

西天山阿吾拉勒西段木汗巴斯陶侵入岩体的地球化学特征、时代及地质意义*

刘新^{1,2} 钱青³ 苏文¹ 李继磊^{1,4}

LIU Xin^{1,2}, QIAN Qing³, SU Wen¹ and LI JiLei^{1,4}

1. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029

2. 中国科学院研究生院, 北京 100049

3. 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

4. 德国纽伦堡-埃朗根大学北巴伐利亚地学中心, 埃朗根 91054

1. *Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China*

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

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

4. *GeoZentrum Nordbayern, Universität Erlangen, Schlossgarten 5a, 91054 Erlangen, Germany*

2012-02-27 收稿, 2012-05-15 改回.

Liu X, Qian Q, Su W and Li JL. 2012. Pluton from Muhanbasitao in the western of Awulale, Western Tianshan: Geochemistry, geochronology and geological implications. *Acta Petrologica Sinica*, 28(8):2401–2413

Abstract A number of Paleozoic intrusions are exposed in the western segment of Awulale Mountains. Among them, the Muhanbasitao pluton consists of hornblende gabbros and granites. They are enriched in large ion lithophile elements (LILE, Rb, Ba, Sr) and intensively depleted in high field strength elements (HSFE, Nb, Ta, Ti) without obvious REE fractionation and Eu anomaly, similar to the geochemical characteristics of calc-alkaline magmatites in a continental arc setting. LA-ICP-MS zircon U-Pb ages of hornblende gabbro and granite are 317.0 ± 2.2 Ma and 319.1 ± 2.4 Ma respectively. The geochronology and geochemistry of the Muhanbasitao pluton suggest that all the southern margin of the Yili-Central Tianshan block including the western segment of Awulale Mountains is an active continental margin environment at the latest of Early Carboniferous to earliest of Late Carboniferous.

Key words Western Tianshan; Awulale Mountain; Hornblende gabbro; Granite; LA-ICP-MS zircon U-Pb age

摘要 阿吾拉勒山西段出露大量古生代侵入岩体。其中木汗巴斯陶岩体由角闪辉长岩和花岗岩组成。它们均富集大离子亲石元素(Rb、Ba、Sr等)、强烈亏损高场强元素(Nb、Ta、Ti), 不具明显的轻重稀土分异和铕异常, 类似于大陆弧钙碱性岩浆岩的地球化学特征。LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年结果表明角闪辉长岩和花岗岩的侵位时代分别为 317.0 ± 2.2 Ma 和 319.1 ± 2.4 Ma。木汗巴斯陶侵入岩体的地球化学和年代学表明包括阿吾拉勒山西段在内的整个伊犁-中天山地块南缘在早石炭世晚期至晚石炭世早期处于一个活动大陆边缘环境。

关键词 西天山; 阿吾拉勒山; 角闪辉长岩; 花岗岩; 锆石 LA-ICP-MS 年龄

中图法分类号 P588.12; P597.3

1 引言

中亚造山带位于西伯利亚板块、卡拉库姆-塔里木板块、华北板块和东欧板块之间, 是典型的增生型造山带, 也是全球显生宙大陆地壳生长的最显著地区。我国境内的天山造

山带位于中亚造山带西段南部, 是其重要组成部分。天山造山带构造演化的研究对理解整个中亚造山带的演化有重要意义 (Coleman, 1989; Windley *et al.*, 1990; Sengor and Burtman, 1993; Xiao *et al.*, 2004a, b; Wang *et al.*, 2006; Gao *et al.*, 2009; 李锦轶等, 2006a, b; 高俊等, 2009)。在我国境内, 天山造山带的展布范围与地理概念上的天山山脉基本

* 本文受国家自然科学基金项目(41025008, 41172066, 41021063, 40872057)资助。

第一作者简介: 刘新, 女, 1987年生, 博士生, 矿物学、岩石学、矿床学专业, E-mail: skliuxin1016@126.com

一致。以托克逊-库米什公路为界分为东天山和西天山,西天山又被分为北天山、中天山和南天山(Gao *et al.*, 1998; 马瑞士等, 1997; 白云来等, 2004)。这些次一级的名称是地理概念与地质“造山带”的叠加。西天山造山带以北天山缝合带(或称中天山北缘缝合带)、那拉提北坡-尼古拉耶夫缝合带、南天山缝合带(或称中天山南缘缝合带)为界,自北向南可分为北天山弧增生地体、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.*, 2009; Qian *et al.*, 2009; 高俊等, 2009)。哈萨克斯坦的 Uzunbulak 和 Anrankhal 山分别出露有新太古代和古元古代片麻岩,代表了伊犁地块的变质基底(Kröner *et al.*, 2007)。

西天山造山带发育大量古生代侵入岩,出露面积约占造山带的 30%(Long *et al.*, 2011; 王作勋等, 1990)。这些侵入岩的时代主要集中于奥陶纪至二叠纪之间。从北向南,按

其所属的大地构造单元,可分为北天山花岗岩带、伊犁地块北缘花岗岩带、伊犁地块南缘花岗岩带和南天山花岗岩带(Long *et al.*, 2011)。按照其分布的山脉地理位置,结合岩体时代,可分为北天山北缘巴音沟晚古生代侵入岩、北天山博罗科努-依连哈比尔尕晚古生代侵入岩带、伊犁盆地乌孙山-阿吾拉勒晚古生代侵入岩带、那拉提-中天山古生代侵入岩带、南天山晚古生代侵入岩带、塔里木北缘古生代侵入岩带(朱志新等, 2011)。早古生代至晚石炭世岩浆岩一般被认为是南天山洋和北天山洋向伊犁-中天山地块之下俯冲的产物(Windley *et al.*, 1990; Long *et al.*, 2011)。总体特征上,西天山晚古生代岩浆岩主要包括与俯冲有关的钙碱性花岗岩及与同碰撞有关的偏铝、过铝花岗岩及后造山富钾花岗岩(Long *et al.*, 2011; 刘楚雄等, 2004; 韩宝福等, 2004; 杨天南和王小平, 2006; 龙灵利等, 2007; 张招崇等, 2009)。

位于阿吾拉勒山脉西端与伊犁河交汇处以北的木汗巴

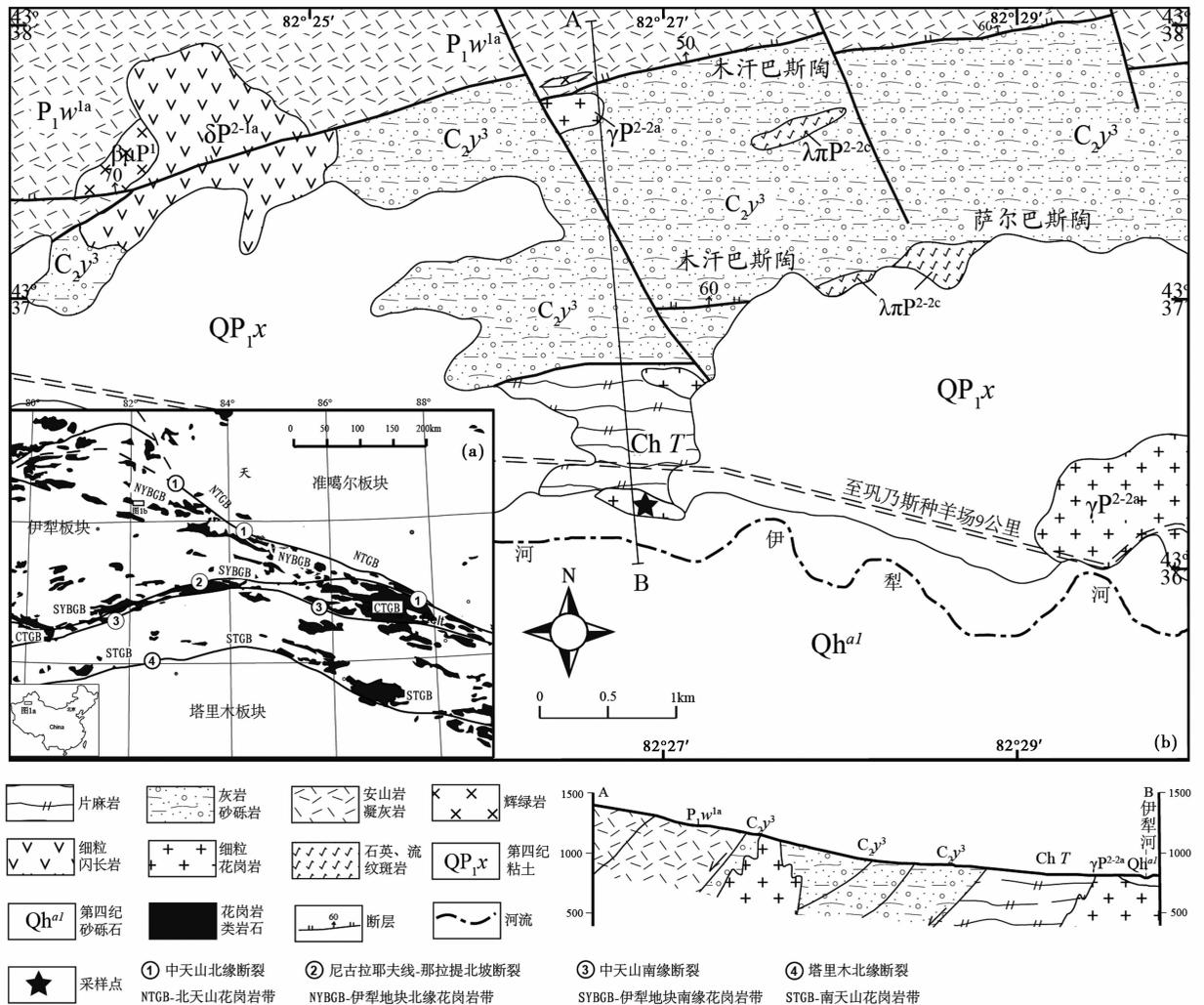


图1 研究区构造地质简图(据李继磊等, 2009; Long *et al.*, 2011 改绘)

Fig. 1 Sketch geological map of the study area (modified after Li *et al.*, 2009; Long *et al.*, 2011)

斯陶地区出露数个花岗岩和石英岩-流纹斑岩侵入体(图1),属于伊犁地块南缘花岗岩带。前人研究成果表明阿吾拉勒山一带发育形成于岛弧或裂谷环境的晚古生代沉积岩系和岩浆岩(姜常义等,1993;姜常义和吴文奎,1995,1996;李注苍等,2006;朱志新等,2011)。根据岩体与侵入地层的关系,木汗巴斯陶地区的侵入岩被认为形成于早二叠世至晚二叠世之间的陆内裂谷环境(江西省地质矿产勘探开发局,2005^①),但尚缺乏详细的岩石成因和年代学研究。本文研究样品采自伊犁河边出露面积约0.2km²的岩体,其由辉长岩和花岗岩组成。对该侵入体进行了岩石地球化学和LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年研究,结合区域上的最新研究进展,讨论该岩体形成的构造背景和地质意义。

2 地质背景和岩石学特征

出露于木汗巴斯陶地区的花岗岩和石英-流纹斑岩侵入

体呈小岩株、岩瘤、岩枝产出,其侵入的围岩有两种类型(图1)。远离218国道的北部山区,围岩地层为上石炭统伊什基里克组,岩性主要为流纹质火山凝灰岩、流纹岩、粗安岩夹砂岩、砾岩。218国道两侧的南部地区,围岩地层则为中元古界(相当于长城系)特克斯群,该群仅出露在木汗巴斯陶附近,受东西向断层控制(图1b),出露面积约为2km²,岩性主要为灰黑色黑云二长片麻岩、黑云透闪紫苏斜长片麻岩、条带状黑云斜长变粒岩和透辉石斜长变粒岩夹大理岩(江西省地质矿产勘探开发局,2005)。片麻岩获得的锆石 Camenca 离子探针 U-Pb 的上交点年龄 $1609 \pm 40\text{Ma}$ 和下交点年龄 $764 \pm 72\text{Ma}$,表明该地层确实为中元古界,代表了伊犁地块的结晶基底(李继磊等,2009)。本文研究样品采自218国道巩乃斯种羊场以西约10km处公路南侧(图1b)。侵入岩体主要由角闪辉长岩和花岗岩组成,但主体为细粒花岗岩;局部可见辉长岩和花岗岩交生、穿插产出(图2a)。二者接触部位可见流动构造。

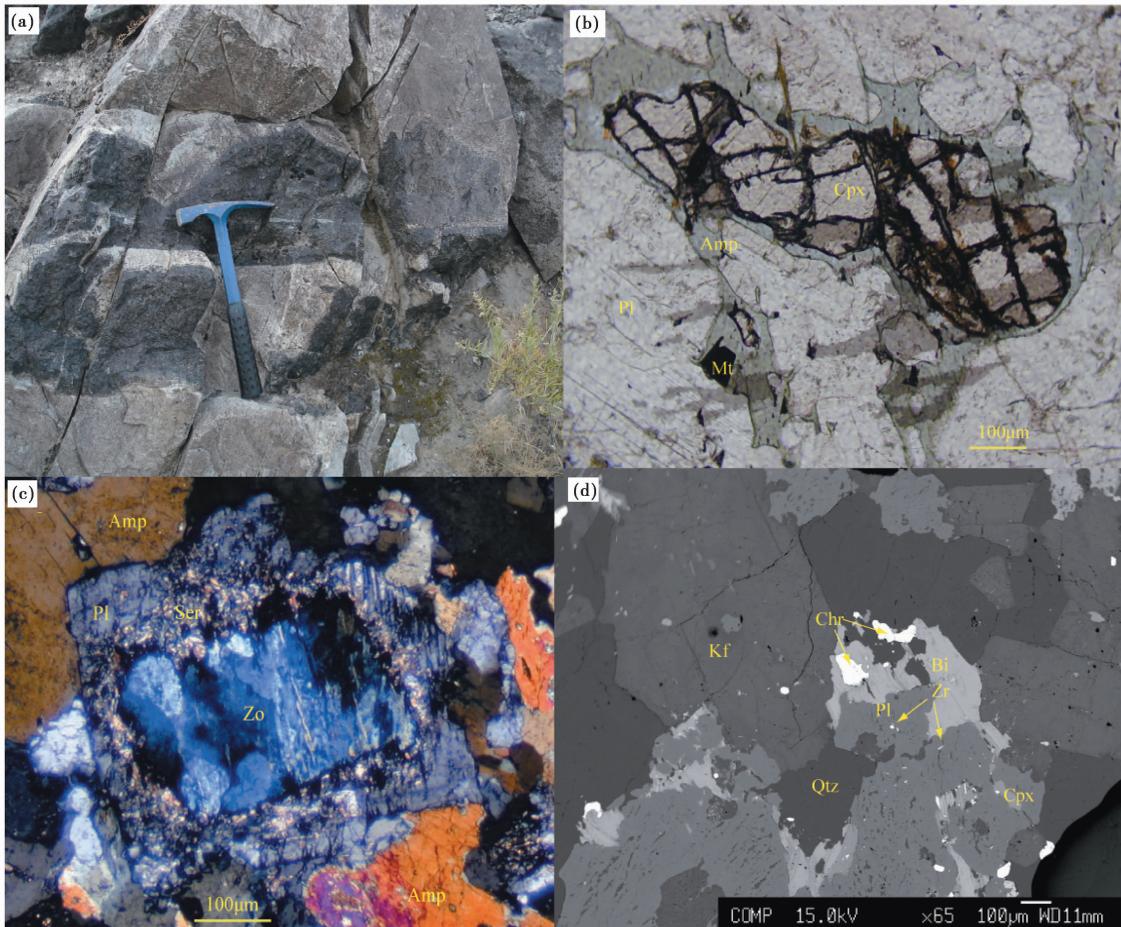


图2 角闪辉长岩和花岗岩野外产状及岩相学照片

(a)-角闪辉长岩和花岗岩相互包裹;(b)-辉石被角闪石包裹(NL1-1);(c)-角闪辉长岩中斜长石发生黝帘石化和绢云母化(NL07-16);(d)-花岗岩的矿物组合(NL07-15)

Fig. 2 Petrographical and field photos of the hornblende gabbros and granites

(a)-hornblende gabbros and granites packed each other in the field; (b)-pyroxene surrounded by amphibole (NL1-1); (c)-the zoisitization and sericitization of plagioclase in hornblende gabbro (NL07-15); (d)-mineral composition of granite (NL07-16)

表1 角闪辉长岩和花岗岩的矿物组成

Table 1 Mineral compositions of the hornblende gabbros and granite

岩性	角闪辉长岩					花岗岩
	NL07-15	NL1-1	NL1-4	NL4-5	NL6-1	NL07-16
斜长石	55	60	65	30	65	25
钾长石						20
角闪石	25	20	15	22	15	2
辉石	10	12	12	20	10	2
石英	4	3	3	10	2	35
黑云母						8
榍石	2	1	1		2	1
磷灰石	1	1	1	1	1	2
锆石						1
铬铁矿		1	1	1		
磁铁矿	3	2	2	1	3	3
钛铁矿					2	1

角闪辉长岩呈浅灰黑色,中细粒结构,矿物组成为斜长石、角闪石、单斜辉石、斜方辉石,副矿物主要为石英、榍石、磷灰石、铬铁矿、磁铁矿、钛铁矿,辉石多以包体形式存在于角闪石中间(图2b),较大颗粒的长石多已发生黝帘石化和绢云母化(图2c),角闪石局部发生绿泥石化。花岗岩为浅灰白色,矿物组成为石英、斜长石、钾长石、单斜辉石、角闪石、黑云母,副矿物为榍石、磷灰石、锆石、钛铁矿、磁铁矿(图2d),多数黑云母发生绿泥石化。两种岩石矿物组合见表1。

3 分析方法

3.1 地球化学分析方法

主量和微量地球化学分析测试在中国科学院地质与地球物理研究所岩矿分析实验室和微量元素分析实验室完成。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)完成测试,采用国家一级岩石标样GBW07101-07114为基本效应校正,每10样品附带一个平行标样。微量元素(包括稀土元素)含量测试利用酸溶液法制备样品,在ICP-MS Element II(电感耦合等离子体光谱仪)上进行分析测试,一般每10个待测样品选取一个样品为平行样,并附有空白样检测。采用GSR标样进行校正,相对偏差一般 $\leq 10\%$,分析结果见表2。

矿物成分在中国科学院地质与地球物理研究所用CAMEXA SX51型电子探针分析,加速电压15kV,电流20nA,计数时间20s,电子束斑 $3\mu\text{m}$,代表性矿物电子探针化学成分见表3。

3.2 年代学测试方法

对岩石样品进行锆石单矿物分选,在双目镜下挑选,挑

选出 >1000 粒锆石矿物。样品靶的制备在中国科学院地质与地球物理研究所离子探针实验室完成,制备方法按照宋彪等(2002)。先对锆石进行透射光、反射光以及阴极发光(CL)照相,在此基础上选择锆石进行定年测试。锆石U-Pb年龄测试在中国地质大学(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,并对锆石中稀土含量进行同步测定。激光剥蚀束斑为 $32\mu\text{m}$,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。在样品测试过程中每隔20个测点分析一次NIST610,以 ^{29}Si 做内标,测定锆石中的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比值和元素分析数据采用ICPMSDataCal程序(Liu *et al.*, 2008),谐和图及年龄计算利用Isoplot3.0程序(Ludwig, 2003)。测试结果见表4。

4 分析结果

4.1 地球化学特征

4.1.1 主量元素特征

角闪辉长岩的 $\text{SiO}_2 = 47.20\% \sim 52.45\%$; 岩石全碱含量($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$) = $2.17\% \sim 3.51\%$; $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} = 0.05 \sim 0.27$; $\text{TiO}_2 = 0.65\% \sim 1.02\%$; $\text{Al}_2\text{O}_3 = 16.40\% \sim 19.92\%$, 属过铝质; 全铝饱和指数 $A/\text{CNK} [\text{Al}_2\text{O}_3 / (\text{CaO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})] = 1.11 \sim 1.31$; 里特曼指数 $\sigma = 0.7 \sim 2.27$, 属于钙碱性系列。

花岗岩的 $\text{SiO}_2 = 72.23\%$; 岩石全碱含量($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$) = 6.70% ; $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} = 0.69$; $\text{TiO}_2 = 0.73\%$; $\text{Al}_2\text{O}_3 = 14.52\%$, 属过铝质; 全铝饱和指数 $A/\text{CNK} [\text{Al}_2\text{O}_3 / (\text{CaO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})] = 1.17$; 里特曼指数 $\sigma = 1.54$, 属于钙碱性系列。

4.1.2 微量元素和稀土元素特征

角闪辉长岩稀土总量 $\sum \text{REE} = 61.8 \times 10^{-6} \sim 99.7 \times 10^{-6}$, 平均 69.0×10^{-6} ; $(\text{La}/\text{Yb})_N = 2.98 \sim 4.18$, $(\text{La}/\text{Sm})_N = 1.68 \sim 2.23$, $(\text{Gd}/\text{Yb})_N = 1.25 \sim 1.49$; $\delta\text{Eu} = 0.95 \sim 1.12$ 。花岗岩稀土总量较角闪辉长岩较高, $\sum \text{REE} = 76.9 \times 10^{-6}$; $(\text{La}/\text{Yb})_N = 3.45$, $(\text{La}/\text{Sm})_N = 3.34$, $(\text{Gd}/\text{Yb})_N = 0.79$; $\delta\text{Eu} = 1.19$ 。两种岩石稀土元素配分模式较为相似(图3a), 稀土总量低; 轻重稀土分馏较弱, 说明其源区无石榴石残留; 多数样品铈异常不明显, 说明其源区无显著的斜长石结晶分离或者堆晶作用。

在原始地幔标准化微量元素蛛网图(图3b)中, 角闪辉长岩与花岗岩均富集大离子亲石元素Rb、Ba、Sr等, 亏损高场强元素Ni、Ta、Ti。Nb = $2.4 \times 10^{-6} \sim 11.68 \times 10^{-6}$, 接近大陆岛弧的含量(McCulloch and Gamble, 1991)。

表2 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 ($\times 10^{-6}$) composition of the samples

岩性	角闪辉长岩						花岗岩	岩性	角闪辉长岩						花岗岩
样品号	NL07-15	NLI-1	NLI-4	NLI-5	NLI-6	NL07-16	样品号	NL07-15	NLI-1	NLI-4	NLI-5	NLI-6	NL07-16		
SiO ₂	52.45	48.75	51.87	49.89	47.20	72.23	Nb	2.66	2.40	2.51	4.26	2.04	11.68		
TiO ₂	0.65	0.95	0.80	0.89	1.06	0.73	Cs	0.57	0.37	0.57	0.40	0.57	2.63		
Al ₂ O ₃	19.92	18.43	19.30	16.40	18.10	14.52	Ba	84.48	98.49	63.31	161.8	141.4	1255		
Fe ₂ O ₃ ^T	4.84	7.30	6.80	9.41	11.85	1.39	La	7.79	7.42	6.77	12.70	6.66	11.79		
MnO	0.09	0.19	0.10	0.20	0.14	0.10	Ce	16.14	15.64	14.78	26.41	14.03	21.52		
MgO	5.48	6.33	4.90	6.76	5.71	0.71	Pr	2.27	2.28	2.18	3.79	2.03	2.78		
CaO	12.33	14.24	12.03	10.26	11.27	3.60	Nd	9.56	9.84	9.27	16.00	8.93	10.71		
Na ₂ O	2.16	1.85	2.58	2.91	2.20	3.26	Sm	2.25	2.53	2.61	3.99	2.19	2.28		
K ₂ O	0.42	0.32	0.20	0.60	0.89	3.44	Eu	0.85	0.95	0.84	1.23	0.82	0.90		
P ₂ O ₅	0.16	0.25	0.16	0.28	0.22	0.12	Gd	2.38	2.71	2.73	3.91	2.41	2.34		
LOI	1.54	0.88	1.16	1.50	1.14	0.60	Tb	0.43	0.46	0.47	0.65	0.39	0.45		
Total	100.0	99.49	99.90	99.10	99.79	100.7	Dy	2.72	2.91	3.01	3.93	2.51	3.06		
Na ₂ O + K ₂ O	2.58	2.17	2.78	3.51	3.09	6.70	Ho	0.57	0.61	0.62	0.82	0.51	0.69		
K ₂ O/Na ₂ O	0.13	0.11	0.05	0.14	0.27	0.69	Er	1.60	1.70	1.69	2.24	1.44	2.03		
A/CNK	1.31	1.13	1.25	1.11	1.22	1.17	Tm	0.24	0.26	0.26	0.33	0.22	0.34		
σ	0.70	0.82	0.87	1.79	2.27	1.54	Yb	1.57	1.69	1.63	2.18	1.45	2.45		
Li	3.50	4.87	4.47	12.69	7.37	1.62	Lu	0.24	0.26	0.25	0.34	0.22	0.40		
Be	0.55	0.62	0.64	0.77	0.51	1.24	Hf	1.67	0.99	1.30	2.23	0.90	9.31		
Sc	31.51	37.53	20.53	33.49	38.41	7.33	Ta	0.20	0.17	0.17	0.28	0.15	1.18		
V	199.6	324.6	297.3	215.1	356.7	67.41	Tl	0.08	0.06	0.06	0.08	0.09	0.32		
Cr	96.27	73.50	70.37	230.1	43.08	7.50	Pb	2.20	10.11	43.39	1.83	18.85	15.62		
Co	16.51	20.82	17.61	33.82	29.32	3.59	Bi	0.09	0.39	1.78	0.12	0.94	0.08		
Ni	31.44	26.23	18.59	64.24	23.53	1.73	Th	1.74	0.47	0.80	1.86	1.09	4.82		
Cu	7.49	19.05	10.10	45.99	69.01	17.47	U	0.68	0.20	0.33	0.35	0.34	2.13		
Zn	34.79	48.55	39.65	56.98	61.67	192.1	Σ REE	62.56	64.27	61.80	99.74	56.70	79.40		
Ga	16.55	19.21	18.73	16.82	18.87	14.39	(HREE) _N	9.44	10.21	10.10	14.19	8.79	11.72		
Rb	11.16	7.59	3.71	14.63	21.91	73.30	δ Eu	1.12	1.11	0.96	0.95	1.09	1.19		
Sr	453.2	457.8	519.7	440.1	455.9	251.3	(La/Yb) _N	3.56	3.14	2.98	4.18	3.29	3.45		
Y	13.96	15.03	14.70	21.21	12.90	17.65	(La/Sm) _N	2.23	1.90	1.68	2.05	1.97	3.34		
Zr	59.71	30.64	43.19	83.54	28.23	345.3	(Gd/Yb) _N	1.25	1.32	1.38	1.49	1.37	0.79		

4.2 锆石 LA-ICP-MS 年龄和 REE 配分模式

本文对一件角闪辉长岩 (NL07-15) 和一件花岗岩 (NL07-16) 进行锆石年龄测定。NL07-15 (角闪辉长岩) 样品中锆石大小约 100 μ m, 自形-半自形, 在 CL 图像上可见清晰的震荡生长环带, 个别出现扇形结构 (图 4), 应为结晶过程中局部结晶生长速率发生变化所导致 (吴元保和郑永飞, 2004)。NL07-16 (花岗岩) 样品中锆石一般大于 100 μ m, 晶形较好, 多呈长柱状, 长宽比可达 4 : 1, 柱面、锥面均可见, 个别较为浑圆, 在 CL 图像上也可见清晰的震荡环带。上述两件样品锆石的环带均较均匀, 未见残余核。样品 NL07-15 的

锆石 Th/U = 0.37 ~ 0.85 (均值 0.51), 绝大多数位于 0.45 ~ 0.65 之间; 07-16 锆石 Th/U = 0.32 ~ 0.79 (均值 0.51), 绝大多数位于 0.4 ~ 0.6 之间。两件锆石样品的稀土配分特征相似 (图 5): HREE 明显富集, Ce 正异常和 Eu 负异常特点显著, 为典型的岩浆成因锆石 (Rubatto, 2002; Hoskin and Schaltegger, 2003; 吴元保和郑永飞, 2004; Schulz *et al.*, 2006)。

NL07-15 样品中对 19 个锆石的 19 个点位进行了分析, 其中 14 个点的 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄在 307 ~ 323Ma 之间, 协和年龄为 317.0 \pm 2.2Ma (加权平均年龄 316.6 \pm 3.1Ma) (图 6a)。NL07-16 样品也测定了 19 个锆石, 19 个测点其中 14 个点

表 4 锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年分析结果

Table 4 LA-ICP-MS zircon U-Pb dating results

测点号	含量(×10 ⁻⁶)			同位素比值						年龄(Ma)					
	²³² Th	²³⁸ U	Th/U	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
NL07-15															
0715-01	107	273	0.39	0.05439	0.00164	0.36811	0.01062	0.04924	0.00046	387	69	318	8	310	3
0715-02	113	229	0.49	0.05405	0.00188	0.36386	0.01241	0.04880	0.00045	372	75	315	9	307	3
0715-03	196	307	0.64	0.05471	0.00173	0.37594	0.01145	0.04973	0.00046	467	75	324	8	313	3
0715-04	178	347	0.51	0.05477	0.00177	0.36980	0.01155	0.04894	0.00048	467	72	320	9	308	3
0715-05	118	237	0.50	0.05490	0.00183	0.38813	0.01276	0.05128	0.00053	409	74	333	9	322	3
0715-06	230	272	0.85	0.05471	0.00163	0.38357	0.01083	0.05077	0.00046	467	67	330	8	319	3
0715-07	115	230	0.50	0.05154	0.00176	0.35915	0.01229	0.05040	0.00050	265	80	312	9	317	3
0715-08	169	332	0.51	0.05277	0.00149	0.37348	0.01018	0.05136	0.00046	320	65	322	8	323	3
0715-09	132	273	0.49	0.05289	0.00174	0.36732	0.01236	0.05011	0.00050	324	71	318	9	315	3
0715-10	369	633	0.58	0.05285	0.00118	0.37378	0.00820	0.05117	0.00040	324	19	322	6	322	2
0715-11	114	251	0.46	0.05405	0.00180	0.37910	0.01266	0.05077	0.00054	372	81	326	9	319	3
0715-12	108	247	0.44	0.05173	0.00187	0.36335	0.01273	0.05103	0.00045	272	83	315	9	321	3
0715-13	136	293	0.46	0.05206	0.00162	0.36283	0.01131	0.05044	0.00048	287	75	314	8	317	3
0715-14	98	267	0.37	0.05364	0.00164	0.37521	0.01134	0.05062	0.00046	367	73	324	8	318	3
NL07-16															
0716-01	327	601	0.54	0.05270	0.00133	0.37366	0.00901	0.05142	0.00044	317	57	322	7	323	3
0716-02	161	381	0.42	0.05283	0.00156	0.36062	0.01049	0.04956	0.00054	320	67	313	8	312	3
0716-03	116	147	0.79	0.05299	0.00313	0.38099	0.02199	0.05230	0.00075	328	135	328	16	329	5
0716-04	345	577	0.60	0.05199	0.00171	0.36352	0.01213	0.05052	0.00056	283	79	315	9	318	3
0716-05	99	313	0.32	0.05277	0.00159	0.37383	0.01103	0.05137	0.00049	320	69	322	8	323	3
0716-06	119	295	0.40	0.05202	0.00181	0.35675	0.01162	0.05003	0.00053	287	77	310	9	315	3
0716-07	142	322	0.44	0.05284	0.00254	0.35533	0.01643	0.04877	0.00067	320	109	309	12	307	4
0716-08	263	522	0.50	0.05289	0.00138	0.37671	0.00947	0.05162	0.00047	324	62	325	7	324	3
0716-09	139	360	0.39	0.05253	0.00148	0.36514	0.01049	0.05019	0.00048	309	65	316	8	316	3
0716-10	462	622	0.74	0.05311	0.00126	0.36508	0.00861	0.04972	0.00053	345	54	316	6	313	3
0716-11	426	933	0.46	0.05303	0.00121	0.38097	0.00864	0.05190	0.00042	332	56	328	6	326	3
0716-12	455	772	0.59	0.05415	0.00117	0.37917	0.00822	0.05073	0.00043	376	53	326	6	319	3
0716-13	131	278	0.47	0.05580	0.00221	0.38237	0.01513	0.04972	0.00060	443	89	329	11	313	4
0716-14	124	292	0.42	0.05670	0.00187	0.39025	0.01244	0.05016	0.00066	480	72	335	9	315	4

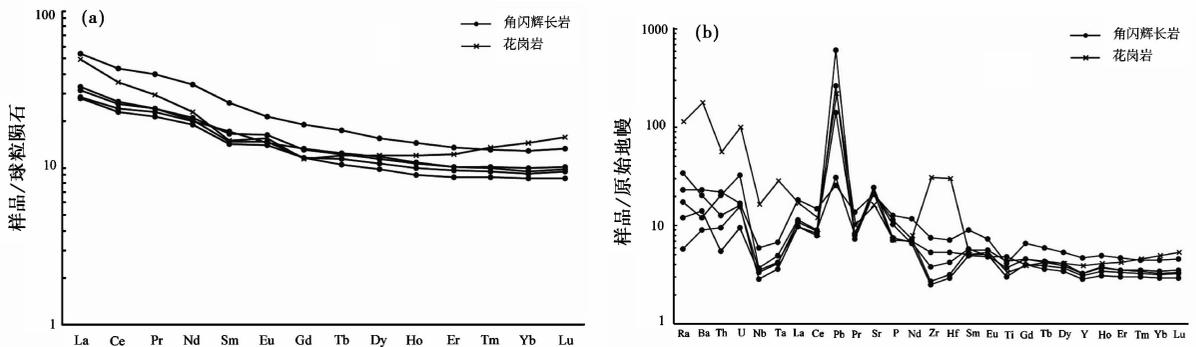


图 3 角闪辉长岩和花岗岩球粒陨石标准化稀土配分图(a)和原始地幔标准化微量元素蛛网图(b) (标准化值据 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 3 Condrile-normalized REE pattern (a) and primitive mantle-normalized trace elements spider (b) for the hornblende gabbros and granite (normalization data after Sun and McDonough, 1989)

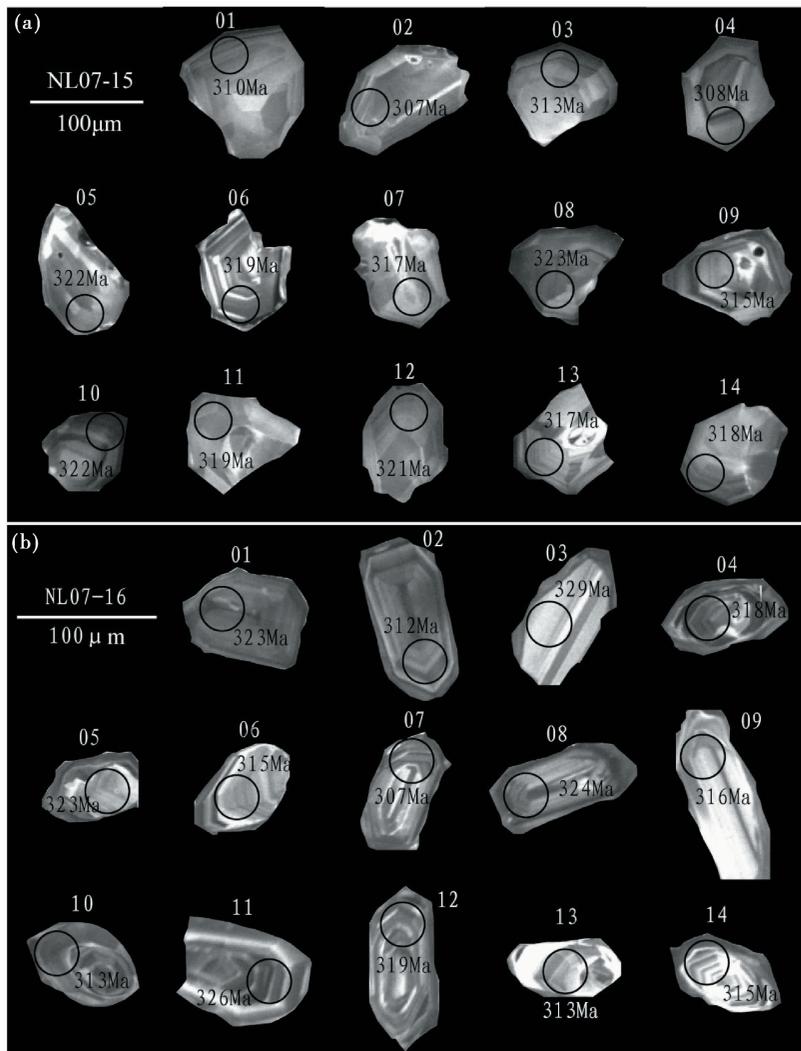


图4 角闪辉长岩(NL07-15) (a)和花岗岩(NL07-16) (b) 锆石阴极发光图像

Fig. 4 Cathodoluminescence (CL) images for zircons from hornblende gabbro (NL 07-15) (a) and granite (NL 07-16) (b)

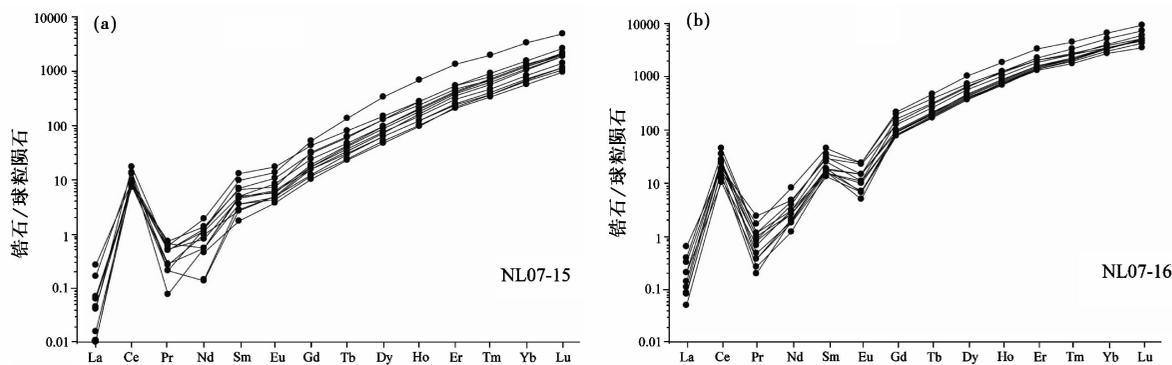


图5 角闪辉长岩(a)和花岗岩(b)中锆石的球粒陨石标准化稀土配分图(标准化值据 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 5 Condrite-normalized REE patterns for zircons from hornblende gabbro (a) and granite (b) (normalization data after Sun and McDonough, 1989)

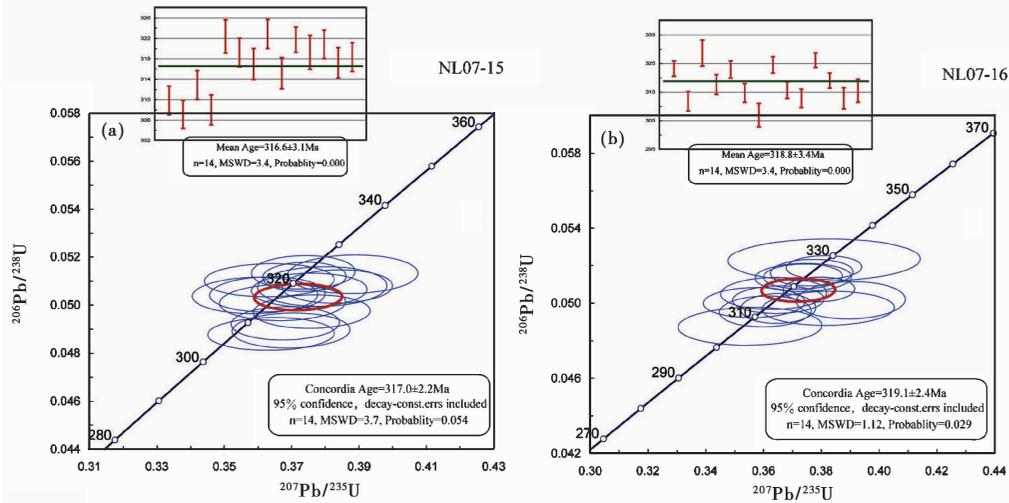


图6 角闪辉长岩 (NL07-15) (a) 和花岗岩 (NL07-16) (b) LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄谐和图

Fig. 6 LA-ICP-MS U-Pb concordia diags of zircons from hornblende gabbro (NL 07-15) (a) and granite (NL 07-16) (b)

$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄在 312 ~ 329Ma 之间, 协和年龄为 $319.1 \pm 2.4\text{Ma}$ (加权平均年龄 $318.8 \pm 3.4\text{Ma}$) (图 6b), 其中两个点偏离协和线, 可能是由于不同程度的普通 Pb 的贡献, 而两个偏移点均位于协和线的右边, 也可能是由于结晶后 U 和 Pb 同位素的增加或丢失引起, 因为在这种情况下测量时 ^{207}Pb 偏高, 但当锆石年龄小于 1000Ma 时一般不影响 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄。另三个年龄明显较老, 为 381Ma、391Ma、394Ma, 可能是继承锆石。角闪辉长岩 $317.0 \pm 2.2\text{Ma}$ 和花岗岩 $319.1 \pm 2.4\text{Ma}$ 在误差范围内相同, 表明他们的形成时间大体相同。

5 讨论

5.1 木汗巴斯陶角闪辉长岩、花岗岩的成因和构造环境

木汗巴斯陶地区侵入体基性岩与酸性岩共存。这两种岩石类型的里特曼指数显示它们的化学成分属于钙碱性。在 $\text{FeO}^{\text{T}}-\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}-\text{MgO}$ 图解中 (图略) 它们也均位于钙碱性岩浆岩区域。富集大离子亲石元素 Rb、Ba、Sr、Pb 等, 相对亏损高场强元素 Nb、Ta、Ti, 这些地球化学特征与俯冲带岛弧岩岩浆特点相似 (Rogers and Hawkesworth, 1989; Stern *et al.*, 1990; Sajona *et al.*, 1996)。在花岗岩类构造环境判别图 Y + Yb-Rb (图 7a) 和 Yb-Ta (图 7b) 中, 它们均投在火山弧型花岗岩范围, 在 Nb/Yb-Th-Yb 图解 (图 7c) 中所有样品均位于大陆岛弧岩岩浆内或者其边缘。它们的 Nb 含量 ($2.4 \times 10^{-6} \sim 11.68 \times 10^{-6}$) 接近大陆岛弧含量。区域上, 阿吾拉勒山广泛发育石炭纪浅水陆缘沉积岩, 产于大陆岛弧内部环境的石炭纪钙碱性火山岩、岛弧型花岗岩、花岗闪长岩和闪长岩 (姜常义等, 1993; 姜常义和吴文奎, 1995, 1996; 王博等, 2006; 朱志新等, 2011)。结合区域地质特征和木汗巴斯陶侵入岩的地球化学特征, 可以推断木汗巴斯陶侵入岩产出在俯冲带之上的活动大陆边缘, 为大陆岛弧型岩浆岩。

火山弧型花岗岩的成岩过程较为复杂, 如图 7a 所示, 可以是俯冲板片脱水产生的富水流体交代上覆地幔楔引起, 也可以是俯冲板片部分熔融产生的熔体形成, 或者是富集地幔交代地幔楔产生熔体导致 (Pearce, 1996)。角闪辉长岩和花岗岩中无明显的 Eu 和 Sr 的负异常, 说明岛弧地壳未加厚, 而在活动大陆俯冲板块边缘, 地温梯度很陡, 只有在俯冲板片最顶部的物质会被加热, 在正常地壳厚度范围内这个温度只能导致俯冲的玄武质物质产生脱水作用产生富水流体或者俯冲沉积物发生部分熔融 (Kelemen *et al.*, 2003)。角闪辉长岩富集 Ba、Sr、Pb, 而 Th、La、Ce 富集程度轻微甚至出现弱亏损, 说明其原始岩浆可能是富集地幔发生部分熔融形成, 且其地幔源区受到富水流体 (而不是俯冲沉积物) 的交代 (Pearce, 1996; Kelemen *et al.*, 2003), 在图 7a 中所有角闪辉长岩样品也均处于此范围内。花岗岩中无明显 Sr 异常, 稀土分馏较弱, 说明岩浆形成和结晶演化的深度小于石榴石稳定的压力范围 (Alonso-Perez *et al.*, 2009), 不是来源于岛弧地壳底部, 在图 7a 中, 所有花岗岩样品均投在活动板块边缘位置。在 80 ~ 100km 的深度范围内, 金红石以稳定相存在, 而金红石是 Nb、Ta、Ti 元素的主要赋存矿物, 这导致所产生的岛弧岩浆强烈亏损 Nb、Ta、Ti 等高场强元素; 此外, 角闪辉长岩和花岗岩稀土配分图显示相对于重稀土而言, 中稀土有轻微的亏损, 说明其源区可能有轻微的角闪石残留, 这也会进一步加剧 Nb、Ta、Ti 的亏损 (Kelemen *et al.*, 2003)。所选的用于进行 La-ICP-MS U-Pb 年龄分析的锆石的结构和稀土配分模式均证明这些锆石具有岩浆锆石的特征, 表明所获得的年龄代表岩体的侵位时间。角闪辉长岩年龄 $317.0 \pm 2.2\text{Ma}$ 和花岗岩年龄 $319.1 \pm 2.4\text{Ma}$ 在误差范围内一致, 表明在早晚石炭纪相交时期富集地幔楔发生了部分熔融, 导致了地壳发生局部部分熔融, 形成上述花岗岩岩浆。

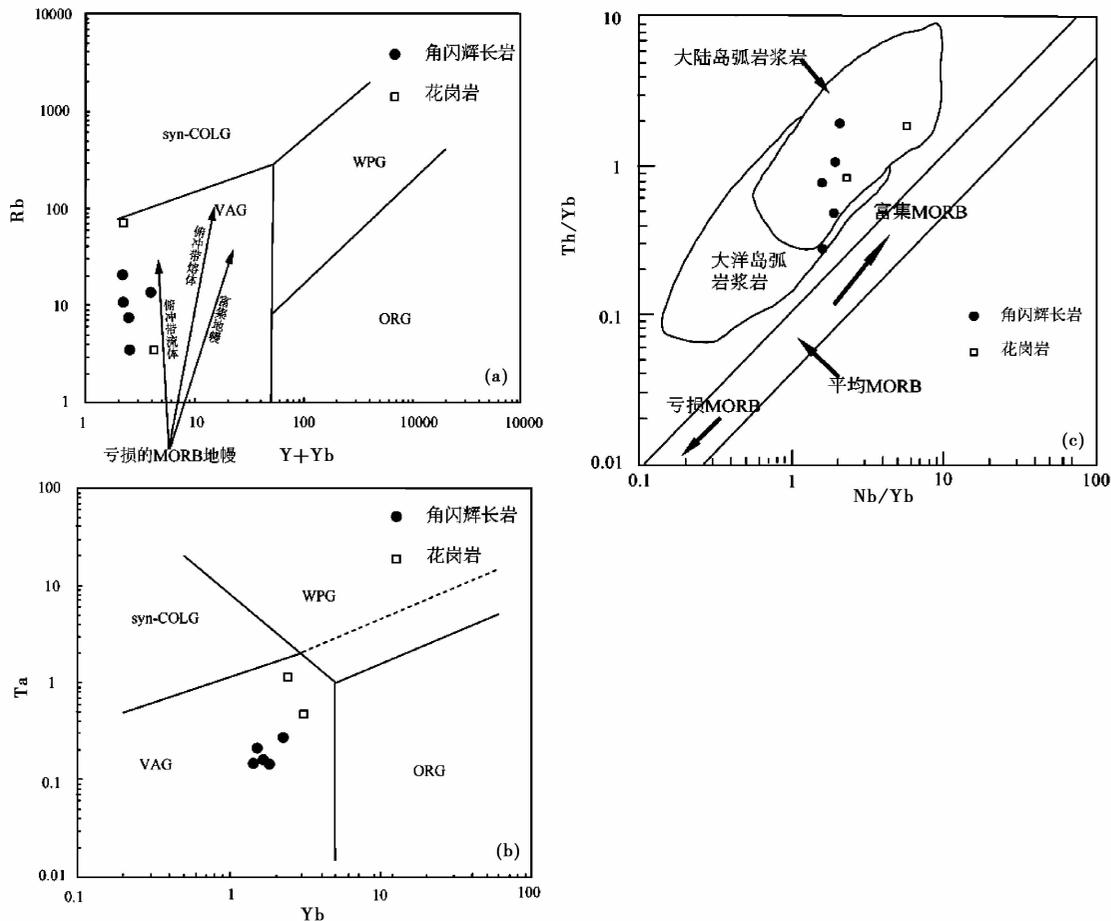


图7 构造判别图解

(a)-角闪辉长岩和花岗岩的 Y + Nb-Rb 图解(据 Pearce, 1996); (b)-角闪辉长岩和花岗岩的 Yb-Ta 图解(据 Pearce *et al.*, 1984); (c)-角闪辉长岩和花岗岩的 Nb/Yb-Th-Yb 图解(据 Pearce *et al.*, 1984). syn-COLD 同碰撞花岗岩; WPG 板内花岗岩; VAG 火山弧花岗岩; ORG 洋脊花岗岩

Fig. 7 Discrimination diagrams of tectonic environments

(a)-Y + Nb-Rb diagram for hornblende gabbros and granite (after Pearce, 1996); (b)-Yb-Ta diagram for hornblende gabbros and granite (after Pearce *et al.*, 1984); (c)-Nb/Yb-Th-Yb diagram for hornblende gabbros and granite (after Pearce *et al.*, 1984). syn-COLD-syn collision granite; WPG-within plate granite; VAG-volcanic arc granite; ORG-ocean ridge granite

5.2 木汗巴斯陶角闪辉长岩、花岗岩地质意义

阿吾拉勒山展布于伊犁地块东南缘,其东端是伊犁地块、中天山弧地体和北天山弧增生体三个单元收窄交汇处的三角地带,主要由岛弧至裂谷特征的沉积岩系和岩浆岩构成,经历了复杂的构造演化进程。晚古生代时期,阿吾拉勒山可能是伊犁-中天山南缘活动陆缘的一部分(Gao *et al.*, 2009),与南天山洋向北的俯冲相关;但也可能是伊犁地块北缘活动陆缘的一部分,与北天山洋向南的俯冲有成因联系(Wang *et al.*, 2006)。侵入于北天山蛇绿混杂岩带巴音沟地区的四棵树“钉合花岗岩体”的锆石 U-Pb 年龄为 316Ma,表明北天山洋在早石炭世末已经闭合(Han *et al.*, 2010),而南天山洋的洋壳俯冲活动在早石炭世末还在进行(Han *et al.*, 2011)。据此,我们推断木汗巴斯陶岩体的形成可能与南天山洋向北的俯冲事件有关。

中天山弧地体广泛发育的 450 ~ 320Ma 三十余个具岛弧花岗岩地球化学特征的侵入体(Long *et al.*, 2011)暗示晚志留世到早石炭世末南天山洋一直向北持续俯冲。阿吾拉勒西段特铁达坂至白石墩一带发育大量产生于大陆岛弧内侧的石炭纪钙碱性基性-中性侵入岩类、早二叠世以碱性为主的中酸性侵入岩及晚二叠世陆内裂谷型辉长岩类(姜常义和吴文奎, 1996);在尼勒克黑山头-莫斯早特一带发育二叠纪(259.5Ma)埃达克质浅成-次火山相花岗岩质体(Zhao *et al.*, 2008; 熊小林等, 2001)。上述岩浆岩体系表明阿吾拉勒山西段石炭纪处于洋壳俯冲形成的大陆岛弧环境,二叠纪逐渐变为造山后的拉伸环境(姜常义和吴文奎, 1995, 1996)。二叠纪末至三叠纪初,由于幔源岩浆的底侵作用导致天山地壳增厚,下地壳玄武质岩石发生部分熔融形成埃达克质熔体,侵入至地壳浅部,形成埃达克质浅成侵入岩(Zhao *et al.*, 2008; 熊小林等, 2001)。本文研究的木汗巴斯陶侵入体记

录了阿吾拉勒山石炭纪岛弧型岩浆活动事件。

伊犁-中天山地块南缘分布有大量具有岛弧岩浆岩特征的火山岩,其年代从晚泥盆世($>361\text{Ma}$,西南天山西部)、早石炭世($355\sim 352\text{Ma}$,西南天山中部)一直延续到晚石炭世($\text{ca. } 313\text{Ma}$,西南天山东部),这表明从晚泥盆世到早石炭世伊犁地块南缘一直为活动大陆边缘环境(Zhu *et al.*, 2009; 朱永峰等, 2005, 2006)。阿吾拉勒山晚古生代时期位于伊犁地块南缘,与中天山弧地体一起构成南天山洋向北俯冲形成的活动大陆边缘(Long *et al.*, 2011)。大地构造位置上,阿吾拉勒山一直处于中天山弧地体的后侧。中天山弧地体上的大量 $480\sim 320\text{Ma}$ 拉斑质-钙碱性I型花岗岩类岩石(Long *et al.*, 2011)、额尔宾山出露的 $296.9\pm 5.4\text{Ma}$ 、 $304.2\pm 11.6\text{Ma}$ 的准铝质、过铝质同碰撞花岗岩(朱志新等, 2008)、切穿西天山高压变质岩带的 285Ma 强过铝质S型花岗岩脉(Gao *et al.*, 2011)、从吉尔吉斯斯坦至我国境内南天山广泛分布的二叠纪($295\sim 273\text{Ma}$)后碰撞花岗岩(Konopelko *et al.*, 2007; Seltmann *et al.*, 2010; Long *et al.*, 2011)等表明伊犁-中天山南缘活动陆缘与俯冲相关的岩浆活动自早奥陶世就已经开始,延续至晚石炭世,在二叠纪叠加与后碰撞相关的岩浆活动(韩宝福等, 2004; 朱志新等, 2006; 徐学义等, 2006; 高俊等, 2006; 杨天南和王小平, 2006; 龙灵利等, 2007)。近年来获得的石榴辉岩相矿物包体的变质锆石边部年龄 $319\pm 2.9\text{Ma}$ 和 $318.7\pm 3.3\text{Ma}$ (Su *et al.*, 2010)、石榴辉岩中金红石U-Pb年龄为 $318\pm 7\text{Ma}$ (Li *et al.*, 2010)、异剥钙榴岩的锆石SHRMP U-Pb年龄为 $291\pm 15\text{Ma}$ (Li *et al.*, 2010)、石榴辉岩的矿物-全岩Lu-Hf等时线年龄 $313\sim 316\text{Ma}$ (Klemd *et al.*, 2011)也证实早石炭世末期南天山洋可能接近俯冲结束,塔里木和伊犁-中天山地块开始碰撞。木汗巴斯陶侵入体可能是南天山洋俯冲结束向陆陆碰撞造山带转换过程中的岩浆活动的记录,其源区保存了受俯冲带流体交代的印迹。

6 结论

(1) 木汗巴斯陶地区侵入岩由角闪辉长岩和花岗岩组成。这两种岩石均富集大离子亲石元素(Rb、Ba、Sr等)、强烈亏损高场强元素(Nb、Ta、Ti)、轻重稀土分异不明显、无显著铕异常的地球化学特征。角闪辉长岩和花岗岩侵位时代分别为 $317.0\pm 2.2\text{Ma}$ 和 $319.1\pm 2.4\text{Ma}$ 。

(2) 木汗巴斯陶侵入岩体为大陆弧型钙碱性岩浆岩,很可能是晚古生代南天山洋向北侧伊犁-中天山地块南缘俯冲事件的产物。

致谢 北京大学地球与空间科学学院朱永峰、郭召杰教授和地质与地球物理研究所韩春明博士提出了详细的修改意见;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;主微量地球化学分析得到本单位李禾、靳新娣工

程师的帮助;在电子探针测试过程中得到毛骞、马玉光工程师的指导;在此一并感谢。

References

- Alonso-Perez R, Müntener O and Ulmer P. 2009. Igneous garnet and amphibole fractionation in the roots of island arcs: Experimental constraints on andesitic liquids. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 157(4): 541–558
- Bai YL, Chen QI, Tang ZI, Fan YX and Jiang RF. 2004. The characteristics of basic-ultrabasic rocks in the back-arc rift system on the northeastern margin of the Tarim plate. *Geology in China*, 31: 254–261 (in Chinese with English abstract)
- Coleman RG. 1989. Continental growth of northwest China. *Tectonics*, 8(3): 621–635
- Gao J, Li MS, Xia XC, Tang YQ and He GQ. 1998. Paleozoic tectonic evolution of the Tianshan Orogen, northwestern China. *Tectonophysics*, 287(1–4): 213–231
- 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, Wang YT and Yang FQ. 2009. 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, Li JL and Su W. 2009. Accretionary orogenic process of western Tianshan, China. *Geological Bulletin of China*, 28(12): 1804–1816 (in Chinese with English abstract)
- Gao J, Klemd R, Qian Q, Zhang X, Li J, Jiang T and Yang Y. 2011. The collision between the Yili and Tarim blocks of the Southwestern Altaids: Geochemical and age constraints of a leucogranite dike crosscutting the HP-LT metamorphic belt in the Chinese Tianshan Orogen. *Tectonophysics*, (499): 118–131
- Han BF, He GQ, Wu TR and Li HM. 2004. Zircon U-Pb dating and geochemical features of Early Paleozoic granites from Tianshan, Xinjiang: Implications for tectonic evolution. *Xinjiang Geology*, 22(1): 4–11 (in Chinese with English abstract)
- Han BF, Guo ZJ, Zhang ZC, Zhang L, Chen JF and Song B. 2010. Age, geochemistry, and tectonic implications of a Late Paleozoic stitching pluton in the North Tian Shan suture zone, western China. *Geological Society of America Bulletin*, 122(3–4): 627–640
- Han BF, He GQ, Wang XC and Guo ZJ. 2011. Late Carboniferous collision between the Tarim and Kazakhstan-Yili terranes in the western segment of the South Tian Shan Orogen, Central Asia, and implications for the North Xinjiang, western China. *Earth-Science Reviews*, (109): 74–93
- Hoskin PWO and Schaltegger U. 2003. The composition of zircon and igneous and metamorphic petrogenesis. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 53(1): 27–62
- Jiang CY, Wu WK, Xie CG and Li WP. 1993. Characteristics of Carboniferous volcanic rocks and the trench-arc basin system in the northern part of West Tianshan Mountains. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 12(3): 2–31 (in Chinese with English abstract)
- Jiang CY and Wu WK. 1995. The change from island arc to rift valley: Evidence from volcanic rocks of Awulale area. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 14(4): 289–300 (in Chinese with English abstract)
- Jiang CY and Wu WK. 1996. Magma action and tectonic evolution in Awulale district, western Tian Shan Mountain. *Journal of Xi'an College of Geology*, 18(2): 18–24 (in Chinese with English abstract)
- Kelemen P, Hanghoj K and Greene A. 2003. One view of the geochemistry of subduction-related magmatic arcs, with an emphasis on primitive andesite and lower crust. *Treatise on Geochemistry*, 3(18): 593–659
- Klemd R, John T, Scherer E, Rondey S and Gao J. 2011. Changes in

- dip of subducted slabs at depth: Petrological and geochronological evidence from HP-UHP rocks (Tianshan, NW-China). *Earth and Planetary Science Letters*, 310(1-2): 9-20
- Konopelko D, Biske G, Seltmann R, Eklund O and Belyatsky B. 2007. Hercynian post-collisional A-type granites of the Kokshaal Range, southern Tien Shan, Kyrgyzstan. *Lithos*, 97(1-2): 140-160
- Kröner A, Windley B, Badarch G, Tomurtogoo O, Hegner E, Jahn B, Gruschka S, Khain E, Demoux A and Wingate M. 2007. Accretionary growth and crust formation in the Central Asian Orogenic Belt and comparison with the Arabian-Nubian shield. *Memoirs-Geological Society of America*, 200: 1-181
- Li JL, Su W, Zhang X and Liu X. 2009. Zircon U-Pb dating and its significance for granulite-facies gneisses from the western Awulale mountain, western Tianshan, China. *Geological Bulletin of China*, 28(12): 1852-1862 (in Chinese with English abstract)
- Li JY, Wang KZ, Sun GH, Mo SG, Li WQ, Yang TM and Gao LM. 2006a. Permian mafic-ultramafic complexes on the southern margin of the Tu-Ha Basin, East Tianshan Mountains; Geological records of vertical crustal growth in Central Asia. *Acta Petrologica Sinica*, 22(5): 1087-1102 (in Chinese with English abstract)
- Li JY, He GQ, Xu X, Li HQ, Sun GH, Yang TN, Gao LM and Zhu ZX. 2006b. Crustal tectonic framework of northern Xinjiang and adjacent regions and its formation. *Journal of Geology*, 80(1): 148-168 (in Chinese with English abstract)
- Li QL, Lin W, Su W, Li XH, Shi YH, Liu Y and Tang GQ. 2010. SIMS U-Pb rutile age of low-temperature eclogites from southwestern Chinese Tianshan, NW China. *Lithos*, (122): 76-86
- Li XP, Zhang LF, Wilde SA, Song B and Liu XM. 2010. Zircons from rodingite in the Western Tianshan serpentinite complex: Mineral chemistry and U-pb ages define nature and timing of rodingitization. *Lithos*, 118(1): 17-34
- 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 CX, Xu BL, Zou TR, Lu FX, Tong Y and Cai JH. 2004. Petrochemistry and tectonic significance of the Hercynian alkaline rocks along the northern margin of the Tarim platform and its adjacent area. *Xinjiang Geology*, 22(1): 43-49 (in Chinese with English abstract)
- Liu YS, Hu ZC, Gao S, Guntherr D, Xu J, Gao CC 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
- Long LL, Gao J, Xiong XM and Qian Q. 2007. Geochemistry and geochronology of granulitoids in Bikai region, southern Central-Tianshan mountains, Xinjiang. *Acta Petrologica Sinica*, 23(4): 719-732 (in Chinese with English abstract)
- Long LL, Gao J, Klemd R, Beier C, Qian Q, Zhang X, Wang JB and Jiang T. 2011. Geochemical and geochronological studies of granulite rocks from the Western Tianshan Orogen; Implications for continental growth in the southwestern Central Asian Orogenic Belt. *Lithos*, (126): 321-340
- Ludwig K. 2003. User's manual for Isoplot V.3.00: A geochronological toolkit for Microsoft Excel. Berkeley Geochronology Center, Special Publication, No. 4: 1-70
- Ma RS, Shu LS and Sun JQ. 1997. Tectonic Evolution and Metallogeny of Eastern Tianshan Mountains. Beijing: Geological Publishing House, 1-202 (in Chinese)
- McCulloch M and Gamble J. 1991. Geochemical and geodynamical constraints on subduction zone magmatism. *Earth and Planetary Science Letters*, 102(3-4): 358-374
- Pearce JA, Harris NBW and Tindle AG. 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *Journal of Petrology*, 25(4): 956-983
- Pearce JA. 1996. Sources and settings of granitic rocks. *Episodes*, 19(4): 120-125
- Qian Q, Gao J, Klemd R, He GQ, Song B, 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 Xiata, NW China. *International Journal of Earth Sciences*, 98(3): 551-569
- Rogers G and Hawkesworth CJ. 1989. A geochemical traverse across the North Chilean Andes: Evidence for crust generation from the mantle wedge. *Earth and Planetary Science Letters*, 91(3-4): 271-285
- Rubatto D. 2002. Zircon trace element geochemistry: Partitioning with garnet and the link between U-Pb ages and metamorphism. *Chemical Geology*, 184(1-2): 123-138
- Sajona FG, Maury RC, Bellon H, Cotton J and Defant M. 1996. High field strength element enrichment of Pliocene-Pleistocene island arc basalts, Zamboanga Peninsula, Western Mindanao (Philippines). *Journal of Petrology*, 37(3): 693-726
- Schulz B, Klemd R and Bratz H. 2006. Host rock compositional controls on zircon trace element signatures in metabasites from the Austroalpine basement. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 70(3): 697-710
- Seltmann R, Konopelko D, Biske G, Divaev F and Sergeev S. 2010. Hercynian post-collisional magmatism in the context of Paleozoic magmatic evolution of the Tien Shan orogenic belt. *Journal of Asian Earth Sciences*, (42): 821-838
- Sengor A and Burtman V. 1993. Evolution of the Altaid tectonic collage and Palaeozoic crustal growth in Eurasia. *Nature*, 364: 299-307
- Song B, Zhang YH, Wan YS and Jian P. 2002. Mount making and procedures of the SHRIMP dating. *Geological Review*, 48(Suppl.): 26-30 (in Chinese with English abstract)
- 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 Altai. *European Journal of Mineralogy*, 22(4): 473-478
- Sun SS and McDonough WF. 1989. Chemical and isotopic systematic of oceanic basalts: Implication for mantle composition and processes. In: Saunders AD and Norry MJ (eds.). *Magmatism in Oceanic Basins*. Spec. Publ. Geol. Soc. Lond., 42: 313-345
- Wang B, Faure M, Cluzel D, Shu L, Charvet J, Meffre S and Ma Q. 2006. Late Paleozoic tectonic evolution of the northern West Chinese Tianshan belt. *Geodynamica Acta*, 19(3-4): 227-237
- Wang B, Shu LS, Cluzel D, Faure M, Charvet J and Ma Q. 2006. Geochemical characteristics and tectonic significance of Carboniferous volcanic rocks in the northern part of the Yili Block, Xinjiang. *Chinese Geology*, 33(3): 498-508 (in Chinese with English abstract)
- Wang ZX, Wu JY and Lü XC. 1990. Polycyclic Tectonic Evolution and Metallogeny of Tianshan Mountains, China. Beijing: Science Press, 1-217 (in Chinese)
- Windley B, Allen M, Zhang C, Zhao ZY and Wang GR. 1990. Paleozoic accretion and Cenozoic reformation of the Chinese Tien Shan Range, Central Asia. *Geology*, 18(2): 128-131
- Wu YB and Zheng YF. 2004. Genesis of zircon and its constraint on interpretation of U-Pb age. *Chinese Science Bulletin*, 49(16): 1589-1604 (in Chinese)
- Xiao WJ, Windley B, Badarch G, Sun S, Li J, Qin K and Wang Z. 2004a. 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
- Xiao WJ, Zhang LC, Qin KZ, Sun S and Li JL. 2004b. Paleozoic accretionary and collisional tectonics of the Eastern Tianshan (China): Implications for the continental growth of central Asia. *American Journal of Science*, 304(4): 370-395
- Xiong XL, Zhao ZH, Bai ZH, Mei HY, Wang YX, Xu JF and Bao ZW. 2001. The adakite-type Na-rich intermediate-acid igneous rocks and crustal growth from Awulale of west Tianshan. *Chinese Science*

- Bulletin, 46(4): 281-287 (in Chinese)
- Xu XY, Ma ZP, Xia ZC, Xia LQ, Li XM and Wang LS. 2006. TIMS U-Pb isotopic dating and geochemical characteristics of Paleozoic granitic rocks from the Middle-Western section of Tianshan. *Northeast Geology*, 39(1): 50-75 (in Chinese with English abstract)
- Yang TN and Wang XP. 2006. Geochronology, petrochemistry and tectonic implications of Early Devonian plutons in Kumux area, Xinjiang. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 25(5): 401-411 (in Chinese with English abstract)
- Yuan HL, Gao S, Liu XM, Li H, 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
- Zhang ZC, Dong SY, Huang H, Ma LT, Zhang DY, Zhang S and Xue CJ. 2009. Geology and geochemistry of the Permian intermediate-acid intrusions in the southwestern Tianshan, Xinjiang, China: Implications for petrogenesis and tectonics. *Geological Bulletin of China*, 28(12): 1827-1839 (in Chinese with English abstract)
- Zhao ZH, Xiong XL, Wang Q, Wyman DA, Bao ZW, Bai ZH and Qiao YL. 2008. Underplating-related adakites in Xinjiang Tianshan, China. *Lithos*, 102(1-2): 374-391
- Zhu YF, Zhang LF, Gu LB, Guo X and Zhou J. 2005. The zircon SHRIMP chronology and trace element geochemistry of the Carboniferous volcanic rocks in western Tianshan Mountains. *Chinese Science Bulletin*, 50(18): 2004-2014 (in Chinese)
- Zhu YF, Zhou J and Guo X. 2006. 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(6): 1085-1099
- Zhu ZX, Wang KZ, Zheng YJ, Sun GH, Zhang C and Li YP. 2006. The zircon SHRIMP dating of Silurian and Devonian granitic intrusions in the southern Yili Block, Xinjiang and preliminary discussion on their tectonic setting. *Acta Petrologica Sinica*, 22(5): 1193-1200 (in Chinese with English abstract)
- Zhu ZX, Li JY, Dong LH, Zhang XF, Hu JW and Wang KZ. 2008. The age determination of Late Carboniferous intrusions in Mangqisu region and its constraints to the closure of oceanic basin in South Tianshan, Xinjiang. *Acta Petrologica Sinica*, 24(12): 2761-2766 (in Chinese with English abstract)
- Zhu ZX, Li JY, Dong LH, Wang KZ and Zhang XF. 2011. Geological characteristics and tectonic significance of Paleozoic intrusive rocks in western Tianshan of Xinjiang Province. *Earth Science Frontiers*, 18(2): 170-179 (in Chinese with English abstract)
- 火山岩的证据. *岩石矿物学杂志*, 14(4): 289-300
- 姜常义, 吴文奎. 1996. 西天山阿吾拉勒地区岩浆活动与构造演化. *西安地质学院学报*, 18(2): 18-24
- 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
- 李锦轶, 王克卓, 孙桂华, 莫申国, 李文铅, 杨天南, 高立明. 2006a. 东天山吐哈盆地南缘古生代活动陆缘残片: 中亚地区古亚洲洋板块俯冲的地质记录. *岩石学报*, 22(5): 1087-1102
- 李锦轶, 何国琦, 徐新, 李华芹, 孙桂华, 杨天南, 高立明, 朱志新. 2006b. 新疆北部及邻区地壳构造格架及其形成过程的初步探讨. *地质学报*, 80(1): 148-168
- 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
- 刘楚雄, 许保良, 邹天人, 路凤香, 童英, 蔡剑辉. 2004. 塔里木北缘及邻区海西期碱性岩岩石化学特征及其大地构造意义. *新疆地质*, 22(1): 43-49
- 龙灵利, 高俊, 熊贤明, 钱青. 2007. 新疆中天山南缘比开(地区)花岗岩地球化学特征及年代学研究. *岩石学报*, 23(4): 719-732
- 马瑞士, 舒良树, 孙家齐. 1997. 东天山构造演化与成矿. 北京: 地质出版社, 1-202
- 宋彪, 张玉海, 万渝生, 简平. 2002. 锆石 SHRIMP 样品靶制作、年龄测定及有关现象讨论. *地质论评*, 48(1): 26-30
- 王博, 舒良树, 马前. 2006. 新疆伊犁北部石炭纪火山岩地球化学特征及其地质意义. *中国地质*, 33(3): 498-508
- 王作勋, 郭继易, 吕喜朝. 1990. 天山多旋回构造演化与成矿. 北京: 地质出版社, 1-127
- 吴元保, 郑永飞. 2004. 锆石成因矿物学研究及其对 U-Pb 年龄解释的制约. *科学通报*, 49(16): 1589-1604
- 熊小林, 赵振华, 白正华, 梅厚钧, 王一先, 王强, 许继峰, 包志伟. 2001. 西天山阿吾拉勒 adakite 型钠质中酸性岩及地壳垂向增生. *科学通报*, 46(4): 281-287
- 徐学义, 马中平, 夏祖春, 夏林圻, 李向民, 王立社. 2006. 天山中西段古生代花岗岩 TIMS 法锆石 U-Pb 同位素定年及岩石地球化学特征研究. *西北地质*, 39(1): 50-75
- 杨天南, 王小平. 2006. 新疆库米什早泥盆世侵入岩时代, 地球化学及大地构造意义. *岩石矿物学杂志*, 25(5): 401-411
- 张招崇, 董书云, 黄河, 马乐天, 张东阳, 张舒, 薛春纪. 2009. 西南天山二叠纪中酸性侵入岩的地质学和地球化学: 岩石成因和构造背景. *地质通报*, 28(12): 1827-1839
- 朱永峰, 张立飞, 古丽冰, 郭璇, 周晶. 2005. 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): 2004-2014
- 朱永峰, 周晶, 郭璇. 2006. 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
- 朱志新, 王克卓, 郑玉洁, 孙桂华, 张超, 李亚萍. 2006. 新疆伊犁地块南缘志留纪和泥盆纪花岗岩侵入体锆石 SHRIMP 定年及其形成时构造背景的初步探讨. *岩石学报*, 22(5): 1193-1200
- 朱志新, 李锦轶, 董连慧, 张晓帆, 胡建卫, 王克卓. 2008. 新疆南天山盲起苏晚石炭世侵入岩的确定及对南天山洋盆闭合时限的限定. *岩石学报*, 24(12): 2761-2766
- 朱志新, 李锦轶, 董连慧, 王克卓, 张晓帆, 徐仕琪. 2011. 新疆西天山古生代侵入岩的地质特征及构造意义. *地学前缘*, 18(2): 170-179

附中文参考文献

- 白云来, 陈启林, 汤中立, 范育新, 江荣伏. 2004. 塔里木板块东北边缘弧后裂谷系统基性, 超基性岩特征. *中国地质*, 31(3): 254-261
- 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. 2009. 西天山的增生造山过程. *地质通报*, 28(12): 1804-1816
- 韩宝福, 何国琦, 吴泰然, 李惠民. 2004. 天山早古生代花岗岩锆石 U-Pb 定年、岩石地球化学特征及其大地构造意义. *新疆地质*, 22(1): 4-11
- 姜常义, 吴文奎, 谢广成, 李伍平. 1993. 西天山北部石炭纪火山岩特征与沟弧盆体系. *岩石矿物学杂志*, 12(3): 2-31
- 姜常义, 吴文奎. 1995. 从岛弧向裂谷的变迁——来自阿吾拉勒地区