英安岩进行了LA-ICP-MS测年,锆石U-Pb年龄为(293±3) Ma。本文分别对西准噶尔沙尔布尔山西段的卡拉岗组酸性火山岩中的英安岩和流纹岩进行了年代学研究,获得卡拉岗组英安岩的锆石LA-ICP-MS U-Pb年龄为(294.4±1.3) Ma,流纹岩的锆石LA-ICP-MS U-Pb年龄为(298.4±2.5) Ma。由此可见,沙尔布尔山西段

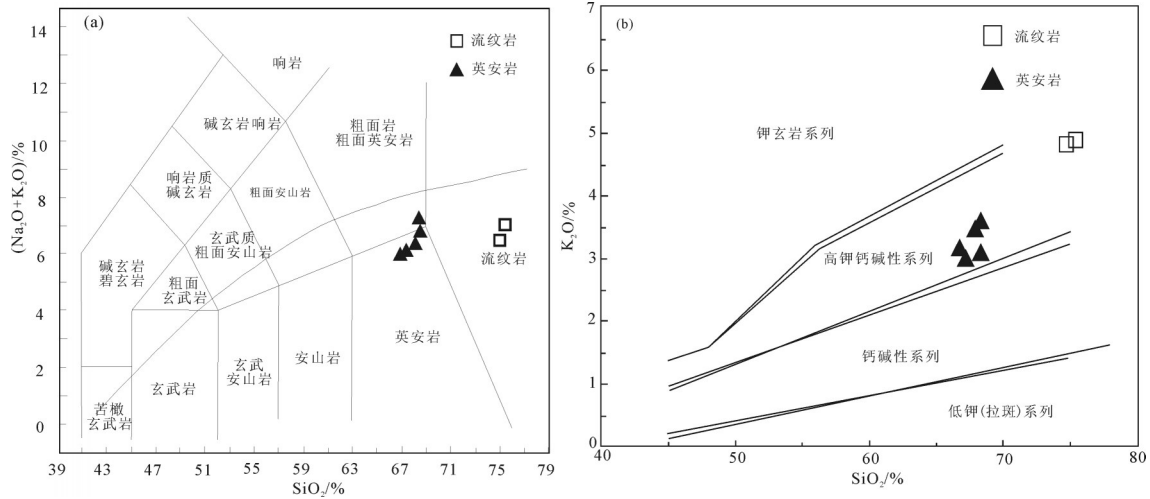


图4 西准噶尔卡拉岗组火山岩岩石类型和系列划分图解
 a—SiO₂-(K₂O+Na₂O)图解(据 Middlemost, 1994); b—SiO₂-K₂O图解(据 Wilson, 1989)
 Fig.4 Classification and series of diagrams of the Kalagan volcanic rocks in West Junggar
 a—SiO₂-(K₂O+Na₂O) diagram (after Middlemost, 1994); b—SiO₂-K₂O diagram (after Wilson, 1989)

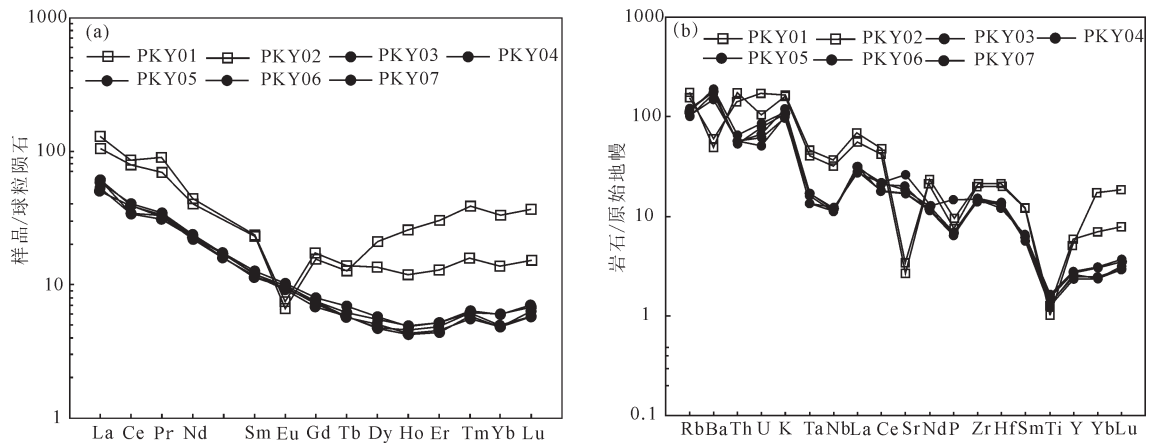


图5 卡拉岗组火山岩稀土元素球粒陨石标准化图解(a,标准化值据 Boyoton,1984)和微量元素原始地幔标准化图解(b,标准化值据 Sun and McDonough,1989)
 Fig.5 Chondrite-normalized REE-patterns (a, chondrite data after Boyoton,1984) and primitive mantle normalized spider diagram (b, primitive mantle data from Sun and McDonough,1989) for Kalagan volcanic rocks

巴音达拉地区的卡拉岗组火山岩与西准噶尔其他地区卡拉岗组火山岩具有相同的年代学特征,主要形成时代均为早二叠世。

6.2 岩石成因

卡拉岗组火山岩具有较高的SiO₂和低Mg值(Mg[#]=29.8~46.6,平均值42.1)的特点,Cr、Co、Ni质量分数分别为2.24×10⁻⁶~12.2×10⁻⁶、4.18×10⁻⁶~6.56×10⁻⁶、3.72×10⁻⁶~14.8×10⁻⁶,远低于原始地幔质量分数值(Rudnick et al., 2003)(Cr=1020×10⁻⁶、Co=105×10⁻⁶、Ni=2400×10⁻⁶),表明其不可能是幔源岩石部分熔融的产物。英安岩与流纹岩的K₂O/TiO₂比值分别为

9.0~12.4、18.0~22.0,变化范围较小,说明两者具有相似的源区性质。卡拉岗组火山岩总体为过铝质的高钾钙碱性火山岩,相对富集轻稀土元素及大离子亲石元素,亏损重稀土元素及高场强元素。不同类型岩石微量元素及稀土元素相互平行,具有较为一致的元素特征及配分形式,也说明它们具有一致的岩浆源区。

微量元素组成上,研究区卡拉岗组火山岩以富集大离子亲石元素(LILE)和轻稀土(LREE)元素,亏损Nb、Ta、Ti等高场强元素为特征,显示火山岩具有壳源岩浆的典型特征(Rudnick et al.,2003)。地壳与

地幔的物质组成表明,地壳一般Ti亏损、Zr富集。本文酸性火山岩亏损Ti、富集Zr,从地壳与地幔一般性的物质组成特点推测,该酸性火山岩很可能源自地壳物质。地壳一般亏损Nb、Ta,蛛网图上的Nb-Ta槽也说明岩石与陆壳密切相关。酸性火山岩的La/Ta比值为22.9~38.9,平均值为30.5,接近接近地壳的La/Ta比值(≈ 29 , Rudnick, 2003), Nb/Ta比值为12.0~15.2,平均值为13.5,接近于地壳平均值(11~12) (Green, 1994); Ti/Zr=5.9~13.1(<20),均位于壳源岩浆范围之内 (Pearce, 1983; Tischendorf and Paelchen, 1985)。由此认为研究区卡拉岗组火山岩其源区应以地壳为主。

卡拉岗组英安岩SiO₂含量66.69%~68.29%,具有相对较高的Ba和Sr含量, Eu具弱的负异常或无异常,流纹岩SiO₂含量74.85%~75.21%,具有相对较低的Ba和Sr含量, Eu负异常明显,说明原岩在演化过程中发生了分离结晶作用或者源区原岩发生了不同程度的部分熔融。

卡拉岗组的酸性火山岩CaO、MgO、TFe₂O₃和TiO₂含量变化非常小,说明不存在明显的分离结晶过程, K/Rb为357.1~403.9>150,表明岩浆分异或水热作用不明显 (Dostal and Chatterjee, 2000)。事实上,对于如此高硅的酸性岩浆来说,很难发生强烈的分离结晶作用,因此说明卡拉岗组火山岩更可能是壳源岩石部分熔融的产物。

卡拉岗组火山岩具有弱-中等的Eu负异常说明在熔融过程中有少量斜长石做为残留相。由于石榴石强烈富集HREE,角闪石富集MREE (Green, 1994),卡拉岗组火山岩样品HREE分布较为平缓, MREE相对于HREE略为亏损,暗示部分熔融后的残留物中可能含有少量角闪石,不含石榴石。

综上所述:卡拉岗组火山岩岩浆由壳源物质经不同程度部分熔融形成,残留相中有少量斜长石和角闪石。

6.3 构造背景及地质意义

本文在卡拉岗组火山岩英安岩和流纹岩已获得LA-ICP-MS锆石U-Pb年龄(294.4 ± 1.3) Ma (MSWD = 0.8) 和(298.4 ± 2.5) Ma (MSWD = 3.4),均落在前人获得的西准噶尔A型花岗岩体的年龄范围之内。

研究区卡拉岗组的碎屑岩呈夹层分布于火山

岩中,表现出明显的受间歇性火山活动控制的特点,主要岩性为沉凝灰岩、凝灰质砂岩。西准噶尔晚古生代残余洋盆结束于早石炭世之前,从早石炭世残余洋盆整体隆升消亡至早二叠世成熟陆壳形成,准噶尔地区发生了一系列构造-岩浆事件 (韩宝福等, 2006)。包括3期陆相火山-沉积岩系形成,高侵位小型闪长岩、石英闪长岩、花岗闪长岩系列向大型富碱花岗岩深成岩A型系列转化,即新生花岗闪长质过渡型地壳向成熟花岗质大陆壳转化的复杂的深部作用过程 (周涛发等, 2006)。研究区分布的二叠系卡拉岗组就是在上述构造演化过程中陆相火山-沉积作用的产物。

卡拉岗组流纹岩具有强烈的负Eu异常,大离子亲石元素(LILE)K、Rb和LREE相对富集, Ba、Sr出现强烈的负异常,高场强元素(HFSE)Nb、Ta、P、Ti强烈亏损,微量元素组成类似于非洲肯尼亚裂谷碱性流纹岩 (Wilson, 1989); (Zr+Ce+ Nb+Y)介于 $346.1 \times 10^{-6} \sim 365.5 \times 10^{-6}$,平均值 355.8×10^{-6} ,大于A型花岗岩的下限值 350×10^{-6} (Whalen et al., 1987),具有A型流纹岩的特点, Y/Nb为1.01~1.47 (平均值1.30)>1.2,属于A₂亚类 (Eby et al., 1992),说明卡拉岗组火山岩可能形成于后碰撞伸展阶段。

区域构造研究表明,新疆北部及邻区二叠纪处于伸展拉张的构造背景 (李锦轶等, 2002; Xiao et al., 2004),主要表现为大规模的幔源花岗岩底垫 (Jahn et al., 2000),西准噶尔地区在287~310 Ma期间发育大量后碰撞A型花岗岩 (韩宝福等, 2006; 苏玉平等, 2006; 童英等, 2010; 魏荣珠, 2010; 杨高等, 2013; 刘阁等, 2016);并且伴随活跃的火山活动 (李锦轶等, 1999; 周涛发等, 2006),萨吾尔地区、托里地区、巴音达拉地区均发育具有后碰撞特征的流纹岩;三塘湖地区、红柳河地区及萨吾尔地区均发育相应的二叠纪板内玄武岩 (赵泽辉等, 2006; 潘金花等, 2008; 周涛发等, 2006)。这些具有后碰撞特征A型花岗岩、流纹岩以及板内玄武岩,均形成于伸展构造环境,揭示出新疆北部及邻区二叠纪处于地壳伸展状态。

7 结 论

(1)对卡拉岗组火山岩进行了精确锆石LA-ICP-MS U-Pb定年,获得英安岩的加权平均²⁰⁶Pb/

^{238}U 年龄为 $(294.4 \pm 1.3)\text{Ma}$, 流纹岩的加权平均 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 $(298.4 \pm 2.5)\text{Ma}$ 。

(2) 卡拉岗组火山岩岩浆由壳源物质经不同程度部分熔融形成, 残留相中有少量斜长石和角闪石。

(3) 巴音达拉地区卡拉岗组火山岩与新疆北部及邻区(三塘湖地区、萨吾尔地区及托里地区)二叠纪火山岩具有相似性, 均形成于后碰撞伸展构造背景。

References

- Boynton W V. 1984. Geochemistry of the rare earth elements: meteorite studies. Henderson P[C]/Rare Earth Element Geochemistry. Elsevier, 63-114.
- Chen Bin, Jahn B M. 2004. Genesis of post-collisional granitoids and basement nature of the Junggar Terrane, NW China: Nd-Sr isotope and trace element evidence[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 23(5): 691-703.
- Chen Jiafu, Han Baofu, Ji Jianqing, Zhang Lei, Xu Zhao, He Guoqi, Wang Tao. 2010. Zircon U-Pb ages and tectonic implications of Paleozoic plutons in northern West Junggar, North Xinjiang, China[J]. *Lithos*, 115(1/4): 137-152.
- Dostal J, Chatterjee A K. 2000. Contrasting behavior of Nb/Ta and Zr/Hf ratios in a peraluminous granitic pluton Nova Scotia, Canada [J]. *Chem. Geol.*, 163: 207-218.
- Eby G N. 1992. Chemical Subdivision of the A-type granitoids: Petrogenetic and tectonic implications[J]. *Geology*, 20: 641-644.
- Gao Xiang, Wei Junhao, Fu Lebing, Wang Mou, Zhang Lin, Yue Peng. 2014. Geochemical Character and Tectonic Significance of the Kalagang formation volcanic rocks in Tuoli Area, West Junggar[J]. *Geological Science and Technology Information*. 2014, 33(5): 16-24 (in Chinese with English abstract).
- Green T H. 1994. Experimental studies of trace-element partitioning applicable to igneous petrogenesis—Sedona 16 years later [J]. *Chemical Geology*, 117: 1-36.
- Han Baofu, Ji Jianqing, Song Biao, Chen Lihui, Zhang Lei. 2006. Late Paleozoic vertical growth of continental crust around the Junggar Basin, Xinjiang, China (Part I): Timing of post-collisional plutonism[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(5): 1077-1086 (in Chinese with English abstract).
- Han Baofu, Guo Zhaojie, Zhang Zhicheng, Zhang Lei, Chen Jiafu, Song Biao. 2010. Age, geochemistry, and tectonic implications of a late Paleozoic stitching pluton in the North Tian Shan suture zone, Western China[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 122(3/4): 627-640.
- Hoskin P W O, Black L P. 2000. Metamorphic zircon formation by solid-state recrystallization of protolith igneous zircon[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 18(4): 423-439.
- Jahn BM, Wu Fuyuan and Chen Bin. 2000. Granitoids of the Central Asian Orogenic Belt and continental growth in the Phanerozoic[J]. *Trans Royal Soc. Edinburgh: Earth Science*, 91: 181-193.
- Li Jinyi, Xiao Xuchang. 1999. Brief review some issues of frame work and tectonic evolution of Xinjiang crust, NW China[J]. *Scientia Geologica Sinica*, 34(4): 405-419 (in Chinese with English abstract).
- Li Jingyi, Wang Kezhao, Li Wenqian, Guo Huachun, Song Biao, Wang Yu, Mo Shenguo, Zhao Ziran, Zhun Zhixin, Pan Chenze. 2002. Tectonic evolution since the Late Paleozoic and mineral prospecting in eastern Tianshan mountains NW China[J]. *Xinjiang Geology*, 20(4): 295-301 (in Chinese with English abstract).
- Liu Ge, Zhu Zhixin, She Jianzhong, Deng Hongtao, Zhao Tongyang, Wang Qinjun, Sun Yaofeng. 2016. Geochronology, geochemistry and petrogenesis of the Zhulumute A-type granites in west Junggar, Xinjiang[J]. *Geological Review*, 62(2): 331-342 (in Chinese with English abstract).
- Liu Yongshen, Hu Zhaochu, Gao Shan, Günther D, Xu Juan, Gao Changhui, Chen Haihong. 2008. In situ analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard[J]. *Chemical Geology*, 257(1/2): 34-43.
- Middlemost E A K. 1994. Naming materials in the magma/igneous rock system[J]. *Earth Science Rev.*, 37: 215-224.
- Muhtar Zari. 1994. The Geologic age of the Kalagang Formation at Shaerbuer mountain[J]. *Journal of Xinjiang Institute of Technology*, 15(2): 127-131 (in Chinese with English abstract).
- Pan Jinhua, Guo Zhaojie, Liu Chang, Zhao Zehui. 2008. Geochronology, geochemistry and tectonic implications of Permian basalts in Hongliuhe area on the border between Xinjiang and Gansu[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 24(4): 793-802 (in Chinese with English abstract).
- Pearce J A. 1983. The role of sub-continental lithosphere in magma genesis at destructive plate margins[C]//Hawkesworth C J, Norry M J (eds.). *Continental Basalts and Mantle Xenoliths*. Nantwich Shiva: Academic Press, 230-249.
- Rudnick R L, Gao S. 2003. Composition of the continental crust[C]//L R R. *Treatise on Geochemistry*. Oxford: Elsevier, 1-64.
- Sun S S, McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalt: Implication for mantle composition and processes[C]//Saunders A D, Norry M J. *Magmatism in the Ocean Basins*. *Geol. Soc. London Spec. Pub.*, 42: 313-345.
- Su Yuping, Tang Hongfeng, Hou Guangshun, Liu Congqiang. 2006. Geochemistry of aluminous A-type granites along Darabut tectonic belt in West Junggar, Xinjiang[J]. *Geochimica*, 35(1): 1-5 (in Chinese with English abstract).
- Tan lugui, Zhou Taofa, Yuan Feng, Fan Yu, Yu Shucang. 2007. ^{40}Ar - ^{39}Ar age of the Kalagang formation volcanic rocks in West Junggar, Xinjing[J]. *Chinese Journal of Geology*, 42(3): 579-586 (in Chinese with English abstract).
- Tischendorf G, Paelchen W. 1985. Zur Klassifikation von Granitoiden/Classification of granitoids[J]. *Zeitschrift fuer Geologische Wissenschaften*, 13(5): 615-627.
- Tong Ying, Wang Tao, Hong Dawei, Han Baofu, Zhang Jianjun, Shi Xingjun, Wang Chao. 2010. Spatial and temporal distribution of

- the Carboniferous–Permian granitoids in northern Xinjiang and its adjacent areas, and its tectonic significance[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 29(6):619–641(in Chinese with English abstract).
- Wei Rongzhu. 2010. Geochemistry and chronology of the Laba intrusion in western Junggar, Xinjiang[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 29(6): 663–674(in Chinese with English abstract).
- Whalen J B, Currie K L, Chappell BW. 1987. A–type granites: Geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 95(4): 407–419.
- Wilson M.1989. *Igneous Petrology: A Global Tectonic Approach*[M]. London: Unwin Hyman, 1–466.
- Windley B F, Alexeiev D, Xiao W J. 2007. Tectonic models for accretion of the Central Asian Orogenic Belt[J]. *Journal of the Geological Society of London*, 164: 31–47.
- Xiao Wenjiao, Windley BF, Badarch G, Sun S, Li J, Qing K, Wang Z. 2004. Palaeozoic accretionary and convergent tectonics of the southern Alataids :Implication for the growth of Central Asia[J]. *Journal of the Geological Society*, London, 161:339–342
- Xiao Wenjiao, Shu Liangshu, Gao Jun, Xiong Xiaolin, Wang Jinbin, Guo Zhaojie, Li Jinyi, Sun Ming. 2008. Continental dynamics of the Central Asian Orogenic Belt and its metallogeny [J]. *Xinjiang Geology*, 26(1):4–8(in Chinese with English abstract).
- Xu Xin, Zhou Kefa, Wang Yu. 2010. Study on extinction of The remnant oceanic basin and tectonic setting of West Junggar during Late Paleozoic[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(11):3206– 3214(in Chinese with English abstract).
- Yang Gaoxue, Li Yongjun , Zhang Bing , Wang Yabing, Liu Zhenwei , Yan Jing, Tian Zhixian. 2013. Geochronology, geochemistry and petrogenesis of the Jietebutiao A–type granites in West Junggar, Xinjiang[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 34(3):295– 306(in Chinese with English abstract).
- Yin Jiyuan, Yuan Chao, Wang Yujing, Long Xiaopin, Guan Yili. 2011. Magmatic Records on the Late Paleozoic Tectonic Evolution of Western Junggar [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 35(2):278–291 (in Chinese with English abstract).
- Yin Jiyuan, Chen Wen, Yuan Chao, Zhang Yunyin, Long Xiaopin, Yu Shun, Zhang Yan, Li Jie, Sun Jinbo. 2013. Ages and tectonic implication of Late Paleozoic plutons in the West Junggar, North Xinjiang: Evidence from LA–ICP–MS zircon geochronology[J]. *Geochimica*, 42 (5) : 414–429(in Chinese with English abstract).
- Zhao Zehui, Guo Zhaojie, Han Baofu, Wang Yi. 2006. The geochemical characteristics and tectonic–magmatic implications of the Latest–Paleozoic volcanic rocks from Santanghu basin, eastern Xinjiang, northwest China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(1): 199–214(in Chinese with English abstract).
- Zhou Taofa, Yuan Feng, Yang Wenping, He Lixin, Tan Lvgui, Fan Yu, Yue Shucang. 2006. Permian volcanism in the Sawu’er area, west Junggar[J]. *Geology in China*, 33(3):553– 558(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 韩宝福, 季建清, 宋彪, 陈立辉, 张磊. 2006. 新疆准噶尔晚古生代陆壳垂向生长(I): 后碰撞深成岩浆活动的时限[J]. *岩石学报*, 22(5): 1077–1086.
- 高翔, 魏俊浩, 付乐兵, 王谋, 张霖, 岳鹏. 2014. 西准噶尔托里地区卡拉岗组火山岩地球化学特征及其构造意义[J]. *地质科技情报*, 33(5):16–24.
- 木合塔尔·扎日. 1994. 沙尔布尔山卡拉岗组地质时代的确定[J]. *新疆工学院学报*, (2):127–131.
- 李锦铁, 肖序常. 1999. 对新疆地壳结构与构造演化几个问题的简要评述[J]. *地质科学*, 34(4):405–419.
- 李锦铁, 王克卓, 李文铅, 郭华春, 宋彪, 王瑜, 莫申国, 赵子然, 朱志新, 潘成泽. 2002. 东天山晚古生代以来大地构造与矿产勘查[J]. *新疆地质*, 20(4):295–301.
- 刘阁, 朱志新, 舍建忠, 邓洪涛, 赵同阳, 王庆军, 孙耀峰. 2016. 新疆西准噶尔朱鲁木特A型花岗岩年代学、地球化学及岩石成因[J]. *地质评论*, 62(2):331–342.
- 潘金花, 郭召杰, 刘畅, 赵泽辉. 2008. 新甘交界红柳河地区二叠纪玄武岩年代学、地球化学及构造意义[J]. *岩石学报*, 24(4):793–802.
- 谭绿贵, 周涛发, 袁峰, 范裕, 岳书仓. 2007. 新疆西准噶尔卡拉岗组火山岩⁴⁰Ar–³⁹Ar年龄[J]. *地质科学*, 42(3):579–586.
- 苏玉平, 唐红峰, 候广顺, 刘从强. 2006. 新疆西准噶尔达拉布特构造带铝质A型花岗岩的地球化学研究[J]. *地球化学*, 35(1): 1–5.
- 童英, 王涛, 洪大卫, 韩宝福, 张建军, 史兴俊, 王超. 2010. 北疆及邻区石炭–二叠纪花岗岩时空分布特征及其构造意义[J]. *岩石矿物学杂志*, 29(6):619–641.
- 魏荣珠. 2010. 新疆西准噶尔拉巴花岗岩地球化学特征及年代学研究[J]. *岩石矿物学杂志*, 29(6): 663–674.
- 肖文交, 舒良树, 高俊, 熊小林, 王京彬, 郭召杰, 李锦铁, 孙敏. 2008. 中亚造山带大陆动力学过程与成矿作用[J]. *新疆地质*, 26(1):4–8.
- 徐新, 周可法, 王煜. 2010. 西准噶尔晚古生代残余洋盆消亡时间与构造背景研究[J]. *岩石学报*, 26(11):3206–3214.
- 杨高学, 李永军, 张兵, 汪雅兵, 刘振伟, 严镜, 田陟贤. 2013. 新疆西准噶尔接特布调A型花岗岩年代学、地球化学及岩石成因[J]. *地球学报*, 34(3):295–306.
- 尹继元, 袁超, 王毓婧, 龙晓平, 关义立. 2011. 新疆西准噶尔晚古生代大地构造演化的岩浆活动记录[J]. *大地构造与成矿学*, 35(2): 278–291.
- 尹继元, 陈文, 袁超, 张运迎, 龙晓平, 喻顺, 张彦, 李洁, 孙敬博. 2013. 新疆西准噶尔晚古生代侵入岩的年龄和构造意义: 来自锆石LA–ICP–MS定年的证据[J]. *地球化学*, 42(5):414–429.
- 赵泽辉, 郭召杰, 韩宝福, 王毅. 2006. 新疆三塘湖盆地古生代晚期火山岩地球化学特征及其构造–岩浆演化意义[J]. *岩石学报*, 22(1): 199–214.
- 周涛发, 袁峰, 杨文平, 何立新, 谭绿贵, 范裕, 岳书仓. 2006. 西准噶尔萨吾尔地区二叠纪火山活动规律[J]. *中国地质*, 33(3):553–558.