新疆准噶尔北东缘乌图布拉克岩体形成时代、地球化学特征及地质意义*

周刚[1,2] 吴淦国[1] 董连慧[1,3] 张招崇[1] 董永观[4] 童英[5] 何立新[2] 应立娟[6]

ZHOU Gang[1,2], WU GanGuo[1], DONG LianHui[1,3], ZHANG ZhaoCong[1], DONG YongGuan[4], TONG Ying[5], HE LiXin[2] and YING LiJuan[6]

1. 中国地质大学地球科学与资源学院,北京 100083
2. 新疆维吾尔自治区地质矿产勘查开发局第四地质大队,阿勒泰 836500
3. 新疆维吾尔自治区地质矿产勘查开发局,乌鲁木齐 830000
4. 南京地质矿产研究所,南京 210016
5. 中国地质科学院地质研究所,北京 100037
6. 中国地质科学院矿产资源研究所,北京 100037

1. *Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Beijing* 100083, *China*
2. *No.*4 *Geological Team of Xinjiang Bureau of Geology and Mineral Resources, Altay* 836500, *China*
3. *Xinjiang Bureau of Geology and Mineral Resources, Urumqi* 830000, *China*
4. *Nanjing Institute of Geology and Mineral Resources, Nanjing* 210016, *China*
5. *Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing* 100037, *China*
6. *Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing* 100037, *China*

2008-09-30 收稿,2008-11-07 改回.

Zhou G, Wu GG, Dong LH, Zhang ZC, Dong YG, Tong Y, He LX and Ying LJ. 2009. Formation time and geochemical feature of Wutubulak pluton in the northeastern margin of Junggar in Xinjiang and its geological significance. ***Acta Petrologica Sinica*****, , 25(6):1390 – 1402**

Abstract The Wutubulak pluton is located in the northeastern margin of Junggar and the southern side of the Ertrix-Mayin'ebo tectonic belt. This pluton is composed of granodiorite and monzogranite, and a few of quartz diorite and moyite. Zircon SHRIMP U-Pb age of this pluton is 360.1 ±3.6Ma. It's $K_2O + Na_2O$ content reaches 7.05% ~9.48%. The A/NKC value (0.91 ~1.04) indicates it belongs to the metaluminous and prealuminous as "I" type granite. REE content is quite low, so that its ∑REE changes only between 72×10^{-6} and 184×10^{-6} with a richenment of light REE as $(La/Yb)_N$ value between 5 and 13. There is a slight negative Eu anomaly or no obvious Eu anomaly of quartz diorite, granodiorite and monzogranite (δEu 0.72 ~0.98), whereas moyite contains an obvious negative Eu anomaly (δEu 0.15 ~0.21). Incompatible elements such as Rb, Th, K are richened, Sr, Ba, P and Ti are poor and the deficiency of Nb and Ta is not obvious. Initial Sr value changes between 0.70165 and 0.70462, and its $\varepsilon_{Nd}(t)$ is positive as +4.7 ~ +6.9. Mode ages of two samples are 758Ma and 551Ma. These suggest the magmatic sources are complex, may from new basaltic crust, and with the additional mixture of young mantle-source material. Based on the previous research work, time limit of post-collision of Altay orogen might be between 360Ma and 290Ma, namely between the end of Devonian and the end of Carboniferous.

Key words Wutubulak pluton; Zircon SHRIMP U-Pb dating; Geochemistry; Time limit of post-collision; The northeastern margin of Junggar

摘 要 乌图布拉克岩体位于准噶尔北东缘,额尔齐斯-玛因鄂博构造带南侧。岩体主要由花岗闪长岩和二长花岗岩组成,有少量石英闪长岩和钾长花岗岩。岩体的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为 360.1 ±3.6Ma。岩石的 $K_2O + Na_2O$ = 7.05% ~9.48%,

* 国家 305 项目(2007BAB25B01)和国家自然科学基金项目(40702010)资助.

第一作者简介:周刚,男,1966 年生,博士,教授级高工,主要从事区域地质和矿产勘查及地质项目管理工作,E-mail: xazhougang@126.com

Acta Petrologica Sinica

A/NKC = 0.91 ~ 1.04,属准铝-过铝质"I"型花岗岩。岩石稀土总量低,∑REE 为 $72 \times 10^{-6} \sim 184 \times 10^{-6}$,轻稀土富集,$(La/Yb)_N = 5 \sim 13$。石英闪长岩、花岗闪长岩、二长花岗岩具弱的铕负异常或无明显异常($\delta Eu = 0.72 \sim 0.98$);钾长花岗岩铕负异常明显($\delta Eu = 0.15 \sim 0.21$)。在微量元素配分模式中,具有 Sr、Ba、P、Ti 的亏损,而 Nb、Ta 亏损不明显。岩石有低的 Sr 初始值(0.70165 ~ 0.70462)和高的 $\varepsilon_{Nd}(t)$(+4.7 ~ +6.9)。2 个样品的 Nd 模式年龄分别为 758Ma 和 551Ma。上述特征表明,岩浆可能具有较复杂的来源,推测该岩体岩浆可能来源于年轻的玄武质地壳,并有幔源物质的加入。综合本文资料及区域地质特征分析,阿尔泰造山带后碰撞时限可能为 360 ~ 290Ma,即泥盆纪末-石炭纪末。

关键词 乌图布拉克岩体;锆石 SHRIMP U-Pb 年龄;地球化学;后碰撞时限;准噶尔北东缘

中图法分类号 P588.121;P597.3

新疆阿勒泰造山带是中亚造山带(CAOB)的重要组成部分。由于其复杂的造山和演化过程,近年来已成为国内外研究的前沿和热点地区之一(Sengör *et al.*, 1993; Han *et al.*, 1997; Jahn *et al.*, 2000, 2004; Windley *et al.*, 2002; Xiao *et al.*, 2004; Chen and Jahn, 2004; Zhu *et al.*, 2006; Wang *et al.*, 2006;韩宝福等,1998,1999,2004,2006;李锦轶和徐新,2004;王涛等,2005;牛贺才等,2006;张招崇等,2006,2007;童英等,2007;周刚等,2007;朱永峰等,2007)。阿勒泰地区花岗岩分布广泛(约占基岩出露面积的 40%),对花岗岩的研究,是了解该区区域构造演化的关键切入点之一。前人对其进行了大量的研究工作,认为该区花岗岩具有多时代、多类型、多成因、多来源、形成于多种构造环境的特征(芮行健和吴玉金,1984;邹天人等,1988;刘伟,1990;岳永君等,1990;赵振华等,1993;王中刚等,1998;袁峰等,2001;王登红等,2002)。近年来,许多学者利用锆石 SHRIMP U-Pb 法和锆石 LA-ICPMS U-Pb 法精确测定了阿尔泰花岗岩类的形成时代(Wang *et al.*, 2006; Yuan *et al.*, 2007;袁峰等,2006;童英等,2006a, b, c, 2007;周刚等,2007;曾乔松等,2007;杨富全等,2008)。统计结果显示,该区岩浆侵入活动存在 4 个峰值:460Ma、400Ma、375Ma 和 280Ma(Wang *et al.*, 2006;曾乔松等,2007),特别是早-中古生代花岗岩类分布广泛,多数形成于 400Ma 左右,为同造山花岗岩(Wang *et al.*, 2006;童英等,2007;杨富全等,2008)。然而,前人的研究主要集中于额尔齐斯构造带以北大量花岗岩基出露地区,而对该构造带以南的准噶尔盆地北缘及周边地区的研究相对较少。近年来研究表明,以额尔齐斯构造带为界,南北两侧花岗岩类无论其规模、产状、形成时代、成因类型及岩浆来源等均有明显不同(邹天人等,1988;刘伟,1990;赵振华等,1993;王中刚等,1998;袁峰等,2006;韩宝福等,2006;范裕等,2007)。韩宝福等(2006)认为:准噶尔地区主要发育后碰撞花岗岩,东准噶尔后碰撞深成岩浆活动发生在 330 ~ 265Ma 之间,而西准噶尔后碰撞深成岩浆活动的时限在 340 ~ 275Ma 之间。虽然目前大多数学者认为阿尔泰造山带后碰撞时限为早石炭世晚期-早二叠世末(王京彬和徐新,2006;韩宝福等,2006),但也存在一些争议(王涛等,2005)。乌图布拉克岩体位于额尔齐斯构造带南侧,是准噶尔北缘具有代表性的岩体之一,因此是了解该区岩浆事件与构造演化的重要岩体。

1 岩体地质特征

乌图布拉克岩体位于准噶尔北东缘,额尔齐斯构造带南西侧(图 1)。岩体呈近椭圆状岩株,出露面积约 $31km^2$。长轴方向为北西-南东向,与区域构造线方向一致。该岩体侵位于中泥盆统蕴都喀拉组(D_2y)地层中,局部围岩具有热接触变质和接触交代变质现象,形成石英阳起石片岩、阳起绿帘石岩等。热接触变质晕宽度一般为 100 ~ 300m。岩体北东侧和南西侧边部的岩石均具有糜棱岩化现象,形成糜棱岩化闪长岩、糜棱岩化花岗闪长岩和糜棱岩化花岗岩,而岩体中心部位的岩石无明显变形。可能为岩体在侵位过程中形成的变形构造,岩体北西和南东端围岩的产状具有因岩体侵位而受到调整的现象,说明该岩体具有强力就位的特征。

该岩体组成的岩石类型较复杂,有闪长岩、花岗闪长岩、二长花岗岩和钾长花岗岩,以花岗闪长岩和二长花岗岩为主体(图 1)。闪长岩由多个侵入体组成,出露面积约 $7.8km^2$,占该岩体面积的 25%。主要分布于岩体边部,部分呈单个侵入体侵入于地层中,呈不规则状岩株。与花岗闪长岩、二长花岗岩以及花岗岩的接触界线明显,为呈脉动接触。花岗闪长岩呈单个侵入体产出,出露面积约 $5.7km^2$,占该岩体面积的 18%。呈长条状分布于该岩体北东部,与二长花岗岩接触界线不清楚,呈渐变过渡关系,为涌动接触。二长花岗岩由多个侵入体组成,出露面积约 $15.4km^2$,占该岩体面积的 50%。其最大的侵入体呈"炸鸡腿"状分布于乌图布拉克岩体的中部,为该岩体的主体侵入体,与闪长岩呈脉动接触,与花岗闪长岩和钾长花岗岩呈涌动接触关系。钾长花岗岩为单个侵入体,出露面积约 $2.2km^2$,占该岩体面积的 7%,呈不规则脉状出露于岩体南西侧,与闪长岩呈脉动接触,与二长花岗岩呈涌动接触关系。

在闪长岩中常见有暗色包体,包体呈不规则状,大小一般为 1cm 左右。花岗闪长岩、二长花岗岩及钾长花岗岩中常见近圆形的闪长岩捕虏体,特别是在与闪长岩接触带附近,闪长岩捕虏体含量较高,捕虏体直径一般小于 20cm。说明花岗闪长岩、二长花岗岩和花岗岩的形成晚于闪长岩。钾长花岗岩呈脉状分布于岩体边部,在花岗闪长岩和二长花岗岩中也偶见规模较小的钾长花岗岩脉,说明钾长花岗岩的形成略晚于闪长岩和二长花岗岩。而花岗闪长岩与二长花岗岩

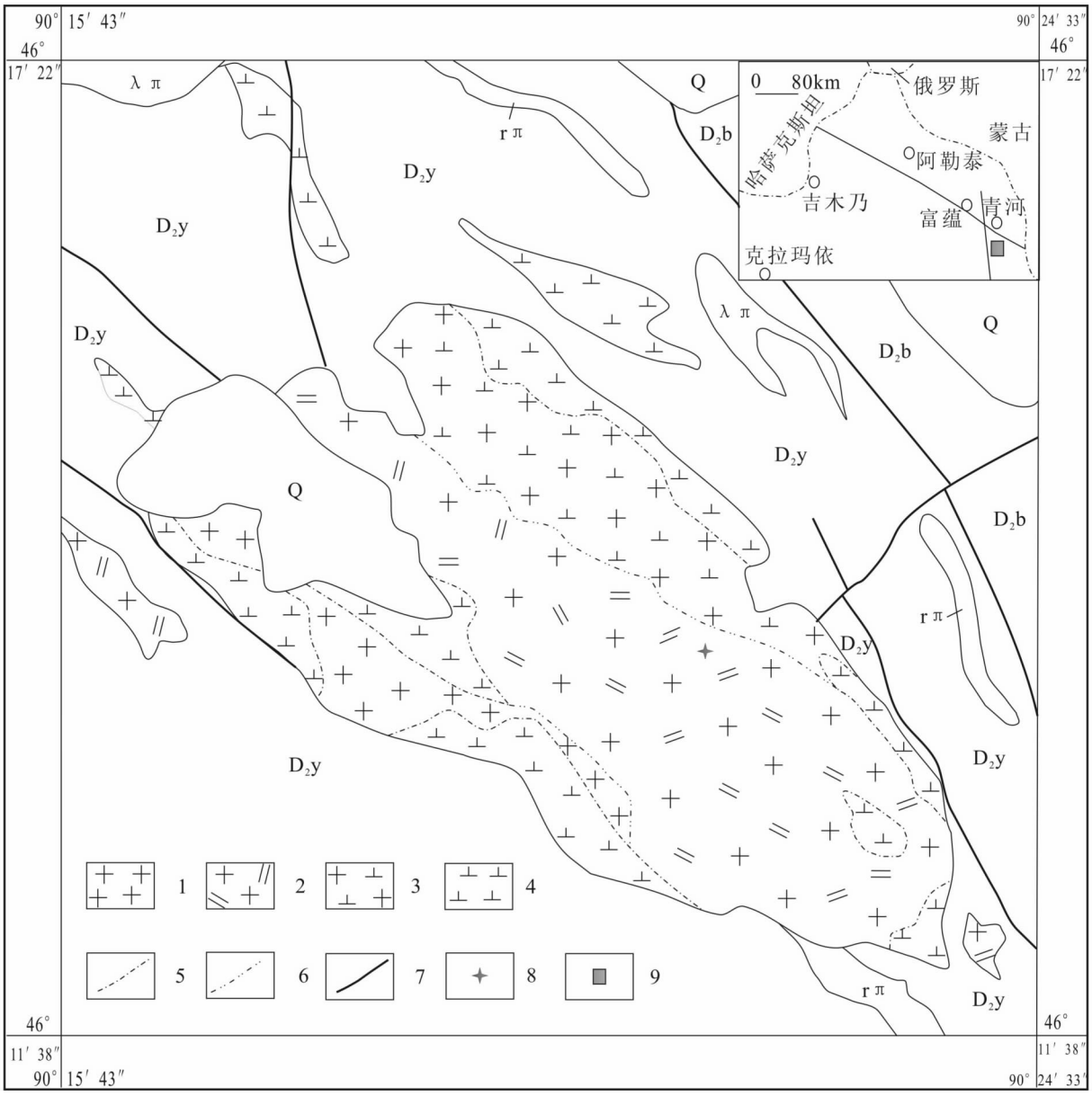


图 1 乌图布拉克岩体平面地质简图

Q-第四系;D_2y-中泥盆统蕴都喀拉组火山-沉积岩;D_2b-中泥盆统北塔山组火山岩;rπ-花岗斑岩;λπ-流纹斑岩;1-钾长花岗岩;2-二长花岗岩;3-花岗闪长岩;4-(石英)闪长岩;5-脉动接触界线;6-涌动接触界线;7-断层;8-同位素年龄样的采样位置;9-研究区位置

Fig. 1 Simplified geological map of Wutubulak pluton

Q-Quaternary Systerm; D_2y-Yundukala Formation of middle Devonian Series volcanic-sedimentary rocks; D_2b-Beitashan Formation of middle Devonian Series volcanic rocks; rπ-granite-porphyry; λπ-rhyolite-porphyry; 1-moyite; 2-monzogranite; 3-granodiorite; 4-(quartz) diorite; 5-clear intrusive contact line; 6-gradual change intrusive contact line; 7-fault; 8-collection location of istopic sample; 9-location of research area

只是成分上的渐变过渡,二者接触关系不清,无法分辨其侵入的先后顺序,应为近同时侵位的侵入体。

2 岩石学特征

组成该岩体的岩石除闪长岩为细粒结构外,花岗闪长岩、二长花岗岩、钾长花岗岩均为中细粒结构。岩石中暗色矿物主要为角闪石和黑云母;斜长石往往见有环带结构,为中长石以及中更长石;长石往往具有较弱的粘土化、绿帘石化以及绢云母化蚀变;晚期形成的钾长花岗岩中见有微斜长石交代斜长石的现象。

闪长岩:呈灰色-灰黑色,半自形粒状结构,块状构造。岩石主要由斜长石(70%)、普通角闪石(25%)、少量石英(3%)及副矿物(2%)等组成。斜长石呈半自形板状,多有

碎粒化,粒径 < 2mm,个别较大,约 1 × 3mm;斜长石蚀变较强,具黑云母化、绿帘石化,受力定向分布;普通角闪石呈半自形柱状,大小 0.5 ~ 1.2mm,部分具碎粒化、圆化,普遍沿长轴定向排列,具波状消光;石英多已碎粒化,但仍占据原来位置,呈集合体分布,外形 0.2 ~ 1mm,分布于斜长石间,具波状消光;副矿物以磁铁矿为主,呈粒状,大小 0.02 ~ 0.5mm,零散分布,局部褐铁矿化。另见有微量的磷灰石,呈自形柱状,大小 0.02 ~ 0.3mm,包于其它矿物中。

花岗闪长岩:呈灰-浅灰黑色,他形-半自形粒状结构,块状构造。岩石由石英(25%)、斜长石(45%)、钾长石(15%)及暗色矿物(15%)组成。石英呈他形粒状,大小 0.5 ~ 2.8mm,局部碎粒化,具强烈波状消光;斜长石呈自形—半自形板状,大小 0.5 × 0.2 ~ 3.0 × 1.2mm,具聚片双晶,环带结构,局部硅化,钾长石化;钾长石呈半自形—不规则板状、粒状,大小0.3 ~ 2.4mm,具条纹结构,为条纹长石;暗色矿物主要为角闪石,次为黑云母。角闪石呈半自形柱状,大小 0.2 ~ 1.8mm;黑云母呈褐色半自形片状,片度为 0.2 ~ 1.8mm,常与角闪石一起分布。岩石中另见榍石、磁铁矿、锆石及磷灰石等副矿物,含量甚微。

二长花岗岩:呈灰-浅肉红色,中细粒他形-半自形粒状结构,块状构造。岩石由石英(30%)、钾长石(32%)、斜长石(35%)、黑云母(3%)等矿物组成。石英呈他形粒状,大小 0.8 ~ 3.2mm,具强烈波状消光,不均匀分布,个别内含长石、云母小晶体;钾长石呈半自形-不规则板粒状,大小 1.0 ~ 4.5mm,具条纹结构,格子状双晶,为条纹长石、微斜长石。具轻度泥化,局部蚀变强烈,个别内含斜长石、云母、石英小晶体,较均匀分布;斜长石呈自形-半自形板状,大小 0.5 × 0.3 ~ 4.0 × 2.1mm,具聚片双晶,环带构造,环带中心部分蚀变强烈,边缘较洁净,轻度泥化、绢云母化、隐晶帘石化,局部硅化,大小均匀分布;黑云母呈半自形片状,片径 0.2 ~ 1.2mm,褐-浅黄褐色,局部绿泥石化、绿帘石化,稀疏分布;岩石中另见有磁铁矿(粒状,0.03 ~ 0.5mm)、磷灰石(柱粒状,0.03 ~ 0.1mm)、锆石(柱粒状,0.03 ~ 0.1mm)等副矿物,含量甚少。

钾长花岗岩:呈肉红色,半自形粒状结构,块状构造。岩石主要由钾长石(45%)、斜长石(18%)、石英(35%)组成,见有少部分黑云母(1 ~ 2%)及副矿物等。钾长石成分为微斜条纹长石和微斜长石,呈他形板状、粒状,粒径大多为 1.0 ~ 3.0mm。微斜条纹长石中的钠长石往往呈不规则状、碎云片状。钾长石具高岭土化蚀变,可见其交代斜长石的现象;斜长石呈半自形板状,粒径大多为 0.5 ~ 2.0mm,具粘土化及微弱的绢云母化蚀变,可见其被钾长石交代呈交代残余结构;石英呈他形粒状,大小不一,大多为 0.5 ~ 3.0mm,呈波状消光,分布于长石颗粒之间;岩石中见有少量暗色矿物,为黑云母,大多已蚀变为绿泥石。岩石中见有磁铁矿、磷灰石、绿帘石、锆石等副矿物。

3 锆石 U-Pb 年龄

3.1 测试方法

在乌图布拉克岩体的主要岩石类型——二长花岗岩中采样,样品编号 06Q-1,采样位置为东经 90°21′19″,北纬 46°13′51″。样品重约 10kg,破碎后经人工淘洗分离出重砂,经重液分离和磁选后,在双目镜下挑选出代表性的锆石。将挑选出的锆石与数粒 RSES TEM 置于环氧树脂中,用于阴极发光、背散射电子相研究及 SHRIMP U-Pb 分析。阴极发光和背散射电子相研究由中国地质科学院矿产资源研究所电子探针实验室完成,锆石 U-Pb 同位素分析在北京离子探针中心的 SHRIMP 上进行。应用 RSES 参考锆石 TEM(417Ma)进行元素分馏校正,应用 SL13(年龄 572Ma; U 含量 238 × 10^{-6})标定所测锆石的 U、Th、Pb 含量,应用 PRAWN 方法进行数据处理,普通铅根据实测 ^{204}Pb 进行校正。详细分析流程和原理见宋彪等(2002)。

3.2 测试结果

分析结果见表 1。表 1 中所列单个数据点的误差均为 1σ,采用年龄为 $^{206}Pb/^{238}U$ 年龄,其加权平均值为 95% 的置信度。

从表 1 可以看出,该岩体锆石的 U、Th 含量较高,分别为 256 × 10^{-6} ~ 707 × 10^{-6} 和 105 × 10^{-6} ~ 503 × 10^{-6},Th/U 比值较低,且变化较小,为 0.40 ~ 0.80,显示出岩浆锆石的特点(Belousova,2002),这与其形态特点一致。大多数锆石呈自形短柱状及粒状晶体,长 60 ~ 160μm,长短轴之比为 1 ~ 2∶1。在阴极发光照片中,大多数锆石具典型的环带状结构,个别锆石的核部还可见熔蚀现象。13 个分析点在误差范围内有一致的 $^{206}Pb/^{238}U$ 年龄,且均落在 U-Pb 一致曲线之上构成单一的正态分布形式(图 2),采用 $^{206}Pb/^{238}U$ 年龄的加权平均获得年龄值为 360.1 ± 3.6Ma,MSWD = 0.69(图 2),这一年龄代表了岩体的结晶年龄。

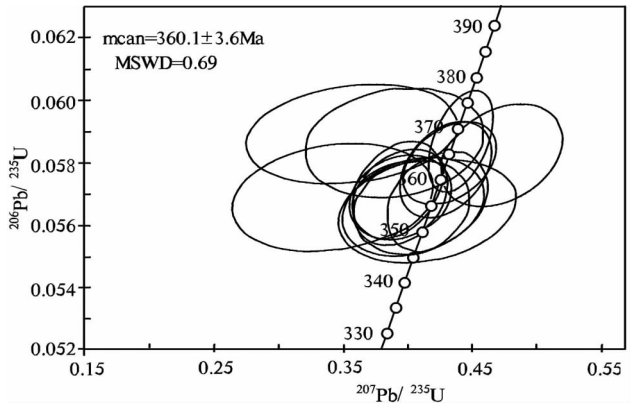


图 2 乌图布拉克岩体锆石 U-Pb 年龄谐和图

Fig. 2 Zircon U-Pb Concordia diagrams of the Wutubulak pluton

表 1 乌图布拉克岩体锆石 U-Pb SHRIMP 年龄分析结果表

Table 1 Zircon U-Pb SHRIMP dating results of Wutubulak pluton

点号	U ($\times10^{-6}$)	Th ($\times10^{-6}$)	Th/U	f_{206} # (%)	$^{206}Pb^*/^{238}U$		$^{207}Pb^*/^{235}U$		$^{207}Pb^*/^{206}Pb^*$		$^{206}Pb/^{238}U$ Age(Ma)		$^{207}Pb/^{206}Pb$ Age(Ma)	
1.1	363.5	163.86	0.466	0.8543	0.0571	1.8	0.393	5.8	0.0499	5.6	358.1	±6.2	189	±130
2.1	647.0	369.32	0.59	0.6609	0.0589	1.8	0.357	15	0.044	15	368.9	±6.3	−111	±370
3.1	255.7	104.66	0.423	0.6307	0.0582	1.9	0.473	6.6	0.059	6.3	364.4	±6.7	567	±140
4.1	528.3	291.74	0.571	1.0589	0.0569	1.8	0.395	6.1	0.0503	5.9	356.7	±6.2	209	±140
5.1	560.2	238.78	0.44	1.0583	0.0566	1.8	0.409	8.2	0.0524	8	355	±6.2	301	±180
6.1	657.0	497.00	0.782	1.1611	0.0565	1.8	0.398	8.5	0.0511	8.3	354.4	±6.2	246	±190
7.1	616.8	315.65	0.529	0.6356	0.0567	1.8	0.423	6.1	0.0541	5.8	355.8	±6.4	375	±130
8.1	502.7	388.00	0.797	0.9589	0.0578	1.8	0.431	5.1	0.0541	4.8	362	±6.4	377	±110
9.1	418.6	228.16	0.563	0.7272	0.0565	1.9	0.418	11	0.0537	10	354.1	±6.5	358	±240
10.1	608.1	463.56	0.788	1.3107	0.0586	2	0.39	12	0.0483	12	367.2	±7.1	112	±270
11.1	362.5	139.37	0.397	1.9985	0.0569	2	0.344	15	0.0438	15	356.7	±6.8	−120	±360
12.1	707.1	502.58	0.734	0.8793	0.0577	1.8	0.428	4.9	0.0537	4.6	361.8	±6.2	360	±100
13.1	543.6	289.75	0.551	0.5348	0.0586	1.8	0.442	3.8	0.0546	3.4	367.4	±6.4	397	± 76

4 地球化学特征

岩石全分析样品由宜昌地质矿产研究所中南实验检测中心分析测试,使用的方法为:主元素分析为湿化学法;稀土元素及 Nb、Zr、Hf、Sr、Ba、V 等元素采用 ICP-AES 法测定,Cr、Ni、Co 等元素采用原子吸收光谱法,Th 采用光度法,U 采用激光萤光法,Ga 采用粉末发射法。内检样品比例大于 20%。内检分析原始合格率为 98%。符合相关质量管理规范要求。全部样品分析完成后,由质量管理小组抽查 20% 件样品,送中南冶金地质研究所分析测试室作 Al_2O_3、$Fe_2O_3^T$、TiO_2 等三个项目的外检分析。按照《地质矿产实验室测试质量管理规范》(DZ0130-94)要求,质量分数 F < 1 为合格。抽查合格率为 97%,表明本项目的测试工作质量良好。

Nd、Sr 同位素组成在中国科学院地质与地球物理研究所同位素实验室用 VG354 固体源热电离质谱计分析测定,NBS987 标样,$^{87}Sr/^{86}Sr = 0.710265 \pm 12$,La Jolla $^{143}Nd/^{144}Nd = 0.511862 \pm 10$,全流程空白值:Sr < 0.5ng, Nd < 50pg。所有样品的 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 和 $^{143}Nd/^{144}Nd$ 同位素比值统一采用 $^{86}Sr/^{88}Sr = 0.1194$ 和 $^{146}Nd/^{144}Nd = 0.7219$ 进行标准化处理,详细分析流程见 Qiao(1998)。

4.1 主量元素特征

该岩体主量、微量元素含量见表 2。岩体 SiO_2 含量变化较大(62.06% ~74.82%)。花岗闪长岩、二长花岗岩和钾长花岗岩的 SiO_2 含量较高(68.01% ~74.82%),并呈连续渐变关系;石英闪长岩含量偏低(62.06%),且与其它三种岩石有着 6% 的间隔。岩石中 K_2O、Na_2O 含量较高,$K_2O + Na_2O$ 为 7.05% ~9.48%。Na_2O 含量较为稳定(3.82% ~4.38%),不随 SiO_2 含量的变化而变化,K_2O 含量变化较大(2.99% ~5.14%),与 SiO_2 含量呈正相关关系。大多数样品的 K_2O/Na_2O 比值小于 1,三件样品(一个二长花岗岩 YQ-26 和二个钾长花岗岩 YQ-25、YQ-63)的比值大于 1,随 SiO_2 含量增加,K_2O/Na_2O 比值增加,反映岩体随分异程度(SiO_2 含量)的增加,逐渐由富 Na 演化为富 K。

从 Harker 图解(图 3)可见,该岩体的 SiO_2 含量分别与

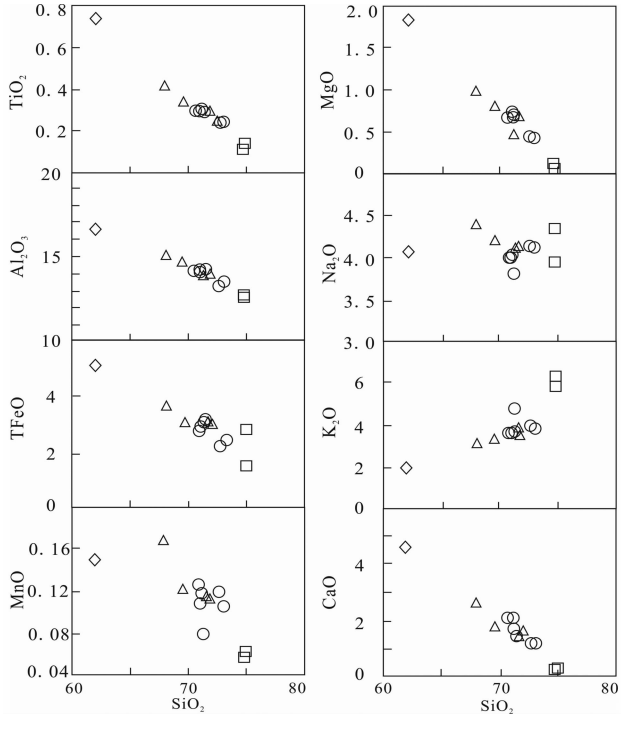


图 3 乌图布拉克岩体哈克图解

图中氧化物含量为去掉灼失量重新换算后的百分比含量。图中菱形为闪长岩;三角形为花岗闪长岩;圆形为二长花岗岩;方形为钾长花岗岩

Fig. 3 Harker diagram of Wutubulak pluton

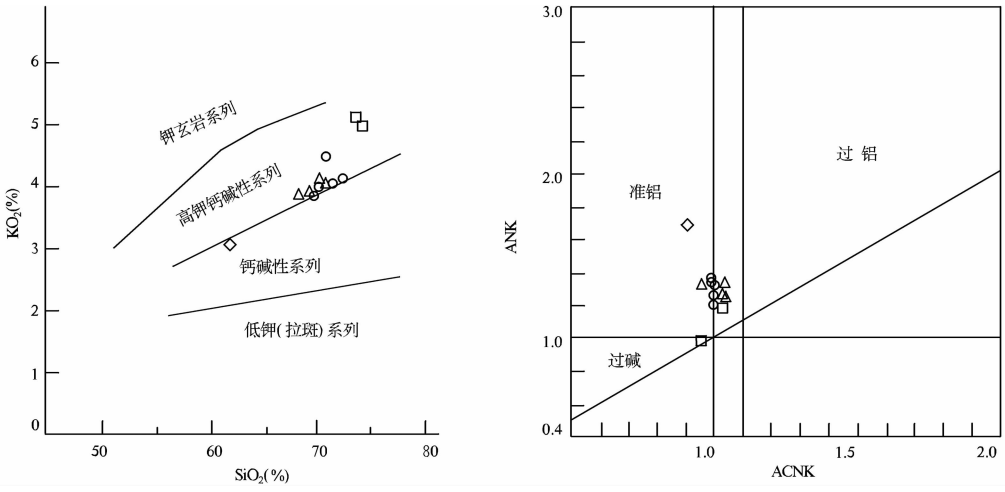


图 4 乌图布拉克岩体 K_2O-SiO_2 及 ANK-ACNK 关系图解

Fig. 4 K_2O-SiO_2 and ANK-ACNK diagrams of the Wutubulak pluton

TiO_2、$Fe_2O_3^T$、Al_2O_3、MgO、CaO 存在较好的负相关性,且随 SiO_2 含量增加呈线性减少,表明在岩浆的演化过程中可能存在岩浆的混合作用。

该岩体岩石化学属高钾钙碱性系列,仅 1 个闪长岩样品落在高钾钙碱性系列与钙碱性系列的分界线附近(图 4)。不同岩性铝饱和指数基本一致,A/NKC 值大多在 1 左右,为 0.91 ~ 1.04,小于 1.1,在 ACNK-ANK 图解中,除 1 个花岗岩样品落入过碱性区外,其它样品均落入准铝质花岗岩区和准铝质与过铝质花岗岩的过渡区域。且 CIPW 标准矿物中不含刚玉或含量小于 1%。

4.2 稀土元素特征

由表 2 可以看出,该岩体各种岩石稀土元素含量总体较低,∑REE 为 71.75×10^{-6} ~ 183.53×10^{-6}。其中,石英闪长岩、花岗闪长岩及二长花岗岩绝大多数样品稀土总量均小于 100×10^{-6},而钾长花岗岩样品中稀土总量相对略高,∑REE 为 148.82×10^{-6} ~ 183.53×10^{-6}。所有岩石均为轻稀土富集,$(La/Yb)_N$ 值均为 5.10 ~ 13.36。石英闪长岩无明显铕异常,δEu 为 0.98;花岗闪长岩、二长花岗岩具微弱的铕负异常,δEu 大多为 0.72 ~ 0.83,仅有个别样品为 0.93;钾长花岗岩具有明显的负铕异常,δEu 值为 0.15 ~ 0.21。说明岩浆演化的早期斜长石分离结晶作用不明显,而晚期具有较强的斜长石的分离结晶。

从稀土元素配分型式图(图 5)上可以看出,除钾长花岗岩(图 5D)具有明显的负铕异常,曲线形态近似于"海鸥型"外,其它岩性曲线特征基本相同。石英闪长岩为较平缓的右倾型(图 5A),无明显铕异常,轻稀土曲线倾斜程度高于重稀土;花岗闪长岩和二长花岗岩的稀土配分曲线特征极为相似,均为明显的右倾型,具有微弱的铕负异常,轻稀土倾斜度较大,而重稀土较平缓(图 5B,C),说明轻稀土元素分馏程度明显高于重稀土元素;钾长花岗岩为右倾型,轻稀土曲线较倾斜,而重稀土曲线较平缓,具有很明显的负铕异常。

4.3 微量元素特征

乌图布拉克岩体微量元素含量见表 2。由表 2 可知,该岩体岩石中 Rb、Ta、Zr、Sr 等微量元素总体偏低,Cr、Ni、V、Sr、Ba、Th、Y 等元素在不同岩性以及相同岩性中相对其它元素均有较大的变化。钾长花岗岩和闪长岩与花岗闪长岩和二长花岗岩相比,具有相对较低的 Rb/Sr 比值和较高的 Sr/Ba 比值,Zr/Hf 比值在各种岩性中基本一致,Th/U 比值在花岗闪长岩和二长花岗岩中相对有较大的变化。钾长花岗岩中 K/Rb 比值明显大于其它岩石类型,说明岩浆演化晚期,K 的增加程度大于 Rb 的增加程度。

由微量元素比值蛛网图(图 6)可以看出,该岩体不相容元素富集,特别是强不相容元素 Rb、Th、K 等富集程度较高。具有 Sr、Ba、P、Ti 的亏损,并随岩体的分异程度增高而增高(图 6)。大多数样品的 Nb、Ta 有弱亏损(Nb/La = 0.74 ~ 1.03),完全不同于有着明显 Nb、Ta 亏损的岛弧环境花岗岩。但有三个样品例外(YQ-24、YQ-62、YQ-63),Nb、Ta 有着明显亏损(Nb/La = 0.24 ~ 0.51),Rb/Sr 比值也是所有样品中最低的,同时,在 CIPW 标准矿物计算中,是少数没有出现刚玉矿物(C)的样品。

4.4 同位素特征

该岩体 Sr、Nd 同位素分析成果见表 2。两个样品的 Sr 初始值分别为 0.70298 和 0.70393。根据周刚等(2006)发表的 Sr 同位素资料,以 360Ma 为岩体形成时代重新计算该岩体的 Sr 初始值为 0.70165 ~ 0.70462。该

岩体的 $\varepsilon_{Nd}(t)$ 大于 0,为 4.7~6.9。在 I_{Sr}-$\varepsilon_{Nd}(t)$ 图解中,都位于第 2 象限,落于亏损地幔演化趋势线上,与阿尔泰造山带部分晚古生代花岗岩特征相似(图 7)。在侵入年龄与 $\varepsilon_{Nd}(t)$ 关系图解中,该岩体样品 $\varepsilon_{Nd}(t)$ 明显高于阿尔泰造山带早古生代花岗岩,与晚古生代花岗岩相似,接近于北疆地区洋壳地壳。对于模式年龄,2 个样品单阶段模式年龄分别为 758Ma 和 551Ma。

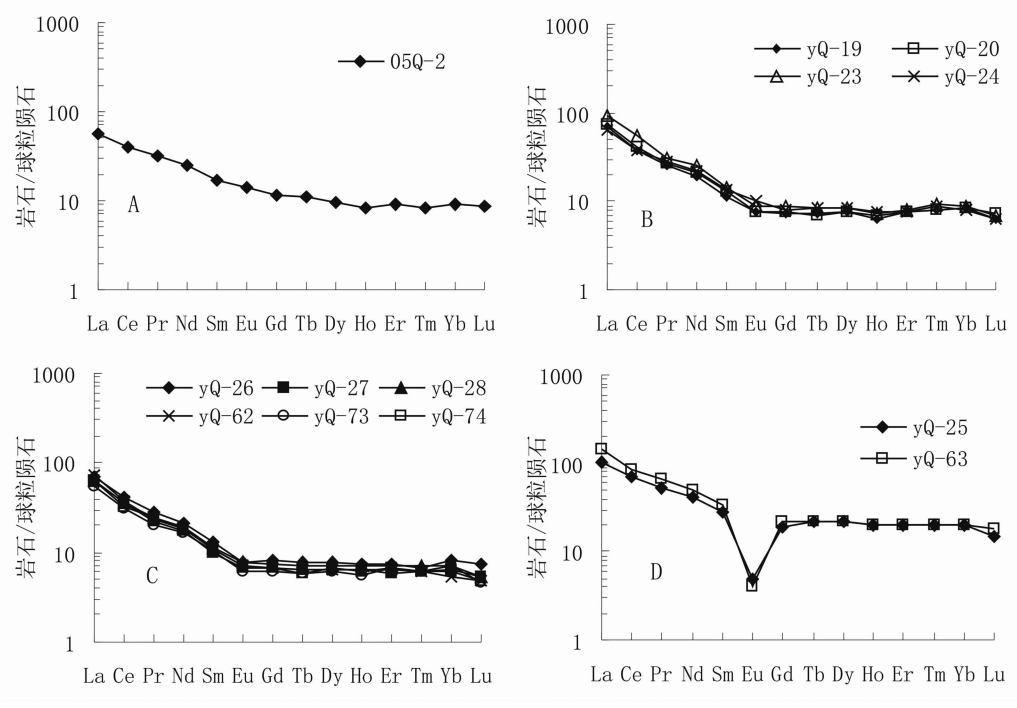


图 5 乌图布拉克岩体球粒陨石标准化稀土元素配分型式图(据 Sun and McDonough, 1989)

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

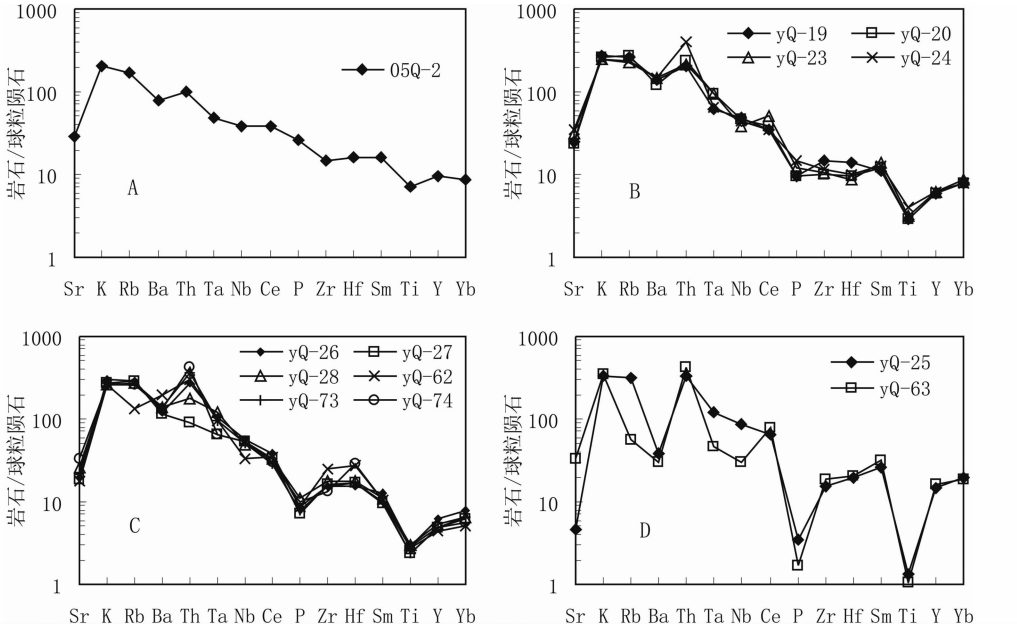


图 6 乌图布拉克岩体微量元素比值蛛网图(球粒陨石据 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 6 Trace elements spider diagram of Wutubulak pluton (after Sun and McDonough, 1989)

表 2 乌图布拉克岩体主量元素(wt%)、微量元素($\times10^{-6}$)和 Sr、Nd 同位素含量表

Table 2 Major elements (wt%) and trace elements ($\times10^{-6}$) contents and Sr, Nd isotopic analyses of Wutubulak pluton

样品号	05Q-2	yQ-19	yQ-20	yQ-23	yQ-24	yQ-26	yQ-27	yQ-28	yQ-62	yQ-73	yQ-74	yQ-25	yQ-63
岩石名称	石英闪长岩		花岗闪长岩				二长花岗岩						钾长花岗岩
SiO_2	62.06	71.49	71.65	69.57	68.01	71.28	73.03	71.15	70.96	72.57	70.8	74.82	74.76
TiO_2	0.74	0.29	0.29	0.33	0.41	0.30	0.24	0.31	0.29	0.24	0.30	0.14	0.11
Al_2O_3	16.6	13.96	14.02	14.74	15.04	13.92	13.56	14.12	14.06	13.34	14.19	12.8	12.68
FeO^T	5.06	3.11	3.07	3.07	3.65	3.22	2.49	3.1	2.94	2.28	2.8	2.85	1.6
MnO	0.11	0.074	0.072	0.081	0.126	0.039	0.065	0.078	0.069	0.079	0.086	0.023	0.018
MgO	1.83	0.687	0.688	0.79	0.979	0.465	0.428	0.747	0.677	0.453	0.68	0.126	0.067
CaO	4.6	1.35	1.62	1.84	2.6	1.64	1.24	1.73	2.08	1.21	2.11	0.334	0.327
Na_2O	4.06	4.11	4.12	4.18	4.38	3.82	4.12	4.03	4	4.14	4	3.95	4.34
K_2O	2.99	3.91	3.78	3.63	3.55	4.38	3.92	3.83	3.8	3.97	3.8	4.91	5.14
P_2O_5	0.27	0.099	0.101	0.128	0.157	0.093	0.075	0.118	0.09	0.081	0.106	0.036	0.018
灼失	0.81	1.01	0.978	1.26	0.876	0.914	0.973	0.977	0.42	0.66	0.51	0.319	0.28
总量	99.13	100.1	100.4	99.62	99.78	100.1	100.2	100.2	99.39	99.03	99.38	100.31	99.34
A/NKC	0.91	1.04	1.02	1.03	0.95	1	1.02	1.01	0.97	1	0.97	1.03	0.95
C		0.73	0.42	0.87		0.11	0.44	0.46		0.2		0.47	
Cr	65.6	5.42	5.41	4.48	4.13	4.95	3.55	4.4	7.81	3.93	3.44	3.93	93.2
Ni	7.92	14.9	13.2	4.4	19.9	19.2	12.7	11.2	13.6	2	3.05	19	40.4
Co	11.7	7.1	7.4	6.9	9.3	3.55	2.9	5.1	8	4.7	3.45	5.7	28.7
Rb	59.1	92.3	95.4	78.6	84	99.3	101	95.3	45.7	90.2	89.8	110	19.8
Sr	337	295	285	382	402	228	225	312	209	265	392	55.8	394
Ba	555	966	850	1010	1030	830	798	981	1330	967	916	260	205
V	156	32.7	33.6	40.8	54.7	25.4	16.9	35.9	48.9	16.4	36.6	5.53	248
Nb	13.3	16.7	16.4	13.1	15.6	19.5	19	17.1	11.5	17.8	18.9	29.6	10.8
Ta	0.97	1.23	1.93	1.93	1.3	2.12	1.31	2.37	1.94	1.94	1.28	2.48	0.95
Zr	101	102	68.6	71.3	77.3	105	113	121	169	107	89.2	105	129
Hf	3.23	2.82	1.91	1.74	2.01	3.03	3.33	3.62	5.38	3.4	5.8	3.88	4.06
Ga	17.4	15.5	15.8	15.9	16.8	15	14.5	15.6	19.5	14.4	16.6	20.9	30.9
U	0.61	1.37	1.66	1.26	1.48	1.32	0.8	1.26	0.8	1.14	1.14	1.03	0.8
Th	4.2	8.47	9.91	8.88	16.9	11.6	3.78	7.47	12.9	15.5	17.9	13.8	17.5
Y	18.8	11.6	11.6	12.4	12.3	12.6	9.82	10.7	8.97	9.72	9.68	29.4	32.2
La	17.5	21.8	22.3	28.4	19.8	21.8	19.7	19.7	22.4	17.3	19.6	32.1	45.4
Ce	32.9	29.6	32.6	44.5	29.7	32.8	29.1	28.7	30.2	24.6	26.1	55.8	68.8
Pr	3.88	3.15	3.26	3.7	3.44	3.4	2.72	2.91	2.82	2.51	2.9	6.32	7.97
Nd	15.1	11.7	12.6	15.3	13.1	12.8	10.3	11.5	10.9	9.93	10.8	24.9	29.7
Sm	3.24	2.22	2.47	2.79	2.59	2.6	1.9	2.22	2.1	1.99	2.08	5.42	6.49
Eu	1.02	0.57	0.55	0.64	0.73	0.57	0.49	0.56	0.51	0.46	0.52	0.36	0.3
Gd	3.05	1.88	1.98	2.28	2.1	2.11	1.76	1.95	1.76	1.59	1.73	4.83	5.68
Tb	0.51	0.34	0.33	0.4	0.4	0.36	0.3	0.34	0.3	0.28	0.28	1.04	1.06
Dy	3.06	2.4	2.46	2.67	2.71	2.5	2.02	2.3	2.06	2	2.12	6.97	7.09
Ho	0.6	0.46	0.5	0.53	0.54	0.52	0.47	0.5	0.46	0.39	0.44	1.41	1.41
Er	1.89	1.58	1.56	1.7	1.59	1.55	1.25	1.46	1.32	1.39	1.38	4.28	4.22
Tm	0.27	0.26	0.26	0.3	0.28	0.22	0.2	0.23	0.2	0.2	0.2	0.65	0.66
Yb	1.86	1.72	1.75	1.86	1.7	1.69	1.36	1.46	1.13	1.46	1.26	4.24	4.14
Lu	0.29	0.21	0.24	0.23	0.21	0.24	0.18	0.18	0.16	0.15	0.16	0.5	0.61
∑REE	85.17	77.89	82.86	105.3	78.89	83.16	71.75	74.01	76.32	64.25	69.57	148.8	183.5
δEu	0.98	0.83	0.74	0.75	0.93	0.72	0.81	0.81	0.79	0.77	0.82	0.21	0.15
$(La/Yb)_N$	6.34	8.55	8.59	10.29	7.85	8.70	9.77	9.10	13.36	7.99	10.49	5.10	7.39
$^{87}Rb/^{86}Sr$					0.9057		2.0533						
$^{87}Sr/^{86}Sr$					0.70858		0.71351						
2δ					1.3E-05		1.2E-05						
$(^{87}Sr/^{86}Sr)_i$					0.70393		0.70298						
$^{147}Sm/^{144}Nd$					0.1249		0.1163						
$^{143}Nd/^{144}Nd$					0.51271		0.5128						
$\varepsilon_{Nd}(t)$					4.7		6.9						
t_{DM}(Ma)					758		551						

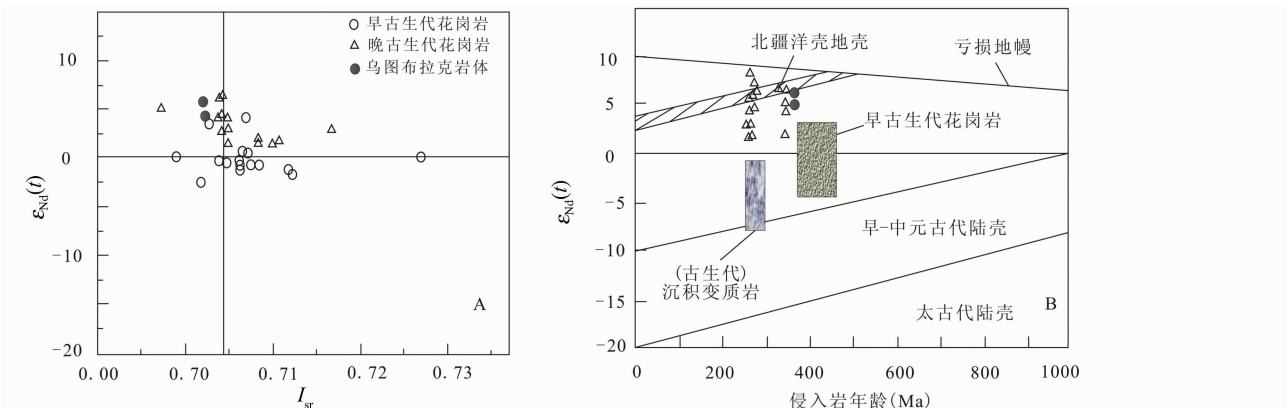


图 7 乌图布拉克岩体的 I_{Sr}-$\varepsilon_{Nd}(t)$ 关系图(A)和侵入年龄-$\varepsilon_{Nd}(t)$ 关系图(B)(转引自王涛等, 2005;童英等,2006c;Wang *et al.*, 2006)

Fig. 7 $\varepsilon_{Nd}(t)$-I_{sr} diagram and $\varepsilon_{Nd}(t)$-intrusive age diagram of Wutubulak pluton (after Wang *et al.*, 2005; Tong *et al.*, 2006c; Wang *et al.*, 2006)

5 讨论

5.1 岩石成因类型及岩浆来源

乌图布拉克岩体由闪长岩、花岗闪长岩、二长花岗岩及钾长花岗岩组成,具有一定的成分演化。大多数样品 A/NKC 值略大于 1 或接近 1,但小于 1.1,且多数样品 CIPW 标准矿物中含少量刚玉(<1%),为准铝-过铝质,具过渡性特征。岩石中所含暗色矿物主要为角闪石及黑云母,未见白云母,不同于典型的"S"型花岗岩,因此该岩体为"I"型花岗岩,但具有向"S"型花岗岩过渡的特点。另外,钾长花岗岩高硅、碱,低钙、镁、铝,具有明显的铕负异常,类似于"A"型花岗岩的特征。在微量元素方面,Rb、Th、K、La 富集,Ba、Sr、P、Nb 和 Ti 强烈亏损,铕负异常明显,其中,铕负异常和 Ba、P、Ti 亏损说明有斜长石、磷灰石和榍石等副矿物分离结晶。这些元素的亏损和铕负异常随分异程度增高(SiO_2 的升高)而明显增高。一般而言,碱性长石结晶分异也可以导致 Ba-Sr-Eu 的亏损,而且岩浆分异晚期的流体作用可以使之更明显(如 Jahn *et al.*, 2001)。钾长花岗岩 Nb、Ta 亏损(Nb/La = 0.24 ~ 0.92)及较低的稀土含量也显示不具有典型 A 型花岗岩的特点。另外,该岩体中钾长花岗岩不含碱性暗色矿物,CIPW 标准矿物中没有霓石(Ac)出现,也与区域上典型的 A 型花岗岩(王式洸等,1994;周刚,1999)不同。在 A 型花岗岩判别图中(图 8),石英闪长岩,花岗闪长岩和二长花岗岩分布在 I、S 型花岗岩区,而钾长花岗岩分布在 A 型花岗岩区,也显示了过渡特点。所以乌图布拉克岩体总体应该是"I"型花岗岩,具有 I-A、I-S 过渡特点。这类花岗岩在中亚造山带大量存在(如 Jahn *et al.*, 2001;Wu *et al.*, 2003)。在阿尔泰造山带后造山时期同样发育有这种过渡类型的花岗岩(韩宝福等,1998;王涛等,2005)。

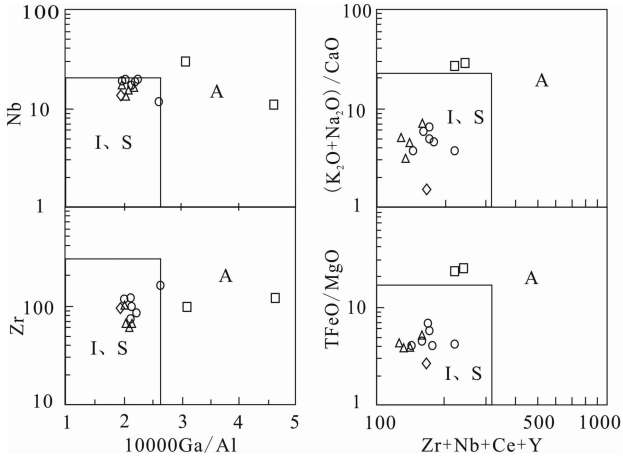


图 8 乌图布拉克花岗岩在 A 型花岗岩判别图中的位置(据 Whalen *et al.*, 1987)

Fig. 8 Lacation of the Wutubulak granites in discrimination diagrams for A-type granites (after Whalen *et al.*, 1987)

乌图布拉克岩体这种介于钙碱性与碱性两者之间的地球化学特征,为其连续过渡提供了中间物证,表明从钙碱性到碱性可能是连续过渡的。这种组合有两种成因:同源岩浆演化分异(如邻区准噶尔碱性花岗岩,Han *et al.*, 1997;Chen and Jahn, 2004);不同源区同时熔融。乌图布拉克岩体闪长岩、花岗闪长岩、二长花岗岩和钾长花岗岩有着相似或相近的主量、微量元素和 Sr 同位素特征,具有同源岩浆的特点,而其中结晶分异作用和流体作用对于岩浆演化起到了重要的影响作用。但岩石化学特征表明该岩体的岩浆演化过程中可能存在有岩浆混合作用,Harker 图解(图 3)中 TiO_2、$Fe_2O_3^T$、Al_2O_3、MgO、CaO 含量随 SiO_2 含量增加呈线性减少。闪长岩与其它岩石之间 SiO_2 含量存在较大的间隔也不符合同源岩浆演化连续系列的特点。

该岩体具有低的 Sr 初始比值,$(^{87}Sr/^{86}Sr)_i$ 为 0.70165 ~ 0.70462,$\varepsilon_{Nd}(t)$ 为较高的正值(+4.7 ~ +6.9)以及较年轻的 Nd 模式年龄,与准噶尔盆地北东缘也布山岩体及乌伦古碱性花岗岩具有相似的 Sr、Nd 同位素组成(Han *et al.*, 1997;韩宝福等,1998)。也布山岩体被推测为岩浆起源于经过交代的亏损地幔,并认为亏损地幔是产生东准噶尔地区晚古生代花岗岩的重要源区(韩宝福等,1998)。乌图布拉克岩体具有幔源岩浆的同位素特征,但没有与之相伴的大规模基性岩浆侵入,不可能是直接由地幔岩浆通过结晶分异形成。从年龄-$\varepsilon_{Nd}(t)$ 图解中也可以看出(图 7),乌图布拉克岩体的 $\varepsilon_{Nd}(t)$ 值远远高于古老地壳演化线,高于古生代变质岩石,也高于同造山花岗岩,与北疆地区洋壳地壳基本一致。准噶尔北缘埃达克岩被认为是由俯冲的大洋板片部分熔融所形成,与其相伴的富铌玄武岩来源于受洋壳熔体交代的地幔楔(张海祥等,2004)。埃达克岩具有强烈亏损 Yb(0.8×10^{-6} ~ 1.39×10^{-6})和 Y(7×10^{-6} ~ 13×10^{-6}),低 Rb 高 Sr,高 Sr/Y 比值(29.04 ~ 72.42)的地球化学特征。乌图布拉克岩体虽然与典型的埃达克岩明显不同,但也具有较低的 Yb(1.13×10^{-6} ~ 4.24×10^{-6})、Y(8.97×10^{-6} ~ 32.2×10^{-6}),因此可以说明该岩体可能来源于洋壳玄武质岩石的部分熔融。但乌图布拉克岩体中的 $\varepsilon_{Nd}(t)$ 值(+4.7 ~ +6.9)略高于准噶尔北缘埃达克岩(+3.02 ~ +4.06)和富铌玄武岩(+4.85 ~ +5.24)(张海祥等,2004);而且在部分熔融过程中金红石等含 Nb、Ta 较高的矿物属难熔矿物,部分熔融形成的岩浆会出现明显的 Nb、Ta 亏损,而乌图布拉克岩体绝大多数样品无明显的 Nb、Ta 亏损,因而可能有新的地幔物质的加入。综合以上讨论,我们有理由推测乌图布拉克岩体的岩浆来源于新生的玄武质地壳(洋壳),并可能有新的年轻幔源物质的加入。

5.2 岩体形成的地质背景

乌图布拉克岩体形成时代为 360.1 ± 3.6Ma,属泥盆纪末,该年龄代表了岩体的结晶年龄。周刚等(2006)对该岩体进行过全岩 Rb-Sr 等时线年龄测定,为 334.1 ± 9.5Ma,属早石炭世中晚期。后者可能反映了区域上的一次构造-岩浆热事件,因为在准噶尔北缘存在大量的石炭纪岩浆侵入活动(刘伟,1990;周刚等,1999;韩宝福等,2006;袁峰等,2006;范裕等,2007)。而泥盆纪末的岩浆侵入活动在准噶尔北缘尚属首次发现,即使在额尔齐斯-玛因鄂博构造带以北的阿尔泰造山带内,目前尚未有 360Ma 左右的花岗岩的精确定年报道,大面积发育的同碰撞花岗岩形成时代为 460 ~ 370Ma(Wang *et al.*, 2006)。乌图布拉克岩体略晚于阿尔泰同碰撞花岗岩形成,可能代表了后碰撞时期的开始。

该岩体绝大多数样品不具有 Nb、Ta 亏损或亏损不明显,与具有明显 Nb、Ta 亏损的岛弧岩浆有明显差别,其形成环境不应为岛弧。在 Rb/30-Hf-Ta×3 图解(图 9)中,该岩体除个别花岗岩和二长花岗岩落在板内花岗岩区、1 个二长花岗岩样品落在火山弧花岗岩区外,其它样品均落在造山晚期-后碰撞花岗岩区。

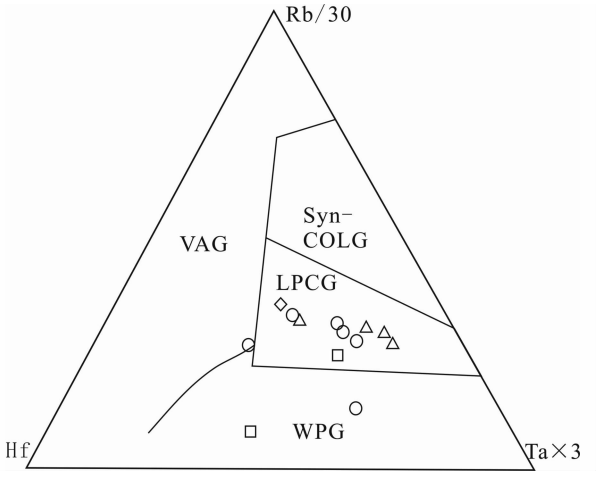


图 9 乌图布拉克岩体 Rb/30-Hf-Ta×3 图解(据 Harris *et al.*, 1986)

Fig. 9 Rb/30-Hf-Ta × 3 diagram of Wutubulak pluton (after Harris *et al.*, 1986)

刘德权等(1993)根据北准噶尔存在的博宁岩认为该区为泥盆纪洋内弧。近几年在该区发现的埃达克岩和富铌玄武岩组合(许继峰等,2001;张海祥等,2004)为早、中泥盆世;埃达克质侵入岩为中泥盆世(381 ~ 376Ma)(张招崇等,2006)。表明该区在早、中泥盆世存在板块的俯冲活动。东准噶尔北缘出露的地层时代主要为早、中泥盆世及石炭世,有少量奥陶纪和晚泥盆世地层。大量的火山活动主要集中在早、中泥盆世,形成下泥盆统托让格库都克组、中泥盆统北塔山组、蕴都喀拉组火山岩-沉积岩,而上泥盆统卡西翁组出露范围极其有限,且主要为沉积岩,火山活动极其微弱,早石炭世地层主要为沉积岩。上泥盆统地层出露极为局限表明晚泥盆世开始该区已开始隆升,哈萨克斯坦板块和西伯利亚板已对接为统一大陆。早石炭世主要为残余海盆。区域上普遍缺失上石炭统地层,东准噶尔局部发育下石炭统未巴塔玛依内山组陆相火山-沉积地层,表明该区在早石炭世末已全面隆升,残余海盘消失。该区岛弧(或洋内弧)活动主要集中于早、中泥盆世时期,到晚泥盆世已基本结束。晚泥盆世-石炭纪虽然存在岩浆侵入活动,但没有与之相伴的大规模火山活动。区域上,阿尔泰南缘火山活动也主要集中在早、中泥盆世,下石炭统红山嘴组火山-沉积地层主要沿断陷沉积盆地分布。因此,阿尔泰造山带的板块俯冲-碰撞造山活动主体应在早、中泥盆世,与大量发育的同碰撞花岗岩时代(~370Ma)一致。

对于阿尔泰造山带,哈萨克斯坦-准噶尔板块何时与西伯利亚板块碰撞对接,后碰撞的时限还存在一些争议。王京彬和徐新(2006)认为新疆北部后碰撞时限为早石炭世维宪期-晚二叠世,并经历了早石炭世伸展-晚石炭世挤压(隆升)

和早二叠世伸展-晚二叠世挤压(隆升)两个伸展-挤压旋回。王涛等(2005)认为阿尔泰造山带同碰撞花岗岩形成于370Ma之前,后碰撞距主碰撞时间较短(10~30Ma),因而将早二叠世形成的花岗岩(276Ma)确认为后造山阶段的产物,有别于后碰撞时期(王涛等,2005)。韩宝福等(2006)根据花岗岩锆石SHRIMP U-Pb法定年,并结合前人成果研究后认为:准噶尔地区主要发育后碰撞花岗岩,东准噶尔后碰撞深成岩浆活动发生在330~265Ma之间,而西准噶尔后碰撞深成岩浆活动的时限在340~275Ma之间。但在东准噶尔,后碰撞深成岩浆活动集中在330~310Ma和305~280Ma两个时段,而在西准噶尔,后碰撞深成岩浆活动的高峰发生在310~295Ma之间。而乌图布拉克岩体形成时代(360Ma)的发现,是准噶尔北缘最老的深成岩体年龄,形成于主体碰撞之后,是碰撞造山后由挤压向伸展过渡时期形成的岩体,具有后碰撞花岗岩的地球化学特征,可能代表了后碰撞时期的开始。结合前人的研究成果,以"A"型花岗岩的出现(西准噶尔北缘阔依塔斯岩体和恰其海岩体等A型花岗岩的锆石SHRIMP U-Pb年龄分别为297.9±4.6Ma和290.7±9.3Ma,周涛发等,2006)作为后碰撞结束的标志,本文推测阿尔泰造山带后碰撞时限可能为360~290Ma,即泥盆纪末-石炭纪末,持续时间70Ma左右。

6 结论

(1)乌图布拉克岩体主要由花岗闪长岩和二长花岗岩组成,有少量石英闪长岩及钾长花岗岩,岩石化学成分总体显示"I"型花岗岩特征,具有向"S"型、"A"型花岗岩过渡的特征。

(2)岩体为高钾钙碱性系列;稀土元素含量较低,主体岩石铕负异常程度较低,但晚期的钾长花岗岩具强烈的铕负异常;不相容元素富集,特别是强不相容元素Rb、Th、K等富集程度较高。具有Sr、Ba、P、Ti负异常,且随岩浆演化趋于明显,无明显Nb、Ta负异常有别于岛弧花岗岩,具后碰撞花岗岩的地球化学特征。

(3)该岩体具有低的Sr同位素初始比值(0.70165~0.70462)和较高的$\varepsilon_{Nd}(t)$值(+4.7~+6.9),并有较年轻的Nd模式年龄(758~551Ma),通过分析推测该岩体岩浆可能来源于新生的玄武质地壳,并有年轻幔源物质的加入。

(4)岩体的锆石SHRIMP U-Pb年龄为360.1±3.6Ma,形成于晚泥盆世末,可能代表了后碰撞的开始,根据前人研究成果,结合区域地质特征分析,推测阿尔泰造山带后碰撞时限可能为360~290Ma,即泥盆纪末-石炭纪末,持续时间70Ma左右。

致谢 感谢审稿人提出的宝贵意见。参加野外工作的还有张小林、罗世宾、王祥、何斌、吴建新等,论文编写过程中得到南京地质矿产研究所张传林研究员的指导和帮助。在此一并致谢!

References

Belousova EA, Griffin WL, O'Reilly SY *et al*. 2002. Igneous zircon: Trace element composition as an indicator of source rock type. Contrib. Mineral. Petrol., 143: 602-622

Chen B and Jahn BM. 2004. Genesis of post-collisional granitoids and basement nature of the Junggar Terrane, NW China: Nd-Sr isotope and trace element evidence. Journal of Asian Earth Sciences, 3:691-703

Fan Y, Zhou TF, Yuan F, Tan LG, Cooke D, Meffre S, Yang WP and He LX. 2007. LA-ICPMS zircon age of Tasite pluton in Sawuer region of west Junggar, Xinjing. Acta Petrologica Sinica, 23(8): 1901-1908(in Chinese with English abstract)

Han BF, Wang SG, Jahn BM and Hong DW. 1997. The Nd isotope of Wulunguhe alkaline granite from Xinjiang and the significance to the Phanerozoic crust growth. Chinese Science Bulletin,17(42):1829-1831

Han BF, He GQ, Wang SG *et al*. 1998. Postcollisional mantle-derived magmatism and vertical growth of the continental crust in North Xinjiang. Geological Review, 44(4):396-406(in Chinese with English abstract)

Han BF, He GQ and Wang SG. 1999. Mantle source magma activity post-collision, underplating and basement character of Junggar Basin. Science in China (Series D), 29(1):16-21

Han BF, Ji JQ, Song B, Chen LH and Li ZH. 2004. SHRIMP Zircon U-Pb age of mafic-ultramafic complex bearing copper and nickel and its geological significance in Kalatongke and East Huangshan, Xinjiang. Chinese Science Bulletin,49(22):2324-2328(in Chinese)

Han BF, Ji JQ, Song B, Chen LH and Zhang L. 2006. Late Paleozoic vertical growth of continental crust around the Junggar Basin, Xinjing, China(Part Ⅰ): Timing of post-collisional plution. Acta Petrologica Sinica, 22(5):1077-1086(in Chinese with English abstract)

Harris NBW, Pearce JA and Tindle AG. 1986. Geochemical characteristics of collision-zone magmatism. In: Coward MP and Reis AC (eds.). Collision Tectonics. Spec. Publ. Geol. Soc. Lond., 67-81

Jahn BM, Wu FY and Chen B. 2000. Massive granitoid generation in Central Asia: Nd isotope evidence and implication for continental growth in the Phanerozoic. Episodes, 22: 82-92

Jahn BM, Wu FY, Capdevila R, Martineau F, Wang Y and Zhao Z. 2001. Highly evolved juvenile granites with terad REE patterns: The Woduhe and Baerzhe granites from the Great Xingan (Khingan) Mountains in NE China. Lithos, 59:171-198

Jahn BM, Windley B, Natal'in B *et al*. 2004. Phanerozoic continental growth in Central Asia. Journal of Asian Earth Sciences, 23: 599-603

Li JY and Xu X. 2004. Major problems on geologic structures and metallogenesis of northern Xinjiang. Xinjiang Geology, 22(2):119-124(in Chinese with English abstract)

Liu DQ, Tang YL and Zhou RH. 1993. Devonian intraoceanic arc and boninite in North Junggar, Xinjiang. Xinjiang Geology, 11(1):1-12(in Chinese with English abstract)

Liu W. 1990. Petrogenetic epochs and peculiarities of genetic types of granitoids in the Altai Mts., Xinjiang Uygur Autonomous Region, China. Geotectonica et Metallogenia, 14(1):43-56(in Chinese with English abstract)

Niu HC, Yu XY, Xu JF, Shan Q, Chen FR, Zhang HX and Zheng ZP. 2006. Late Paleozoic Volcanism and Associated Metallogenesis in the Altay Area, Xinjiang, China. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese)

Qiao GS. 1998. Normalization of isotopic dilution analysis. Science in China(Series A), 31 (10): 1263-1268

Rui XJ and Wu YJ. 1984. Genesis of granites in Altay, Xinjiang. In: International Science Conference Paper Collection of Geological and Metallgenic Relationship of Granites. Nanjing: Jiangsu Science and

Technology Publishing House, 180 – 190 (in Chinese)
Sengör AMC, Natal'in BA and Burtman VS. 1993. Evolution of the Altaid tectonic collage and Paleozoic crustal growth in Eurasia. Nature, 364: 299 – 307
Song B, Zhang, YH, Wan YS and Jian P. 2002. Discussion on the mount preparation, age dating and related issues. Geological Review, (Supp.). : 26 – 30 (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 Basin. Spec. Publ. Geol. Soc. Lond., 42: 313 – 345
Tong Y, Wang T, Hong DW and Han BF. 2006a. Pb Isotopic composition of granitoids from the Altay Orogen, China: Evidence for mantle-derived origin and continental growth. Acta Geologica Sinica, 80(4): 517 – 528 (in Chinese with English abstract)
Tong Y, Hong DW, Wang T, Wang SG and Han BF. 2006b. Tims U-Pb zircon ages of Fuyun post-orogenic linear granite plutons on the southern margin of Altay orogenic belt and their implications. Acta Petrologica et Mineralogica, 25 (2): 85 – 89 (in Chinese with English abstract)
Tong Y, Wang T, Kovach VP, Hong DW and Han BF. 2006c. Age and origin of the Takeshiken postorogenic alkali-rich intrusive rocks in southern Altai, near the Mongolian border in China and its implications for continental growth. Acta Petrologica Sinica, 22(5): 1267 – 1278 (in Chinese with English abstract)
Tong Y, Wang T, Hong DW, Dai YJ, Han BF and Liu XM. 2007. Ages and origin of the Early Devonian granites from the north part of Chinese Altai Mountains and its tectonic implications. Acta Petrologica Sinica, 23(8): 1933 – 1944 (in Chinese with English abstract)
Wang DH, Chen YC, Xu ZG *et al.* 2002. Metallogenic Series and Regularities in Altai Metallogenic Province. Beijing: Atomic Energy Press, 114 – 185 (in Chinese)
Wang JB and Xu X. 2006. Post – collisional tectonic evolution and metallogenesis in northern Xinjiang, China. Acta Petrologica Sinica, 80(1): 23 – 31 (in Chinese with English abstract)
Wang SG, Han BF and Hong DW. 1994. Geochemistry and tectonic significance of alkali granites along Ulungur river, Xinjiang. Scientia Geologica Sinica, 29 (4): 373 – 382 (in Chinese with English abstract)
Wang T, Hong DW, Tong Y, Han BF and Shi YR. 2005. Zircon U-Pb SHRIMP age and origin of post-orogenic Lamazhao granitic pluton from Altai orogen: Its implications for vertical continental growth. Acta Petrologica Sinica, 21(3): 640 – 650 (in Chinese with English abstract)
Wang T, Hong DW, Jahn BM, Tong Y, Wang YB, Han BF and Wang XX. 2006. Timing, Petrogenesis, and setting of Paleozoic synorogenic intrusions from the Altai Mountains, Northwest China: Implications for the tectonic evolution of an accretionary orogen. The Journal of Geology, 2114: 735 – 751
Wang ZG, Zhao ZH and Zou TR. 1998. Geochemistry of the Granitoids in Altay. Beijing: Science Press (in Chinese)
Whalen JB, Currie KL and Chappell BW. 1987. A – type granites: Geochemical characteristics discrimination and petrogenesis. Contrib. Mineral. Petrol., 95: 407 – 419
Windley FB, Kroner A, Guo J, Qu G, Li Y and Zhang C. 2002. Neoproterozoic to Paleozoic geology of the Altai orogen, NW China: New zircon age data and tectonic evolution. The Journal of Geology, 110: 719 – 737
Wu FY, Jahn BM, Lo CH, Yui TF, Lin Q, Ge WC and Sun DY. 2003. Highly fractionated I – type granites in NE China (I): Geochronotogy and petrogenesis. Lithos, 66: 241 – 273
Xiao WJ, Windley BF, Badarch G, Sun S, Li JL, Qin KZ and Wang ZH. 2004. Palaeozoic accretionary and convergent tectonics of the southern Altaids: Implications for the growth of Central Asia. Journal of the Geological Society, London, 161: 339 – 342
Xu JF, Mei HJ, Yu XY, Chen FR and Zhen ZP. 2001. Adakites related to subduction in the northern margin of Junggar arc for the Late Paleozoic: Products of slab melting. Chinese Science Bulletin, 46 (8): 684 – 687 (in Chinese)
Yang FQ, Mao JW, Yan SH, Liu F, Chai FM, Zou G, Liu GR, He LX, Geng XX and Dai JZ. 2008. Geochronology, geochemistry and geological implications of the Mengku synorogenic plagiogranite pluton in Altay, Xinjiang. Acta Geologica Sinica, 82(4): 485 – 499 (in Chinese with English abstract)
Yuan F, Zhou TF and Yue SC. 2001. The ages and genetic types of the granites in the Nurt area, Altai. Xinjiang Geology, 19(4): 292 – 296 (in Chinese with English abstract)
Yuan F, Zhou TF, Tan LG, Fan Y, Yang WP, He LX and Yue SC. 2006. Isotopic ages of the I-type granites in West Junggar Sawuer region. Acta Petrologica Sinica, 22(5): 1238 – 1248 (in Chinese with English abstract)
Yuan C, Sun M, Xiao WJ, Li XH, Chen HL, Lin SF, Xia XP and Long XP. 2007. Accretionary orogenesis of the Chinese Altai: Insights from Paleozoic granitoids. Chemical Geology, 242: 22 – 39
Yue YJ, Wang SG and He GQ. 1990. Genetic types of granitiods of the Altai orogenic belt, China and their implications for crustal evolution. Xinjiang Geoscience No. 2. Beijing: Gelogical Publishing House, 72 – 85 (in Chinese)
Zeng QS, Chen GH, Wang H and Shan Q. 2007. Geochemical characteristic, SHRIMP zircon U-Pb dating and tectonic implication for granitoids in Chonghuer basin, Altai, Xinjing. Acta Petrologica Sinica, 23(8): 1921 – 1932 (in Chinese with English abstract)
Zhang HX, Niu HC, Sato H *et al.* 2004. Late Paleozoic Adakite and Nb-enriched basalt from northern Xinjiang: Evidence for the south ward subduction of the Paleo-Asian Ocean. Geological Journal of China Universities, 10(1): 106 – 113 (in Chinese with English abstract)
Zhang ZC, Yan SH, Chen BL, Zhou G, He YK, Chai FM, He LX and Wan YS. 2006. SHRIMP zircon U-Pb dating for subduction – related granitic rocks in the northern part of East Junggar, Xinjiang. Chinese Science Bulletin, 51(13): 1565 – 1574 (in Chinese)
Zhang ZC, Zhou G, Yan SH, Chen BL, He YK, Chai FM and He LX. 2007. Geology and geochemistry of the Late Paleozoic volcanic rocks of the south margin of the Altai Mountains and implications for tectonic evolution. Acta Geologica Sinica, 81(3): 344 – 358 (in Chinese with English abstract)
Zhao ZH, Wang ZG, Zou TR *et al.* 1993. The REE, isotopic composition of O, Pb, Sr and Nd and petrogenesis of granitoids in the Altai region. In: Tu GZ (ed.). Progress of Solid-Earth Sciences in Northern Xinjiang, China. Beijing: Science Press, 239 – 266 (in Chinese)
Zhou G. 1999. Geochemistry of the "A" type granites of Koytas in Jenminay of Xinjiang and its tectonic significance. Xinjiang Geology, 17(2) 179 – 187 (in Chinese with English abstract)
Zhou G, Qin JH and He LX. 1999. Formation time of granititoids in Sawuer Mountains, Xinjiang. Acta Petrologica et Mineralogica, 18 (3): 237 – 242 (in Chinese with English abstract)
Zhou G, Zhang ZC, Gu GZ, Yang WP, He B, Zhang XL, Lou SB, Wang X and He YK. 2006. Dating of granitic plutons and its geological implications in the Lower Reaches of the Qinggeli River in the northern part of east Junggar, Xinjiang. Geoscience, 20(1): 141 – 150 (in Chinese with English abstract)
Zhou G, Zhang ZC, Lou SB, He B, Wang X, Yin LJ, Zhao H, Li AH and He YK. 2007. Confirmation of high-temperature strongly peraluminous Mayinebo granites in the south margin or Altay, Xinjiang: Age, geochemistry and tectonic implications. Acta Petrologica Sinica, 23(8): 1909 – 1920 (in Chinese with English abstract)
Zhou TF, Tuan F, Tan LG, Fan Y, Yang WP, He LX and Yue SC. 2006. Time limit, geochemical characteristics and tectonic setting of Late Paleozoic magmatism in Sawuer region, Xinjiang. Acta Petrologica Sinica, 22(5): 1225 – 1237 (in Chinese with English abstract)
Zhu YF, Zeng YS and Gu LB. 2006. Geochemistry of the rare metal-bearing pegmatite No. 3 vein and relate granites in the Keketuohai region, Altay Mountains, Northwest China. Journal of Asian Earth

Sciences, 27:61 – 77
Zhu YF, Wang T and Xu X. 2007. Progress of geology study in Xinjiang and its adjacent regions. Acta Petrologica Sinica, 23(8): 1785 – 1794(in Chinese with English abstract)
Zou TR, Cao HZ and Wu BQ. 1988. Orogenic and anorogenic granitoids of the Altay Mountains, Xinjiang and their discrimination criteria. Acta Geologica Sinica, 62(3):228 – 243 (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

范裕,周涛发,袁峰,谭绿贵,David COOKE,Sebastien MEFFRE,杨文平,何立新. 2007. 新疆西准噶尔地区塔斯特岩体锆石 LA-ICPMS 年龄及其意义. 岩石学报,23(8):1901 – 1908
韩宝福,何国琦,王式洸等. 1998. 新疆北部碰撞后幔源岩浆活动与陆壳纵向生长. 地质论评,44(4):396 – 406
韩宝福,何国琦,王式洸. 1999. 后碰撞幔源岩浆活动、底垫作用及准噶尔盆地基底的性质. 中国科学(D 辑),42(2):113 – 119
韩宝福,季建清,宋彪等. 2004. 新疆喀拉通克和黄山东含铜镍矿镁铁-超镁铁杂岩体的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义. 科学通报, 49(22):2324 – 2328
韩宝福,季建清,宋彪,陈立辉,张磊. 2006. 新疆东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. 岩石学报,22(5):1077 – 1086
李锦轶,徐新. 2004. 新疆北部地质构造和成矿作用的主要问题. 新疆地质,22(2):119 – 124
刘德权,唐延龄,周汝洪. 1993. 新疆北准噶尔泥盆纪洋内弧及博宁岩. 新疆地质,11(1):1 – 12
刘伟. 1990. 中国新疆阿尔泰花岗岩的时代及成因类型特征. 大地构造与成矿学, 14(1):43 – 56
牛贺才,于学元,许继峰,单强,陈繁荣,张海祥,郑作平. 2006. 中国新疆阿尔泰晚古生代火山作用及成矿. 北京:地质出版社
芮行健,吴玉金. 1984. 中国阿尔泰花岗岩的成因. 见:花岗岩地质与成矿关系国际学术会议论文集,南京:江苏科学技术出版社,180 – 190
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,(增刊):26 – 30
童英,王涛,洪大卫,韩宝福. 2006a. 中国阿尔泰造山带花岗岩 Pb 同位素组成特征:幔源成因佐证及陆壳生长意义. 地质学报,80(4):517 – 528
童英,洪大卫,王涛,王式洸,韩宝福. 2006b. 阿尔泰造山带南缘富蕴后造山线形花岗岩体锆石 U-Pb 年龄及其地质意义. 岩石矿物学杂志, 25(2):85 – 89
童英,王涛,Kovach VP,洪大卫,韩宝福. 2006c. 阿尔泰中蒙边界塔克什肯口岸后造山富碱侵入岩体的形成时代、成因及其地壳生长意义,岩石学报,22(5):1267 – 1278
童英,王涛,洪大卫,代雅建,韩宝福,柳晓明. 2007. 中国阿尔泰北部山区早泥盆世花岗岩的年龄、成因及构造意义. 岩石学报,23(8):1933 – 1944
王登红,陈毓川,徐志刚等. 2002. 阿尔泰成矿省的成矿系列及成矿规律. 北京:原子能出版社, 114 – 185
王京彬,徐新. 2006. 新疆北部后碰撞构造演化与成矿. 地质学报,80(1):23 – 31
王式洸,韩宝福,洪大卫. 1994. 新疆乌伦古河碱性花岗岩的地球化学及其构造意义. 地质科学,(4):373 – 382
王涛,洪大卫,童英,韩宝福,石玉若. 2005. 中国阿尔泰造山带后造山喇嘛昭花岗岩体锆石 SHRIMP 年龄、成因及陆壳垂向生长意义. 岩石学报,21(3):640 – 650
王中刚,赵振华,邹天人等. 1998. 阿尔泰花岗岩类地球化学. 北京:科学出版社
许继峰,梅厚均,于学元,陈繁荣,郑作平. 2001. 准噶尔北缘晚古生代岛弧中与俯冲作用有关的 adakite 火山岩:消减板片部分熔融的产物. 科学通报,46(8):684 – 687
杨富全,毛景文,闫升好,刘峰,柴凤梅,周刚,刘国仁,何立新,耿新霞,代军治. 2008. 新疆阿尔泰蒙库同造山斜长花岗岩年代学、地球化学及其地质意义. 地质学报,82(4):485 – 499
袁峰,周涛发,岳书仓. 2001. 阿尔泰诺尔特地区花岗岩形成时代及成因类型. 新疆地质,19(4):292 – 296
袁峰,周涛发,谭绿贵,范裕,杨文平,何立新,岳书仓. 2006. 西准噶尔萨吾斯地区 I 型花岗岩同位素精确定年及其意义. 岩石学报,22(5):1238 – 1248
岳永君,王式洸,何国琦. 1990. 中国阿尔泰造山带中花岗岩类的成因类型及其在地壳演化中的意义. 新疆地质科学(第 2 辑). 北京:地质出版社,72 – 85
曾乔松,陈广浩,王核,单强. 2007. 阿尔泰冲乎尔盆地花岗质岩体的锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其构造意义. 岩石学报,23(8):1921 – 1932
张海祥,牛贺才,Hiroaki SATO 等. 2004. 新疆北部晚古生代埃达克岩、富铌玄武岩组合:古亚洲洋板块南向俯冲的证据. 高校地质学报,10(1):106 – 113
张招崇,闫升好,陈柏林等. 2006. 新疆东准噶尔北部俯冲花岗岩:SHRIMP U-Pb 锆石年龄证据. 科学通报,51(13):1565 – 1574
张招崇,周刚,闫升好,陈柏林,贺永康,柴凤梅,何立新. 2007. 阿尔泰山南缘晚古生代火山岩的地质地球化学特征及其对构造演化的启示. 地质学报,81(3):344 – 358
赵振华,王中刚,邹天人等. 1993. 阿尔泰花岗岩类 REE 及 O、Pb、Sr、Nd 同位素组成及成岩模型. 见:涂光炽主编. 新疆北部固体地球科学新进展. 北京:科学出版社, 239 – 266
周刚. 1999. 新疆吉木乃县阔依塔斯 A 型花岗岩的地球化学及构造意义. 新疆地质,17(2)179 – 187
周刚,秦纪华,何立新. 1999. 新疆萨吾尔山花岗岩类的形成时代. 岩石矿物学杂志,18(3):237 – 242
周刚,张招崇,谷高中,杨文平,何斌,张小林,罗世宾,王祥,贺永康. 2006. 新疆东准噶尔北部青格里河下游花岗岩类的时代及地质意义. 现代地质,20(1):141 – 150
周刚,张招崇,罗世宾,何斌,王祥,应立娟,赵华,李爱红,贺永康. 2007. 新疆阿尔泰山南缘玛因鄂博高温型强过铝花岗岩:年龄、地球化学特征及其地质意义. 岩石学报,23(8):1909 – 1920
周涛发,袁峰,谭绿贵,范裕,杨文平,何立新,岳书仓. 2006. 新疆萨吾尔地区晚古生代岩浆作用的时限、地球化学特征及地球动力学背景. 岩石学报,22(5):1225 – 1237
朱永峰,王涛,徐新. 2007. 新疆及邻区地质与矿产研究进展. 岩石学报,23(8):1785 – 1794
邹天人,曹惠志,吴柏青. 1988. 新疆阿尔泰造山花岗岩和非造山花岗岩及其判别标志. 地质学报, 62(3):228 – 243