西天山昭苏东南部阿登套地区大哈拉军山组火山岩及花岗岩侵入体的地球化学特征、时代和构造环境*

李继磊[1,2] 钱青[1] 高俊[1] 苏文[1] 张喜[1,2] 刘新[1,2] 江拓[1,2]

LI JiLei[1,2], QIAN Qing[1], GAO Jun[1], SU Wen[1], ZHANG Xi[1,2], LIU Xin[1,2] and JIANG Tuo[1,2]

1. 中国科学院地质与地球物理研究所 矿产资源研究重点实验室,北京 100029

2. 中国科学院研究生院,北京 100049

1. *Key Laboratory of Mineral Resources, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100029, *China*

2. *Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*

2010-05-06 收稿, 2010-06-27 改回.

Li JL, Qian Q, Gao J, Su W, Zhang X, Liu X and Jiang T. 2010. Geochemistry, zircon U-Pb ages and tectonic settings of the Dahalajunshan volcanics and granitic intrusions from the Adengtao area in the Southeast Zhaosu, western Tianshan Mountains. *Acta Petrologica Sinica*, 26(10):2913 – 2924

Abstract The volcanic rocks of the Dahalajunshan Formation from the Adengtao area (Southeast Zhaosu) in the Chinese western Tianshan Mountains are dominantly composed of basaltic andesites which are characterized by enrichment of large ion lithophile elements (LILE), strong depletion of high field strength elements such as Nb, Ta and Ti and highly fractionation of rare earth elements (REEs). These basaltic andesites are intruded by some K-feldspar granite and granite porphyry dykes. The K-feldspar granite dykes are metaluminous and have high $Na_2O + K_2O$, light rare earth elements (LREEs), Zr, Nb and Y contents, high FeO^T/MgO and Ga/Al ratios, and both the granitoids are depleted in Ba, Sr, P, Ti and Eu. The granitoids (K-feldspar granite and granite porphyry) give Laser-ICPMS zircon U-Pb ages of 354.2 ± 2.3Ma and 339.5 ± 2.3Ma respectively, indicating that the surrounding Dahalajunshan volcanics were formed no later than the earliest stage of the Early Carboniferous. It is proposed that the volcanic rocks of the Dahalajunshan Formation and the Early Carboniferous A-type granites from the Adengtao area in the Southeast Zhaosu were probably formed in a back-arc extensional environment of an active continental margin, based on a combined analysis of the field observations, regional tectonics, and the geochemistry and ages of the rocks.

Key words Western Tianshan; Dahalajunshan Formation volcanic rocks; Granite; Zircon U-Pb age; Tectonic setting

摘 要 西天山昭苏东南部阿登套地区大哈拉军山组火山岩主要由玄武质安山岩组成,具有富集大离子亲石元素、亏损高场强元素(如 Nb、Ta、Ti)、稀土元素高度分馏的特征。这些玄武安山岩被一些钾长花岗岩和花岗斑岩脉体侵入。钾长花岗岩脉为准铝质,含有较高的 $Na_2O + K_2O$、轻稀土元素、Zr、Nb、Y 含量和较高的 FeO^T/MgO 及 Ga/Al 比值。两类花岗岩均亏损 Ba、Sr、P、Ti 和 Eu。钾长花岗岩和花岗斑岩给出的 Laser-ICPMS 锆石 U-Pb 年龄分别为 354.2 ± 2.3Ma 和 339.5 ± 2.3Ma,表明其围岩即大哈拉军山组火山岩的形成时代不晚于早石炭世早期。综合野外地质观察、区域地质构造以及上述岩石的地球化学特征和时代,我们认为西天山昭苏南部大哈拉军山组火山岩及侵入其中的早石炭世 A 型花岗岩脉可能形成于活动陆缘弧后拉张环境。

关键词 西天山;大哈拉军山组火山岩;花岗岩;锆石 U-Pb 年龄;构造环境

中图法分类号 P588.145; P588.121; P597.3

* 本文受国家重点基础发展规划项目(2007CB411302)和国家自然科学基金项目(40721062、40872057、40872059)联合资助.

第一作者简介: 李继磊,男,1984 年生,硕士研究生,构造地质与岩石学专业,E-mail: lijilei@mail.igcas.ac.cn

1 引言

在新疆西天山地区,广泛分布着一套由玄武岩、玄武安山岩、流纹岩、粗面岩、粗面安山岩及中酸性凝灰岩组成的大哈拉军山组火山岩(新疆维吾尔自治区地质矿产局, 1993),主要出露于昭苏-特克斯南部阿登套、大哈拉军山和北部伊什基里克山、阿希金矿周缘、新源县城南部那拉提山北坡、阿吾拉勒山和拉尔敦达坂一带。长期以来,前人对大哈拉军山组做了详细的研究并取得了一系列的成果,但是对大哈拉军山组的形成时代存在较大的争议。已经发表的大哈拉军山组火山岩的年龄从晚泥盆纪到早石炭纪都有分布。例如:特克斯县林场大哈拉军山组火山岩中辉石的^{40}Ar-^{39}Ar 等时线年龄为326Ma(刘友梅等,1994),拉尔敦达坂安山岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为 312Ma,玉希莫勒盖流纹岩的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为316Ma,新源县南玄武岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为 355Ma(朱永峰等,2005a, b; Zhu *et al.*, 2009),阿吾拉勒山一带火山岩全岩 Rb-Sr 等时线年龄为 337Ma(李注苍等,2006),乌孙山一带大哈拉军山组火山岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 353Ma 和 344Ma(张芳荣等,2009),阿希金矿床赋矿围岩——大哈拉军山组火山岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为 363Ma(翟伟等,2006),特克斯达坂安山岩 SHRIMP 锆石边部 U-Pb 年龄为 361Ma (Zhu *et al.*, 2009)。由于大哈拉军山组分布广泛,年龄差异大(>40Ma),部分学者提出将天山地区大哈拉军山组火山岩解体为西部晚泥盆世、中部早石炭世、东部晚石炭世三部分(朱永峰等, 2006a; Zhu *et al.*, 2009)。

另一方面,对大哈拉军山组火山岩的形成环境目前也存在着不同的认识,主要包括以下几种观点:(1)早期的研究根据基底性质、古地理状况和火山岩地球化学特征认为伊犁地区石炭纪火山岩是大陆裂谷的产物(车自成等,1996),这些裂谷火山岩构成了一个大火山岩省,可能与地幔柱的活动有关(夏林圻等,2004, 2006)。(2)基于地球化学和 SHRIMP 年代学的研究,一些学者提出大哈拉军山组火山岩代表南天山洋洋壳向伊犁-中天山板块俯冲所形成的火山岛弧,并可能持续演化到晚石炭纪(朱永峰等,2005b;李注苍等,2006;郭璇和朱永峰,2006;孙林华等,2007;张学奎和李注苍,2008)。(3)与西天山大哈拉军山组同期的中天山骆驼沟火山岩具有 E-MORB 和 OIB 特征,可能形成于大陆减薄拉张环境,不同于大陆裂谷环境(陈丹玲等,2001)。(4)昭苏北部大哈拉军山组火山岩具有 LILE 富集、HFSE 亏损的特点,但与典型的岛弧玄武岩的地球化学特征不同,认为此火山岩形成于具有元古宙陆壳基地的活动大陆边缘弧后拉张环境,不同于大陆裂谷,不是地幔柱的结果(钱青等,2006)。

本文对西天山昭苏东南部阿登套地区的大哈拉军山组火山岩及侵入其中的花岗岩进行了年代学和地球化学研究,结合伊犁板块其它大哈拉军山组火山岩的研究资料,对昭苏南部大哈拉军山组火山岩的形成时代和构造环境进行初步探讨。

2 地质背景

天山造山带位于中亚造山带的西南端,是一个重要的晚古生代碰撞造山带(Windley *et al.*, 1990; Gao *et al.*, 1998)和典型的增生型造山带(Xiao *et al.*, 2009)。西天山自北向南可划分为:北天山弧增生体、伊犁地块北缘活动陆缘、伊犁地块、伊犁地块南缘活动陆缘、中天山复合弧地体、西天山(高压)增生楔和塔里木北部被动大陆边缘(Gao *et al.*, 2009a;Qian *et al.*, 2009;高俊等,2009b)(图 1a)。伊犁-中天山板块自西向东呈楔形尖灭,南北各有古生代碰撞造山带与准噶尔板块和塔里木板块相隔(图 1a),伊犁地块存在元古宙古老基地,阿吾拉勒山与伊犁河交汇处新发现的麻粒岩相片麻岩石 Cameca U-Pb 锆石不一致线上交点年龄 1609Ma 是我国境内伊犁地块所获得的最老基底年龄(李继磊等,2009),其上广泛分布一套石炭纪-二叠纪的火山岩。

大哈拉军山组(C_1^d)在西天山地区广泛出露,最初建组于特克斯南部克克苏河下游的大哈拉军山西侧的火山岩剖面,主要由玄武岩、玄武安山岩、安山岩组成,与上覆地层阿克沙克组及下伏地层震旦系库什台群均为不整合接触(孙林华等,2007)。

本文的研究区位于昭苏-特克斯东南部的阿登套地区(图 1b),在大哈拉军山西约 30km 处,主体出露地层为大哈拉军山组玄武安山岩、安山岩和英安岩,出露较厚,野外可见厚度约2000m,其上被阿克沙克组(C_{1a}^b)灰岩夹碎屑岩、第四纪(Q)以角度不整合覆盖,下部未见底界,区域地层对比知下部以角度不整合覆盖在震旦亚界和上志留统之上。1∶20万区域地质调查报告(新疆维吾尔自治区地质局,1978①)显示大哈拉军山组地层在本地区喷发韵律明显,不同地段岩相不同,呈现出中心-裂隙式陆-浅海相间歇性喷发的特征。

研究区内多见华力西中期的钾长花岗岩(γ_4^{2d})侵入体,主要分布在昭苏县城北部、阿登套及南部山区,南部山区出露最多,以岩基、岩株、岩脉等形式产出,面积分布较广。阿登套地区的钾长花岗岩侵入体为两个小岩株,侵入于大哈拉军山组内,北边一条北西西向分布,南边一条近东西向分布,主要岩石为肉红色钾长花岗岩。花岗斑岩主要分布在钾质花岗岩(γ_4^{2d})内部,主要为岩体后期脉岩,多数北东向分布,由于岩石成分相似,早期的地调结果认为花岗斑岩脉很可能与 γ_4^{2d}有关(新疆维吾尔自治区地质局,1978)。本研究样品采自南部侵入体,为直接侵位于于大哈拉军山组的钾长花岗岩岩脉;花岗斑岩采样于花岗侵入体中的岩脉;安山岩则采自其围岩的大哈拉军山组中(图 1b)。

① 新疆维吾尔自治区地质局. 1978. 区域地质调查报告昭苏幅 K-44-X(1∶20 万)

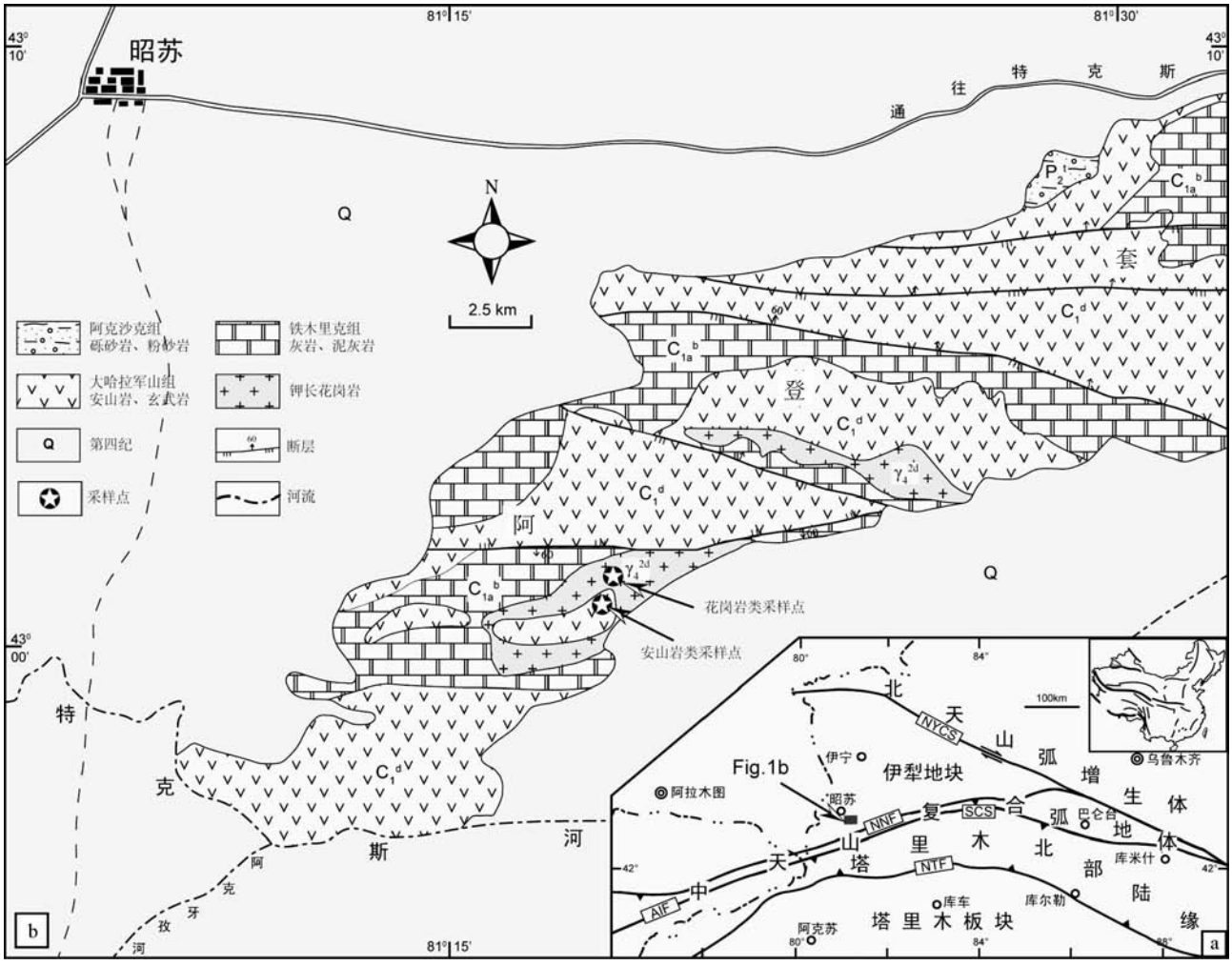

图 1 昭苏南部阿登套地区地质简图(据新疆维吾尔自治区地质局,1978)

Fig. 1 Simplified geological map of Adengtao region in South Zhaosu

3 岩相学特征

大哈拉军山组火山岩呈灰黑色,主要为一套安山岩类,由玄武安山岩(AKTL6、AKTL7)、安山岩(AKTL8)和英安岩(AKTL4)组成。玄武安山岩主要由斜长石(55%)、辉石(30%)、角闪石(5%)等组成,副矿物有磁铁矿、榍石、磷灰石等;斜长石斑晶(0.5~3mm)呈柱状、板条状,发育聚片双晶和环带结构,具交织结构,斜长石微晶近平行排列,中间夹有辉石和磁铁矿的显微晶粒。安山岩主要由斜长石、角闪石、黑云母和辉石等组成,含少量石英,副矿物有磁铁矿、榍石、磷灰石等;具玻基交织结构,含少量细小的杏仁构造,被方解石所充填。英安岩具斑状结构,斑晶多为斜长石,碱性长石较少,有时含少量石英;基质为细粒的长石、石英等,玻璃质结构或霏细结构。

钾长花岗岩(AKTL1、AKTL2)呈肉红色,中粗粒花岗结构,块状构造。由钾长石(60%)、石英(30%)、斜长石(5%)和黑云母(2%)组成,副矿物有磁铁矿、锆石、榍石、磷灰石等。大颗粒钾长石内部常包裹条纹长石。钾长石常与石英构成文象结构,被蠕虫状石英所交代。花岗斑岩(AKTL9)呈浅红色,具有斑状结构,斑晶含量一般为 15%~20%,粒度在 0.5~1cm,主要为石英和钾长石,偶见黑云母,斑晶通常被基质熔蚀,可见熔蚀边。基质呈微花岗结构,隐晶质-微晶,成分与斑晶相同。

4 分析方法

4.1 地球化学组成测试方法

地球化学组成分析测试在中国科学院地质与地球物理研究所矿产资源研究重点实验室完成。主量元素测试利用碱熔法将样品熔制成玻璃片,使用顺序式 X 射线荧光光谱仪(XRF-1500)完成,采用国家一级岩石标样 GBW07101-07114 为基本效应校正,每 10 个样品附带一个平行样品,利用标准曲线法校正。微量和稀土元素含量测试利用酸溶法制备样

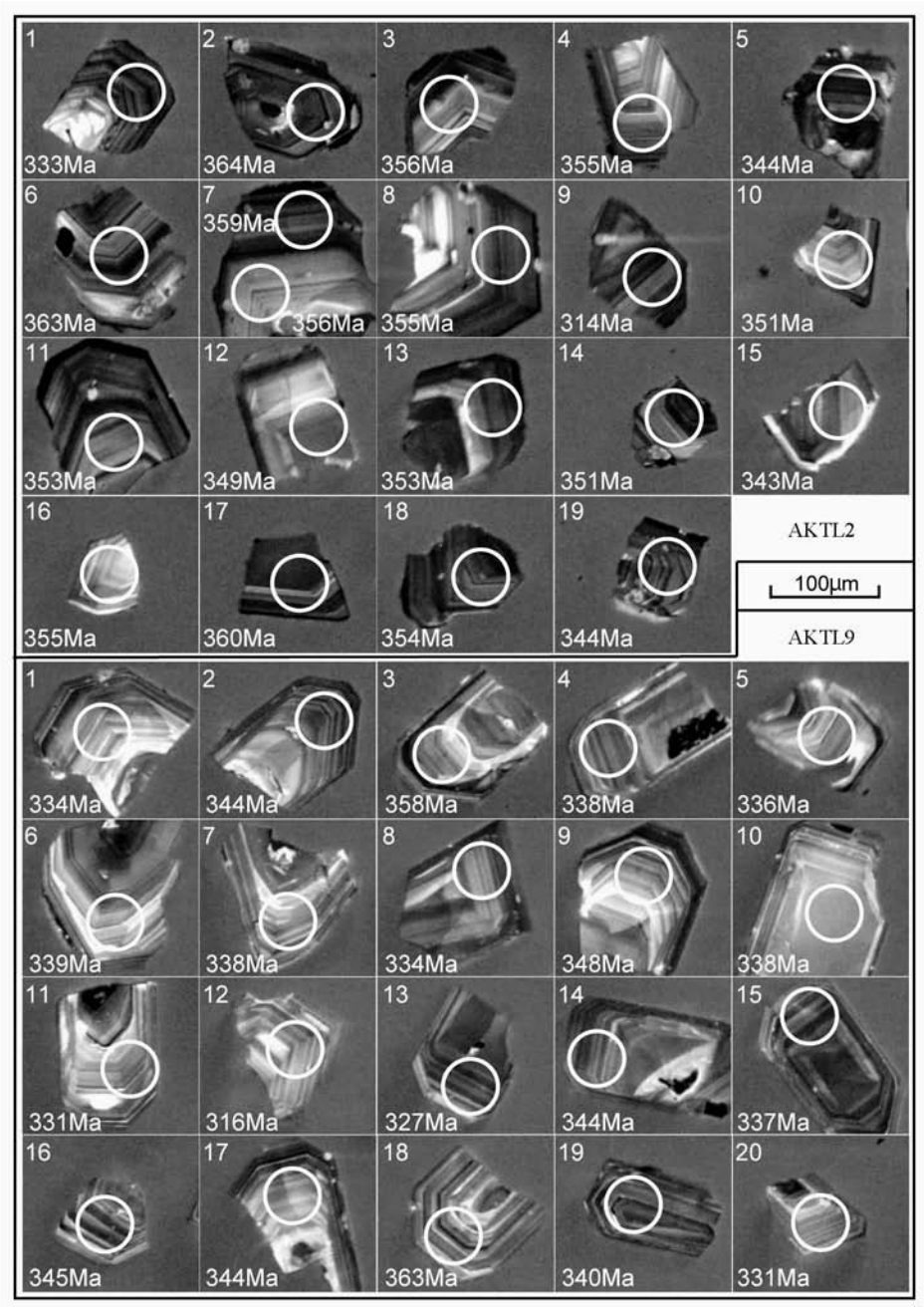

图 2 花岗岩类锆石 CL 图像及测点年龄

Fig. 2 CL images and ages of zircons from the granitoids

品,在 ICP-MS Element Ⅱ(电感耦合等离子体质谱仪)上进行测试,一般间隔 10 个待测样品选取一个样品作为平行样,并附有空白样检测。以 GSR 为标样进行质量监控,采用标准曲线法来校正,相对标准偏差一般≤10%。

4.2 年代学测试方法

按常规方法对花岗岩类样品进行锆石单矿物分选,在双目镜下挑纯;将锆石样品置于环氧树脂上,磨平抛光;然后对锆石进行透、反射照像和阴极发光成像(图 2),结合透、反射图像对 CL 图进行分析,选择最佳的锆石样品进行定年测试。锆石 U-Pb 年龄测定在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室 LA-ICP-MS 仪器上完成,并对锆石的元素含量进行同步测定。激光剥蚀束斑为 32μm,采用 He 作为剥蚀物质的载气,参考物质为美国国家标准技术协会研制的人工合成硅酸盐玻璃 NIST610,锆石 U-Pb 年龄的测定采用国际标准锆石 91500 作为外标校正方法,每隔 5 个分析点测一次标准,保证标准和样品的仪器条件完全一致。在样品分析前后以及每隔 20 个测点各测一次 NIST610,以 Si 做内标,测

表 1 样品主量(wt%)、微量元素($\times 10^{-6}$)地球化学分析数据

Table 1 Major element (wt%) and trace element ($\times 10^{-6}$) compositions of the samples

样品号	AKTL1	AKTL2	AKTL9	AKTL4	AKTL6	AKTL7	AKTL8
岩性	钾长花岗岩		花岗斑岩	英安岩	玄武安山岩		安山岩
SiO_2	74.51	76.14	76.26	65.96	55.40	53.99	58.74
TiO_2	0.10	0.11	0.16	0.48	0.95	0.96	0.85
Al_2O_3	13.25	12.16	11.79	16.12	17.11	17.47	16.17
$Fe_2O_3^T$	1.34	1.35	1.43	3.98	8.15	8.63	6.66
MnO	0.02	0.01	0.03	0.10	0.16	0.12	0.11
MgO	0.14	0.15	0.34	1.29	4.29	4.35	3.67
CaO	0.18	0.21	0.59	3.06	7.36	6.97	5.65
Na_2O	4.52	4.27	5.06	3.58	3.49	3.81	3.03
K_2O	4.94	4.56	2.78	3.60	1.82	1.80	2.47
P_2O_5	0.01	0.01	0.02	0.14	0.28	0.29	0.28
LOI	0.36	0.38	0.88	1.02	1.16	1.68	1.76
Total	99.37	99.36	99.34	99.32	100.16	100.08	99.39
Na_2O+K_2O	9.46	8.83	7.84	7.18	5.31	5.61	5.50
Na_2O/K_2O	0.91	0.94	1.82	0.99	1.92	2.12	1.23
A/CNK	1.01	0.98	0.95	1.05	0.81	0.84	0.90
$Fe_2O_3^T/MgO$	9.60	9.03	4.21	3.08	1.90	1.98	1.82
$Mg^{\#}$	8.2	8.7	17	22	31	30	32
σ	2.84	2.35	1.85	2.25	2.27	2.86	1.92
Ga	22.2	20.9	15.3	20.5	21.0	21.6	20.7
Rb	169	164	104	144	86.0	78.8	110
Sr	21.0	19.1	58.8	363	592	525	458
Y	44.8	42.6	32.0	20.2	22.4	23.3	24.3
Zr	197	236	199	242	166	176	218
Nb	21.7	23.7	18.9	16.2	11.6	12.4	13.7
Cs	1.18	1.16	1.48	7.43	11.4	1.64	2.48
Ba	168	155	209	952	362	432	600
La	48.9	57.6	38.8	34.4	26.1	26.6	32.1
Ce	101	116	78.9	66.9	54.0	55.6	67.1
Pr	12.1	13.8	9.01	7.73	7.00	7.25	8.51
Nd	44.5	51.0	32.9	26.5	28.0	28.6	32.4
Sm	8.84	9.68	6.01	5.00	5.69	5.83	6.36
Eu	0.356	0.354	0.345	1.02	1.45	1.54	1.58
Gd	8.32	8.89	5.78	4.21	4.94	5.20	5.37
Tb	1.41	1.42	0.971	0.657	0.771	0.798	0.825
Dy	8.45	8.13	5.82	3.76	4.32	4.44	4.55
Ho	1.78	1.70	1.23	0.731	0.877	0.896	0.914
Er	4.85	4.62	3.38	2.05	2.32	2.38	2.43
Tm	0.738	0.692	0.528	0.320	0.344	0.354	0.362
Yb	4.75	4.44	3.43	2.07	2.20	2.27	2.29
Lu	0.716	0.663	0.527	0.315	0.328	0.335	0.346
Hf	7.30	7.55	6.69	6.50	4.53	4.77	5.77
Ta	1.66	1.67	1.51	1.26	0.839	0.897	0.997
Pb	13.6	13.5	9.29	22.0	7.72	9.56	50.7
Th	18.7	18.2	17.2	12.7	7.02	7.48	9.80
U	3.54	2.98	3.47	2.76	2.00	2.27	2.97
$\sum$REE	247.2	279.2	187.7	155.7	138.3	142.0	165.1
$(La/Yb)_N$	6.89	8.68	7.58	11.1	7.95	7.83	9.35
$(La/Sm)_N$	3.42	3.67	3.99	4.25	2.83	2.82	3.11
$(Gd/Yb)_N$	1.40	1.60	1.34	1.62	1.79	1.82	1.87
σEu	0.13	0.12	0.18	0.69	0.84	0.86	0.83
10000Ga/Al	3.16	3.25	2.44				
Nb+Zr+Ce+Y	365	419	329				

定锆石中的 U、Th、Pb 的含量。分析方法及仪器参数见文献(Yuan *et al.*, 2004)。锆石 U-Th-Pb 比值和元素含量分析数据处理采用 ICPMSDataCal 程序(Liu *et al.*, 2008),谐和图及年龄计算利用 Isoplot3.0 程序(Ludwig, 2003)。

5 分析结果

5.1 大哈拉军山组主、微量元素地球化学特征

火山岩主量元素分析结果表明(表 1),4 个大哈拉军山组火山岩样品的 SiO_2 较高介于 54% ~66% 之间,Al_2O_3 为 16.1% ~ 7.5%,$Fe_2O_3^T$ 为(3.98% ~ 8.63%),CaO 为 3.06% ~7.36%,Na_2O 为 3.03% ~3.81%,MgO 为 1.29% ~4.35%,$Mg^{\#}$值为 22 ~32($Mg^{\#}=100Mg/(Mg+0.9Fe_{total})$),$K_2O$ 为 1.80% ~3.60%,TiO_2 为 0.48% ~0.96%,P_2O_5 为 0.14% ~0.29%。样品的全碱含量(Na_2O+K_2O)=5.31% ~7.18%,$Na_2O>K_2O$,在 TAS 火山岩判别图解中主要投在玄武安山岩、安山岩区,AKTL4 的 SiO_2 高达 66%,落入英安岩区。里特曼指数($\sigma=(K_2O+Na_2O)^2/(SiO_2-43)$)为 1.92 ~2.86,样品属于钙碱性系列。

样品稀土元素总量($\sum$REE)变化于 138×10^{-6} ~ 165×10^{-6}(表 1),在球粒陨石标准化图解上(图 3a),表现出一致的 LREE 右倾的富集型配分模式,轻重稀土分异明显,$(La/Yb)_N=7.83$ ~ 11.1(平均 9.10),$(La/Sm)_N=2.82$ ~ 4.25(平均 3.25),$(Gd/Yb)_N=1.62$ ~ 1.87(平均 1.77),具弱负 Eu 异常,$\delta Eu=0.69$ ~ 0.86(平均 0.80)。在原始地幔标准化图解中(图 3b),样品富集大离子亲石元素(Cs、Rb、K、LILE),高场强元素(HFSE)亏损,Ba、Nb、Ta 和 P、Ti 显示较明显的负异常,Sr 负异常不明显的配分型式与岛弧火山岩特征相似,也不能排除地壳混染对其地球化学成分的影响,如有研究认为西天山晚泥盆世火山岩是亏损地幔和地壳混染的结果(Zhu *et al.*, 2009)。

5.2 花岗岩类主、微量元素地球化学特征

花岗岩类的主微量元素含量数据见表 1。主量元素方面,AKTL1、AKTL2 以富硅(SiO_2 = 74.5% ~ 76.2%)和碱(Na_2O+K_2O = 9.46% ~ 8.83%),贫镁(MgO = 0.14% ~ 0.15%)和钙(CaO = 0.18% ~ 0.21%),高 $Fe_2O_3^T/MgO$ 比值(9.60 ~ 9.03)为特征。其 $K_2O>Na_2O$,A/CNK = 1.01、0.98,属准铝质钙碱-弱碱性岩石。在稀土元素组成上,稀土总量 $\sum REE=247\times10^{-6}$ ~ 279×10^{-6},球粒陨石标准化 REE 配分图(图 3c)呈现出轻稀土富集、重稀土平坦和 Eu 负异常的稀土配分特点,轻重稀土分异较明显,$(La/Yb)_N=6.89$ ~ 8.68,$(La/Sm)_N=3.42$ ~ 3.67,重稀土相对平坦,$(Gd/Yb)_N=1.40$ ~ 1.60。强烈的 Eu 负异常($\delta Eu=0.12$ ~ 0.13),说明花岗岩在岩浆形成过程中经历了显著的斜长石分离结晶作用,或者岩浆源区有较多斜长石晶体的残留。在微量元素组成上,岩

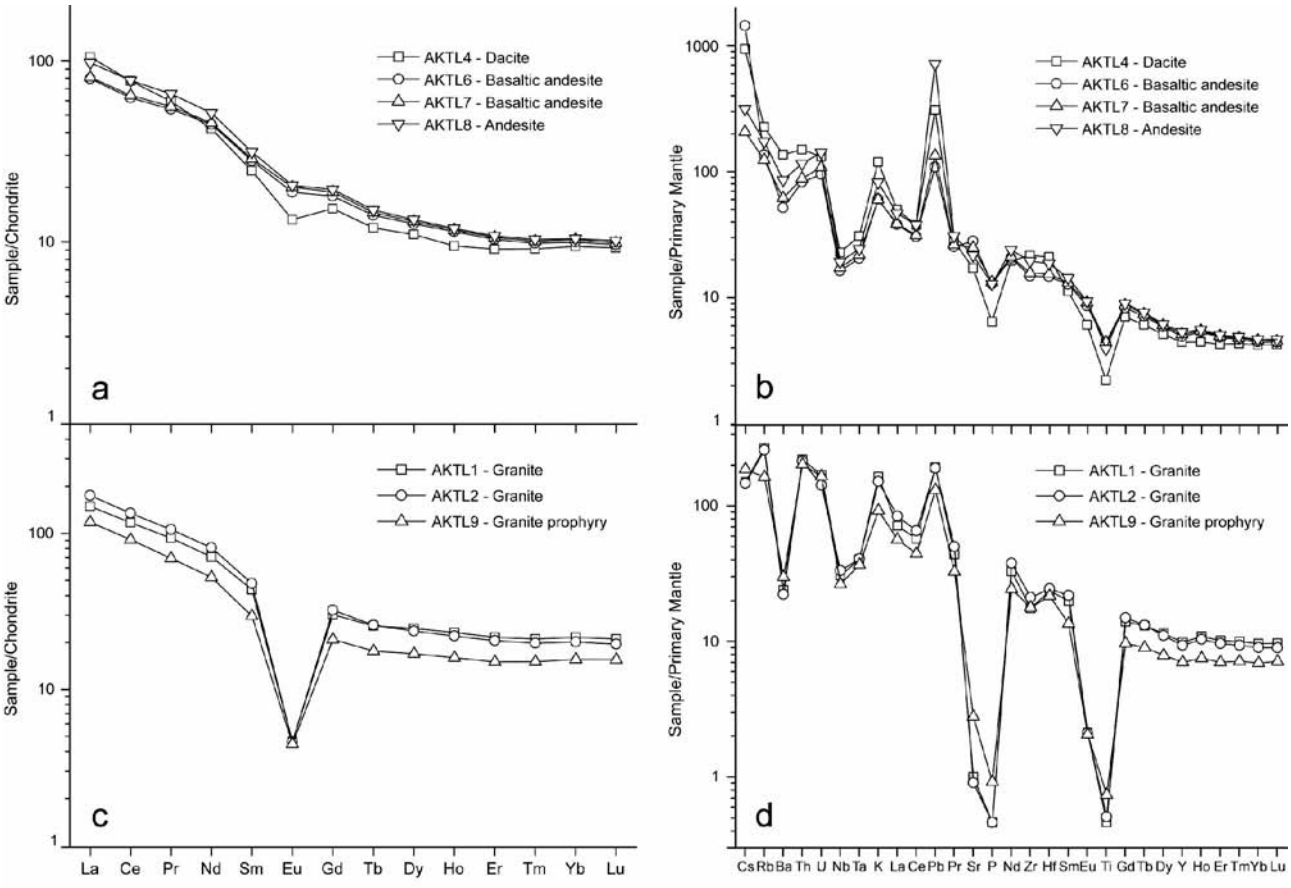

图 3 样品稀土元素配分图、微量元素蛛网图(标准化值据 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 3 Chondrite-normalized REE pattern diagrams and primitive mantle-normalized trace elements spider diagrams of the rocks (after Sun and McDonough, 1989)

石富 Ga、Nd、Zr 和 Hf 等高场强元素,亏损 Ba、Sr、P、Eu、Ti 等元素。$10^4 \times (Ga/Al)$ 比值(3.16、3.25)均大于 A 型花岗岩的下限值(2.6),明显高于 I 型和 S 型花岗岩的平均值(分别为 2.10 和 2.28)(Bonin, 2007)。综合考虑岩石高 Si、高碱,低 Mg、Ca,准铝,高 $Fe_2O_3^T/MgO$ 比、$10^4 \times (Ga/Al)$ 比以及富集 HFSE、亏损 Ba、Sr、P、Eu、Ti 的特点,推断这些钾长花岗岩为铝质 A 型花岗岩。在 Zr、Ce、Nb 对 $10^4 \times (Ga/Al)$ 以及 $Fe_2O_3^T/MgO$ 对(Zr + Nb + Ce + Y)、SiO_2 等 A 型花岗岩多种判别图上,投影点均落在 A 型花岗岩区,而与高分异的 I、S 型花岗岩明显不同。在原始地幔标准化微量元素蛛网图(图 3d)上,表现为 Rb、Th、U、La、Pr、Nd、Hf、Zr 和 Sm 富集,而 Ba、Nb、Sr 强烈亏损,表明它可能是一种高演化成分的铝质 A 型花岗岩。

花岗斑岩 AKTL9 的元素含量与钾长花岗岩的非常类似(表 1),区别是碱度稍低($Na_2O + K_2O = 7.84\%$),$Na_2O > K_2O$,A/CNK = 0.95,$Fe_2O_3^T/MgO$ 比值稍低(4.21)。在稀土元素配分图和微量元素蛛网图上表现与 AKTL1、2 完全相同,稀土总量稍低 $\sum REE = 188 \times 10^{-6}$,Eu 负异常明显($\delta Eu = 0.18$),亏损 Ba、Sr、P、Eu、Ti 等元素,但 $10^4 \times (Ga/Al)$ 比值 2.44 略低于 A 型花岗岩的下限值(2.6)。

5.3 花岗岩类锆石 LA-ICP-MS 年龄和 REE 配分型式

钾长花岗岩 AKTL2 和花岗斑岩 AKTL9 中的锆石颗粒较大,较自形,多在 100μm 以上。CL 图像显示锆石颗粒具有清晰的韵律型环带,为典型的岩浆锆石(图 2)。锆石的 U、Th 含量较高(表 2),U 在 $120 \times 10^{-6} \sim 450 \times 10^{-6}$ 之间,Th 在 $200 \times 10^{-6} \sim 740 \times 10^{-6}$ 之间,两个样品的 Th/U 比都比较均一,AKTL2 在 0.38 ~ 1.13 之间(均值 0.51),绝大多数处于 0.40 ~ 0.50 之间,AKTL9 在 0.48 ~ 0.71 之间(均值 0.62),绝大多数处于 0.55 ~ 0.70 之间,锆石的 Th/U 比均大于 0.4,是典型的岩浆锆石的特点(Rubatto and Gebauer, 2000)。总体来看 AKTL2 中锆石比 AKTL9 的更暗一些,对应于更高的 U 含量(表 2)。AKTL9 中少量锆石可见老核。

AKTL2 测定了 19 颗锆石,20 个点,其中 16 个点的 $^{206}Pb/^{238}U$ 在 343 ~ 364Ma 之间,谐和年龄为 354.2 ± 2.3Ma(图 4a),其余 3 个点偏离谐和线,1 个点年龄明显较年轻,为 314Ma;AKTL9 测定了 20 颗锆石,20 个点,其中 15 个点的 $^{206}Pb/^{238}U$ 在 327 ~ 348Ma 之间,谐和年龄为 339.5 ± 2.3Ma

表 2 花岗岩类锆石 LA-ICP-MS 分析结果

Table 2 LA-ICP-MS data of the zircons from the grantoids

测点号	Th ($\times10^{-6}$)	U ($\times10^{-6}$)	Th/U	同位素比值						年龄(Ma)					
				$^{207}Pb/^{206}Pb$	1σ	$^{207}Pb/^{235}U$	1σ	$^{206}Pb/^{238}U$	1σ	$^{207}Pb/^{206}Pb$	1σ	$^{207}Pb/^{235}U$	1σ	$^{206}Pb/^{238}U$	1σ
AKTL2															
1.1	336	734	0.46	0.05928	0.00146	0.4351	0.01088	0.05302	0.00053	576	54	367	8	333	3
2.1	224	496	0.45	0.05479	0.00139	0.4394	0.01114	0.05801	0.00048	467	57	370	8	364	3
3.1	381	795	0.48	0.05978	0.00133	0.4695	0.01079	0.05675	0.00051	594	48	391	7	356	3
4.1	124	330	0.38	0.05479	0.00165	0.4300	0.01370	0.05661	0.00056	467	67	363	10	355	3
5.1	325	659	0.49	0.05885	0.00144	0.4452	0.01111	0.05482	0.00051	561	52	374	8	344	3
6.1	198	542	0.37	0.05310	0.00128	0.4249	0.01043	0.05793	0.00053	332	56	360	7	363	3
7.1	216	572	0.38	0.05514	0.00185	0.4368	0.01478	0.05730	0.00069	417	79	368	10	359	4
7.2	158	377	0.42	0.05278	0.00144	0.4150	0.01145	0.05685	0.00050	320	66	352	8	356	3
8.1	262	632	0.41	0.05245	0.00165	0.4102	0.01238	0.05657	0.00061	306	72	349	9	355	4
9.1	310	644	0.48	0.05398	0.00159	0.3745	0.01207	0.04994	0.00066	369	67	323	9	314	4
10.1	161	245	0.66	0.05174	0.00171	0.3995	0.01312	0.05598	0.00065	272	74	341	10	351	4
11.1	213	488	0.44	0.05297	0.00133	0.4117	0.01017	0.05625	0.00058	328	25	350	7	353	4
12.1	213	352	0.60	0.05380	0.00158	0.4129	0.01178	0.05562	0.00052	361	67	351	8	349	3
13.1	252	606	0.42	0.05375	0.00124	0.4167	0.00928	0.05622	0.00051	361	52	354	7	353	3
14.1	324	612	0.53	0.05390	0.00134	0.4168	0.01037	0.05592	0.00046	369	56	354	7	351	3
15.1	419	371	1.13	0.05366	0.00238	0.4041	0.01755	0.05457	0.00064	367	100	345	13	343	4
16.1	128	199	0.65	0.05354	0.00233	0.4147	0.01786	0.05663	0.00063	350	103	352	13	355	4
17.1	259	506	0.51	0.05444	0.00130	0.4307	0.00990	0.05745	0.00058	391	49	364	7	360	4
18.1	186	437	0.43	0.05247	0.00128	0.4072	0.00990	0.05642	0.00061	306	56	347	7	354	4
19.1	290	537	0.54	0.05369	0.00162	0.4049	0.01191	0.05481	0.00057	367	73	345	9	344	3
AKTL9															
1.1	255	374	0.68	0.05476	0.00159	0.4031	0.01202	0.05310	0.00049	467	60	344	9	334	3
2.1	299	443	0.68	0.05369	0.00187	0.4069	0.01363	0.05485	0.00055	367	80	347	10	344	3
3.1	248	361	0.69	0.05209	0.00192	0.4117	0.01522	0.05703	0.00061	300	81	350	11	358	4
4.1	198	361	0.55	0.05139	0.00162	0.3811	0.01157	0.05378	0.00051	257	72	328	9	338	3
5.1	320	479	0.67	0.05473	0.00147	0.4051	0.01081	0.05347	0.00047	467	61	345	8	336	3
6.1	143	233	0.62	0.05263	0.00204	0.3920	0.01498	0.05401	0.00059	322	89	336	11	339	4
7.1	241	364	0.66	0.05219	0.00164	0.3887	0.01251	0.05386	0.00068	295	72	333	9	338	4
8.1	237	382	0.62	0.05322	0.00151	0.3914	0.01085	0.05326	0.00052	339	97	335	8	334	3
9.1	345	485	0.71	0.05271	0.00140	0.4053	0.01098	0.05552	0.00045	317	61	346	8	348	3
10.1	154	318	0.48	0.05293	0.00210	0.3930	0.01504	0.05385	0.00055	324	91	337	11	338	3
11.1	130	239	0.55	0.05325	0.00311	0.3858	0.02236	0.05263	0.00090	339	127	331	16	331	5
12.1	197	334	0.59	0.05504	0.00185	0.3846	0.01465	0.05024	0.00073	413	71	330	11	316	4
13.1	398	707	0.56	0.05240	0.00127	0.3795	0.01073	0.05201	0.00055	302	56	327	8	327	3
14.1	337	496	0.68	0.05399	0.00137	0.4105	0.01005	0.05487	0.00041	372	53	349	7	344	3
15.1	365	685	0.53	0.05714	0.00146	0.4259	0.01095	0.05366	0.00056	498	57	360	8	337	3
16.1	312	483	0.65	0.05268	0.00162	0.4020	0.01198	0.05505	0.00050	322	70	343	9	345	3
17.1	305	476	0.64	0.05328	0.00139	0.4053	0.01093	0.05476	0.00054	339	59	345	8	344	3
18.1	277	419	0.66	0.05402	0.00189	0.4313	0.01377	0.05798	0.00061	372	75	364	10	363	4
19.1	451	692	0.65	0.05342	0.00112	0.4007	0.00838	0.05416	0.00044	346	48	342	6	340	3
20.1	229	363	0.63	0.05685	0.00169	0.4132	0.01227	0.05263	0.00051	487	65	351	9	331	3

(图 4b)，其余 3 个点偏离谐和线，另外 2 个点年龄明显较老，为 358Ma 和 363Ma。两个谐和年龄 354Ma 和 340Ma 分别代表岩浆结晶时的年龄，是花岗岩的形成年龄；样品中几个点偏离谐和线，可能是由于不同程度的普通 Pb 的贡献，或者是结晶后 U 和 Pb 同位素的增加或丢失，往往导致测量时^{207}Pb偏高，但当锆石年龄小于 1000Ma 时一般不影响$^{206}Pb/^{238}U$的年龄，故在谐和图中统统表现为向右偏离；钾长花岗岩 AKTL2 中 1 个较年轻的锆石可能是分选时混入或是有一定程度的 Pb 丢失的结果，花岗斑岩 AKTL9 中 2 粒较老的锆石需做其它的工作辅助解释。

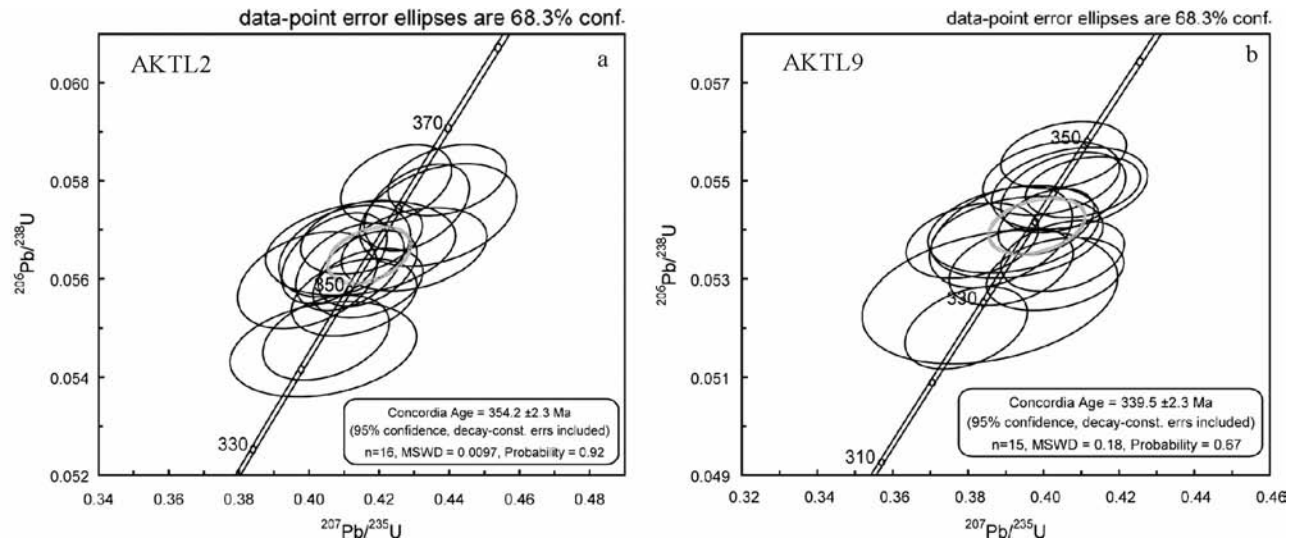

图 4 花岗岩类 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄谐和图

Fig. 4 LA-ICP-MS U-Pb concordia diagrams of zircons from the granitoids

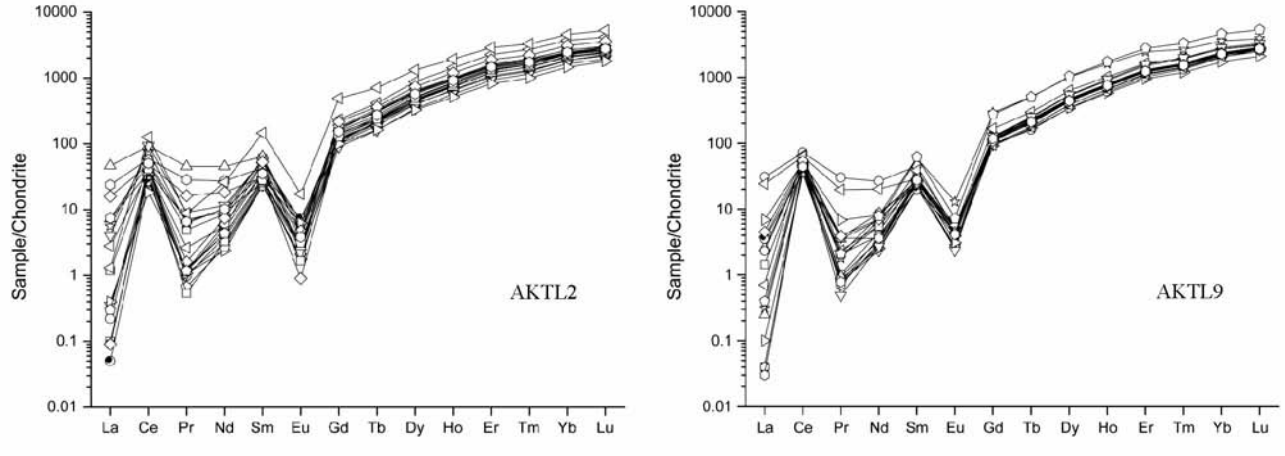

图 5 锆石球粒陨石标准化稀土配分图(标准化值据 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 5 Chondrite-normalized REE pattern diagrams of zircons (after Sun and McDonough, 1989)

锆石的稀土元素配分图(图 5)具有 HREE 明显富集、Ce 正异常和 Eu 负异常明显等特点,是典型的岩浆锆石的特征。除年龄有差异外,花岗岩和花岗斑岩的锆石在形态、稀土总量和稀土球粒陨石标准化配分图上表现完全一致。

6 讨论

6.1 花岗岩侵入体对大哈拉军山组火山岩形成时代的制约

随着对西天山大哈拉军山组火山岩研究的深入以及近年来高精度锆石定年数据的报道,大哈拉军山组的形成时代问题也成为一个争论的焦点,对大哈拉军山组火山岩年龄的准确限定是重建西天山构造演化的重要一环。如引言所述,对西天山石炭纪火山岩的年龄报道从晚泥盆到晚石炭,跨度超过 40Ma。从西到东火山岩年龄有由老变年轻的趋势,西天山西部特克斯-昭苏一带的火山岩主要由晚泥盆世-早石炭世喷发的火山岩组成,中部新源城南沿那拉提北坡分布的火山岩形成于早石炭世,东部的拉尔敦达坂一带的火山岩则形成于晚石炭世。部分研究建议将大哈拉军山组进行"解体"(朱永峰等,2005a, 2006a;Zhu *et al.*, 2009)。

高精度 LA-ICPMS 锆石年代学测定的钾长花岗岩年龄为 354Ma,花岗斑岩年龄为 340Ma,花岗斑岩比钾长花岗岩晚 14Ma,超出误差范围,可能为后期的岩浆侵入事件,与野外脉状花岗斑岩侵入钾长花岗岩体中的观察是吻合的,二者成分、地球化学特征一致,说明二者可能形成于相近的岩浆环境和源区。本研究虽然没有直接获得大哈拉军山组的年龄,但侵入玄武安山岩之中的钾长花岗岩年龄为 354Ma 和后期的花岗斑岩 340Ma,说明钾长花岗岩侵入体是在早石炭纪侵入的,此年龄结果严格限定了大哈拉军山组年龄的上限,认

定昭苏-特克斯东南部阿登套地区的火山岩年龄不会晚于354Ma。纵观前人对大哈拉军山组的年代学研究，最老的年龄是西天山西段巩留-特克斯地区的晚泥盆纪（朱永峰等，2006a），结合本研究作者认为昭苏东南阿登套地区的大哈拉军山组很可能是晚泥盆纪形成的，与前人的研究结果相一致。

6.2 钾长花岗岩的形成环境探讨

Loiselle and Wones（1979）最早将A型花岗岩定义为碱性（alkaline）、贫水（anhydrous）和非造山（anorogenic）的花岗岩（Loiselle and Wones, 1979），后来又被拓展为还包括中等碱质、含少量水、准铝-弱过铝质而不含碱性暗色矿物的铝质A型花岗岩（Eby, 1990；King *et al.*, 1997）。A型花岗岩多形成于拉张伸展的构造环境，并经常出现在非造山或碰撞后伸展阶段，A型花岗岩产于伸展的构造背景的观点得到了普遍的认同（Clemens *et al.*, 1986；Whalen *et al.*, 1987；Eby, 1990, 1992；Wu *et al.*, 2002；Bonin, 2007；吴福元等，2007）。阿登套地区的钾长花岗岩侵入体地球化学特征具有高Si、高碱，低Mg、Ca，准铝，高$Fe_2O_3^T$/MgO比、$10^4 \times (Ga/Al)$比大于2.6，Eu负异常明显以及富集HFSE、亏损Ba、Sr、P、Ti的特点，推断此钾长花岗岩可能为铝质A型花岗岩。

但是，仅通过地球化学数据来判定A型花岗岩并不是十分可靠的，因为在高分异的情况下（铝质A型花岗岩），I型和S型花岗岩具有与A型花岗岩相似的矿物学和地球化学特点（Chappell and White, 1992）。无论A型花岗岩成因如何，有一点大家比较共认，即该类岩石的形成温度较高，而且部分A型花岗岩形成压力还较低（即来源于较浅部的中上地壳），这不仅有岩石学依据，也得到实验岩石学资料的支持（Clemens *et al.*, 1986；Douce, 1997）。因此，正常的I或者S型花岗岩经分异作用难以形成A型花岗岩（吴福元等，2007）。

我们利用锆石饱和温度计（Miller *et al.*, 2003）计算了花岗岩浆的温度：

$$T_{Zr} = 129000/[2195 + 0.85M + \ln(496000/Zr_{melt})]$$

其中，T为绝对温度，Zr_{melt}为熔体中锆的浓度，M为岩石中阳离子比值$M = (Na + K + 2Ca)/(Al \cdot Si)$。锆石饱和温度$T_{Zr}$的意义（Miller *et al.*, 2003）在于：（1）对于长英质岩浆，T_{Zr}近似于熔体分离的温度，是原始侵位岩浆的最低计算温度。这是因为T_{Zr}最适合中性到长英质岩浆，特别是长英质岩浆经历了高程度分异，成分中锆石已达饱和，不再改变。这种熔体已将继承的及早期结晶的锆石全部包括了，即绝大部分Zr已在熔体中了。（2）对于缺乏继承锆石或早期结晶锆石的岩石，表明熔体中锆石未达饱和，这种情况下的T_{Zr}代表的是广泛结晶前在侵位上部岩浆的实际温度。没有继承锆石表明在源区锆石可能没有达到饱和，因此T_{Zr}代表了源区原始岩浆的最低温度。本研究根据上述公式计算的M值为1.42～1.46，花岗岩类的岩浆温度为800～820℃，是岩浆的最低计算温度，故此花岗岩类的形成温度较高，不支持高分异I型和S型花岗岩的可能性，支持此钾长花岗岩为铝质A型花岗岩的结论。

研究表明阿登套A型花岗岩形成于早石炭世的伸展拉张环境，考虑到在早石炭世依然有南天山洋向北俯冲（Gao *et al.*, 1995, 1998, 2009a；Gao and Klemd, 2003；高俊等，2006, 2009b），研究区南部西天山高压变质带一般认为是晚石炭纪变质，最新的榴辉岩透镜体中含绿辉石包体的锆石边部Camaca U-Pb年龄为320Ma（Su *et al.*, 2010），说明在晚石炭纪以前依然有洋壳俯冲。我们推断此A型花岗岩很可能产出于活动大陆边缘的弧间或弧后的拉张环境。结合区域地质背景，以及昭苏北部有弧后拉张环境的报道（钱青等，2006），我们更倾向于此A型花岗岩为活动陆缘弧后拉张的产物。产于活动大陆边缘的弧后拉张环境的A型花岗岩在华南地区也有报道（Jiang *et al.*, 2005, 2006；Zhao *et al.*, 2008）。

6.3 大哈拉军山组火山岩的形成环境

如引言所述，西天山大哈拉军山组火山岩的成因环境主要有“裂谷-地幔柱”（车自成等，1996；夏林圻等，2004，2006，2008）和“岛弧火山岩”（朱永峰等，2005a，b，2006b；李注苍等，2006；郭璇和朱永峰，2006；孙林华等，2007；张学奎和李注苍，2008）两种争议。另有研究表明昭苏北部大哈拉军山组火山岩具有LILE富集、HFSE亏损的特点，但与典型的岛弧玄武岩的地球化学特征不同，同时发育有指示拉张环境的Fe-Ti玄武岩，认为此火山岩形成于具有元古代陆壳基地的活动大陆边缘弧后拉张环境，不同于大陆裂谷，不是地幔柱的结果（钱青等，2006）。

弧后盆地和岛弧的岩浆来源关系是一个重要而又尚未解决的问题。对一个成熟的沟-弧-盆体系，岛弧和弧后盆地（Back-Arc Basin, BAB）玄武岩有着不同的主微量元素特征和同位素特征（Stern *et al.*, 1990），岛弧岩浆以富集LILE、亏损HFSE、具有高的放射性Sr含量和低的放射性Nd含量为特点，而BAB岩浆与洋中脊玄武岩（MORB）非常相似，没有（或有弱的）LILE富集、无HFSE亏损，弧前位置和BAB裂谷具有明显的地理分布差异。但是，初始的弧后裂谷在弧内或靠弧非常近的地方发育，故在弧后裂谷的最初阶段，BAB火山岩的性质与岛弧火山岩非常类似，如年轻的马里亚纳海沟的弧后环境喷发的玄武岩具有非常强的岛弧性质（Stern *et al.*, 1990）。世界上其它几个弧后盆地体系在其演化的初期也显示出显著的岛弧特性，如Lau Basin北部（Hawkins and Melchior, 1985），以及Lau Basin南部的Valu Fa洋脊熔岩（Marcelot *et al.*, 1983）等。

西天山昭苏-特克斯地区的大哈拉军山组火山岩年龄被限定在晚泥盆纪-早石炭纪，侵入其中的A型花岗岩为稍晚或者是同期的岩浆活动，二者应有相同的岩浆形成环境，由此推断这些火山岩也可能是活动大陆边缘弧后拉张活动的

产物,与前人(钱青等,2006)的认识一致。研究区火山岩样品富集 LILE、亏损 HFSE 的特点与岛弧火山岩特征相似,推测其可能产生于弧后拉张的初期阶段。

7 结论

(1)西天山昭苏南部阿登套地区发现花岗岩类侵入在大哈拉军山组火山岩中,得到钾长花岗岩和花岗斑岩的岩浆锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄分别为 354Ma 和 340Ma,认定为早石炭纪的侵入体。此侵入体限定了大哈拉军山组年龄的上限,推断昭苏-特克斯一带的火山岩不会晚于 354Ma,很可能是在晚泥盆纪形成的。

(2)地球化学特征显示钾长花岗岩为典型的铝质 A 型花岗岩,很可能产出于活动大陆边缘的弧后拉张环境。推断昭苏-特克斯一带在早石炭纪可能存在南天山洋向北俯冲的大陆弧后盆地。

(3)鉴于阿登套地区的大哈拉军山组与 A 型花岗岩侵入体构造上相邻、年代上差别不大,二者应有相同的岩浆成因环境,由此推出阿登套地区的大哈拉军山组火山岩可能是活动陆缘弧后拉张活动的产物,结合其具有岛弧火山岩的特性推测可能形成于弧后拉张的初期阶段。

致谢 衷心感谢牛贺才研究员和另一名匿名审稿人提出的宝贵修改意见和建议。在 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 实验准备和测试过程中得到本单位闫欣工程师和马红霞、中国地质大学(武汉)陈能松教授和张璐的帮助,主微量元素地球化学分析得到本单位李禾、靳新娣工程师的帮助,在此一并感谢。

References

Bonin B. 2007. A-type granites and related rocks: Evolution of a concept, problems and prospects. Lithos, 97(1-2): 1-29

Bureau of Geology and Mineral Resources of Xinjiang. 1993. Regional Geology of Xinjiang Uygur Autonomous Region. Beijing: Geological Publishing House, 1-841 (in Chinese)

Chappell BW and White AJR. 1992. I-type and S-type granites in the Lachlan Fold Belt. Transactions of the Royal Society of Edinburgh-Earth Sciences, 83: 1-26

Che ZC, Liu L, Liu HF and Luo JH. 1996. Review on the ancient Yili rift, Xinjiang, China. Acta Petrologica Sinica, 12(3): 478-490 (in Chinese with English abstract)

Chen DL, Liu L, Che ZC and Luo JH. 2001. Geochemical characteristis and tectonic implication of Carboniferous volcanites in the Luotuogou area of Middle Tianshan. Acta Petrologica Sinica, 17(3): 378-384 (in Chinese with English abstract)

Clemens JD, Holloway JR and White AJR. 1986. Origin of an A-type granite: Experimental constraints. American Mineralogist, 71(3-4): 317-324

Douce AEP. 1997. Generation of metaluminous A-type granites by low-pressure melting of calc-alkaline granitoids. Geology, 25(8): 743-746

Eby GN. 1990. The A-type granitoids-a review of their occurrence and chemical characteristics and speculations on their petrogenesis. Lithos, 26(1-2): 115-134

Eby GN. 1992. Chemical subdivision of the A-type granitoids-petrogenetic and tectonic implications. Geology, 20(7): 641-644

Gao J, He G, Li M, Xiao X, Tang Y, Wang J and Zhao M. 1995. The mineralogy, petrology, metamorphic *PTDt* trajectory and exhumation mechanism of blueschists, South Tianshan, northwestern China. Tectonophysics, 250(1-3): 151-168

Gao J, Li MS, Xiao XC, Tang YQ and He GQ. 1998. Paleozoic tectonic evolution of the Tianshan Orogen, northwestern China. Tectonophysics, 287(1-4): 213-231

Gao J and Klemd R. 2003. Formation of HP-LT rocks and their tectonic implications in the western Tianshan Orogen, NW China: Geochemical and age constraints. Lithos, 66(1-2): 1-22

Gao J, Long LL, Qian Q, Huang DZ, Su W and Klemd R. 2006. South Tianshan: A Late Paleozoic or a Triassic Orogen? Acta Petrologica Sinica, 22(5): 1049-1061 (in Chinese with English abstract)

Gao J, Long LL, Klemd R, Qian Q, Liu DY, Xiong XM, Su W, Liu W and Wang YT and Yang FQ. 2009a. Tectonic evolution of the South Tianshan orogen and adjacent regions, NW China: Geochemical and age constraints of granitoid rocks. International Journal of Earth Sciences, 98(6): 1221-1238

Gao J, Qian Q, Long LL, Zhang X and Li JL. 2009b. The accretionary orogenic processes of western Tianshan. Geological Bulletin of China, 28(12): 1804-1816 (in Chinese with English abstract)

Guo X and Zhu YF. 2006. Petrological and geochemical characteristics of the Carboniferous volcanic rocks, south of the Xinyuan Coutry, Xinjiang. Geological Journal of China Universities, 12(1): 62-73 (in Chinese with English abstract)

Hawkins JW and Melchior JT. 1985. Petrology of Mariana Trough and Lau Basin basalts. Journal of Geophysical Research-Solid Earth and Planets, 90(NB13): 1431-1468

Jiang YH, Ling HF, Jiang SY, Fan HH, Shen WZ and Ni P. 2005. Petrogenesis of a Late Jurassic peraluminous volcanic complex and its high-Mg, potassic, quenched enclaves at Xiangshan, Southeast China. Journal of Petrology, 46(6): 1121-1154

Jiang YH, Jiang SY, Zhao KD and Ling HF. 2006. Petrogenesis of Late Jurassic Qianlishan granites and mafic dykes, Southeast China: Implications for a back-arc extension setting. Geological Magazine, 143(4): 457-474

King PL, White AJR, Chappell BW and Allen CM. 1997. Characterization and origin of aluminous A-type granites from the Lachlan Fold Belt, southeastern Australia. Journal of Petrology, 38(3): 371-391

Li JL, Su W, Zhang X and Liu X. 2009. Zircon Cameca U-Pb dating and its significance for granulite-facies gneisses from the western Awulale Mountain, West Tianshan, China. Geological Bulletin of China, 28(12): 1852-1862 (in Chinese with English abstract)

Li ZC, Li YJ, Li JH, Luan XD and Guo WJ. 2006. Geochemical characteristics of the Dahalajunshan Formation volcanic rocks and their implications on the tectonic setting in Awulale area. Xinjiang Geology, 24(2): 120-124 (in Chinese with English abstract)

Liu YM, Yang WH and Cao TY. 1994. Study on isotopic age of Dahalajunshan Formation in Tekesi forestry of Xinjiang. Geochimica, 23(1): 99-104 (in Chinese with English abstract)

Liu YS, Hu ZC, Gao S, Gunther D, Xu J, Gao CG and Chen HH. 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

Loiselle MC and Wones DR. 1979. Characteristics and origin of anorogenic granites. Geological Society of America Abstracts with Programs, 11: 468

Ludwig KR. 2003. User´ Manual for Isoplot/Ex, v. 3. 0: A geochronological toolkit for Microsoft Excel. Berkeley Geochronology Center, Special Publication No. 4: 1-70

Marcelot G, Dupuy C, Girod M and Maury RC. 1983. Petrology of Futuna Island lavas (New Hebrides): An example of calc-alkaline magmatism associated with the initial-stages of back-arc spreading. Chemical Geology, 38(1-2): 23-37

Miller CF, McDowell SM and Mapes RW. 2003. Hot and cold granites?

Implications of zircon saturation temperatures and preservation of inheritance. Geology, 31(6): 529 – 532

Qian Q, Gao J, Xiong XM, Long LL and Huang DZ. 2006. Petrogenesis and tectonic settings of Carboniferous volcanic rocks from North Zhaosu, western Tianshan Mountains: Constraints from petrology and geochemistry. Acta Petrologica Sinica, 22(5): 1307 – 1323 (in Chinese with English abstract)

Qian Q, Gao J, Klemd R, He GQ, Song BA, Liu DY and Xu RH. 2009. Early Paleozoic tectonic evolution of the Chinese South Tianshan Orogen: Constraints from SHRIMP zircon U-Pb geochronology and geochemistry of basaltic and dioritic rocks from Xiate, NW China. International Journal of Earth Sciences, 98(3): 551 – 569

Rubatto D and Gebauer D. 2000. Use of cathodoluminescence for U-Pb zircon dating by ion microprobe: Some examples from the western Alps. Cathodoluminescence in Geosciences: 373 – 400

Stern RJ, Lin PN, Morris JD, Jackson MC, Fryer P, Bloomer SH and Ito E. 1990. Enriched back-arc basin basalts from the northern Mariana Trough: Implications for the magmatic evolution of back-arc basins. Earth and Planetary Science Letters, 100(1 – 3): 210 – 225

Su W, Gao J, Klemd R, Li JL, Zhang X, Li XH, Chen NS and Zhang L. 2010. U-Pb zircon geochronology of Tianshan eclogites in NW China: Implication for the collision between the Yili and Tarim blocks of the southwestern Altaids. European Journal of Mineralogy, 22(4): 473 – 478

Sun LH, Peng TP and Wang YJ. 2007. Geochemical characteristics of basaltic andesites from Dahalajunshan Formation, southestern Tekesi (Xinjiang): Petrogenesis and its tectonic significance. Geotectonica et Metallogenia, 31(3): 372 – 379 (in Chinese with English abstract)

Sun SS and McDonough WF. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts; implications for mantle composition and processes. In: Saunders AD and Norry MJ (eds.). Magmatism in the Ocean Basins. Geological Society Special Publications, 42: 313 – 345

Whalen JB, Currie KL and Chappell BW. 1987. A-type granites: Geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis. Contributions to Mineralogy and Petrology, 95(4): 407 – 419

Windley BF, Allen MB, Zhang C, Zhao ZY and Wang GR. 1990. Paleozoic accretion and Cenozoic redeformation of the Chinese Tien-Shan-Range, Central-Asia. Geology, 18(2): 128 – 131

Wu FY, Sun DY, Li HM, Jahn BM and Wilde S. 2002. A-type granites in northeastern China: Age and geochemical constraints on their petrogenesis. Chemical Geology, 187(1 – 2): 143 – 173

Wu FY, Li XH, Yang JH and Zheng YF. 2007. Discussions on the petrogenesis of granites. Acta Petrologica Sinica, 23(6): 1217 – 1238 (in Chinese with English abstract)

Xia LQ, Xia ZC, Xu XY, Li XM, Ma ZP and Wang LS. 2004. Carboniferous Tianshan igneous megaprovince and mantle plume. Geological Bulletin of China, 23(9 – 10): 903 – 910 (in Chinese with English abstract)

Xia LQ, Li XM, Xia ZC, Xu XY, Ma ZP and Wang LS. 2006. Carboniferous-Permian rift-related volcanism and mantle plume in the Tianshan, northwestern China. Northwestern Geology, 39(1): 1 – 49 (in Chinese with English abstract)

Xia LQ, Xia ZC, Xu XY, Li XM and Ma ZP. 2008. Petrogenesis of Caboniferous-Early Permian rift-related volcanic rocks in the Tianshan and its neighboring areas, northwestern China. Northwestern Geology, 41(4): 1 – 68 (in Chinese with English abstract)

Xiao WJ, Windley BF, Huang BC, Han CM, Yuan C, Chen HL, Sun M, Sun S and Li JL. 2009. End-Permian to Mid-Triassic termination of the accretionary processes of the southern Altaids: Implications for the geodynamic evolution, Phanerozoic continental growth, and metallogeny of Central Asia. International Journal of Earth Sciences, 98(6): 1189 – 1217

Yuan HL, Gao S, Liu XM, Li HM, Gunther D and Wu FY. 2004. Accurate U-Pb age and trace element determinations of zircon by laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry. Geostandards and Geoanalytical Research, 28(3): 353 – 370

Zhai W, Sun XM, Gao J, He XP, Liang JL, Miao LC and Wu YL. 2006. SHRIMP dating of zircons from volcanic host rocks of Dahalajunshan Formation in Axi gold deposit, Xinjiang, China, and its geological implications. Acta Petrologica Sinica, 22(5): 1399 – 1404 (in Chinese with English abstract)

Zhang FR, Cheng CH, Yu Q and Lou FS. 2009. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating of volcanic rocks from Dahalajunshan Formation, Wusun Mountains in West Tianshan. Xinjiang Geology, 27(3): 231 – 235 (in Chinese with English abstract)

Zhang XK and Li ZC. 2008. Geochemical characteristics and their implications of the Dahalajunshan Formation volcanic rocks in Western Tianshan. Gansu Science and Technology, 24(3): 32 – 35 (in Chinese)

Zhao XF, Zhou MF, Li JW and Wu FY. 2008. Association of Neoproterozoic A- and I-type granites in South China: Implications for generation of A-type granites in a subduction-related environment. Chemical Geology, 257(1 – 2): 1 – 15

Zhu YF, Zhou J and Zhang LF. 2005a. The zircon SHRIMP chronology of the Dahalajunshan Formation in West Tianshan, Xinjiang. Abstracts of Petrology and Geodynamics Meeting. Hangzhou, China: 424 – 425 (in Chinese)

Zhu YF, Zhang LF, Gu LB, Guo X and Zhou J. 2005b. The zircon SHRIMP chronology and trace element geochemistry of the Carboniferous volcanic rocks in western Tianshan Mountains. Chinese Science Bulletin, 50(19): 2201 – 2212

Zhu YF, Zhou J, Song B, Zhang LF and Guo X. 2006a. Age of the "Dahalajunshan" Formation in Xinjiang and its disintegration. Geology in China, 33(3): 487 – 497 (in Chinese with English abstract)

Zhu YF, Zhou J and Guo XA. 2006b. Petrology and Sr-Nd isotopic geochemistry of the Carboniferous volcanic rocks in the western Tianshan Mountains, NW China. Acta Petrologica Sinica, 22(5): 1341 – 1350 (in Chinese with English abstract)

Zhu YF, Guo X, Song B, Zhang LF and Gu LB. 2009. Petrology, Sr-Nd-Hf isotopic geochemistry and zircon chronology of the Late Palaeozoic volcanic rocks in the southwestern Tianshan Mountains, Xinjiang, NW China. Journal of the Geological Society, 166: 1085 – 1099

附中文参考文献

车自成,刘良,刘洪福,罗金海. 1996. 论伊犁古裂谷. 岩石学报, 13(3): 478 – 490

陈丹玲,刘良,车自成,罗金海. 2001. 中天山骆驼沟火山岩的地球化学特征及其构造环境. 岩石学报, 17(3): 378 – 384

高俊,龙灵利,钱青,黄德志,苏文,Klemd R. 2006. 南天山:晚古生代还是三叠纪碰撞造山带? 岩石学报, 22(5): 1049 – 1061

高俊,钱青,龙灵利,张喜,李继磊,苏文. 2009b. 西天山的增生造山过程. 地质通报, 28(12): 1804 – 1816

郭璇,朱永峰. 2006. 新疆新源县城南石炭纪火山岩岩石学和元素地球化学研究. 高校地质学报, 12(1): 62 – 73

李继磊,苏文,张喜,刘新. 2009. 西天山阿吾拉勒西段麻粒岩相片麻岩锆石 Cameca U-Pb 年龄及其地质意义. 地质通报, 28(12): 1852 – 1862

李注苍,李永军,李景宏,栾新东,郭文杰. 2006. 西天山阿吾拉勒一带大哈拉军山组火山岩地球化学特征及构造环境分析. 新疆地质, 24(2): 120 – 124

刘友梅,杨蔚华,高计元. 1994. 新疆特克斯县林场大哈拉军山组火山岩年代学研究. 地球化学, 23(1): 99 – 104

钱青,高俊,熊贤明,龙灵利,黄德志. 2006. 西天山昭苏北部石炭纪火山岩的岩石地球化学特征、成因及形成环境. 岩石学报, 22(5): 1307 – 1323

孙林华,彭头平,王岳军. 2007. 新疆特克斯东南大哈拉军山组玄武安山岩地球化学特征:岩石成因和构造背景探讨. 大地构造与成矿学, 31(3): 372 – 379

吴福元,李献华,杨进辉,郑永飞. 2007. 花岗岩成因研究的若干问题. 岩石学报, 23(6): 1217 – 1238

夏林圻,夏祖春,徐学义,李向民,马中平,王立社. 2004. 天山石炭纪大火成岩省与地幔柱. 地质通报, 23(9 – 10): 903 – 910

夏林圻,李向民,夏祖春,徐学义,马中平,王立社. 2006. 天山石炭-二叠纪大火成岩省裂谷火山作用与地幔柱. 西北地质, 39(1): 1 – 49

夏林圻,夏祖春,徐学义,李向民,马中平. 2008. 天山及邻区石炭纪-早二叠世裂谷火山岩岩石成因. 西北地质, 41(4): 1 – 68

新疆维吾尔自治区地质矿产局. 1993. 新疆维吾尔自治区区域地质志. 北京: 地质出版社, 1 – 841

翟伟,孙晓明,高俊,贺小平,梁金龙,苗来成,吴有良. 2006. 新疆阿希金矿床赋矿围岩——大哈拉军山组火山岩 SHRIMP 锆石年龄及其地质意义. 岩石学报, 22(5): 1399 – 1404

张芳荣,程春华,余泉,楼法生. 2009. 西天山乌孙山一带大哈拉军山组火山岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年. 新疆地质, 27(3): 231 – 235

张学奎,李注苍. 2008. 西天山大哈拉军山组火山岩地球化学特征及地质意义. 甘肃科技, 24(3): 32 – 35

朱永峰,周晶,张立飞. 2005a. 新疆西天山"大哈拉军山组"火山岩的 SHRIMP 年代学研究. 2005 年全国岩石学与地球动力学研讨会论文摘要集. 杭州: 424 – 425

朱永峰,张立飞,古丽冰,郭璇,周晶. 2005b. 西天山石炭纪火山岩 SHRIMP 年代学及其微量元素地球化学研究. 科学通报, 50(18): 78 – 88

朱永峰,周晶,宋彪,张立飞,郭璇. 2006a. 新疆"大哈拉军山组"火山岩的形成时代问题及其解体方案. 中国地质, 33(3): 487 – 497

朱永峰,周晶,郭璇. 2006b. 西天山石炭纪火山岩岩石学及 Sr-Nd 同位素地球化学研究. 岩石学报, 22(5): 1341 – 1350