

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2018.719>



北阿尔金野马泉二长花岗岩成因及其构造意义

郑 坤^{1,2}, 吴才来^{1*}, 郜源红¹, 郭文峰¹, 陈红杰¹, 吴 迪³, 高 栋¹

1. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037

2. 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871

3. 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083

摘要: 野马泉二长花岗岩为北阿尔金地区出露面积最大的花岗岩体, 为探讨其成因、形成环境及其与北阿尔金区域构造演化的关系, 对其进行了岩石学、地球化学、锆石 U-Pb 年代学及 Hf 同位素等方面的研究。研究表明, 野马泉岩体为中—粗粒等粒或似斑状二长花岗岩, 岩体侵位时代为 450~453 Ma。岩石具较高的 $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 比值为 1.72~2.29, 铝饱和指数 A/CNK 为 0.99~1.10, P_2O_5 与 SiO_2 含量呈负相关, 具 I 型花岗岩特征。轻稀土富集而重稀土亏损, 较弱的负 Eu 异常, 微量元素特征显示富集 Rb、Ba、Th、U、K 等元素, 相对亏损 Nb、Ta、P、Ti 等元素。锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 5.52~10.75, 二阶段模式年龄 $t_{\text{DM}2}$ 为 0.75~1.09 Ga, 其源岩可能主要是 0.75~1.09 Ga 的新生地壳(基性岩)。结合区域构造背景, 野马泉二长花岗岩体可能形成于同碰撞—后碰撞环境, 为造山带根部基性岩石部分熔融形成。

关键词: 二长花岗岩; 地球化学; U-Pb 年代学; Hf 同位素特征; 岩石成因; 北阿尔金。

中图分类号: P581

文章编号: 1000-2383(2018)04-1266-12

收稿日期: 2017-12-20

Petrogenesis and Tectonic Implications of Yemaquan Monzogranite from North Altyn

Zheng Kun^{1,2}, Wu Cailai^{1*}, Gao Yuanhong¹, Guo Wenfeng¹, Chen Hongjie¹, Wu Di³, Gao Dong¹

1. Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

2. School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China

3. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

Abstract: Yemaquan monzogranite pluton is the largest outcrop in North Altyn, with a medium-coarse grain and porphyritic texture. This paper aims to discuss the genesis and diagenesis environment of the monzogranite, and the tectonic evolution of North Altyn. Thus, it is necessary to study petrology, geochemistry, zircon U-Pb chronology and Hf isotope of the pluton. The zircon U-Pb age data suggest that the monzogranite was generated at 450–453 Ma. The rock shows significant features of I-type granite with high ratio of $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ (1.72–2.29), aluminum saturation index ($A/\text{CNK}=0.99–1.10$) and negative correlation between $\text{P}_2\text{O}_5\%$ and $\text{SiO}_2\%$. The REE pattern shows depletion of HREE, relative enrichment of LREE, and slightly negative Eu anomaly. In the primitive mantle-normalized trace-element diagram, the rock shows strong enrichment of Rb, Ba, Th, U, K and depletion of Nb, Ta, P, Ti. The values of $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ range in 5.52–10.75. The two-stage model ages ($t_{\text{DM}2}$) vary from 0.75 to 1.09 Ga. These characteristics indicate that the source rock was formed from the juvenile crust (basites). Considering the regional tectonic setting, it is concluded that the monzogranite was generated by partial melting of the basites at the root of the orogenic belt in the syn-collision to post-collision environment.

Key words: monzogranite; geochemistry; U-Pb chronology; Hf isotopic characteristics; petrogenesis; North Altyn.

基金项目: 中国地质调查局项目(Nos.121201102000150005-06, 12120115027001); 国家自然科学基金项目(No.41272079)。

作者简介: 郑坤(1989—), 男, 博士, 矿物学、岩石学、矿床学专业。ORCID: 0000-0003-4935-2157. E-mail: zhengkun163mail@163.com

* **通讯作者:** 吴才来, ORCID: 0000-0001-8933-7010. E-mail: wucailai@126.com

引用格式: 郑坤, 吴才来, 郜源红, 等, 2018. 北阿尔金野马泉二长花岗岩成因及其构造意义. 地球科学, 43(4): 1266–1277.

阿尔金造山带位于中国西北部,为柴达木盆地与塔里木盆地的地理分界,是一条复合造山带。北阿尔金位于该造山带的北部,区内主要出露蛇绿岩块、高压变质岩以及大量的中酸性侵入岩和火山岩。近年来的研究表明,北阿尔金西段的红柳沟蛇绿岩形成于早古生代,暗示北阿尔金地区早古生代曾存在洋盆(刘良,1999;吴峻等,2002;杨经绥等,2008),区内火山—沉积地层的研究也显示具有弧后洋盆性质(杨子江,2012)。北阿尔金红柳泉一带出露低温榴辉岩(513 ± 5 Ma)和蓝片岩(497 ± 10 Ma)等高压变质岩,暗示本区在早古生代发生过洋壳俯冲作用(张建新等,2007),东段地区发现许多与俯冲有关的火山岩(郝瑞祥等,2013;李松彬,2013),整个北阿尔金地区广泛出露与俯冲有关的中酸性侵入岩,这些岩体的年代学研究表明北阿尔金洋壳俯冲可能发生在 $514 \sim 460$ Ma(戚学祥等,2005;吴才来等,2007;康磊等,2011;韩凤彬等,2012;孟令通等,2016;Meng *et al.*, 2017)。而巴什考供盆地南北两侧 S 型花岗岩的研究,暗示本区 $450 \sim 430$ Ma 可能为同碰撞—碰撞后环境(吴才来等,2005, 2007; Wu *et al.*, 2009)。新近,北阿尔金西段红柳沟一带,发现了低 Mg 和高 Mg 两种不同类型的埃达克质花岗质岩石,两者形成时代分别为 $445 \sim 439$ Ma 和 $425 \sim 422$ Ma,暗示北阿尔金地区陆—陆碰撞和加厚可能发生在 $450 \sim 440$ Ma,挤压环境向伸展环境的转变可能发生在 $425 \sim 422$ Ma(Yu *et al.*, 2017)。

野马泉岩体是北阿尔金地区出露面积最大的花岗岩体,陈宣华等(2003)在阔什布拉克地区对该岩体进行了取样,将该岩体命名为阔什布拉克岩体,获得其年龄为 443 ± 5 Ma(测试方法为 TIMS),并与北阿尔金红柳沟蛇绿岩($508 \sim 524$ Ma,刘良,1999)及阿尔金西段榴辉岩(504 Ma,张建新等,1999)等进行年龄数据的对比,认为该岩体为板块俯冲作用晚期产物,是活动大陆边缘岩浆弧的根。但该结论缺乏岩石地球化学和同位素方面的约束,也与近期区域上的研究成果不一致(近期研究结果表明本区 450 Ma 左右可能为碰撞环境)。该岩体是何成因?形成于何种环境?为解决这些问题,笔者在野马泉地区对该岩体进行了野外调查和采样,试图在野外地质工作的基础上,从岩石学、地球化学、锆石 U-Pb 年代学及 Hf 同位素等方面对其进行研究,以探讨其成因及构造意义。

1 岩体地质及岩相学特征

阿尔金造山带长期以来经历了复杂的地质构造演化,是一条北东东向带状展布的复合造山带,自北向南依次可分为 5 个次级构造单元:阿北地块、北阿尔金蛇绿混杂岩带、中阿尔金地块、南阿尔金超高压变质带以及南阿尔金蛇绿混杂岩带(许志琴等,1999;刘良等,2009;杨文强等,2012;盖永升等,2015)。北阿尔金蛇绿混杂岩带地处阿北地块和中阿尔金地块之间(图 1a),呈东西向带状分布,混杂岩带内出露有蛇绿岩块、高压变质岩以及大量与俯冲有关的中酸性侵入岩和火山岩。野马泉二长花岗岩体出露于北阿尔金红柳沟—拉配泉蛇绿混杂岩带中段,位于巴什考供盆地以东,呈不规则椭圆状(图 1b),岩体出露面积达 600 多 km^2 ,为北阿尔金地区出露面积最大的花岗岩体。根据 $1:20$ 万巴什考供幅地质图(新疆维吾尔自治区地质局,1982; $1:20$ 万巴什考供幅地质图),其围岩主要是震旦系的变基性熔岩、砂岩、粉砂岩。岩体内部常见有浅肉红色细粒的花岗质脉体以及细粒闪长质暗色包体(图 2a),岩体边缘有时可见围岩捕掇体。

野马泉二长花岗岩体具有良好的岩相分异,岩体内部结构并不均一,呈中—粗粒等粒或似斑状结构(基质为中细粒),主要由石英、斜长石、钾长石、角闪石、黑云母等矿物组成(图 2b)。石英呈他形粒状,含量为 $25\% \sim 30\%$,有时可见蠕英结构;碱性长石主要为微斜长石,含量为 $20\% \sim 25\%$,可见格子状双晶,黏土化蚀变明显;斜长石绢云母化明显,含量为 $35\% \sim 40\%$;角闪石含量为 5% 左右;黑云母含量为 5% 左右,有绿泥石化现象;副矿物有锆石、磷灰石、榍石等。

2 分析测试方法

岩石粉末碎样、化学全分析工作分别在河北廊坊区调院和河北廊坊物化探研究所实验室完成,主量元素分析使用 X 荧光光谱仪 3080E 进行分析测试,分析的相对标准偏差小于 $2\% \sim 8\%$ 。稀土元素 La、Ce、Pr、Nd、Sm、Eu、Gd、Tb、Dy、Ho、Er、Tm、Yb、Lu、Y 和微量元素 Cu、Pb、Th、U、Hf、Ta、Sc、Cs、V、Co、Ni 使用等离子质谱(ICP-MS)Excel 进行测试。而微量元素 Sr、Ba、Zn、Rb、Nb、Zr、Ga 等用 X 荧光光谱仪 2100 进行分析测试,分析的相对标准

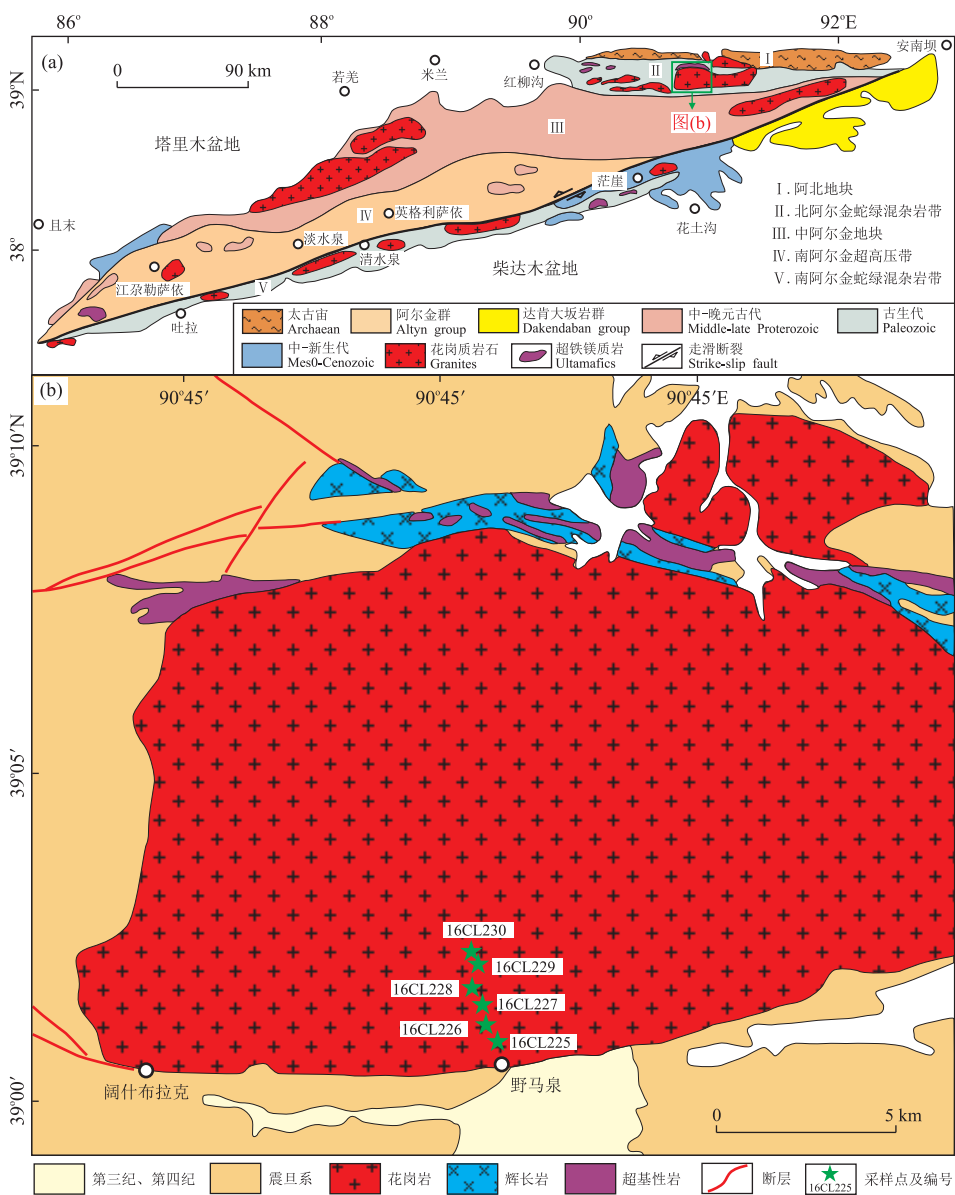


图 1 北阿尔金巴什考供盆地以东的研究区地质简图

Fig.1 Geological sketch map of the study area at the east of Bashikaogong basin, North Altyn

图 a 据吴才来等(2016)修改

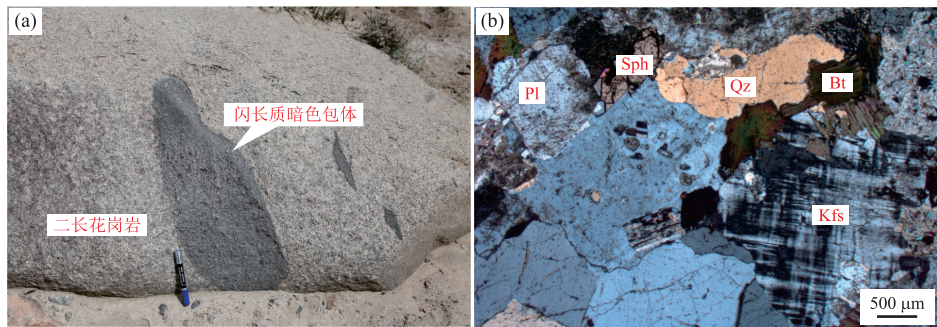


图 2 二长花岗岩野外露头照片和显微照片(正交偏光)

Fig.2 Field photograph and micrograph of the monzogranite

Qz.石英;Pl.斜长石;Kfs.钾长石;Bt.黑云母;Sph.榍石.据 Whitney and Evans(2010)

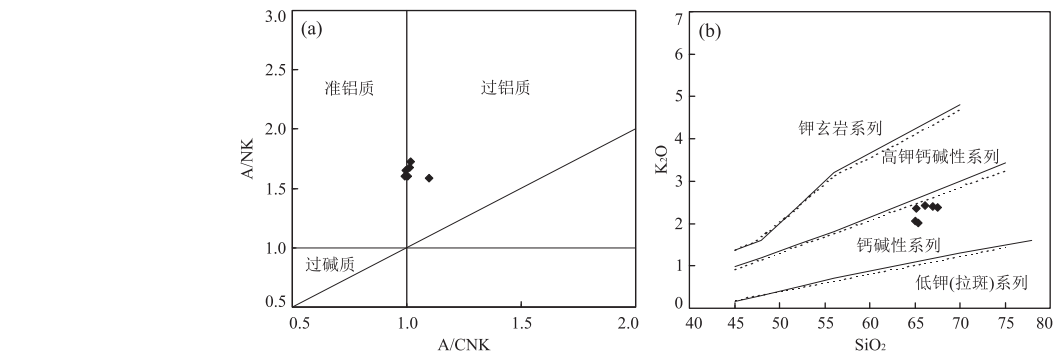


图 3 二长花岗岩的 A/CNK-A/NK 图解(a)和 K₂O-SiO₂ 图解(b)

Fig.3 A/NK-A/CNK diagram (a) and K₂O-SiO₂ plots of the monzogranite (b)

图 a 据 Maniar and Piccoli(1989);图 b 据 Rickwood(1989)

表 1 二长花岗岩主量元素(%)和微量元素(10⁻⁶)数据

Table 1 Major (%) and trace element (10⁻⁶) compositions of the monzogranite

样号	16CL225	16CL226	16CL227	16CL228	16CL229	16CL230
SiO ₂	66.94	65.39	65.17	65.04	66.11	67.48
TiO ₂	0.55	0.55	0.58	0.59	0.57	0.53
Al ₂ O ₃	15.99	16.70	15.92	16.25	15.27	15.56
Fe ₂ O ₃	1.35	1.36	1.54	1.28	1.44	1.29
FeO	2.14	2.05	1.98	2.24	2.02	1.85
MnO	0.07	0.08	0.07	0.08	0.07	0.07
MgO	1.80	1.81	1.77	1.80	1.76	1.66
CaO	2.46	3.68	3.51	3.49	3.14	3.31
Na ₂ O	4.54	4.58	4.30	4.55	4.18	4.32
K ₂ O	2.41	2.00	2.36	2.06	2.43	2.38
P ₂ O ₅	0.18	0.19	0.19	0.20	0.19	0.17
LOI	1.39	1.45	2.44	2.27	2.61	1.24
Total	99.83	99.84	99.84	99.85	99.79	99.85
A/CNK	1.10	1.02	0.99	1.01	1.00	0.99
La	36.99	29.04	37.36	29.81	31.15	28.65
Ce	66.21	60.68	76.60	68.11	67.76	60.18
Pr	7.67	7.14	8.51	8.60	7.85	7.19
Nd	28.54	25.74	29.84	31.70	28.60	25.44
Sm	5.38	4.78	5.37	6.31	5.19	4.64
Eu	1.28	1.27	1.33	1.43	1.29	1.15
Gd	4.57	3.92	4.58	4.81	4.36	3.92
Tb	0.74	0.61	0.67	0.79	0.68	0.60
Dy	4.17	3.45	3.75	4.46	3.80	3.37
Ho	0.76	0.63	0.70	0.81	0.69	0.62
Er	2.20	1.85	1.92	2.35	1.91	1.74
Tm	0.34	0.28	0.29	0.37	0.29	0.27
Yb	2.03	1.83	1.87	2.33	1.86	1.76
Lu	0.28	0.28	0.28	0.33	0.27	0.27
ΣREE	161.17	141.51	173.08	162.21	155.69	139.82
LREE/HREE	9.68	10.01	11.31	8.99	10.25	10.14
δEu	0.77	0.87	0.80	0.77	0.81	0.81
Cs	8.32	5.29	4.73	5.18	3.03	7.73
Rb	88.81	58.65	87.21	65.43	66.94	80.85
Ba	774.07	836.55	848.82	844.56	1 015.78	778.97
Th	10.99	8.45	10.60	7.96	9.25	10.47
U	2.79	2.89	2.43	2.32	1.78	2.31
Ta	1.22	1.15	1.03	1.41	1.03	1.02
Nb	14.03	13.91	14.75	18.07	14.86	14.49
Sr	314.57	372.98	330.37	352.32	307.71	329.07
Hf	5.60	5.57	5.25	5.56	4.96	5.07
Zr	219.03	208.31	189.51	196.34	186.24	185.74
Y	20.64	18.60	18.69	22.95	19.10	18.11
Li	31.96	25.09	29.42	35.49	30.05	35.24
Be	2.48	3.19	3.17	3.12	2.30	2.72
Sc	6.73	7.59	9.94	8.36	6.14	5.97
Cr	25.13	22.01	28.39	21.98	16.94	16.46
Co	9.80	9.51	10.72	10.85	8.43	7.95
Ni	17.09	16.56	19.39	18.99	14.43	15.92
Pb	19.84	24.51	22.04	22.76	24.02	23.18
Rb/Sr	0.28	0.16	0.26	0.19	0.22	0.25
Sm/Nd	0.19	0.19	0.18	0.20	0.18	0.18
Nb/Ta	11.50	12.10	14.29	12.78	14.38	14.25
Zr/Hf	39.11	37.38	36.08	35.34	37.58	36.66

偏差小于 10%。

锆石的分选在河北廊坊区调院完成,样品碎至 40~80 目,在双目镜下人工挑选,并在中国地质科学院地质研究所大陆动力学重点实验室完成阴极发光照片拍摄工作。锆石的 U-Pb 定年在中国地质科学院地质研究所大陆动力学重点实验室完成,采用美国 Thermo Fisher 公司最新一代 Neptune Plus 型多接收等离子体质谱仪和美国 Coherent 公司生产的 GeoLasPro 193nm 激光剥蚀系统(LA-MC-ICP-MS).激光剥蚀以 He 作为载气,剥蚀束斑直径为 32 μm,频率为 8 Hz.在开始测试分析之前,先用国际上通用的锆石标样 91500 作为参考物质进行仪器的最佳化,并选用 GJ-1 作为辅助标样对数据的准确性进行验证.测试数据的处理,采用中国地质大学刘勇胜教授研发的 ICPMSDataCal 程序(Liu *et al.*, 2010)和 Ludwig(2003)的 Isoplot 程序。

锆石 Hf 同位素分析测试在中国地质科学院地质研究所大陆动力学重点实验室完成,所用仪器为 Neptune Plus 多接收等离子质谱和 Compex Pro193nm 激光剥蚀系统(LA-MC-ICP-MS),实验过程中采用 He 作为剥蚀物质载气,剥蚀直径为 44 μm,测定时使用国际上通用的锆石标样 GJ-1 作为参考物质,测试过程中锆石标准 GJ-1 的 ¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf 测试加权平均值为 0.282 007±0.000 025(2σ). 初始 ¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf 计算, Lu 的衰变常数采用 1.865×10⁻¹¹·a⁻¹(Scherer *et al.*, 2001).计算 ε_{Hf}(t) 时采用的球粒陨石 Hf 同位素值 ¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf=0.033 6, ¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf=0.282 785(Bouvier *et al.*, 2008).

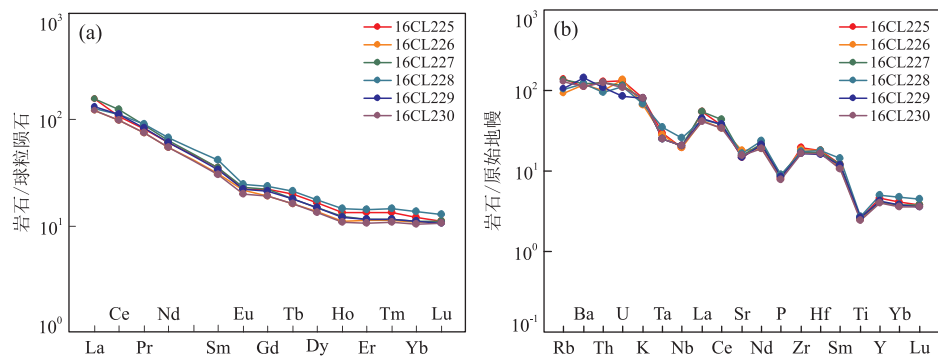


图 4 二长花岗岩稀土元素球粒陨石标准化配分模式和微量元素蛛网图
Fig.4 Chondrite-normalized REE patterns and trace element spider diagrams for the monzogranite
据 Sun and McDonough(1989)

3 地球化学特征

野马泉二长花岗岩 SiO_2 含量变化较小,为 65.04%~67.48%,铁、镁、钛含量较低,全铁含量 FeO^{T} 为 3.01%~3.40%, MgO 含量为 1.66%~1.81%, TiO_2 含量为 0.53%~0.59%, Na_2O 含量为 4.18%~4.58%, K_2O 含量为 2.00%~2.43%,全碱含量 $\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$ 为 6.18%~7.01%, $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 比值为 1.72~2.29。 Al_2O_3 含量为 15.27%~16.70%,岩石铝饱和指数 A/CNK 为 0.99~1.10,平均为 1.02,属准铝质—弱过铝质岩石,里特曼指数 σ (为 1.8~2.0)<3.3 显示为钙碱性,样品在 $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ 图解中均落入钙碱性系列,以上特征表明该岩体为钙碱性准铝质—弱过铝质花岗岩(表 1,图 3a,3b)。

岩石的稀土总量(REE)为 $139.82 \times 10^{-6} \sim 226.38 \times 10^{-6}$,轻、重稀土比值(LREE/HREE)为 8.99~21.54,轻稀土富集而重稀土亏损,轻重稀土元素分馏明显,稀土配分模式呈右倾型,具有轻微的负 Eu 异常, δEu 为 0.77~0.87(表 1,图 4a)。中稀土和重稀土的亏损可能与角闪石、石榴子石、辉石等矿物有关(Douce and Johnston, 1991; Bea *et al.*, 1994)。微量元素特征显示富集 Rb、Ba、Th、U、K 等元素,而相对亏损 Nb、Ta、P、Ti 等元素(表 1,图 4b)。

4 锆石 U-Pb 年代学及 Hf 同位素特征

样品 16CL225(样品为中粒结构,采样位置为 $\text{N}39^\circ1.253'$, $\text{E}90^\circ50.832'$):锆石呈长柱状,具有明显的岩浆振荡环带,测点的 Th/U 比值为 0.4~1.3,为典型的岩浆锆石(Koschek, 1993; Corfu *et al.*,

2003; Wu and Zheng, 2004)。样品投点主体落在谐和线及其附近,但部分测点因受到后期的改造发生铅丢失而偏离谐和线较远。除去偏离谐和线较远的测点,其余 20 个测点的加权平均年龄为 453.4 ± 3.6 Ma,代表岩体的结晶年龄(表 2,图 5a)。同时,选择了以上用于加权平均年龄计算的 20 个测点进行原位 Hf 同位素测试,锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为 5.52~8.94,平均值为 7.07,单阶段模式年龄 720~863 Ma,二阶段模式年龄 t_{DM2} 为 871~1 086 Ma(表 3)。

样品 16CL230(样品为中粒结构,采样位置为 $\text{N}39^\circ1.986'$, $\text{E}90^\circ50.484'$):锆石呈长柱状,具有明显的岩浆振荡环带,为典型的岩浆锆石。样品投点主体落在谐和线及其附近,部分测点因受后期改造发生铅丢失而偏离谐和线较远。除去偏离谐和线较远的测点,其余 16 个测点的加权平均年龄为 450.7 ± 3.8 Ma,代表岩体的结晶年龄(表 2,图 5b)。对以上用于加权平均年龄计算的 16 个测点进行原位 Hf 同位素测试,锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为 5.67~10.75,平均值为 7.24,单阶段模式年龄为 649~838 Ma,二阶段模式年龄 t_{DM2} 为 753~1 070 Ma(表 3)。

5 讨论

5.1 岩体侵位时代及岩石成因类型

陈宣华等(2003)曾在阔什布拉克地区对该岩体进行了采样,获得其形成年龄为 443 ± 5 Ma(分析方法为 TIMS)。近几年来,笔者在北阿尔金野马泉地区对该岩体进行野外地质调查并取样,对其中 2 个样品进行了锆石 U-Pb LA-ICP-MS 定年分析,分析结果表明该岩体侵位时代为 450~453 Ma,属奥陶纪岩浆侵位产物。

表 2 二长花岗岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年测试结果

Table 2 LA-ICP-MS zircon U-Pb isotopic data of the monzogranite

样品测试点	含量(10 ⁻⁶)			同位素比值						年龄(Ma)	
	Th	U	Th/U	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ
16CL225-01	497	810	0.61	0.055 1	0.000 3	0.544 6	0.009 4	0.071 7	0.001 2	446.4	7.3
16CL225-02	649	898	0.72	0.055 1	0.000 3	0.562 5	0.009 0	0.074 1	0.001 2	460.5	7.1
16CL225-03	587	992	0.59	0.057 8	0.000 4	0.578 6	0.008 4	0.072 5	0.001 0	451.5	6.2
16CL225-04	506	876	0.58	0.058 9	0.000 4	0.576 0	0.010 9	0.071 0	0.001 4	442.0	8.2
16CL225-07	900	706	1.27	0.055 6	0.000 3	0.573 2	0.012 4	0.074 8	0.001 5	465.0	9.3
16CL225-08	163	434	0.38	0.060 2	0.001 0	0.622 2	0.021 0	0.074 8	0.001 7	465.1	10.1
16CL225-09	406	840	0.48	0.056 2	0.000 4	0.553 5	0.010 4	0.071 5	0.001 2	444.9	7.5
16CL225-10	692	1 033	0.67	0.058 7	0.000 6	0.604 8	0.014 1	0.074 8	0.001 9	464.9	11.6
16CL225-11	200	365	0.55	0.059 4	0.004 5	0.613 1	0.066 3	0.074 0	0.002 7	460.5	16.4
16CL225-12	667	1 323	0.50	0.056 6	0.000 4	0.576 4	0.013 3	0.073 8	0.001 6	459.3	9.5
16CL225-13	742	894	0.83	0.058 4	0.001 0	0.592 8	0.008 1	0.073 8	0.001 6	458.9	9.9
16CL225-14	587	1 148	0.51	0.058 5	0.002 3	0.581 8	0.037 2	0.071 8	0.001 8	447.2	10.6
16CL225-18	435	858	0.51	0.055 3	0.000 4	0.567 4	0.009 6	0.074 4	0.001 1	462.6	6.7
16CL225-19	886	1 486	0.60	0.056 4	0.000 4	0.560 3	0.007 4	0.072 1	0.000 9	448.6	5.5
16CL225-20	535	837	0.64	0.057 2	0.000 6	0.572 3	0.012 6	0.072 6	0.001 3	451.5	7.6
16CL225-21	379	837	0.45	0.055 9	0.000 4	0.546 5	0.009 6	0.070 9	0.001 3	441.3	7.9
16CL225-22	342	490	0.70	0.057 7	0.000 6	0.588 5	0.024 0	0.073 9	0.002 9	459.5	17.3
16CL225-23	705	990	0.71	0.056 8	0.000 4	0.578 5	0.008 4	0.073 8	0.001 0	459.2	5.8
16CL225-25	754	1 232	0.61	0.058 1	0.000 7	0.601 4	0.029 8	0.074 9	0.003 2	465.3	19.1
16CL225-26	359	593	0.61	0.056 2	0.000 3	0.549 7	0.014 0	0.071 0	0.001 8	441.9	10.7
16CL230-01	444	639	0.70	0.064 8	0.001 5	0.663 0	0.031 3	0.073 9	0.002 2	459.7	13.1
16CL230-02	378	698	0.54	0.055 2	0.000 3	0.550 4	0.011 3	0.072 3	0.001 5	449.7	9.0
16CL230-04	229	518	0.44	0.057 7	0.000 4	0.578 0	0.009 4	0.072 7	0.001 2	452.3	7.4
16CL230-05	422	732	0.58	0.057 2	0.000 4	0.563 7	0.010 7	0.071 5	0.001 4	445.0	8.3
16CL230-06	411	758	0.54	0.056 4	0.000 4	0.557 2	0.010 4	0.071 7	0.001 3	446.2	7.9
16CL230-07	548	858	0.64	0.056 4	0.000 4	0.568 9	0.010 0	0.073 1	0.001 4	455.1	8.5
16CL230-09	499	669	0.75	0.055 4	0.000 5	0.552 3	0.008 2	0.072 2	0.001 2	449.6	7.2
16CL230-11	293	517	0.57	0.056 4	0.001 0	0.571 9	0.013 9	0.073 4	0.001 1	456.7	6.5
16CL230-12	316	385	0.82	0.057 4	0.000 8	0.581 1	0.010 9	0.073 4	0.001 0	456.5	6.0
16CL230-15	847	909	0.93	0.059 8	0.000 8	0.587 3	0.007 0	0.071 2	0.000 7	443.3	4.4
16CL230-16	351	704	0.50	0.056 7	0.000 5	0.574 0	0.006 3	0.073 5	0.000 9	456.9	5.4
16CL230-18	416	475	0.87	0.054 8	0.000 4	0.551 8	0.014 0	0.073 1	0.001 8	454.6	11.0
16CL230-19	539	476	1.13	0.063 0	0.000 8	0.630 6	0.017 8	0.072 5	0.001 6	451.3	9.6
16CL230-23	470	547	0.86	0.055 5	0.000 3	0.546 0	0.008 0	0.071 4	0.001 1	444.6	6.5
16CL230-24	431	756	0.57	0.055 4	0.000 3	0.552 9	0.008 4	0.072 4	0.001 1	450.7	6.6
16CL230-25	716	967	0.74	0.056 5	0.000 5	0.567 9	0.009 6	0.072 9	0.001 4	453.4	8.2

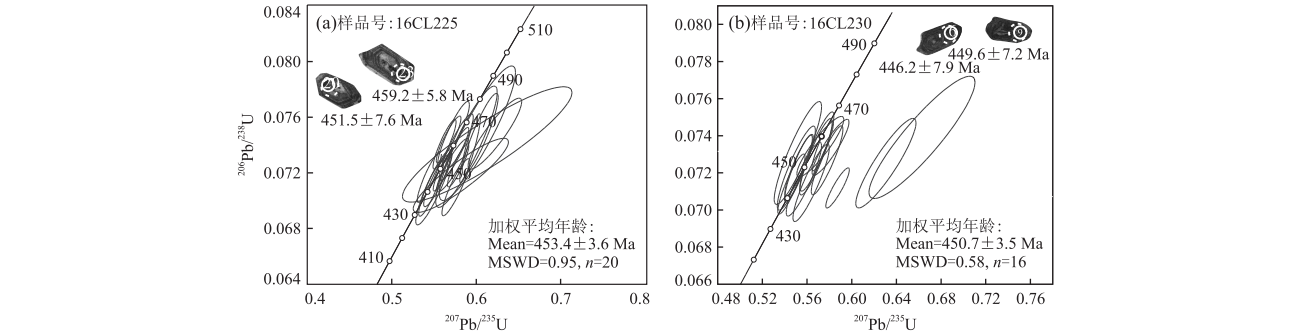


图 5 二长花岗岩的锆石阴极发光图像和锆石 U-Pb 年龄谐和图

Fig.5 Cathodoluminescence (CL) images of representative zircon grains and zircon U-Pb concordia plots of the monzogranite

到目前为止,尽管中外地质学家已经提出很多种花岗岩成因分类方案,但最常用的仍然是 I 型、S 型、M 型、A 型分类.A 型花岗岩中常见碱性暗色矿物,岩石富碱、高硅、富铁、低镁,具很高的 REE 含量,K₂O 含量较高 4%~6%(Whalen *et al.*, 1987; 吴锁平等,2007;张旗等,2012).野马泉二长花岗岩

表 3 二长花岗岩锆石 LA-ICP-MS Hf 同位素分析结果

Table 3 LA-ICP-MS zircon Hf isotopic analyses for the samples from the monzogranite

样品测试点	年龄 (Ma)	¹⁷⁶ Yb/ ¹⁷⁷ Hf	2σ	¹⁷⁶ Lu/ ¹⁷⁷ Hf	2σ	¹⁷⁶ Hf/ ¹⁷⁷ Hf	2σ	ε _{Hf} (<i>t</i>)	<i>T</i> _{DM1} (Ma)	<i>T</i> _{DM2} (Ma)	<i>f</i> _{Lu/Hf}
16CL225-01	446.4	0.023 356	0.000 135	0.000 758	0.000 003	0.282 697	0.000 013	6.97	781	984	−0.98
16CL225-02	460.5	0.037 430	0.001 265	0.001 204	0.000 037	0.282 689	0.000 014	6.86	801	1 002	−0.96
16CL225-03	451.5	0.030 057	0.000 374	0.000 973	0.000 010	0.282 701	0.000 014	7.15	780	976	−0.97
16CL225-04	442.0	0.049 730	0.000 411	0.001 621	0.000 013	0.282 709	0.000 015	7.04	782	976	−0.95
16CL225-07	465.0	0.075 396	0.001 801	0.002 377	0.000 055	0.282 727	0.000 018	7.92	772	938	−0.93
16CL225-08	465.1	0.040 287	0.000 431	0.001 337	0.000 014	0.282 688	0.000 015	6.87	806	1 005	−0.96
16CL225-09	444.9	0.024 452	0.000 139	0.000 799	0.000 004	0.282 680	0.000 012	6.30	806	1 026	−0.98
16CL225-10	464.9	0.062 159	0.001 107	0.002 009	0.000 033	0.282 727	0.000 015	8.05	764	930	−0.94
16CL225-11	460.5	0.020 878	0.000 573	0.000 721	0.000 016	0.282 696	0.000 013	7.22	782	979	−0.98
16CL225-12	459.3	0.081 491	0.001 226	0.002 664	0.000 029	0.282 692	0.000 017	6.47	830	1 026	−0.92
16CL225-13	458.9	0.067 293	0.001 554	0.002 242	0.000 050	0.282 710	0.000 018	7.25	793	976	−0.93
16CL225-14	447.2	0.063 321	0.000 959	0.001 881	0.000 035	0.282 702	0.000 017	6.83	797	993	−0.94
16CL225-18	462.6	0.041 836	0.000 203	0.001 290	0.000 003	0.282 748	0.000 014	8.94	720	871	−0.96
16CL225-19	448.6	0.049 673	0.000 793	0.001 566	0.000 023	0.282 704	0.000 015	7.00	788	984	−0.95
16CL225-20	451.5	0.025 792	0.000 324	0.000 793	0.000 009	0.282 689	0.000 015	6.78	793	1 000	−0.98
16CL225-21	441.3	0.052 188	0.000 394	0.001 532	0.000 011	0.282 729	0.000 017	7.75	752	930	−0.95
16CL225-22	459.5	0.065 883	0.001 637	0.002 081	0.000 055	0.282 660	0.000 016	5.52	863	1 086	−0.94
16CL225-23	459.2	0.035 430	0.001 110	0.001 100	0.000 030	0.282 686	0.000 015	6.73	804	1 009	−0.97
16CL225-25	465.3	0.042 295	0.002 500	0.001 279	0.000 066	0.282 699	0.000 016	7.27	790	980	−0.96
16CL225-26	441.9	0.080 906	0.003 871	0.002 437	0.000 123	0.282 700	0.000 015	6.46	814	1 013	−0.93
16CL230-01	459.7	0.065 292	0.001 400	0.002 075	0.000 025	0.282 807	0.000 019	10.75	649	753	−0.94
16CL230-02	449.7	0.042 051	0.000 496	0.001 321	0.000 009	0.282 684	0.000 015	6.41	811	1 022	−0.96
16CL230-04	452.3	0.035 893	0.001 511	0.001 165	0.000 049	0.282 709	0.000 014	7.38	773	962	−0.96
16CL230-05	445.0	0.036 728	0.000 348	0.001 134	0.000 006	0.282 703	0.000 014	7.02	781	979	−0.97
16CL230-06	446.2	0.032 393	0.000 238	0.001 035	0.000 005	0.282 671	0.000 016	5.96	823	1 048	−0.97
16CL230-07	455.1	0.036 569	0.000 402	0.001 139	0.000 004	0.282 675	0.000 015	6.26	820	1 036	−0.97
16CL230-09	449.6	0.086 300	0.001 620	0.002 675	0.000 066	0.282 747	0.000 020	8.21	750	907	−0.92
16CL230-11	456.7	0.037 098	0.000 330	0.001 212	0.000 003	0.282 708	0.000 018	7.44	774	962	−0.96
16CL230-12	456.5	0.036 127	0.000 435	0.001 159	0.000 018	0.282 699	0.000 016	7.11	787	983	−0.97
16CL230-15	443.3	0.065 600	0.001 673	0.001 995	0.000 041	0.282 737	0.000 017	7.94	750	920	−0.94
16CL230-16	456.9	0.038 908	0.000 411	0.001 209	0.000 014	0.282 665	0.000 016	5.90	837	1 060	−0.96
16CL230-18	454.6	0.042 958	0.001 031	0.001 380	0.000 021	0.282 754	0.000 016	8.96	713	863	−0.96
16CL230-19	451.3	0.105 026	0.001 036	0.003 142	0.000 031	0.282 694	0.000 023	6.24	838	1 034	−0.91
16CL230-23	444.6	0.020 077	0.000 253	0.000 640	0.000 005	0.282 695	0.000 014	6.88	781	988	−0.98
16CL230-24	450.7	0.030 514	0.000 580	0.000 986	0.000 021	0.282 660	0.000 014	5.67	838	1 070	−0.97
16CL230-25	453.4	0.037 458	0.000 534	0.001 201	0.000 015	0.282 717	0.000 016	7.68	762	944	−0.96

中不含碱性暗色矿物, K₂O 含量较低(2.0% ~ 2.4%), SiO₂ 含量(65.04% ~ 67.48%) 及 REE 总量(139.82 × 10^{−6} ~ 226.38 × 10^{−6}) 并不高, FeO^T/MgO 比值(1.67 ~ 2.05) 也明显低于典型富铁 A 型花岗岩的 FeO^T/MgO 值(13.4; Whalen *et al.*, 1987), 该岩体不具有 A 型花岗岩特征。I 型花岗岩常出现角闪石、磷灰石、榍石等矿物, 铝饱和指数 A/CNK 通常小于 1.1, Na₂O > K₂O。而典型的 S 型花岗岩常含有石榴子石、白云母、堇青石等矿物, 呈过铝质 A/CNK > 1.1, 且 K₂O > Na₂O (Sylvester, 1998)。野马泉二长花岗岩中含有角闪石、磷灰石、榍石等矿物, 铝饱和指数 A/CNK < 1.1, Na₂O > K₂O, 显示 I 型花岗岩特征。另外, 有研究表明, 在准铝质—弱过铝质 I 型花岗岩中 P₂O₅ 与 SiO₂ 含量呈负相关关系, 而在过铝质

的 S 型花岗岩中 P₂O₅ 含量会随 SiO₂ 的增加而增加或基本不变(Chappell, 1999; Wu *et al.*, 2003)。野马泉二长花岗岩中 P₂O₅ 和 SiO₂ 含量呈明显的负相关(图 6), 锆石为典型的长柱状, 基本没有继承锆石, 也反映该岩体为典型的 I 型花岗岩。

5.2 源区特征

野马泉二长花岗岩富集 LREE 和 Rb、Ba、Th、U、K 等元素, 而相对亏损 HREE 及 Nb、Ta、P、Ti 等元素, 显示陆壳或弧岩浆特征(Thompson *et al.*, 1984)。岩石中 Rb/Sr 比值为 0.16 ~ 0.28, 接近陆壳比值(0.15), Sm/Nd 比值(0.18 ~ 0.20) 也与陆壳(0.17 ~ 0.25) 相近(Rudnick and Gao, 2003), Nb/Ta 比值为 11.5 ~ 14.4, 平均 13.2, Zr/Hf 的平均值为 37, 比较接近壳源岩石(Taylor and McLennan,

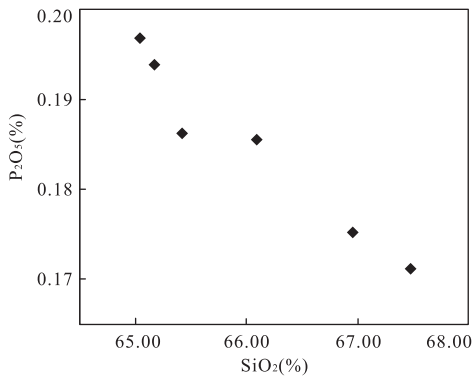


图 6 二长花岗岩 SiO₂-P₂O₅ 图解

Fig.6 SiO₂-P₂O₅ plot of the monzogranite

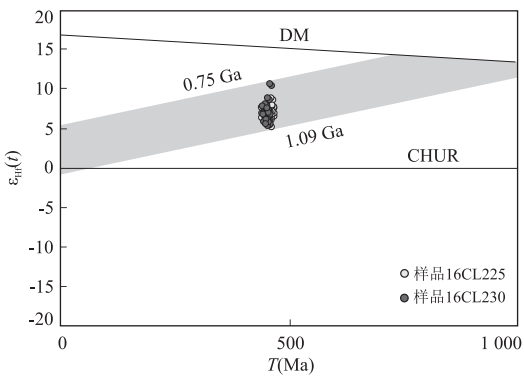


图 7 二长花岗岩的锆石 Hf 同位素 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ -T 图解

Fig.7 Zircon Hf isotopic $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ -T plot of the monzogranite

1985).近年来,锆石 Hf 同位素分析常被用于花岗岩源区性质研究,正的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值通常被解释为新生地壳熔融或者地幔物质的加入,而具负 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值的花岗岩被认为源于古老地壳物质熔融(Taylor and McLennan, 1985;吴福元等,2007).野马泉二长花岗岩中锆石的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 $5.52 \sim 10.75$,单阶段模式年龄为 $0.65 \sim 0.86$ Ga,二阶段模式年龄 t_{DM2} 为 $0.75 \sim 1.09$ Ga (图 7).考虑到所测锆石的 $f_{\text{Lu/Hf}}$ 值 ($-0.98 \sim -0.91$) 明显小于镁铁质地壳的 $f_{\text{Lu/Hf}}$ 值 (-0.34) 和硅铝质地壳的 $f_{\text{Lu/Hf}}$ 值 (-0.72),二阶段模式年龄可能更能反映其源区物质从亏损地幔被抽取的时间(Vervoort and Patchett, 1996).

实验岩石学表明,CaO/Na₂O 比值主要受控于源岩成分,比值介于 $0.3 \sim 1.5$ 的花岗质岩石来源于变杂砂岩或火成岩熔融(Jung and Pfänder, 2007),野马泉二长花岗岩 CaO/Na₂O 为 $0.5 \sim 0.8$,在 A/MF-C/MF 源岩判别图解中落入基性岩区(图 8a),其地球化学成分与实验熔体成分对比也暗示源岩可能为基性岩(图 8b).结合锆石 Hf 同位素分析结果,野马泉二长花岗岩的源岩主要是 $0.75 \sim 1.09$ Ga 的新生地壳(基性岩).研究表明,当源区以石榴子石为主要残留相时,具倾斜的 REE 配分模式,Y/Yb 明显大于 10,而当源区以角闪石为主要残留相时,具较平坦的 HREE 配分模式,Y/Yb 接近 10(Sisson, 1994).测试样品显示较平坦的 HREE 配分模式,Y/Yb 值为 $9.2 \sim 10.3$,比较接近 10,反映源区可能没有石榴子石残留,以角闪石为主.另外,岩石中 Sr、Ba、Eu 的弱亏损可能与斜长石的残留或分离结晶有关,源区残留相可能主要为角闪石±斜长石.

5.3 岩体成因及构造意义

野马泉二长花岗岩为钙碱性 I 型花岗岩,研究表明,钙碱性 I 型花岗岩主要产于板块俯冲和陆陆

碰撞两种构造背景下(韩宝福,2007).北阿尔金红柳沟蛇绿岩中,变玄武岩及枕状玄武岩 Sm-Nd 等时线年龄分别为 $508 \sim 512$ Ma 和 524 ± 44 Ma(刘良,1999),其中变玄武岩具过渡型洋中脊玄武岩特征(吴峻等,2002),蛇绿岩中辉长岩年龄为 479 ± 8 Ma(杨经绥等,2008),上述研究反映红柳沟蛇绿岩形成于早古生代,暗示本区早古生代存在洋盆.区内火山—沉积地层的研究显示具有弧后洋盆性质(杨子江,2012).红柳泉一带出露高压变质岩,榴辉岩多硅白云母³⁹Ar-⁴⁰Ar 等时线年龄为 513 ± 5 Ma,蓝片岩钠白云母³⁹Ar-⁴⁰Ar 年龄为 497 ± 10 Ma,暗示本区在早古生代发生过洋壳俯冲作用(张建新等,2007).同时,区内也报道了大量与俯冲有关的火山岩和侵入岩,这些岩体的锆石 U-Pb 年代学研究暗示北阿尔金洋壳俯冲可能发生在 $514 \sim 460$ Ma(戚学祥等,2005;吴才来等,2007;康磊等,2011;韩凤彬等,2012;李松彬,2013;孟令通等,2016; Meng *et al.*, 2017).北阿尔金蛇绿混杂岩带基质(即绿片岩相变质岩系)中的绢云母⁴⁰Ar/³⁹Ar 定年结果表明蛇绿岩构造侵位时间为 450 Ma,暗示俯冲结束和碰撞开始可能在 450 Ma 左右(郝杰等,2006).另外,巴什考供盆地南北两侧大规模 S 型花岗岩的出露(吴才来等,2005, 2007; Wu *et al.*, 2009),以及红柳沟一带具埃达克性质花岗岩的发现(Yu *et al.*, 2017),反映本区自 450 Ma 后可能进入到陆陆碰撞阶段.

野马泉岩体形成于北阿尔金洋壳俯冲阶段还是碰撞阶段? 在俯冲带,随着大洋板片俯冲消减以及大陆板块的碰撞,俯冲大洋板片容易发生板片断离进入软流圈地幔,可以引起地幔物质快速上涌,诱发强烈的岩浆活动(Tulloch *et al.*, 2011).野马泉岩基规模巨大,出露面积达 600 多 km²,大陆板块碰撞,俯冲板片断离引发的地幔物质上涌,可以为其提供

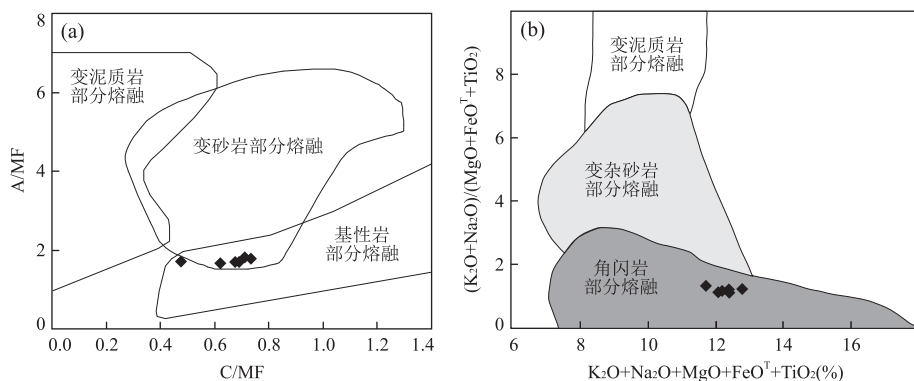


图 8 二长花岗岩的 C/MF-A/MF 图解(a)和 $K_2O+Na_2O+MgO+FeO^T+TiO_2-(K_2O+Na_2O)/(MgO+FeO^T+TiO_2)$ (b)图解
Fig.8 Geochemical diagrams of C/MF-A/MF (a) and $K_2O+Na_2O+MgO+FeO^T+TiO_2-(K_2O+Na_2O)/(MgO+FeO^T+TiO_2)$ (b) for the monzogranite
图 a 据 Altherr *et al.* (2000); 图 b 据 Kaygusuz *et al.* (2007)

充足的热源.结合构造背景,北阿尔金洋壳俯冲作用可能持续至 460 Ma 左右,野马泉岩体形成于 450~453 Ma,与巴什考供盆地南北两侧 S 型花岗岩(447~433 Ma)以及红柳沟埃达克质花岗岩(445~439 Ma)形成时代相近(吴才来等,2005, 2007; Wu *et al.*, 2009; Yu *et al.*, 2017),共同暗示本区自 450 Ma 后进入到同碰撞—后碰撞阶段,俯冲大洋板片发生断离,诱发地幔物质上涌,使得造山带根部(基性岩石)发生大规模熔融,形成规模巨大的野马泉二长花岗岩体.

6 结论

(1)野马泉二长花岗岩体侵位时代为 450~453 Ma,岩石主要由石英、钾长石、斜长石、角闪石、黑云母等矿物组成,副矿物为锆石、磷灰石、榍石等.岩石地球化学特征显示 $Na_2O > K_2O$, Na_2O/K_2O 值为 1.72~2.29,铝饱和指数 A/CNK 为 0.99~1.10,为钙碱性准铝质—弱过铝质岩石, P_2O_5 和 SiO_2 含量呈负相关,具 I 型花岗岩岩石学及地球化学特征.岩石中轻稀土富集而重稀土亏损,具轻微的负 Eu 异常,富集 Rb、Ba、Th、U、K 等元素,而相对亏损 Nb、Ta、P、Ti 等元素.

(2)野马泉二长花岗岩的锆石 $\epsilon_{Hf}(t)$ 值为 5.52~10.75,二阶段模式年龄 t_{DM2} 为 0.75~1.09 Ga,结合地球化学特征,其源岩可能主要是 0.75~1.09 Ga 的新生地壳(基性岩).结合构造背景,野马泉二长花岗岩体可能产于同碰撞—后碰撞环境,俯冲板片断离诱发地幔物质上涌,导致造山带根部基性岩石大规模熔融而形成.

致谢:两位审稿专家对本文的修改提出了宝贵的意见和建议,在此表示衷心的感谢!

References

- Altherr, R., Holl, A., Hegner, E., et al., 2000. High-Potassium, Calc-Alkaline I-Type Plutonism in the European Variscides: Northern Vosges (France) and Northern Schwarzwald (Germany). *Lithos*, 50(1-3): 51-73. [https://doi.org/10.1016/S0024-4937\(99\)00052-3](https://doi.org/10.1016/S0024-4937(99)00052-3)
- Bea, F., Pereira, M. D., Stroh, A., 1994. Mineral/Leucosome Trace-Element Partitioning in a Peraluminous Migmatite (a Laser Ablation-ICP-MS Study). *Chemical Geology*, 117(1-4): 291-312. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(94\)90133-3](https://doi.org/10.1016/0009-2541(94)90133-3)
- Bouvier, A., Vervoort, J. D., Patchett, P. J., 2008. The Lu-Hf and Sm-Nd Isotopic Composition of CHUR: Constraints from Unequilibrated Chondrites and Implications for the Bulk Composition of Terrestrial Planets. *Earth and Planetary Science Letters*, 273(1-2): 48-57. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2008.06.010>
- Chappell, B. W., 1999. Aluminium Saturation in I- and S-Type Granites and the Characterization of Fractionated Haplogranites. *Lithos*, 46(3): 535-551. [https://doi.org/10.1016/S0024-4937\(98\)00086-3](https://doi.org/10.1016/S0024-4937(98)00086-3)
- Chen, X. H., Gehrels, G., Wang, X. F., et al., 2003. Granite from North Altyn Tagh, NW China: U-Pb Geochronology and Tectonic Setting. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 22(4): 294-298 (in Chinese with English abstract).
- Corfu, F., 2003. Atlas of Zircon Textures. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 53(1): 469-500. <https://doi.org/10.2113/0530469>
- Douce, A. E. P., Johnston, A. D., 1991. Phase Equilibria and Melt

- Productivity in the Pelitic System; Implications for the Origin of Peraluminous Granitoids and Aluminous Granulites, *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 107(2): 202—218. <https://doi.org/10.1007/bf00310707>
- Gai, Y.S., Liu, L., Kang, L., et al., 2015. The Origin and Geologic Significance of Plagiogranite in Ophiolite Belt at North Altyn Tagh. *Acta Petrologica Sinica*, 31(9): 2549—2565 (in Chinese with English abstract).
- Han, B.F., 2007. Diverse Post-Collisional Granitoids and Their Tectonic Setting Discrimination. *Earth Science Frontiers*, 14(3): 64—72 (in Chinese with English abstract).
- Han, F.B., Chen, B.L., Cui, L.L., et al., 2012. Zircon SHRIMP U-Pb Age of Intermediate-Acid Intrusive Rocks in Kaladawan Area, Eastern Altun Mountains, NW China, and Its Implications. *Acta Petrologica Sinica*, 28(7): 2277—2291 (in Chinese with English abstract).
- Hao, J., Wang, E.Q., Liu, X.H., et al., 2006. Jinyanshan Collisional Orogenic Belt of the Early Paleozoic in the Altun Mountains: Evidence from Single Zircon U-Pb and ^{40}Ar - ^{39}Ar Isotopic Dating for the Arc Magmatite and Ophiolitic Mélange. *Acta Petrologica Sinica*, 22(11): 2743—2752 (in Chinese with English abstract).
- Hao, R.X., Chen, B.L., Chen, Z.L., et al., 2013. Geochemical Characteristics of Basalts from Kaladawan in East Altun Mountains of Xinjiang and Their Implications. *Acta Geoscientica Sinica*, 34(3): 307—317 (in Chinese with English abstract).
- Jung, S., Pfänder, J.A., 2007. Source Composition and Melting Temperatures of Orogenic Granitoids: Constraints from $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$, $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ and Accessory Mineral Saturation Thermometry. *European Journal of Mineralogy*, 19(6): 859—870. <https://doi.org/10.1127/0935-1221/2007/0019-1774>
- Kang, L., Liu, L., Cao, Y.T. et al., 2011. Geochemistry, Zircon LA-ICP-MS U-Pb Ages and Hf Isotopes of Hongliugou Moyite from North Altyn Tagh Tectonic Belt. *Geological Bulletin of China*, 30(7): 1066—1076 (in Chinese with English abstract).
- Kaygusuz, A., Siebel, W., Şen, C., et al., 2007. Petrochemistry and Petrology of I-Type Granitoids in an Arc Setting: The Composite Torul Pluton, Eastern Pontides, NE Turkey. *International Journal of Earth Sciences*, 97(4): 739—764. <https://doi.org/10.1007/s00531-007-0188-9>
- Koschek, G., 1993. Origin and Significance of the SEM Cathodoluminescence from Zircon. *Journal of Microscopy*, 171(3): 223—232. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2818.1993.tb03379.x>
- Li, S.B., 2013. The Early Paleozoic Tectonic Evolution of Kaladawan Area, Northern Altyn Tagh (Dissertation). Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Liu, L., 1999. High Pressure Metamorphic Rocks and Ophiolite in Altun, and Its Tectonic Significance (Dissertation). Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Liu, L., Chen, D.L., Wang, C., et al., 2009. New Progress on Geochronology of High-Pressure/Ultrahigh-Pressure Metamorphic Rocks from the South Altyn Tagh, the North Qaidam and the North Qinling Orogenic, NW China and Their Geological Significance. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 39(3): 472—479 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Y.S., Gao, S., Hu, Z.C., et al., 2010. Continental and Oceanic Crust Recycling-Induced Melt-Peridotite Interactions in the Trans-North China Orogen: U-Pb Dating, Hf Isotopes and Trace Elements in Zircons from Mantle Xenoliths. *Journal of Petrology*, 51(1—2): 537—571. <https://doi.org/10.1093/petrology/egp082>
- Ludwig, K.R., 2003. User's Manual for Isoplot 3.0: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. Berkeley Geochronology Center, Berkeley.
- Maniar, P.D., Piccoli, P.M., 1989. Tectonic Discrimination of Granitoids. *Geological Society of America Bulletin*, 101(5): 635—643. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1989\)101](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1989)101)
- Meng, L.T., Chen, B.L., Wang, Y., et al., 2016. Timing of Early Paleozoic Tectonic Regime Transition in North Altun: Evidence from Granite. *Geotectonica et Metallogenia*, 40(2): 295—307 (in Chinese with English abstract).
- Meng, L.T., Chen, B.L., Zhao, N.N., et al., 2017. The Distribution, Geochronology and Geochemistry of Early Paleozoic Granitoid Plutons in the North Altun Orogenic Belt, NW China: Implications for the Petrogenesis and Tectonic Evolution. *Lithos*, 268—271: 399—417. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2016.10.022>
- Qi, X.X., Li, H.B., Wu, C.L., et al., 2005. SHRIMP U-Pb Zircon Dating for Qiashikansayi Granodiorite, the Northern Altyn Tagh Mountains and Its Geological Implications. *Chin. Sci. Bull.*, 50(6): 571—576 (in Chinese).
- Rickwood, P.C., 1989. Boundary Lines within Petrologic Diagrams which Use Oxides of Major and Minor Elements. *Lithos*, 22(4): 247—263. [https://doi.org/10.1016/0024-4937\(89\)90028-5](https://doi.org/10.1016/0024-4937(89)90028-5)
- Rudnick, R.L., Gao, S., 2003. Composition of the Continental Crust. *Treatise on Geochemistry*, 1—64. <https://doi.org/10.1016/b0-08-043751-6/03016-4>
- Scherer, E., Münker, C., Mezger, K., 2001. Calibration of the

- Lutetium-Hafnium Clock. *Science*, 293 (5530): 683 — 687. <https://doi.org/10.1093/petrology/egx076>
- Sisson, T. W., 1994. Hornblende-Melt Trace-Element Partitioning Measured by Ion Microprobe. *Chemical Geology*, 117 (1 — 4): 331 — 344. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(94\)90135-x](https://doi.org/10.1016/0009-2541(94)90135-x)
- Sun, S. S., McDonough, W. F., 1989. Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts; Implications for Mantle Composition and Processes. In: Saunders, A. D., Norry, M. J., eds., *Magmatism in the Ocean Basins*. *Geological Society, London, Special Publications*, 42 (1): 313 — 345. <https://doi.org/10.1093/petrology/egx076>
- Sylvester, P. J., 1998. Post-Collisional Strongly Peraluminous Granites. *Lithos*, 45(1 — 4): 29 — 44. [https://doi.org/10.1016/s0024-4937\(98\)00024-3](https://doi.org/10.1016/s0024-4937(98)00024-3)
- Taylor, S. R., McLennan, S. M., 1985. *The Continental Crust: Its Composition and Evolution*. Blackwell Scientific Publication, Oxford.
- Thompson, R. N., Morrison, M. A., Hendry, G. L., et al., 1984. An Assessment of the Relative Roles of Crust and Mantle in Magma Genesis: An Elemental Approach [and Discussion]. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 310 (1514): 549 — 590. <https://doi.org/10.1098/rsta.1984.0008>
- Tulloch, A. J., Ireland, T. R., Kimbrough, D. L., et al., 2011. Autochthonous Inheritance of Zircon through Cretaceous Partial Melting of Carboniferous Plutons: The Arthur River Complex, Fiordland, New Zealand. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 161 (3): 401 — 421. <https://doi.org/10.1007/s00410-010-0539-6>
- Vervoort, J. D., Patchett, P. J., 1996. Behavior of Hafnium and Neodymium Isotopes in the Crust: Constraints from Precambrian Crustally Derived Granites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 60(19): 3717 — 3733. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(96\)00201-3](https://doi.org/10.1016/0016-7037(96)00201-3)
- Whalen, J. B., Currie, K. L., Chappell, B. W., 1987. A-Type Granites: Geochemical Characteristics, Discrimination and Petrogenesis. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 95 (4): 407 — 419. <https://doi.org/10.1007/bf00402202>
- Whitney, D. L., Evans, B. W., 2010. Abbreviations for Names of Rock-Forming Minerals. *American Mineralogist*, 95 (1): 185 — 187. <https://doi.org/10.2138/am.2010.3371>
- Wu, C. L., Lei, M., Wu, D., et al., 2016. Zircon U-Pb Dating of Paleozoic Granites from South Altun and Response of the Magmatic Activity to the Tectonic Evolution of the Altun Orogenic Belt. *Acta Geologica Sinica*, 90 (9): 2276 — 2315 (in Chinese with English abstract).
- Wu, C. L., Yang, J. S., Robinson, P. T., et al., 2009. Geochemistry, Age and Tectonic Significance of Granitic Rocks in North Altun, Northwest China. *Lithos*, 113 (3 — 4): 423 — 436. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2009.05.009>
- Wu, C. L., Yang, J. S., Yao, S. Z., et al., 2005. Characteristics of the Granitoid Complex and Its Zircon SHRIMP Dating at the South Margin of the Bashikaogong Basin, North Altun, NW China. *Acta Petrologica Sinica*, 21(3): 846 — 858 (in Chinese with English abstract).
- Wu, C. L., Yao, S. Z., Zeng, L. S., et al., 2007. Bashikaogong-Shimierbulake Granitic Complex, North Altun, NW China: Geochemistry and Zircon SHRIMP Ages. *Science in China (Series D): Earth Sciences*, 37(1): 10 — 26 (in Chinese).
- Wu, F. Y., Jahn, B. M., Wilde, S. A., et al., 2003. Highly Fractionated I-Type Granites in NE China (I): Geochronology and Petrogenesis. *Lithos*, 66 (3 — 4): 241 — 273. [https://doi.org/10.1016/s0024-4937\(02\)00222-0](https://doi.org/10.1016/s0024-4937(02)00222-0)
- Wu, F. Y., Li, X. H., Yang, J. H., et al., 2007. Discussions on the Petrogenesis of Granites. *Acta Petrologica Sinica*, 23(6): 1217 — 1238 (in Chinese with English abstract).
- Wu, J., Lan, C. L., Li, J. L., et al., 2002. Geochemical Evidence of MORB and OIB Combination in Hongliugou Ophiolite Melanges, Altun Fault Belt. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 21(1): 24 — 30 (in Chinese with English abstract).
- Wu, S. P., Wang, M. Y., Qi, K. J., 2007. Present Situation of Researches on A-Type Granites: A Review. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 26(1): 57 — 66 (in Chinese with English abstract).
- Wu, Y. B., Zheng, Y. F., 2004. Genesis of Zircon and Its Constraints on Interpretation of U-Pb Age. *Chinese Science Bulletin*, 49 (15): 1554 — 1569. <https://doi.org/10.1360/04wd0130>
- Xu, Z. Q., Yang, J. S., Zhang, J. X., et al., 1999. A Comparison between the Tectonic Units on the Two Sides of the Altun Sinistral Strike-Slip Fault and the Mechanism of Lithospheric Shearing. *Acta Geologica Sinica*, 73 (3): 193 — 205 (in Chinese with English abstract).
- Yang, J. S., Shi, R. D., Wu, C. L., et al., 2008. Petrology and SHRIMP Age of the Hongliugou Ophiolite at Milan, North Altun, at the Northern Margin of the Tibetan Plateau. *Acta Petrologica Sinica*, 24 (7): 1567 — 1584 (in Chinese with English abstract).
- Yang, W. Q., Liu, L., Ding, H. B., et al., 2012. Geochemistry, Geochronology and Zircon Hf Isotopes of the Dimuna-like Granite in South Altyn Tagh and Its Geological Significance. *Acta Petrologica Sinica*, 28 (12): 4139 — 4150 (in Chinese with English abstract).
- Yang, Z. J., 2012. Early Palaeozoic Tectonic Evolution in

- Hongliugou, Altyn, Xinjiang (Dissertation). Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Yu, S. Y., Zhang, J. X., Li, S. Z., et al., 2017. Continuity of the North Qilian and North Altun Orogenic Belts of NW China: Evidence from Newly Discovered Palaeozoic Low-Mg and High-Mg Adakitic Rocks. *Geological Magazine*, 1 — 21. <https://doi.org/10.1017/s0016756817000565>
- Zhang, J. X., Meng, F. C., Yu, S. Y., et al., 2007. ^{39}Ar - ^{40}Ar Geochronology of High-Pressure/Low-Temperature Blueschist and Eclogite in the North Altyn Tagh and Their Tectonic Implications. *Geology in China*, 34(4): 558 — 564 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, J. X., Zhang, Z. M., Xu, Z. Q., et al., 1999. The U-Pb and Sm-Nd Ages for Eclogite from the Western Segment of Altyn Tagh Tectonic Belt. *Chinese Science Bulletin*, 44(10): 1109 — 1112 (in Chinese).
- Zhang, Q., Ran, H., Li, C. D., 2012. A-Type Granite: What is the Essence? *Acta Petrologica et Mineralogica*, 31(4): 621 — 626 (in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 陈宣华, Gehrels, G., 王小凤, 等, 2003. 阿尔金山北缘花岗岩的形成时代及其构造环境探讨. *矿物岩石地球化学通报*, 22(4): 294 — 298.
- 盖永升, 刘良, 康磊, 等, 2015. 北阿尔金蛇绿混杂岩带中斜长花岗岩的成因及其地质意义. *岩石学报*, 31(9): 2549 — 2565.
- 韩宝福, 2007. 后碰撞花岗岩类的多样性及其构造环境判别的复杂性. *地质前缘*, 14(3): 64 — 72.
- 韩凤彬, 陈柏林, 崔玲玲, 等, 2012. 阿尔金山喀腊大湾地区中酸性侵入岩 SHRIMP 年龄及其意义. *岩石学报*, 28(7): 2277 — 2291.
- 郝杰, 王二七, 刘小汉, 等, 2006. 阿尔金山脉中金雁山早古生代碰撞造山带: 弧岩浆岩的确定与岩体锆石 U-Pb 和蛇绿混杂岩 $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ 年代学研究的证据. *岩石学报*, 22(11): 2743 — 2752.
- 郝瑞祥, 陈柏林, 陈正乐, 等, 2013. 新疆阿尔金喀腊大湾地区玄武岩的地球化学特征及地质意义. *地球学报*, 34(3): 307 — 317.
- 康磊, 刘良, 曹玉亭, 等, 2011. 北阿尔金构造带红柳沟钾长花岗岩地球化学特征、LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年和 Hf 同位素组成. *地质通报*, 30(7): 1066 — 1076.
- 李松彬, 2013. 阿尔金山北缘喀腊大湾地区早古生代构造演化 (硕士学位论文). 北京: 中国地质科学院地质力学研究所.
- 刘良, 1999. 阿尔金高压变质岩与蛇绿岩及其大地构造意义 (博士学位论文). 北京: 中国科学院地质与地球物理研究所.
- 刘良, 陈丹玲, 王超, 等, 2009. 阿尔金、柴北缘与北秦岭高压—超高压岩石年代学研究进展及其构造地质意义. *西北大学学报(自然科学版)*, 39(3): 472 — 479.
- 孟令通, 陈柏林, 王永, 等, 2016. 北阿尔金早古生代构造体制转换的时限: 来自花岗岩的证据. *大地构造与成矿学*, 40(2): 295 — 307.
- 戚学祥, 李海兵, 吴才来, 等, 2005. 北阿尔金恰什坎萨依花岗岩闪长岩的锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其地质意义. *科学通报*, 50(6): 571 — 576.
- 吴才来, 雷敏, 吴迪, 等, 2016. 南阿尔金古生代花岗岩 U-Pb 定年及岩浆活动对造山带构造演化的响应. *地质学报*, 90(9): 2276 — 2315.
- 吴才来, 杨经绥, 姚尚志, 等, 2005. 北阿尔金巴什考供盆地南缘花岗杂岩体特征及锆石 SHRIMP 定年. *岩石学报*, 21(3): 846 — 858.
- 吴才来, 姚尚志, 曾令森, 等, 2007. 北阿尔金巴什考供—斯米尔布拉克花岗岩杂岩特征及锆石 SHRIMP U-Pb 定年. *中国科学(D辑)*, 37(1): 10 — 26.
- 吴福元, 李献华, 杨进辉, 等, 2007. 花岗岩成因研究的若干问题. *岩石学报*, 23(6): 1217 — 1238.
- 吴峻, 兰朝利, 李继亮, 等, 2002. 阿尔金红柳沟蛇绿混杂岩中 MORB 与 OIB 组合的地球化学证据. *岩石矿物学杂志*, 21(1): 24 — 30.
- 吴锁平, 王梅英, 戚开静, 2007. A 型花岗岩研究现状及其述评. *岩石矿物学杂志*, 26(1): 57 — 66.
- 许志琴, 杨经绥, 张建新, 等, 1999. 阿尔金断裂两侧构造单元的对比及岩石圈剪切机制. *地质学报*, 73(3): 193 — 205.
- 杨经绥, 史仁灯, 吴才来, 等, 2008. 北阿尔金地区米兰红柳沟蛇绿岩的岩石学特征和 SHRIMP 定年. *岩石学报*, 24(7): 1567 — 1584.
- 杨文强, 刘良, 丁海波, 等, 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. *岩石学报*, 28(12): 4139 — 4150.
- 杨子江, 2012. 新疆阿尔金红柳沟一带早古生代地质构造演化研究 (博士学位论文). 北京: 中国地质科学院.
- 张建新, 孟繁聪, 于胜尧, 等, 2007. 北阿尔金 HP/LT 蓝片岩和榴辉岩的 Ar-Ar 年代学及其区域构造意义. *中国地质*, 34(4): 558 — 564.
- 张建新, 张泽明, 许志琴, 等, 1999. 阿尔金构造带西段榴辉岩的 Sm-Nd 及 U-Pb 年龄——阿尔金构造带中加里东期山根存在的证据. *科学通报*, 44(10): 1109 — 1112.
- 张旗, 冉骥, 李承东, 2012. A 型花岗岩的实质是什么? *岩石矿物学杂志*, 31(4): 621 — 626.