

doi: 10.12029/gc20180407

菅坤坤, 刘向东, 何元方, 袁璋, 曾忠诚, 赵端昌, 王星, 杜彪, 王天毅. 2018. 阿尔金中段大通沟花岗岩体年代学、地球化学特征及其成因[J]. 中国地质, 45(4): 740–752.

Jian Kunkun, Liu Xiangdong, He Yuanfang, Yuan Zhang, Zeng Zhongcheng, Zhao Duanchang, Wang Xing, Du Biao, Wang Tianyi. 2018. Geochronology, geochemistry and petrogenesis of the Datonggou granitic plutons in the middle section of Altun Mountains[J]. Geology in China, 45 (4): 740–752(in Chinese with English abstract).

## 阿尔金中段大通沟花岗岩体年代学、地球化学特征及其成因

菅坤坤 刘向东 何元方 袁璋 曾忠诚 赵端昌 王星 杜彪 王天毅

(陕西省地质调查中心, 西安 陕西 710068)

**摘要:** 出露于阿尔金中段的大通沟花岗岩体, 岩性主要为二长花岗岩, LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 $(353.7 \pm 1.1)$  Ma。SiO<sub>2</sub> 为 74.5%~76.2%, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 为 12.62%~14.15%, (Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O) 为 7.71%~8.29%, K<sub>2</sub>O/Na<sub>2</sub>O 为 0.9~1.22, A/CNK 介于 1.0~1.19 之间, 属高钾钙碱性系列的过铝质-强过铝质花岗岩。该岩石富集大离子亲石元素(LILE), 亏损素 Ba、Nb、Sr、P、Ti 等高场强元素(HFSE);  $\Sigma$  REE 变化范围大( $\Sigma$  REE=  $85.7 \times 10^{-6}$ ~ $153.2 \times 10^{-6}$ , 平均为  $111 \times 10^{-6}$ ), 具有强烈的负 Eu 异常( $\delta$ Eu=0.03~0.59, 平均 0.33), LREE/HREE=3.52~11.9, 轻稀土相对富集, 轻重稀土分馏明显。微量元素地球化学特征表明, 其源区物质主要来源于上地壳的变杂砂岩和变泥质岩类。锆石饱和温度计演算结果显示锆石的结晶温度为 722~745°C(平均 735°C), 估算二长花岗岩源区的压力为 0.8~1.6GPa。综合区域地质资料, 阿尔金中段大通沟花岗岩体的形成与造山带根部块体的拆沉作用有关。

**关键词:** 阿尔金; 早石炭世; 过铝质花岗岩; 地球化学

中图分类号: P588.12<sup>1</sup>; P597; P595 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2018)04-0740-13

## Geochronology, geochemistry and petrogenesis of the Datonggou granitic plutons in the middle section of Altun Mountains

JIAN Kunkun, LIU Xiangdong, HE Yuanfang, YUAN Zhang, ZENG Zhongcheng,  
ZHAO Duanchang, WANG Xing, DU Biao, WANG Tianyi

(Shaanxi Center of Geological Survey, Xi'an 710016, Shaanxi, China)

**Abstract:** The Datonggou granitic plutons, outcropped in the middle part of Altun Mountains, are principally composed of monzonite granite. The LA-ICP-MS zircon U-Pb isotopic dating indicates that the Datonggou monzonite granite was emplaced at  $(353.7 \pm 1.1)$  Ma. They have high-K cal-alkaline and strong peraluminous features (SiO<sub>2</sub>=74.5%–76.2%, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>=12.62%–14.15%, (Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O)=7.71%–8.29%, K<sub>2</sub>O/Na<sub>2</sub>O=0.9–1.22, A/CNK=1.0–1.19). The Datonggou granitic plutons are rich in large ion lithophile elements (LILE) and depleted in high field strength elements (HFSE) with a clear negative Ba, Nb, Sr, P, Ti anomaly.

收稿日期: 2016-06-19; 改回日期: 2018-03-11

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目(12120113044600、12120114081901)。

作者简介: 菅坤坤, 男, 1987 年出生, 硕士, 工程师, 长期从事区域地质调查工作, jiankunryan@163.com。

REE distribution patterns show strong negative anomaly of Eu ( $\delta\text{Eu}=0.03-0.59$ ) and distinct enrichment of LREE relative to HREE. The geochemical characteristics of trace elements indicate that the rocks were formed by partial melting of variable hybrid sandstone and variable mudstone from the upper crust. The partially melting temperature calculated by whole rock Zr thermometer is  $722-745^\circ\text{C}$  and pressure is  $0.8-1.6\text{ GPa}$ . Combined with the data from the Altun Mountains, it is held that the Datonggou granitic plutons in middle Altun Mountains might be related to the delamination of deep blocks under the Altun orogen.

**Key words:** Altun Mountains; Early Carboniferous; peraluminous granites; geochemistry

**About the first author:** JIAN Kunkun, male, born in 1987, master, engineer, engages in the study of petrology and regional geological survey; E-mail: jiankunryan@163.com.

**Fund support:** Supported by China Geological Survey Program (No. 12120113044600, 12120114081901).

## 1 引言

阿尔金造山带西接昆仑山,东连祁连山,是塔里木盆地和柴达木盆地之间的天然屏障,阿尔金断裂带是我国西北地区的一条重要构造带,也是中亚地区规模最大的北东东向走滑断裂,断裂的北东端切割祁连构造带和北山构造带,南西端插入昆仑构造带,分割塔里木地块和柴达木地块,又是青藏高原北部的自然边界。近年来,阿尔金地区在高压-超高压变质作用及蛇绿岩研究方面已取得了相当的成果(Zhang Jianxin et al, 2005; Mattinson, 2007; 杨经绥等, 2009; 刘良等, 2007; 张建新等, 2007; 李向民等, 2009),而花岗岩方面的研究相对薄弱。目前,阿尔金地区花岗岩方面的研究主要集中在晚泥盆世及以前,晚古生代中晚期花岗岩的报道较少,花岗岩的研究重点主要集中在古生代花岗质岩石的岩浆作用期次、部分熔融作用的物质来源、岩浆形成的温度、压力,及其与超高压变质岩石变质期次的耦合关系,以及岩浆形成的构造背景方面(刘亮等, 2015; 吴才来等, 2014, 2016),虽然取得了一定的成果,但仍需进一步深入研究,尤其是晚泥盆世以来的岩浆作用机制,仍不十分清楚。为此,本文选取阿尔金山中段的大通沟花岗岩体作为研究对象,在野外地质调查和岩相学观察的基础上,对其进行了详细的地球化学研究,并结合锆石阴极发光图像进行LA-ICP-MS 锆石U-Pb 定年,以确定其形成时代、源区性质和岩石形成的温压条件,并进一步探讨其成因机制。

## 2 区域地质背景及岩体地质特征

阿尔金山位于青藏高原北缘,介于塔里木板块及柴达木微板块之间,是一个经历了太古代-古元

古代陆核和结晶基底的形成、中元古代稳定大陆边缘沉积、新元古代末期-早古生代板块扩张、加里东期板块俯冲-碰撞、晚古生代剥露夷平和局部浅海沉积、印支期的伸展作用和碱性岩侵入、晚燕山期大规模的左行走滑,由形成于不同构造层次、不同时期和不同构造环境的地质体所组成的复合造山带(刘良等, 1999; 许志琴等, 1999)。阿尔金造山带由北到南分别划为5个构造单元(吴才来等, 2016)(图1a):阿北微地块(敦煌地块)、北阿尔金蛇绿混杂岩带、阿中微地块、南阿尔金高压-超高压带和南阿尔金早古生带蛇绿混杂岩带。

研究区阿尔金断裂以北出露地层主要为蓟县系木孜萨依组和金雁山组,木孜萨依组主要为一套碎屑岩建造,并经历了浅变质,局部发育火山岩夹层,变质程度最高可达绿片岩相;蓟县系金雁山组为一套碳酸盐岩建造。阿尔金断裂以南出露地层主要为古元古界达肯大坂岩群和中侏罗统采石岭组,达肯大坂岩群由一套中高级变质岩系组成,主要岩性由黑云斜长片岩,黑云斜长片麻岩和透辉石大理岩组成;采石岭组为一套陆相碎屑岩建造,局部发育煤线。岩浆岩出露在阿尔金断裂以南,以晚泥盆世基性杂岩体和中酸性花岗岩体为主,以及小面积的早石炭世二长花岗岩体。晚泥盆世基性杂岩体岩性主要为辉石岩-辉长岩-闪长玢岩,花岗岩体,岩性为石英闪长岩-花岗闪长岩-二长花岗岩,二者接触部位岩浆混合作用明显。大通沟二长花岗岩体出露于阿尔金断裂南侧,位于柴达木盆地西北缘(图1a、b),与古元古界达肯大坂岩群呈侵入接触关系。

大通沟花岗岩体呈岩株状产出,出露面积约 $5\text{ km}^2$ ,岩性单一,主要为二长花岗岩(图2a),由中心至边部矿物颗粒由中粗粒变为中细粒,靠近阿尔金

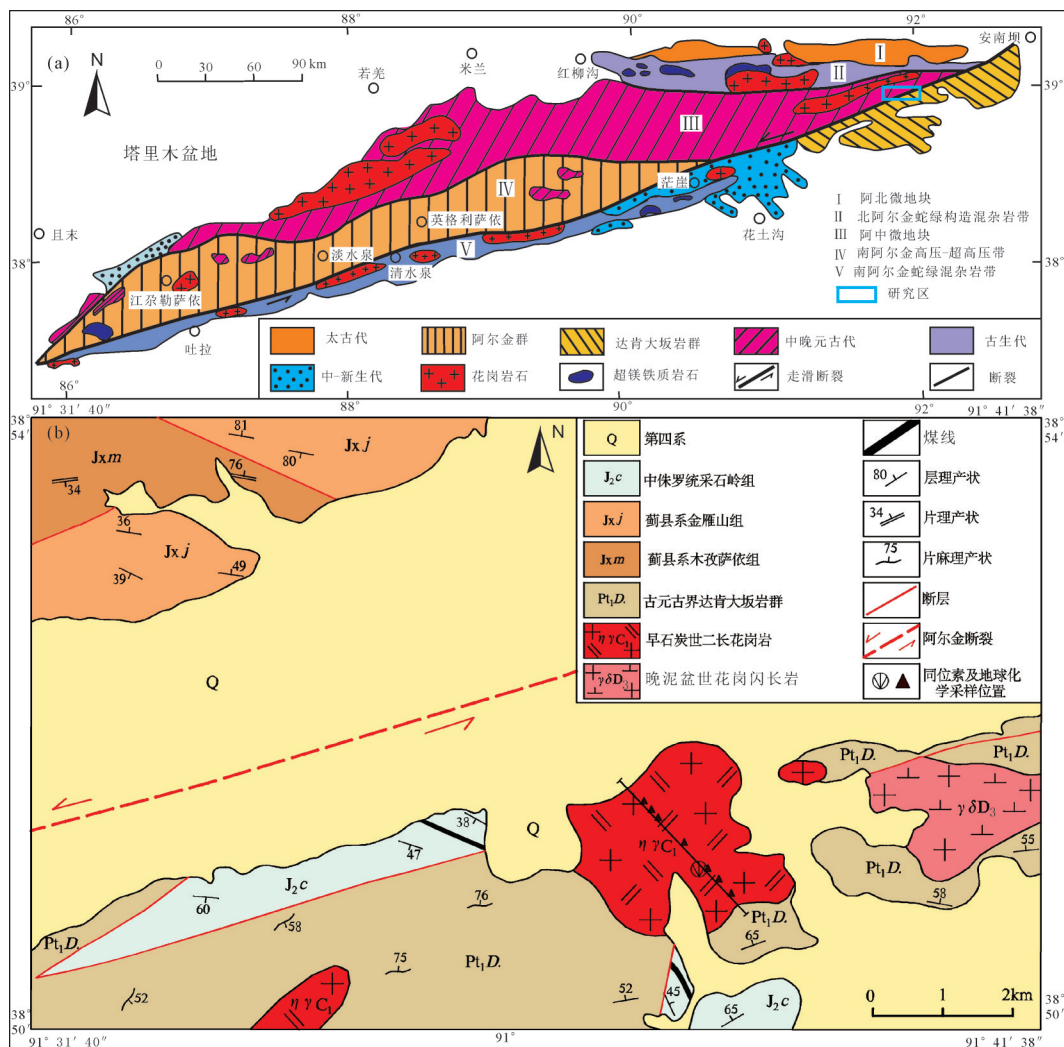


图1 阿尔金造山带地质构造图(a, 据吴才来等, 2016)和研究区地质简图(b)

Fig. 1 Geological and tectonic map of Altun orogenic belt (a, after Wu Cailai et al., 2016) and sketch map of Datonggou area (b)

断裂岩石碎裂岩化。岩体北部受阿尔金走滑断裂控制,接触界面被第四系覆盖,南部与古元古界达肯大坂岩群呈侵入接触,岩体中发育大理岩捕虏体(图2b)。二长花岗岩:浅肉红色,花岗结构(图2c),碎裂花岗结构(2d),块状构造。主要由钾长石(35%)、斜长石(30%)、石英(25%)、白云母(4%)、黑云母(4%)和铁质(约2%)组成,副矿物主要为磷灰石和少量锆石,含量小于1%。钾长石主要为条纹长石和微斜长石,多呈自形板柱状,微斜长石发育格子双晶,钾长石与石英交生形成显微文象结构;斜长石呈半自形柱状至他形粒状,发育聚片双晶;石英呈他形粒状,波状消光;白云母呈他形片状,最高干涉色Ⅱ级蓝绿;黑云母,强烈蚀变,多数绿泥石化,局部可见一组极完全解理;铁质多呈他形粒状

或隐晶质土状,浸染状或沿裂隙分布。

### 3 分析测试方法

岩石地球化学分析在中国地质科学院国家地质实验测试中心完成。主量测试采用X-荧光光谱法(XRF),测试仪器为3080E型X-荧光光谱仪,其中FeO采用容量滴定法。微量和稀土元素检测仪器为Excell型等离子质谱(ICP-MS)。

锆石分选在廊坊区域地质调查研究院进行,将样品破碎至约100 μm,先用磁法和重液分选,然后在双目镜下手工挑选,将晶形好且无明显包裹体及裂隙的锆石作为本次锆石测年的对象。首先将锆石颗粒粘在双面胶上,然后用无色透明的环氧树脂固定,待环氧树脂充分固化后,对其表面进行抛光

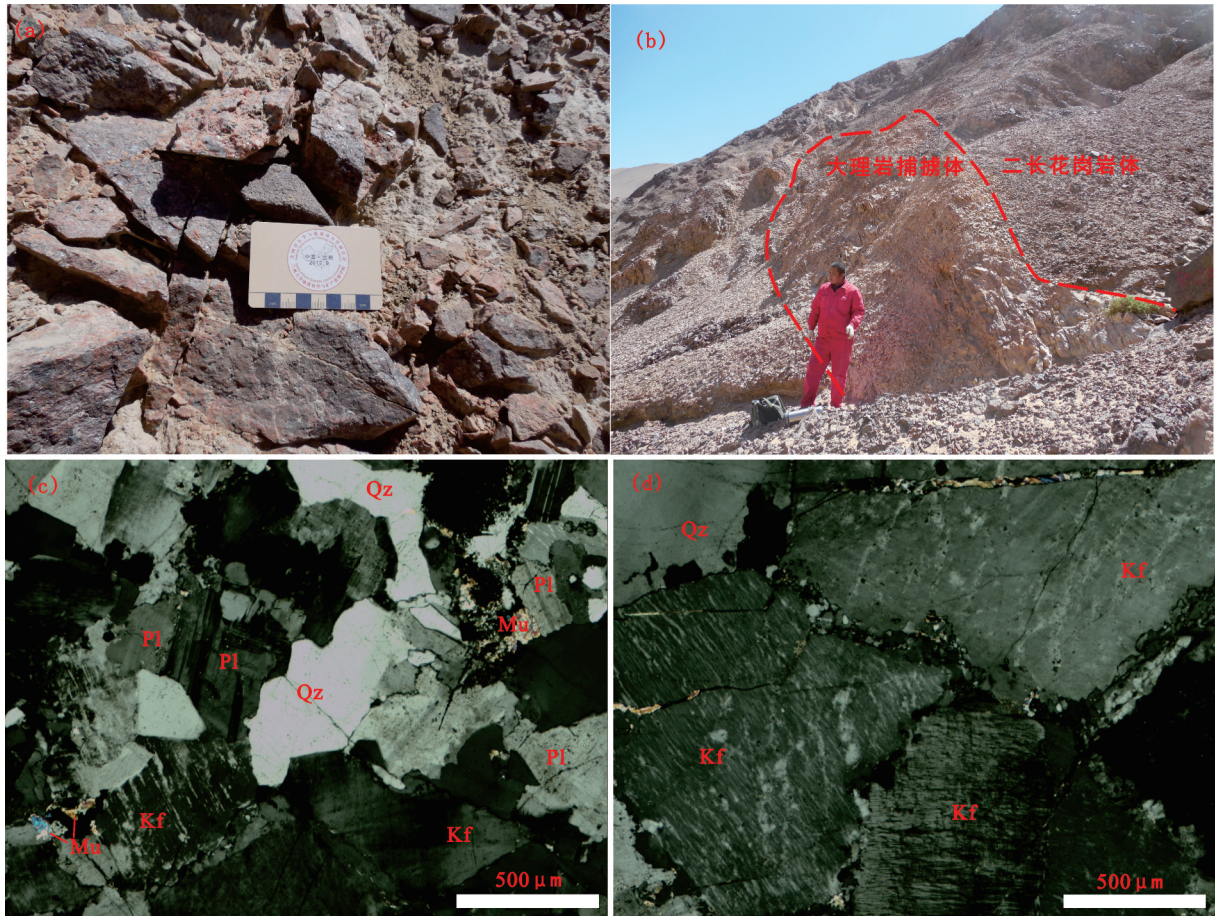


图2 二长花岗岩野外及典型结构显微照片

Fig.2 Outcrop photos and micrographs showing typical textures of the granitic plutons

至锆石内部暴露。锆石的阴极发光照相在西北大学大陆动力学国家重点实验室扫描电镜加载阴极发光仪上完成。锆石原位U-Pb同位素年龄分析在西北大学大陆动力学国家重点实验室的LA-ICP-MS仪器上用标准测定程序进行。分析仪器为Elan 6100DRC型四极杆质谱仪和Geolas 200M型激光剥蚀系统,激光器为193 nm ArF准分子激光器。激光束斑直径为30 μm,剥蚀深度为20~40 μm。锆石年龄采用标准锆石91500和GJ-1作为外部标准物质,元素含量采用NIST610作为外部标准物质。选择<sup>29</sup>Si作为内标来消除激光能量在点分析过程中和分析点之间的漂移。数据处理采用Glitter(ver4.0)程序,年龄谐和图和加权平均年龄计算及绘制均采用Isoplot3(2006),详细分析步骤和数据处理方法以及仪器工作参数等见参考文献(柳小明等,2002;袁洪林等,2003)。

## 4 测试结果

### 4.1 锆石U-Pb年代学

二长花岗岩(样品编号为PM017-1),采样点的坐标为北纬38°51.2';东经91°38.3'。样品中锆石颜色为浅黄色至无色,半透明,形态大部分呈自形长柱状,少量为棱角柱状,长50~250 μm,长宽比为2:1~3:1,锆石振荡环带清晰(图3)。CL图像显示,锆石主要可以分为两类:一类为具有继承核结构的锆石(3、8、9、15、16、20、24),继承核呈暗色或浅色不规则状,可能为部分熔融过程中原岩锆石的残留;另一类为无继承核结构的锆石,锆石具有清晰的振荡环带。为了研究锆石的形成年龄,本次工作所有测点均选在锆石结晶时生成的环带部位,此次共完成了24颗锆石的24个测点分析,分析结果见表1。所有测点均具有较高的Th、U含量(Th:  $81 \times 10^{-6} \sim$

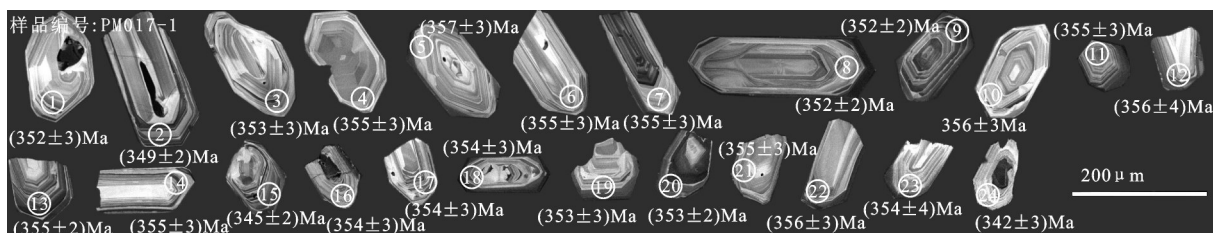


图3 二长花岗岩锆石CL图像及U-Pb年龄分析点

Fig. 3 CL images of zircons from monzonite granite and the points for U-Pb analysis

表1 二长花岗岩LA-ICP-MS 锆石U-Pb 同位素分析结果  
Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Pb data of the monzonite granite

测点编号	元素含量/ $10^{-6}$			同位素比值					同位素年龄/Ma				
	$^{232}\text{Th}$	$^{238}\text{U}$	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$1\sigma$
PM017-1-1	169.95	256.49	0.7	0.05439	0.00142	0.42111	0.01026	0.05615	0.00045	357	7	352	3
PM017-1-2	254.57	533.7	0.5	0.05982	0.00113	0.45901	0.00759	0.05565	0.00038	384	5	349	2
PM017-1-3	171.1	267.49	0.6	0.05507	0.00126	0.42773	0.00892	0.05633	0.00041	362	6	353	3
PM017-1-4	152.33	306.49	0.5	0.05574	0.00136	0.43548	0.00981	0.05667	0.00044	367	7	355	3
PM017-1-5	122.53	201.18	0.6	0.05263	0.00163	0.41281	0.01212	0.05689	0.0005	351	9	357	3
PM017-1-6	129.6	213.48	0.6	0.057	0.00153	0.44536	0.01113	0.05666	0.00046	374	8	355	3
PM017-1-7	112.87	206.98	0.5	0.05551	0.00164	0.43283	0.01202	0.05655	0.00048	365	9	355	3
PM017-1-8	176.97	250.72	0.7	0.05383	0.00117	0.41616	0.00825	0.05607	0.0004	353	6	352	2
PM017-1-9	491.3	767.94	0.6	0.05585	0.00088	0.43247	0.00564	0.05616	0.00035	365	4	352	2
PM017-1-10	106.07	189.52	0.6	0.0566	0.0017	0.44249	0.0125	0.0567	0.00049	372	9	356	3
PM017-1-11	113.98	223.06	0.5	0.05464	0.00172	0.42628	0.01268	0.05658	0.00051	361	9	355	3
PM017-1-12	80.98	143.31	0.6	0.05909	0.00218	0.46248	0.01632	0.05677	0.00059	386	11	356	4
PM017-1-13	511.02	633.35	0.8	0.05726	0.00101	0.44658	0.00681	0.05656	0.00037	375	5	355	2
PM017-1-14	186.9	243.14	0.8	0.05744	0.00165	0.44792	0.01205	0.05656	0.00048	376	8	355	3
PM017-1-15	603.74	696.28	0.8	0.05515	0.00095	0.41758	0.00614	0.05491	0.00035	354	4	345	2
PM017-1-16	149.9	217.05	0.7	0.05869	0.00193	0.45624	0.01424	0.05638	0.00054	382	10	354	3
PM017-1-17	244.66	297.61	0.8	0.05707	0.00157	0.4447	0.01146	0.05652	0.00047	374	8	354	3
PM017-1-18	268.09	322.86	0.8	0.05648	0.00148	0.43909	0.01068	0.05638	0.00045	370	8	354	3
PM017-1-19	222.44	321.45	0.7	0.05732	0.00148	0.44445	0.01063	0.05624	0.00045	373	7	353	3
PM017-1-20	645.42	1103.83	0.6	0.0554	0.00083	0.43034	0.00524	0.05633	0.00034	363	4	353	2
PM017-1-21	131.13	176.87	0.7	0.05919	0.00195	0.46156	0.01439	0.05656	0.00053	385	10	355	3
PM017-1-22	213.34	312.19	0.7	0.05525	0.00146	0.43185	0.01059	0.05669	0.00045	365	8	356	3
PM017-1-23	110.44	222.05	0.5	0.06063	0.00234	0.47208	0.01737	0.05647	0.00061	393	12	354	4
PM017-1-24	98.2	169.82	0.6	0.06246	0.00185	0.46932	0.01306	0.05449	0.00047	391	9	342	3

$645 \times 10^{-6}$ ; U:  $143 \times 10^{-6} \sim 1104 \times 10^{-6}$ ), Th/U 比值为 0.48~0.87, 均大于 0.4, 具有典型的岩浆锆石的特点 (Vavra et al, 1999; Hoskin et al, 2003; 吴元保等, 2004)。测点 15 和 24 的  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄值为 345Ma 和 342Ma, 明显偏离谐和曲线, 考虑剔除, 因此不参与加权平均年龄的计算。其余 22 个测点均位于谐和线及其附近区域 (图 4a), 其  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄值比较集中, 介于  $(349 \pm 2) \text{ Ma} \sim (357 \pm 3) \text{ Ma}$ , 加权平均年龄为  $(353.7 \pm 1.1) \text{ Ma}$  (MSWD=0.44) (图 4b), 解释为二长花岗岩的结晶年龄。

#### 4.2 岩石地球化学

阿尔金中段大通沟花岗岩体主量元素测试结果见表 2, 稀土和微量元素分析结果见表 3。

全岩  $\text{SiO}_2$  含量变化在 74.5%~76.2%, MgO 的含量为 0.06%~0.25%, CaO 为 0.44%~1.19%,  $\text{FeO}^*$  的含量为 0.77%~1.43%,  $\text{TiO}_2$  的含量较低 0.03%~0.13%,  $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$  含量为 7.71%~8.29%, 在  $\text{SiO}_2 - (\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$  图解中样品落在花岗岩区域 (图 5a),  $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$  的值为 0.9~1.22; 里特曼指数  $\sigma$  为 1.84~2.16, 在  $\text{SiO}_2 - \text{K}_2\text{O}$  图解 (图 5b) 中, 样品均属高钾钙碱性系列; 碱度

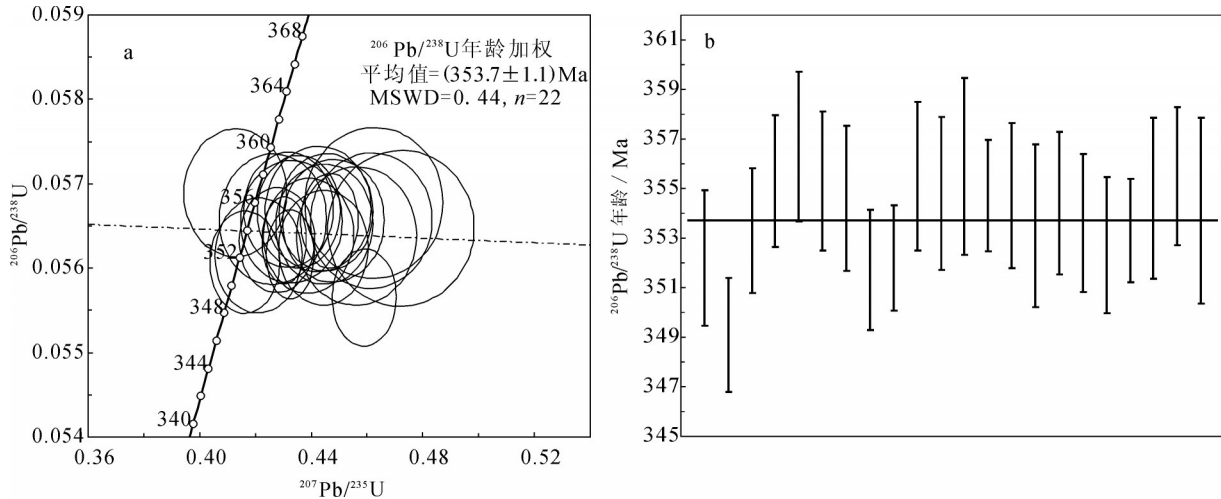


图4 二长花岗岩锆石U-Pb年龄谐和图(a)和加权平均年龄图(b)  
Fig.4 Zircon U-Pb concordia diagram (a) and weighted average age (b) for monzonite granite

表2 阿尔金中段大通沟花岗岩体主要元素地球化学组成(%)

Table 2 Major element compositions of the Datonggou granitic plutons from the middle section of Altun (%)

样品号	岩性	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	MnO	LOST	TOTAL	δ	A/CNK	A/NK
PM017-1	二长花岗岩	75.29	13.32	1.17	0.17	0.96	0.17	3.91	3.80	0.11	0.03	0.03	1.22	100.16	1.84	1.09	1.27
PM017-2	二长花岗岩	74.67	13.21	0.98	0.17	1.19	0.10	4.55	3.74	0.09	0.03	0.04	1.39	100.16	2.17	1.00	1.19
PM017-4	二长花岗岩	76.16	14.10	0.61	0.17	0.44	0.10	3.83	4.23	0.03	0.00	0.03	0.46	100.17	1.96	1.19	1.27
PM017-5	二长花岗岩	75.93	14.04	0.71	0.38	0.48	0.06	3.92	4.37	0.03	0.00	0.04	0.44	100.41	2.08	1.14	1.23
PM017-7	碎裂岩化二长花岗岩	74.48	14.15	1.17	0.29	0.79	0.25	3.91	4.25	0.11	0.03	0.03	0.83	100.29	2.11	1.12	1.26
PM017-8	碎裂岩化二长花岗岩	75.17	13.90	0.84	0.17	0.78	0.12	4.24	4.01	0.05	0.02	0.03	0.82	100.17	2.12	1.10	1.24
PM017/10	碎裂岩化二长花岗岩	75.71	12.62	0.94	0.50	0.95	0.16	3.82	3.96	0.13	0.02	0.05	1.00	99.85	1.85	1.02	1.19

率为3.17~3.69; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>含量在12.62%~14.15%之间, 铝饱和指数A/CNK为1.0~1.19, 属过铝质-强过铝质花岗岩(图6)。岩石主量元素总体表现为高硅, 中高等Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Na<sub>2</sub>O和K<sub>2</sub>O, 低MgO, 铝饱和指数A/CNK多数大于1.1, CIPW标准矿物计算结果中刚玉(C)含量大于1%, 总体表现出与S型花岗岩的地球化学特征。

岩石的稀土总量为85.7×10<sup>-6</sup>~153.2×10<sup>-6</sup>, 平均为111×10<sup>-6</sup>, (La/Yb)<sub>N</sub>整体较高, 为3.53~10.99, 两个样品为1.90~1.95, LREE/HREE=3.52~11.9, 显示轻稀土元素富集, 重稀土元素亏损, (Gd/Yb)<sub>N</sub>=0.77~1.54, 重稀土平缓, Dy、Ho含量相对亏损, Y/Yb=6.62~7.63, 接近10, 暗示角闪石可能为源区的残留相(葛小月等, 2002)。具有强烈的负铈异常, δEu=0.03~0.59, 暗示源区可能有斜长石的残留, 球粒陨石标准化配分模式图(图7a), 表现为右倾型。原始

地幔标准化微量元素蛛网图中(图7b), 岩石明显富集大离子亲石元素Rb、Th、U、K, 而高场强元素Ba、Nb、Sr、P和Ti明显亏损。

## 5 讨论

### 5.1 花岗岩源区

近年来对过铝质花岗岩的研究中, 普遍接受的观点是它们的源区虽具有多样性, 但变质沉积岩(如泥质岩、砂屑岩或杂砂岩等)是主要的源区(Chappell et al, 1992; Harris et al, 1992; Williamson et al, 1996; Sylvester, 1998)。阿尔金山中段大通沟花岗岩体的A/CNK为1.0~1.19, 属过铝质-强过铝质系列, 花岗岩的K/Rb比值(174~333)和La/Nb的平均比值2.77分别与地壳的相应值(150~350)和2.2非常接近(Barth et al, 2000; Dostal et al, 2000), 表明岩石源于地壳, 在Nb/Y-Th/Y图解(图8a)中所有样品

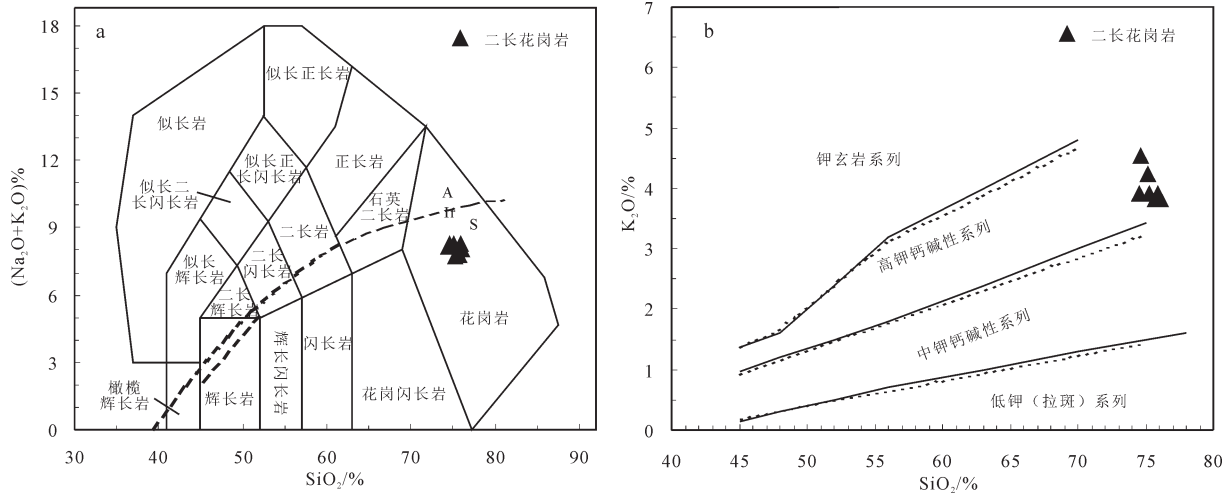


图5 阿尔金中段大通沟花岗岩 TAS 图解(a)和 SiO<sub>2</sub>-K<sub>2</sub>O 图解(b);(a,据 Cox et al, 1979; b,据 Rickwood, 1989; Ir-Irvine 岩石系列分界线; A-碱性系列; S-亚碱性系列)

Fig.5 TAS classification diagrams (a) and K<sub>2</sub>O-SiO<sub>2</sub> (b) plots of the Datonggou granitic plutons from the Middle Section of Altun; A-alkaline series; S- Subalkalic series (a, after Cox et al., 1979; b, after Rickwood, 1989)

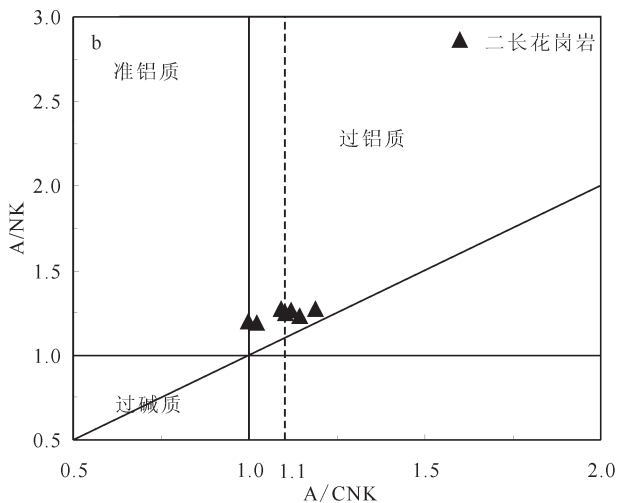


图6 阿尔金中段大通沟花岗岩 A/NK-A/CNK 图解(据 Peccerillo et al, 1976)

Fig.6 A/NK-A/CNK diagrams of the Datonggou granitic plutons from the middle section of Altun (after Peccerillo et al., 1976)

落在大陆上地壳的上方区域,反映它们起源于上地壳。Sylvester 研究了全球具有代表性的 5 个褶皱带的强过铝质花岗岩,提出  $w(\text{SiO}_2)$  值在 67%~77% 的强过铝质花岗岩,其  $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$  比值反映其源区成分特征(Sylvester, 1998)。由砂岩(或正变质岩)部分熔融形成的花岗质熔体的  $w(\text{CaO})/w(\text{Na}_2\text{O})$  值高于由泥岩部分熔融形成的熔体。泥岩生成的过铝

质花岗岩中的  $w(\text{CaO})/w(\text{Na}_2\text{O})$  值一般小于 0.3,而砂屑岩生成的过铝质花岗岩的  $w(\text{CaO})/w(\text{Na}_2\text{O})$  值一般大于 0.3。阿尔金山中段大通沟花岗岩体的  $w(\text{CaO})/w(\text{Na}_2\text{O})$  值介于 0.1~0.25,仅一个样品为 0.32,在  $\text{Molar}((\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})/(\text{FeO}^*+\text{MgO}+\text{TiO}_2)-(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}+\text{MgO}+\text{FeO}^*+\text{TiO}_2)(\text{wt}\%))$  图解(图 8b)中,所有样品落在变杂砂熔体和变泥岩熔体区域,均反映出其岩浆源区岩石成分为砂屑岩和泥岩。综上,阿尔金山中段大通沟花岗岩的源岩为上地壳的变杂砂岩和变泥质岩类。

### 5.2 岩石形成的温压条件

研究表明,温度升高过程中,如石榴子石、铝硅酸盐和斜长石相对稳定,而黑云母和钛铁矿等含钛矿物相对易分解,使进入熔体的 Ti 相对增多,因此  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$  比值的大小可以反映部分熔融温度的高低。当  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2 > 100$  时,其熔融温度小于 875℃;  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2 < 100$  时,其熔融温度大于 875℃(Sylvester, 1998);本文阿尔金山中段大通沟花岗岩  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$  比值介于 124~516,仅一个样品为 97,表明其熔融温度小于 875℃。

一般认为花岗岩大多是绝热上升就位的,在此过程中温度变化慢而压力变化较快,所以岩浆早期结晶时的温度也可以近似代表岩浆起源时的温度(吴福元等, 2007)。锆石广泛存在于花岗质岩石中,

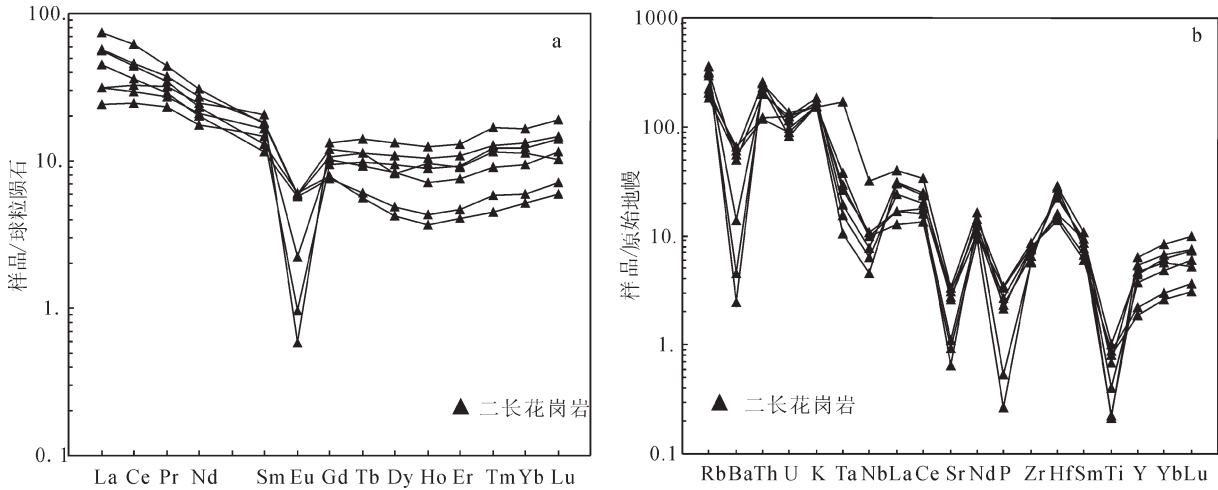


图7 阿尔金中段大通沟花岗岩体球粒陨石标准化稀土元素球粒陨石标准化稀土配分图(a, 标准化值据 Sun et al, 1989)和原始地幔标准化微量元素蛛网图(b, 标准化值据 Sun et al, 1989)

Fig.7 Chondrite-normalized REE patterns ( a ,normalizing values after Sun et al., 1989) and primitive mantle normalized trace element abundances of the Datonggou granitic plutons ( b ,normalizing values after Sun et al., 1989)

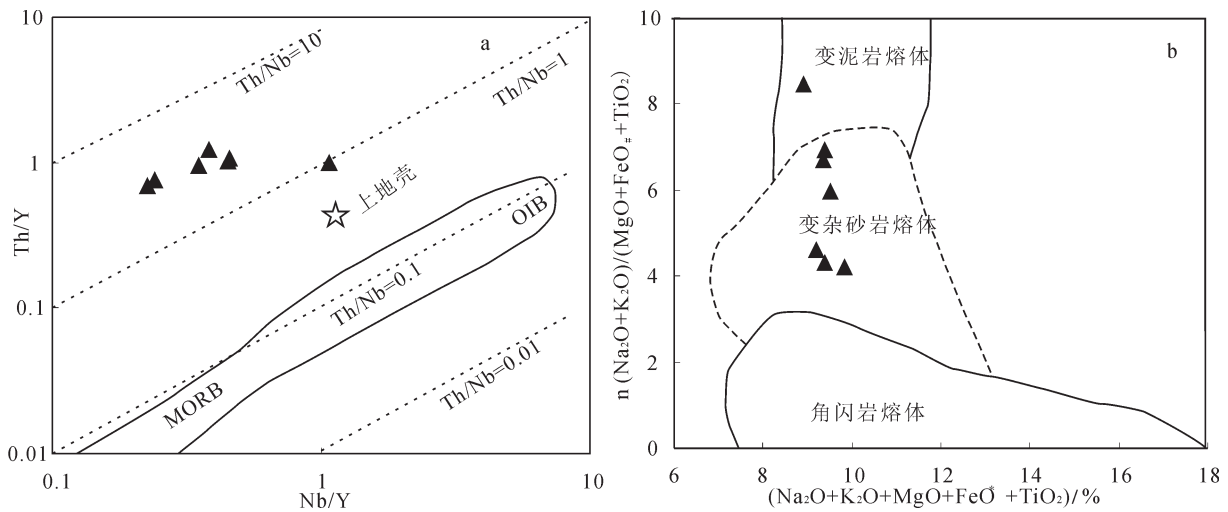


图8 阿尔金山中段大通沟花岗岩体源区判别图(a, 据 Boztug et al, 2007; b, 据 Altherr et al, 2002)

Fig.8 Source region discrimination diagrams of the Datonggou granitic plutons from the middle section of Altun (a, after Boztug et al., 2007; b, after Altherr et al., 2002)

锆石的 Zr 饱和温度计是限定地壳深熔成因的花岗岩的重要工具(Watson et al, 1983)。锆石是花岗质岩浆体系中较早结晶的副矿物,因而可以认为锆石饱和温度可近似代表花岗质岩石近液相线的温度(King et al, 1997)。锆石中 Zr 的分配系数对温度十分敏感,而其他因素对其没有明显影响(Miller et al, 2003), Watson 等 (1983)依据 Zr 在岩石的特性,建立了 Zr 溶解度、温度和岩浆主要元素组成之间的关系:  $\ln D_{Zr}^{zircon/melt} = \{-3.8 - [0.85(M-1)]\} + 12900/T$ 。

Miller (2003)等的研究表明如果岩浆中 Zr 不饱和, Zr 饱和温度计所给出的 Zr 饱和温度 ( $T_{Zr}$ ) 为初始岩浆温度的下限;而如果岩浆中 Zr 达到饱和状态,所给出的 Zr 饱和温度为初始岩浆温度的上限,并重新建立了锆饱和和地质温度计的计算方程:  $T_{Zr} = 12900/[2.95 + 0.85M + \ln(496000/Zr_{r,melt})] - 273.15$  其中  $M=(Na + K + 2Ca)/(Si \times Al)$ , 数值为全岩 Si、Al、Fe、Mg、Ca、Na、K、P 元素阳离子数归一化后各元素的阳离子数数值。根据上述公式演算(表4), 获得阿



表3 阿尔金山中段大通沟岩体微量元素分析结果( $10^{-6}$ )  
Table 3 Trace element compositions of the Datonggou granitic plutons from the middle section of Altun ( $10^{-6}$ )

样品	PM017-1	PM017-2	PM017-4	PM017-5	PM017-7	PM017-8	PM017/10
岩性	二长花岗岩			碎裂岩化二长花岗岩			
La	20.7	20.92	8.778	11.55	16.4	11.54	27
Ce	41.85	43.99	23.52	31.02	34.65	28.19	59
Pr	4.735	5.167	3.171	4.388	3.965	3.725	5.97
Nd	16.52	19.2	12.53	17.45	14.22	14.92	21.8
Sm	2.98	4.176	3.39	4.797	2.668	3.789	4.1
Eu	0.532	0.519	0.084	0.051	0.498	0.194	0.51
Gd	2.421	3.689	2.909	4.02	2.335	3.099	3.22
Tb	0.324	0.656	0.565	0.822	0.355	0.54	0.65
Dy	1.618	4.09	3.554	5.077	1.863	3.171	3.15
Ho	0.31	0.884	0.756	1.062	0.368	0.604	0.81
Er	1.006	2.72	2.312	3.259	1.154	1.865	2.25
Tm	0.16	0.456	0.431	0.599	0.208	0.32	0.41
Yb	1.273	3.262	3.046	4.115	1.469	2.328	2.78
Lu	0.226	0.559	0.536	0.729	0.27	0.439	0.39
Y	8.532	24.63	20.16	28.81	9.946	16.96	21.2
∑REE	103.19	134.92	85.74	117.75	90.37	91.68	153.24
Rb	129.6	204.2	187.7	225.2	117.5	197.4	141.0
Ba	457.1	343.5	31.3	17.1	389.9	96.6	420.0
Th	10.39	16.96	19.31	21.93	10.05	18.03	21.20
U	2.62	2.58	1.70	2.06	1.89	2.37	2.83
Ta	0.42	0.80	1.20	1.52	0.64	1.06	6.99
Nb	3.25	5.54	7.04	6.94	4.48	7.71	22.50
Sr	65.15	54.63	19.76	13.72	58.19	23.03	70.70
Zr	85.00	96.00	66.00	64.00	89.00	73.00	82.70
Hf	4.69	6.84	8.53	8.72	4.24	7.43	4.89

尔金山中段大通沟花岗岩初始岩浆温度为722~745°C(平均735°C),根据锆石CL图像,本文过铝质花岗岩中含有一定量的继承锆石,表明相应熔体达到了锆石饱和状态(Harrison et al, 2007),所以,锆饱和和温度计所给出的温度是初始岩浆温度的上限,也就是说,阿尔金山中段大通沟花岗岩体的岩浆的初始温度不超过722~745°C。

岩浆结晶时的压力已有较好的方法可以获得(Anderson, 1996),但对源岩发生部分熔融时的压力仍然知之甚少,目前一般根据源区残留相矿物组合估算源区的压力条件。花岗岩在熔融时主要受石榴子石、角闪石和斜长石等矿物的制约,根据实验岩石学资料,如果岩浆源区存在斜长石,则表明岩浆起源的压力较低(<10 kbar),但若源区出现石榴石,其形成的压力明显升高(>10 kbar)。Castillo (2006)总结了一些岩石地球化学特征与残留矿物之间的关系:高Sr(>300×10<sup>-6</sup>)和无负Eu异常表明

源区残留相中基本无斜长石;低Y(<15×10<sup>-6</sup>)、高Sr/Y(<20)、低Yb(<1.9×10<sup>-6</sup>)和高La/Yb(>20)是源区残留相中有石榴石的特征表现。本文阿尔金山中段大通沟花岗岩具有低Sr(13.7×10<sup>-6</sup>~70.7×10<sup>-6</sup>)和强烈的负Eu异常,表明源区残留相中具有斜长石;较高Y(17×10<sup>-6</sup>~28.8×10<sup>-6</sup>),两个样品为8.53×10<sup>-6</sup>和9.95×10<sup>-6</sup>),低Sr/Y(0.48~7.64),高Yb(2.33×10<sup>-6</sup>~4.12×10<sup>-6</sup>),两个样品为1.27×10<sup>-6</sup>和1.47×10<sup>-6</sup>),低La/Yb(2.81~16.26)均表明源区无石榴石残留,轻微的HREE亏损可能是残留相中含有角闪石(Xiong et al, 2005)。Rapp(1991)等的实验研究表明,玄武岩在0.8 GPa下发生部分熔融时残留相为角闪石+斜长石±斜方辉石(无石榴石),在1.6 GPa时,残留相为石榴石+单斜辉石±角闪石±斜长石±斜方辉石,表明残留相出现石榴子石时源区压力至少为1.6 GPa。阿尔金山中段大通沟花岗岩源区残留相为斜长石和角闪石,不含石榴石,因此估算源区压力应介于0.8~1.6 GPa。

### 5.3 构造背景及岩石成因

南阿尔金地区超高压岩石的峰期变质时代为504~475 Ma (Liu et al., 2012; 刘良等, 2007, 2013),该期陆壳深俯冲作用产生大量的花岗岩类,其时代集中在505~472 Ma (Kang et al., 2014; 康磊等, 2016a, 2016b; 孙吉明等, 2012),此次碰撞造山作用标志着南阿尔金洋盆的闭合。由于俯冲板片的折返,区内构造由碰撞挤压转换为伸展体制,导致高压—超高压变质岩石发生退变质作用,退变质作用的时代为462~451 Ma,板片折返过程中产生同折返或后碰撞花岗岩类,其时代为467~450 Ma (张若愚等, 2016; 马中平等, 2011; 曹玉婷等, 2010; 杨文强等, 2012; 康磊等, 2013, 2016a),与超高压变质岩石退变质的时代一致。碰撞后伸展阶段,高压—超高压变质岩石进一步发生角闪岩相退变质作用,并产生大量花岗质岩浆,其时代集中在426~385 Ma(刘良等, 2015; 吴才来等, 2014; 王超等, 2008; 吴锁平等, 2007)。

大量研究表明,南阿尔金俯冲碰撞杂岩带内存在多期花岗岩浆作用。如吴才来等(2016),将南阿尔金花岗岩划分为五期:第一期,时代约460 Ma,岩石具有I型花岗岩的属性,其形成可能与洋壳俯冲

有关;第二期,时代为450~435 Ma,岩石具有I型花岗岩的特征,可能形成于后碰撞环境;第三期,时代为411~385 Ma,具有A型花岗岩的属性,可能形成于板块碰撞后造山带块体均衡调整、伸展阶段;第四期,时代为352~343 Ma,岩石组合为花岗闪长岩+二长花岗岩,岩石具有S型花岗岩特征;第五期,时代为265 Ma,岩石具有I型花岗岩地球化学特征,第四期和第五期岩浆活动可能与造山带深部块体的拆沉作用有关。刘良等(2015),根据岩体野外地质和岩石学特征划分出四期岩浆作用:第一期,时代为 $\geq$ (517~500) Ma,形成于洋壳俯冲阶段,为先期俯冲洋壳部分熔融的产物;第二期,时代为501~496 Ma,形成于陆壳深俯冲阶段;第三期,时代为462~451 Ma,形成于俯冲陆壳发生板片断离并开始折返阶段;第四期,时代为426~385 Ma,形成于造山期后的伸展减薄阶段。杨文强等(2012)将南阿尔金古生代花岗质岩浆活动分为三期:第一期,时代约为500 Ma,形成于陆-陆碰撞造山作用阶段地壳加厚背景;第二期,时代为466~451 Ma,形成于深俯冲陆壳发生断离后的伸展背景,与超高压岩石退变质时代基本一致;第三期,时代为424~385 Ma,形成于造山期后的伸展背景。综合以上证据表明,南阿尔金地区中晚奥陶世以来已进入后碰撞伸展阶段,并持续到晚泥盆世。晚泥盆世以来,南阿尔金造山带深部块体发生拆沉作用,幔源物质的底侵引起中上地壳的部分熔融形成S型和I型花岗岩类。

研究区东部出露一套晚泥盆世基性杂岩体和中性花岗岩体,基性杂岩体岩性组合为角闪辉石岩+角闪辉长岩+闪长玢岩,中酸性花岗岩体岩性主要为石英闪长岩+花岗闪长岩+二长花岗岩,二者接触部位岩浆混合作用明显,基性杂岩体中角闪辉石岩的年龄为 $(377\pm 2)$  Ma<sup>①</sup>,中酸性花岗岩体中石英闪长岩的年龄为 $(380\pm 2)$  Ma<sup>①</sup>,晚泥盆世花岗岩体中发育暗色矿物包体,总体上具有高钾钙碱性、准铝质、I型花岗岩的特征,岩石源区主要为下地壳部分熔融,表明研究区晚古生代发生了幔源岩浆的底侵作用,而底侵的幔源岩浆可能是造山带深部块体的拆沉作用引起的。本文大通沟二长花岗岩体年龄为 $(353.7\pm 1.1)$  Ma,属早石炭世,岩石属过铝质—强过铝质,铝饱和指数A/CNK为1.0~1.19,平均为1.1,特征矿物出现白云母,CIPW标准矿物计算结果中刚

表4 锆石饱和温度计计算结果  
Table 4 Calculation results of zircon saturation thermometer

样品号	M/比值	Zr/10 <sup>-6</sup>	lnD <sub>Zr</sub>	T <sub>Zr</sub> /°C
PM017-1	1.29	85.00	8.67	741.25
PM017-2	1.42	96.00	8.55	742.15
PM017-4	1.19	66.00	8.92	728.15
PM017-5	1.24	64.00	8.96	722.34
PM017-7	1.28	89.00	8.63	745.40
PM017-8	1.29	73.00	8.82	729.35
PM017/10	1.37	82.70	8.70	733.79

玉(C)含量大于1%,以上特征表明大通沟二长花岗岩具有S型花岗岩的特征。岩石地球化学特征显示,其源岩为上地壳的变杂砂岩和变泥质岩类。结合区域地质背景,阿尔金山中段大通沟花岗岩体的成因机制为,造山带深部块体的拆沉作用,致使幔源物质的底侵,引起不同层次的地壳部分熔融,从而先后形成晚泥盆世中酸性花岗岩体和早石炭世大通沟二长花岗岩体。

## 6 结论

(1) LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年结果表明,阿尔金山中段大通沟花岗岩体的形成时代为 $(353.7\pm 1.1)$  Ma (MSWD=0.44), 属早石炭世。

(2) 二长花岗岩的锆石矿物结晶温度为722~745°C, 平均为735°C, 估算花岗岩源区形成的压力范围为0.8~1.6 GPa。

(3) 阿尔金山中段大通沟花岗岩体具有S型花岗岩的特征,为上地壳的变杂砂岩和变泥质岩部分熔融的产物,其成因与造山带根部块体的拆沉有关。

**致谢:** 感谢陕西省地质调查中心的各位同仁在野外工作过程中给予的帮助! 同时感谢匿名审稿人和编辑部老师在成稿过程中提出的宝贵意见!

### 注释

① 陕西省地质调查中心. 2016. 新疆阿尔金山阿克达坂南1:5万J46E007005等四幅区域地质调查报告。

### References

Altherr R, Siebel W. 2002. I-type plutonism in a continental back-arc setting: Miocene granitoids and monzonites from the central

- Aegean Sea, Greece[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 143(4): 397–415.
- Anderson J L. 1996. Status of thermobarometry in granitic batholiths[J]. Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth Sciences, 87(1/2):125–138.
- Barth M G, McDonough W F, Rndnick R I. 2000. Tracking the budget of Nb and Ta in the continental crust[J]. Chemical Geology, 165(3/4): 197–213.
- Boztug D, Harlavan Y, Arehart G B, Muharrem S, Necmettin A. 2007. K–Ar age, whole–rock and isotope geochemistry of A–type granitoids in the Divrigi–Sivas Region, eastern–central Anatoli, Turkey[J]. Lithos, 97(1/2):193–218.
- Cao Yuting, Liu Liang, Wang Chao, Yang Wenqiang, Zhu Xiaohui. 2010. Geochemical, zircon U–Pb dating and Hf isotope compositions studies for Tatelekebulake granite in South Altyn Tagh[J]. Acta Petrologica Sinica, 26(11):3259–3271 ( in Chinese with English abstract).
- Castillo P R. 2006. An overview of adakite petrogenesis[J]. Chinese Science Bulletin, 51(3):257–268.
- Chappell B W, White A J R. 1992. I– and S–type granites in the Lachlan Fold Belt[J]. Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth Sciences, 83(83): 1–26.
- Cox K G, Bell J D, Pankhurst R J. 1979. The Interpretation of Igneous Rocks [M]. London: Allen and Unwin, 30–450.
- Dostal J, Chatterjee A K. 2000. Contrasting behaviour of Nb/Ta and Zr/Hf ratios in a peraluminous granitic pluton Nova Scoyia, Canada[J]. Chemical Geology, 163(1/4): 207–218.
- Ge Xiaoyue Li Xianhua, Chen Zhigang, Li Wuping. 2002. Geochemistry and petrogenesis of Jurassic high Sr low Y granitoids in eastern China: Constrains on crustal thickness[J]. Chinese Science Bulletin, 47(6):474–480(in Chinese ).
- Harris N B W, Inger S. 1992. Trace element modelling of pelite–derived granites[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 110 (1): 46–56.
- Harrison T M, Watson E B, Aikman A B. 2007. Temperature spectra of zircon crystallization in plutonic rocks[J]. Geology, 35(7):635–638.
- Hoskin PWO, Schaltegger U. 2003. The composition of zircon and igneous and metamorphic petrogenesis[J]. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 53(1):27–62.
- Kang Lei, Liu Liang, Cao Yuting, Wangchao, Yang Wenqiang, Liang Sha. 2013. Geochemistry, zircon U–Pb age and its geological significance of the gneissic granite from the eastern segment of the Tatelekebulake composite granite in the South Altyn Tagh[J]. Acta Petrologica Sinica, 29 (9): 3039–3048 ( in Chinese with English abstract).
- Kang Lei, Liu Liang, Wang Chao, Cao Yuting, Yang Wenqiang, Wang Yawei, Liao Xiaoying. 2014. Geochemistry and zircon U–Pb dating of Changshagou adakite from the south Altyn UHPM terrane: Evidence of the partial melting of the lower crust[J]. Acta Geologica Sinica, 88(5):1454–1465.
- Kang Lei, Xiao Peixi Gao Xiaofeng, Xi Rengang, Yang Zaichao. 2016a. Chronology, geochemistry and petrogenesis of monzonitic granite and quartz diorite in Mangai area: Its inspiration to Early Paleozoic tectonic–magmatic evolution of the southern Altyn Tagh[J]. Acta Petrologica Sinica, 32(6):1731–1748 ( in Chinese with English abstract).
- Kang Lei, Xiao Peixi Gao Xiaofeng, Xi Rengang, Yang Zaichao. 2016b. Early Paleozoic magmatism and collision progenic process of the south Altyn[J]. Acta Geologica Sinica, 90(10): 2527–2550.
- King P L, White A J R, Chappell B W. 1997. Characterization and origin of aluminous A–type granites from the Lachlan fold belt, Southeastern Australia[J]. Journal of Petrology, 38(3): 371–391.
- Li Xiangmin, Ma Zhongping, Sun Jiming Xu Xueyi, Lei Yongxiao, Wang Lishe, Duan Xingxing. 2009. Characteristics and age study about the Yuemakeqi maficultramagmatic rock in the southern Altyn Fault[J]. Acta Petrologica Sinica, 25 (4): 862–872 ( in Chinese with English abstract).
- Liu Liang, Cao Yuting, Chen Danling, Zhang Chengli, Yang Wenqiang, Kang Lei, Liao Xiaoying. 2013. New progresses on the HP–UHP metamorphism in the South Altyn Tagh and the North Qinling[J]. Chinese Science Bulletin, 58: 2113–2123 ( in Chinese).
- Liu Liang, Che Zicheng, Wang Yan, Luo Jinhai, Chen Danling. 1999. The petrological characters and geotectonic setting of high–pressure metamorphic rock belts in Altun Mountains[J]. Acta Petrologica Sinica, 15(1): 57–64( in Chinese with English abstract).
- Liu Liang, Kang Lei, Cao Yuting, Yang Wenqiang. 2015. Early Paleozoic granitic magmatism related to the processes from subduction to collision in South Altyn, NW China[J]. Science China: Earth Sciences, 58(9): 1513–1522.
- Liu Liang, Wang Chao, Cao Yuting, Chen Danling, Kang Lei, Yang Wenqiang, Zhu Xiaohui. 2012. Geochronology of multi–stage metamorphic events: Constraints on episodic zircon growth from the UHP eclogite in the South Altyn, NW China[J]. Lithos, 136–139: 10–26.
- Liu Liang, Zhang Anda, Chen Danling, Yang Jiayi, Luo Jinhai, Wang Chao. 2007. Implications based on LA–ICP–MS zircon U–Pb ages of eclogite and its country rock from Jianggalesayi area, Altyn Tagh[J]. Earth Science Frontiers, 14 (1): 98–107 (in Chinese with English abstract).
- Liu Xiaoming, Gao Shan, Yuan Honglin, Hattendorf B, Gunther D, Chen Liang, Hu Shenghong. 2002. Analysis of 42 major and trace elements in glass standard reference materials by 193 nm LA–ICPMS[J]. Acta Petrologica Sinica, 18(3): 408–418 (in Chinese with English abstract).
- Ma Zhongping, Li Xiangmin, Xu Xueyi, Sun Jiming, Tang Zhuo, Du Tao. 2011. Zircon LA–ICP–MS U–Pb isotopic dating for Qingshuiquan layered maficultramafic intrusion southern Altun

- orogen, in northwestern China and its implication[J]. *Geology in China*, 38(4): 1071–1078(in Chinese with English abstract).
- Mattinson C G, Menold C A, Zhang J X, Bird D K. 2007. High—and ultrahigh—pressure metamorphism in the north Qaidam and south Altyn terranes, western China[J]. *International Geology Review*, 49(11): 969–995.
- Miller C F, McDowell S M, Mapes R W. 2003. Hot and cold granites? Implications of zircon saturation temperatures and preservation of inheritance[J]. *Geology*, 31(6):529–532.
- Peccerillo A, Taylor S R. 1976. Geochemistry of Eocene calc–alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, northern Turkey[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 58(1): 63–81.
- Rapp R P, Watson E B, Miller C F. 1991. Partial melting of amphibolite/eclogite and the origin of Archaean trondhjemitic and Tonalities[J]. *Precambrian Research*, 51(1/4): 1–25.
- Rickwood P C. 1989. Boundary lines within petrologic diagrams which use oxides of major and minor elements[J]. *Lithos*, 22(4): 247–263.
- Sun Jieming, Ma Zhongping, Tang Zhuo, Li Xiangmin. 2012. LA–ICP–MS zircon dating of the Yumuquan magma mixing granite in the southern Altyn Tagh and its tectonic significance[J]. *Acta Geologica Sinica*, 86(2): 247–257(in Chinese with English abstract).
- Sun S S, McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes[C] //Saunders A D, Norry M J. *Magmatism in Oceanic Basins*. London: Geological Society Special Publication, 42(1): 313–345.
- Sylvester P J. 1998. Post–collisional strongly peraluminous granites[J]. *Lithos*, 45(1/4): 29–44.
- Vavra G, Schmid R, Gebauer D. 1999. Internal morphology, habit and U–Th–Pb microanalysis of amphibolite–to–granulite facies zircons:geochronology of the Ivrea Zone (Southern Alps) [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 134(4):380–404.
- Wang Chao, Liu Liang, Zhang Anda, Yang Wenqiang, Cao Yuting. 2008. Geochemistry and petrography of Early Paleozoic Yusupuleke Tagh rapakivi–textured granite complex, South Altyn: An example for magma mixing[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 24(12): 2809–2819 ( in Chinese with English abstract).
- Watson E B, Harrison T M. 1983. Zircon saturation revisited: temperature and composition effects in a variety of crustal magma type[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 64(2): 295–304.
- Williamson B J, Shaw A, Downes H, Thirlwall M F. 1996. Geochemical constraints on the genesis of Hercynian two–mica leucogranites from the Massif Central, France[J]. *Chemical Geology*, 127(1/3):25–42.
- Wu Cailai, Gao Yuanhong, Lei Min, Qin Haipeng, Liu Chunhua, Li Mingze, B Ronald Frost, Joseph L Wooden. 2014. Zircon SHRIMP U–Pb dating, Lu–Hf isotopic characteristics and petrogenesis of the Palaeozoic granites in Mangya area, southern Altun, NW China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 30(8): 2297–2323(in Chinese with English abstract).
- Wu Cailai, Lei Min, Zhang Xin, Chen Hongjie, Wu Di, Li Tianxiao. 2016. Petrogenesis and zircon Lu–Hf isotopic characteristics of the granites from the southern Altun area, Northwest China[J]. *Geology in China*, 43(6): 1853–1883(in Chinese with English abstract).
- Wu Fuyuan, Li Xianhua, Yang Jinhui, Zheng Yongfei. 2007. Discussion on the petrogenesis of granites[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(6): 1217–1238(in Chinese with English abstract).
- Wu Suoping, Wu Cailai, Chen Qilong. 2007. Characteristics and tectonic setting of the Tula aluminous A–type granite at the south side of the Altyn Tagh fault, NW China[J]. *Geological Bulletin of China*, 26(10): 1385–1392 ( in Chinese with English abstract).
- Wu Yuanbao, Zheng Yongfei. 2004. Genesis of zircon and its constraints on interpretation of U–Pb age[J]. *Chinese Science Bulletin*, 49(16):1589–1604(in Chinese).
- Xiong X L, Adam J, Green TH. 2005. Rutile stability and rutile/melt HFSE partitioning during partial melting of hydrous basalt: Implications for TTG genesis[J]. *Chemical Geology*, 218(3–4): 339–359.
- Xu Zhiqin, Yang Jingsui, Zhang Jianxin, Jiang Mei, Li Haibing, Cui Junwen. 1999. A comparison between the tectonic units on the two sides of the Altun sinistral strike–slip fault and the mechanism of lithospheric shearing[J]. *Acta Geologica Sinica*, 73(3): 193–205 (in Chinese with English abstract).
- Yang Jingsui, Xu Zhiqin, Zhang Jianxin, Zhang Zeming, Liu Fulai, Wu Cailai. 2009. Tectonic setting of main high—and ultrahigh—pressure metamorphic belts in China and adjacent region and discussion on their subduction and exhumation mechanism[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(7): 1529–1560 (in Chinese with English abstract).
- Yang Wenqiang, Liu Liang, Ding Haibo, Xiao Peixi, Cao Yuting, Kang Lei. 2012. Geochemistry, geochronology and zircon Hf isotopes of the Dimunalike granite in South Altyn Tagn and its geological significance[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 28(12): 4139–4150 ( in Chinese with English abstract).
- Yuan Honglin, Wu Fuyuan, Gao Shan, Liu Xiaoming, Xu Ping, Sun Deyou. 2003. LA–ICP MS zircon U–Pb age and REE of Cenozoic pluton in NE China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 48(14): 1511–1520 ( in Chinese).
- Zhang Jianxin, Meng Fancong. 2005. Sapphirine – bearing high pressure mafic granulite and its implications in the south Altyn Tagh[J]. *Chinese Science Bulletin*, 50(3):265–269.
- Zhang Jianxin, Meng Fancong, Mattinson C G. 2007. Progress, controversies and challenge of studies on south Altyn Tagh–North Qaidam HP/UHP metamorphic belt[J]. *Geological Journal of Chinese Universities*, 13(3): 526–545 ( in Chinese with English

- abstract).
- Zhang Ruoyu, Zeng Zhongcheng, Zhu Weipeng, Chen Ning, Zhao Jianglin, Li Qi, Wang Qinwei, Rao Jingwen. 2016. LA-ICP-MS Zircon U-Pb dating, geochemical features and their geological implications of Paxialayidang Plutons on the southern margin of Altyn Tagh[J]. *Geological Review*, 62(5): 1283-1299(in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 曹玉亭, 刘良, 王超, 杨文强, 朱小辉. 2010. 阿尔金南缘塔特勒克布拉克花岗岩的地球化学特征、锆石 U-Pb 定年及 Hf 同位素组成[J]. *岩石学报*, 26(11): 3259-3271.
- 葛小月, 李献华, 陈志刚, 李伍平. 2002. 中国东部燕山期高 Sr 低 Y 型中酸性火成岩的地球化学特征及成因: 对中国东部地壳厚度的制约[J]. *科学通报*, 47(6): 474-480.
- 康磊, 刘良, 曹玉亭, 王超, 杨文强, 梁莎. 2013. 阿尔金南缘塔特勒克布拉克复式花岗岩体东段片麻状花岗岩的地球化学特征、锆石 U-Pb 定年及其地质意义[J]. *岩石学报*, 29(9): 3039-3048.
- 康磊, 校培喜, 高晓峰, 奚仁刚, 杨再朝. 2016a. 茫崖二长花岗岩、石英闪长岩的年代学、地球化学及岩石成因: 对阿尔金南缘早古生代构造-岩浆演化的启示[J]. *岩石学报*, 32(6): 1731-1748.
- 康磊, 校培喜, 高晓峰, 奚仁刚, 杨再朝. 2016b. 阿尔金南缘早古生代岩浆作用及碰撞造山过程[J]. *地质学报*, 90(10): 2527-2550.
- 李向民, 马中平, 孙吉明, 徐学义, 雷永孝, 王立社, 段星星. 2009. 阿尔金断裂南缘约马克其镁铁-超镁铁岩的性质和年代学研究[J]. *岩石学报*, 25(4): 862-872.
- 刘良, 曹玉亭, 陈丹玲, 张成立, 杨文强, 康磊, 廖小英. 2013. 南阿尔金与北秦岭高压-超高压变质作用研究新进展[J]. *科学通报*, 58: 2113-2123.
- 刘良, 车自成, 王焰, 罗金海, 陈丹玲. 1999. 阿尔金高压变质岩带的特征及其构造意义[J]. *岩石学报*, 15(1): 57-64.
- 刘良, 康磊, 曹玉亭, 杨文强. 2015. 南阿尔金早古生代俯冲碰撞过程中的花岗质岩浆作用[J]. *中国科学: 地球科学*, 45(8): 1126-1137.
- 刘良, 张安达, 陈丹玲, 杨家喜, 罗金海, 王超. 2007. 阿尔金江孜勒萨石榴辉岩和围岩锆石 LA-ICP-MS 微区原位定年及其地质意义[J]. *地学前缘*, 14(1): 98-107.
- 柳小明, 高山, 袁洪林, Hattendorf B, Gunther D, 陈亮, 胡圣红. 2002. 193nm LA-ICPMS 对国际地质标准参考物质中 42 种主量和微量元素的分析[J]. *岩石学报*, 18(3): 408-418.
- 马中平, 李向民, 徐学义, 孙吉明, 唐卓, 杜涛. 2011. 南阿尔金山清水泉镁铁-超镁铁质侵入体 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素定年及其意义[J]. *中国地质*, 38(4): 1071-1078.
- 孙吉明, 马中平, 唐卓, 李向民. 2012. 阿尔金南缘鱼目泉岩浆混合花岗岩 LA-ICP-MS 测年与构造意义[J]. *地质学报*, 86(2): 247-257.
- 王超, 刘良, 张安达, 杨文强, 曹玉亭. 2008. 阿尔金造山带南缘岩浆混合作用: 玉苏普阿勒克塔格岩体岩石学和地球化学证据[J]. *岩石学报*, 24(12): 2809-2819.
- 吴才来, 郜源红, 雷敏, 秦海鹏, 刘春花, 李名则, B Ronald Frost, Joseph L Wooden. 2014. 南阿尔金茫崖地区花岗岩类锆石 SHRIMP U-Pb 定年、Lu-Hf 同位素特征及岩石成因[J]. *岩石学报*, 30(8): 2297-2323.
- 吴才来, 雷敏, 张昕, 陈红杰, 吴迪, 李天啸. 2016. 南阿尔金花岗岩锆石 Lu-Hf 同位素特征及岩石成因[J]. *中国地质*, 43(6): 1853-1883.
- 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[J]. *岩石学报*, 23(6): 1217-1238.
- 吴锁平, 吴才来, 陈其龙. 2007. 阿尔金断裂南侧吐拉铝质 A 型花岗岩的特征及构造环境[J]. *地质通报*, 26(10): 1385-1392.
- 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[J]. *科学通报*, 49(16): 1589-1604.
- 许志琴, 杨经绥, 张建新, 姜枚, 李海兵, 崔军文. 1999. 阿尔金断裂两侧构造单元的对比及岩石圈剪切机制[J]. *地质学报*, 73(3): 193-205.
- 杨经绥, 许志琴, 张建新, 张泽明, 刘福来, 吴才来. 2009. 中国主要高压-超高压变质带的大地构造背景及俯冲/折返机制的探讨[J]. *岩石学报*, 25(7): 1529-1560.
- 杨文强, 刘良, 丁海波, 校培喜, 曹玉婷, 康磊. 2012. 南阿尔金迪木那里克花岗岩地球化学、锆石 U-Pb 年代学与 Hf 同位素特征及其构造地质意义[J]. *岩石学报*, 28(12): 4139-4150.
- 袁洪林, 吴福元, 高山, 柳小明, 徐平, 孙德有. 2003. 东北地区新生代侵入体的锆石激光探针 U-Pb 年龄测定与稀土元素成分分析[J]. *科学通报*, 48(14): 1511-1520.
- 张建新, 孟繁聪, Mattinson C G. 2007. 南阿尔金-柴北缘高压-超高压变质带研究进展、问题及挑战[J]. *高校地质学报*, 13(3): 526-545.
- 张若愚, 曾忠诚, 朱伟鹏, 陈宁, 赵江林, 李琦, 王秦伟, 饶静文. 2016. 阿尔金造山带帕夏拉依岩体锆石 U-Pb 年代学、地球化学特征及地质意义[J]. *地质论评*, 62(5): 1283-1299.