北阿尔金喀孜萨依二长花岗岩成因及其构造意义

郑坤^{1,2)},吴才来¹⁾,吴迪³⁾,高栋¹⁾,陈红杰⁴⁾,徐楠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)中国地质科学院地质力学研究所,北京,100081;4)郑州大学,郑州,450001

内容提要:喀孜萨依二长花岗岩出露于北阿尔金蛇绿混杂岩带北缘,为探讨其成因、源区特征及构造环境,本 文对其进行了岩石学、锆石 U-Pb 定年、Hf 同位素及岩石地球化学等方面的研究。研究结果表明,喀孜萨依二长花 岗岩主要由石英、斜长石、钾长石、角闪石、黑云母等矿物组成,岩体侵位时代为 425~423 Ma,铝饱和指数 A/CNK 为 0.97~1.07,属弱过铝质钙碱性-高钾钙碱性岩石,P₂O₅与 SiO₂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,Eu 异常不明显,岩石富集 Rb、Ba、Th、U、K 等元素,相对亏损 Nb、Ta、P、Ti 等元素。锆石 ε_{Hf}(*t*)值 为+2.65 ~ +6.23,二阶段模式年龄 *t*_{DM2}为 1015~1243 Ma,其源岩主要来自新生地壳。结合区域构造背景,喀孜 萨依二长花岗岩体可能形成于碰撞后伸展环境。

关键词:二长花岗岩;地球化学;锆石 U-Pb 定年;岩石成因;北阿尔金

阿尔金造山带地处青藏高原的北缘,东临祁连 西接昆仑,延伸近1000 km。北阿尔金蛇绿混杂岩 带是阿尔金造山带的次级构造单元之一,混杂岩带 内主要出露有蛇绿岩块、高压变质岩、中酸性侵入岩 和火山岩以及复理石沉积。前人研究表明,区内蛇 绿岩形成于早古生代(Liu Liang, 1999; Wu Jun et al., 2002; Yang Jingshui et al., 2008), 红柳泉一带 出露榴辉岩(513±5 Ma)和蓝片岩(497±10 Ma)等 高压变质岩,被认为与洋壳俯冲作用有关(Zhang Jianxin et al., 2007), 混杂岩带东段报道了许多与 俯冲有关的火山岩(517~482 Ma)(Hao Ruixiang et al., 2013; Li Songbin, 2013)。此外, 混杂岩带内 广泛出露有与俯冲有关的中酸性侵入岩(520~460 Ma)(Qi Xuexiang et al., 2005a; Wu Cailai et al., 2007; Kang Lei et al., 2011; Han Fengbin et al., 2012; Meng Lingtong et al., 2016, 2017)。而混杂 岩带西段地区的S型花岗杂岩体及埃达克质花岗岩 的研究,暗示本区在450~430 Ma 间可能为碰撞环 境(Wu Cailai et al., 2005, 2007, 2009; Yu Shengyao et al.,2018)。Yu Shengyao et al. (2018)根据红柳 沟一带的高 Mg 埃达克质花岗岩(425~422 Ma)的 研究,认为本区从碰撞挤压环境向伸展环境的转变 可能发生在 425~422 Ma。

喀孜萨依二长花岗岩体出露于北阿尔金蛇绿混 杂岩带的北缘,Qi Xuexiang et al. (2005b)对其进行 了锆石 U-Pb 年代学及地球化学研究,获得其侵位 年龄为 404.7 Ma,并认为其来自地幔楔的部分熔 融,与阿尔金地块和塔里木地块间的斜向碰撞引发 的大规模走滑作用有关(Qi Xuexiang et al., 2005b)。然而,地幔部分熔融难以产生花岗岩,且 现有的研究表明北阿尔金洋壳俯冲可能发生在 520 ~460Ma(Qi Xuexiang et al.,2005a;Wu Cailai et al.,2007;Kang Lei et al.,2011;Han Fengbin et al.,2012;Meng Lingtong et al.,2016,2017),喀孜 萨依岩体不可能来自地幔楔的部分熔融。喀孜萨依 岩体作为北阿尔金地区花岗质岩浆活动晚期产物, 其岩石成因、物质来源及形成环境尚不清楚。因此, 本文选取该岩体作为研究对象,从岩石学、岩石地球

注:本文为国家自然科学基金项目(项目编号:41872071、40672049)和中国地质调查局项目(项目编号:DD20190006、DD20160022-06)联 合资助的成果。

收稿日期:2019-06-09;改回日期:2019-09-12;网络发表日期:2019-09-18;责任编辑:黄敏。

作者简介:郑坤,男,1989年生,博士研究生,矿物学、岩石学、矿床学专业。Email: zhengkun163mail@163.com。通讯作者:吴才来,男, 1960年生,研究员,博士生导师,主要从事火成岩岩石学科研工作。Email: wucailai@126.com。

引用本文:郑坤,吴才来,吴迪,高栋,陈红杰,徐楠. 2019. 北阿尔金喀孜萨依二长花岗岩成因及其构造意义. 地质学报,93(10):2531~ 2541, doi: 10.19762/j. cnki. dizhixuebao. 2019240. Zhang Kun, Wu Crilei, Wu Di, Cos Dang, Chen Hangija, Yu Nan, 2010, Betragenesis of the Kasisavi menogenerite from

Zheng Kun, Wu Cailai, Wu Di, Gao Dong, Chen Hongjie, Xu Nan. 2019. Petrogenesis of the Kazisayi monzogranite from North Altun and its tectonic implications. Acta Geologica Sinica, 93(10):2531~2541.

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环境。

1 岩体地质及岩相学特征

阿尔金造山带位于青藏高原的北缘,为塔里木 盆地与柴达木盆地的地理分界,是一条经历了复杂 地质构造演化的复合造山带,自北向南可分为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(Xu Zhiqin et al.,1999;Liu Liang et al.,2009;Yang Wenqiang et al.,2012;Gai Yongsheng et al.,2015)。北阿尔金蛇绿混杂岩带 为阿尔金造山带重要的次级构造单元之一(图 1a), 处在阿北地块与中阿尔金地块之间,呈近东西向带 状延伸,主要由蛇绿岩块、高压变质岩、早古生代中 酸性侵入岩和火山岩、具复理石特征的深海-半深海 碎屑岩及碳酸盐岩等组成。

喀孜萨依二长花岗岩体出露于北阿尔金蛇绿混 杂岩带西段北缘,岩体呈近东西向带状分布(图 1b),与岩体南北两侧的断层走向一致,出露面积近 70 km²,岩体围岩主要是早古生代的俯冲碰撞杂 岩。二长花岗岩体南侧出露少量肉红色中粒花岗闪 长岩(481.5Ma,Qi Xuexiang et al.,2005b),二长花 岗岩体边缘有时可见肉红色花岗闪长岩捕掳体。喀 孜萨依二长花岗岩呈灰白色,块状构造,中粒花岗结 构,岩石主要由石英、斜长石、钾长石、角闪石、黑云 母等矿物组成(图 2b)。石英,它形粒状,含量 25% ~30%;斜长石,半自形宽板状,含量 35%~40%, 有绢云母化现象;钾长石含量 20%~25%;角闪石 呈绿色,含量 3%~5%;黑云母含量为 2%~3%。 副矿物有锆石、磷灰石、榍石、磁铁矿等。

2 分析测试方法

锆石的分选在河北廊坊区调院完成,锆石 U-Pb 测年在中国地质科学院地质研究所完成,所用仪器 为 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 公司的 GeoLasPro 193 nm 激光剥蚀系统(LA-MC-ICP-MS)。激光剥蚀以 He 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 Yongsheng et al.,2010)和 Ludwig(2003)的 Isoplot 程序。

错石 Hf 同位素分析在中国地质科学院地质研 究所完成,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, 剥蚀束斑直径为 44 μm,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¹⁷⁶ Hf /¹⁷⁷ Hf 测试加权平均值为 0.282007 ± 0.000025 (2_{σ})。初始¹⁷⁶ Hf /¹⁷⁷ Hf 计算,Lu 的衰变 常数采用 1.865×10⁻¹¹ y⁻¹ (Scherer et al.,2001)。 计算 ε_{Hf}(*t*)时采用的球粒陨石 Hf 同位素值¹⁷⁶ Lu / ¹⁷⁷ Hf=0.0336,¹⁷⁶ Hf /¹⁷⁷ Hf=0.282785(Bouvier et al.,2008)。

岩石样品的粉末碎样、化学全分析分别在河北 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%~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)Excell 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 标准偏差小于 10%。

3 分析测试结果

3.1 锆石 U-Pb 定年及 Hf 同位素特征

样品 16CL220:锆石呈长柱状,长约 120~200 um,具有清晰的岩浆振荡环带,锆石 Th 含量为 333 ×10⁻⁶~3195×10⁻⁶,U 含量为 675×10⁻⁶~2801 ×10⁻⁶,Th/U 比值为 0.5~1.1,为典型的岩浆锆石 (Koschek,1993;Corfu et al., 2003)。本文对样品 中的 15 颗锆石进行了年龄测定,测点的²⁰⁶ Pb/²³⁸ U 加权平均年龄为 425±3 Ma,代表岩体的侵位年龄 (表 1,图 3a)。选择以上用于锆石 U-Pb 定年的测 点进行原位 Hf 同位素分析,15 个测点的分析结果 显示,锆石 $\epsilon_{\rm Hf}(t)$ 值为+2.65 ~ +6.23,二阶段模 式年龄 $t_{\rm DM2}$ 为 1015~1243 Ma(表 2)。

样品 16CL221:锆石呈长柱状,长约 110~210 um,具岩浆振荡环带,锆石 Th 含量为 $178 \times 10^{-6} \sim 1540 \times 10^{-6}$,U 含量为 $298 \times 10^{-6} \sim 1857 \times 10^{-6}$, Th/U 比 值 为 $0.4 \sim 1.2$,为 典 型 岩 浆 锆 石 (Koschek,1993;Corfu et al., 2003)。本文对样品 中的 15 颗锆石进行了年龄测定,测点的²⁰⁶ Pb/²³⁸ U 加权平均年龄为 423 ± 3 Ma,代表岩体的侵位年龄



图 1 阿尔金造山带构造单元划分图(a)(据 Wu Callai et al.,2016 修改)及喀孜萨依地区地质简图(b) (据 1/20 万巴什考供幅地质图修编)

Fig. 1 Geological map showing the tectonic units of the Altun orogenic belt(a)(modified after Wu Callai et al. ,2016) and geological sketch map of the Kazisayi area(b)(modified after 1/200000 regional geological map of Bashikaogong region)



图 2 喀孜萨依二长花岗岩野外露头照片和显微照片(正交偏光) Fig. 2 Field photographs and micrographs of the Kazisayi monzogranites Qz-石英;Pl-斜长石;Kfs-钾长石;Amp-角闪石;Bt-黑云母;Sph-榍石 Qz-quartz; Pl-plagioclase; Kfs-K-feldspar; Amp-amphibole; Bt-biotite; Sph-Sphene

(表1,图3b)。选择以上用于锆石 U-Pb 定年的测 点进行原位 Hf 同位素分析,15 个测点分析结果显 示,锆石 ε_{Hf}(t)值为+2.79 ~ +5.24,二阶段模式 年龄 *t*_{DM2}为 1076~1232 Ma(表 2)。

3.2 地球化学特征

喀孜萨依二长花岗岩样品中,SiO₂含量为 64.87%~75.09%,Al₂O₃含量为13.39%~ 16.77%,全铁含量 FeO^T为 0.92%~3.31%,MgO 含量为 0.30%~1.76%,TiO₂含量为 0.08%~ 0.78%,Na₂O含量为 3.63%~4.87%,K₂O含量为 1.37%~4.42%,Na₂O/K₂O 比值为 0.82~3.36。 岩石呈弱过铝质,铝饱和指数 A/CNK 为 0.97~ 1.05,平均为 1.02,样品在 K₂O-SiO₂图解中落入钙 碱性-高钾钙碱性区域,以上特征表明喀孜萨依二长



图 3 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. 3 Cathodoluminescence (CL) images of representative zircon grains and zircon U-Pb concordia plot for the monzogranites

桜口洞屋上	含量(×10 ⁻⁶)			同位素比值							a)
样皕测试点	Th	U	Th/U	$^{207} Pb / ^{206} Pb$	1σ	$^{207}Pb/^{235}U$	1σ	$^{206}Pb/^{238}U$	1σ	$^{206} Pb/^{238} U$	1δ
16CL220-01	1486	1730	0.86	0.0545	0.0004	0.5098	0.0078	0.0678	0.0011	422.9	6.4
16CL220-02	611	1101	0.55	0.0546	0.0003	0.5051	0.0067	0.0670	0.0009	418.2	5.4
16CL220-03	945	1543	0.61	0.0550	0.0004	0.5255	0.0068	0.0693	0.0010	431.7	6.0
16CL220-04	1591	1863	0.85	0.0549	0.0004	0.5148	0.0055	0.0679	0.0007	423.8	4.3
16CL220-05	381	697	0.55	0.0543	0.0004	0.5192	0.0051	0.0693	0.0007	431.8	4.1
16CL220-06	1236	1499	0.82	0.0543	0.0005	0.4995	0.0083	0.0666	0.0011	415.8	6.8
16CL220-07	703	1046	0.67	0.0551	0.0005	0.5147	0.0080	0.0677	0.0010	422.4	6.2
16CL220-08	1277	1528	0.84	0.0546	0.0004	0.5151	0.0069	0.0684	0.0009	426.7	5.5
16CL220-09	1018	1019	1.00	0.0551	0.0005	0.5198	0.0119	0.0684	0.0015	426.4	8.8
16CL220-10	333	675	0.49	0.0543	0.0004	0.5158	0.0111	0.0688	0.0015	429.1	9.0
16CL220-11	841	962	0.87	0.0549	0.0004	0.5171	0.0110	0.0682	0.0015	425.5	8.8
16CL220-12	910	1402	0.65	0.0565	0.0006	0.5173	0.0089	0.0664	0.0013	414.7	7.9
16CL220-13	878	1678	0.52	0.0552	0.0005	0.5232	0.0078	0.0687	0.0010	428.5	6.0
16CL220-14	3195	2802	1.14	0.0563	0.0003	0.5358	0.0090	0.0690	0.0011	429.9	6.9
16CL220-15	878	1506	0.58	0.0554	0.0003	0.5284	0.0084	0.0692	0.0011	431.2	6.5
16CL221-01	844	1061	0.80	0.0553	0.0003	0.5175	0.0058	0.0679	0.0006	423.5	3.9
16CL221-02	770	952	0.81	0.0541	0.0006	0.5029	0.0112	0.0674	0.0014	420.3	8.3
16CL221-03	1379	1679	0.82	0.0545	0.0005	0.5130	0.0078	0.0682	0.0009	425.3	5.3
16CL221-04	1145	1343	0.85	0.0562	0.0007	0.5298	0.0074	0.0684	0.0010	426.7	5.9
16CL221-05	1540	1857	0.83	0.0549	0.0005	0.5204	0.0073	0.0688	0.0009	428.8	5.7
16CL221-06	1387	1675	0.83	0.0585	0.0005	0.5543	0.0050	0.0687	0.0007	428.3	4.3
16CL221-07	838	1194	0.70	0.0551	0.0004	0.5127	0.0077	0.0675	0.0009	420.9	5.6
16CL221-08	1450	1188	1.22	0.0578	0.0019	0.5347	0.0230	0.0669	0.0013	417.5	7.7
16CL221-09	735	1274	0.58	0.0541	0.0005	0.5001	0.0118	0.0670	0.0016	418.0	9.6
16CL221-10	276	677	0.41	0.0556	0.0011	0.5119	0.0110	0.0667	0.0012	416.5	7.2
16CL221-11	884	1423	0.62	0.0574	0.0017	0.5343	0.0211	0.0673	0.0014	420.0	8.5
16CL221-12	370	672	0.55	0.0543	0.0006	0.5042	0.0104	0.0674	0.0015	420.2	8.9
16CL221-13	865	834	1.04	0.0542	0.0004	0.5125	0.0081	0.0685	0.0011	426.9	6.7
16CL221-14	872	1402	0.62	0.0633	0.0023	0.5793	0.0194	0.0665	0.0010	414.9	6.1
16CL221-15	198	298	0.66	0.0545	0.0005	0.5156	0.0091	0.0685	0.0011	427.3	6.8

表 1 二长花岗岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年测试结果

Table 1	LA-ICM-MS	zircon	U-Pb	isotopic	data	of	the	monzogranites
								0

花岗岩为弱过铝质钙碱性-高钾钙碱性岩石(表 3, 图 4a, b)。岩石样品的稀土总量(REE)为 86.6× 10⁻⁶~208.8×10⁻⁶,轻稀土富集而重稀土亏损,轻 重稀土比值(LREE/HREE)为 7.0~16.4,Eu 异常 不明显。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(表 3,图 5a, b)。Sr、Eu 亏损不明显,暗示源区可能无斜长石 残留。

表 2 二长花岗岩锆石 LA-ICP-MS Hf 同位素分析结果

Table 2	LA-ICM-MS	zircon Hf	' isotopic	compositions	of th	e monzogranites
---------	-----------	-----------	------------	--------------	-------	-----------------

样品测试点	年龄(Ma)	$^{176}Yb/^{177}Hf$	2σ	¹⁷⁶ Lu/ ¹⁷⁷ Hf	2σ	$^{176}{ m Hf}/^{177}{ m Hf}$	2σ	$\varepsilon_{\rm Hf}(t)$	t _{DM1} (Ma)	$t_{\mathrm{DM2}}(\mathrm{Ma})$	$f_{ m Lu/Hf}$
16CL220-01	425	0.035080	0.000143	0.000846	0.000003	0.282664	0.000018	5.318	829	1073	-0.97
16CL220-02	425	0.033811	0.000236	0.000884	0.000003	0.282655	0.000018	4.954	843	1096	-0.97
16CL220-03	425	0.024194	0.000253	0.000640	0.000006	0.282669	0.000016	5.546	817	1058	-0.98
16CL220-04	425	0.034477	0.000300	0.000897	0.000005	0.282654	0.000016	4.925	845	1098	-0.97
16CL220-05	425	0.019575	0.000866	0.000515	0.000013	0.282608	0.000013	3.409	900	1194	-0.98
16CL220-06	425	0.012295	0.000269	0.000367	0.000008	0.282623	0.000016	3.985	876	1158	-0.99
16CL220-07	425	0.016044	0.000395	0.000437	0.000012	0.282620	0.000014	3.868	881	1165	-0.99
16CL220-08	425	0.028063	0.000130	0.000767	0.000004	0.282644	0.000015	4.625	855	1117	-0.98
16CL220-09	425	0.024573	0.000921	0.000652	0.000018	0.282641	0.000016	4.555	857	1121	-0.98
16CL220-10	425	0.022123	0.000572	0.000628	0.000012	0.282618	0.000015	3.739	889	1173	-0.98
16CL220-11	425	0.025299	0.000169	0.000713	0.000004	0.282588	0.000015	2.650	933	1243	-0.98
16CL220-12	425	0.020008	0.000641	0.000537	0.000015	0.282632	0.000013	4.268	867	1140	-0.98
16CL220-13	425	0.022378	0.000325	0.000622	0.000006	0.282587	0.000017	2.651	931	1242	-0.98
16CL220-14	425	0.028436	0.000180	0.000751	0.000005	0.282652	0.000015	4.899	844	1099	-0.98
16CL220-15	425	0.027705	0.000176	0.000689	0.000004	0.282689	0.000014	6.228	791	1015	-0.98
16CL221-01	423	0.018474	0.000388	0.000464	0.000011	0.282654	0.000013	5.02	835	1090	-0.99
16CL221-02	423	0.026960	0.000331	0.000680	0.000006	0.282638	0.000015	4.40	861	1130	-0.98
16CL221-03	423	0.023073	0.000199	0.000680	0.000004	0.282656	0.000013	5.02	837	1090	-0.98
16CL221-04	423	0.024085	0.000352	0.000706	0.000013	0.282631	0.000014	4.12	873	1147	-0.98
16CL221-05	423	0.035955	0.000374	0.000925	0.000007	0.282641	0.000017	4.42	863	1128	-0.97
16CL221-06	423	0.023026	0.000182	0.000694	0.000004	0.282652	0.000014	4.89	842	1098	-0.98
16CL221-07	423	0.030977	0.000655	0.000780	0.000011	0.282646	0.000015	4.63	853	1115	-0.98
16CL221-08	423	0.025011	0.000311	0.000717	0.000015	0.282646	0.000015	4.66	852	1113	-0.98
16CL221-09	423	0.027387	0.000269	0.000838	0.000012	0.282644	0.000017	4.55	857	1120	-0.97
16CL221-10	423	0.017601	0.000380	0.000529	0.000009	0.282661	0.000018	5.24	827	1076	-0.98
16CL221-11	423	0.028198	0.000577	0.000794	0.000006	0.282644	0.000016	4.55	857	1120	-0.98
16CL221-12	423	0.019259	0.000193	0.000542	0.000006	0.282656	0.000016	5.08	833	1087	-0.98
16CL221-13	423	0.027642	0.001285	0.000760	0.000024	0.282653	0.000015	4.88	843	1099	-0.98
16CL221-14	423	0.018738	0.000353	0.000504	0.000010	0.282645	0.000015	4.70	848	1111	-0.98
16CL221-15	423	0.023253	0.000645	0.000605	0.000011	0.282592	0.000017	2.79	924	1232	-0.98



图 4 二长花岗岩的 A/CNK-A/NK 图解(a)(据 Maniar et al.,1989)和 K₂O-SiO₂ 图解(b)(据 Rickwood,1989) Fig. 4 A/CNK-A/NK diagram(a)(after Maniar et al.,1989)and K₂O-SiO₂ plots for the monzogranites(b)(after Rickwood,1989)



Fig. 5 Chondrite-normalized REE patterns and trace element spider diagram for the monzogranites (normalized values after Sun et al. ,1989)

4 讨论

4.1 岩体侵位时代及成因

Qi Xuexiang et al. (2005b)曾报道了喀孜萨依 二长花岗岩体侵位时代为 404.7 Ma,属 I 型花岗 岩,岩浆来自地幔楔部分熔融。但地幔部分熔融难 以产生花岗岩,岩体的成因及其产出的构造环境仍 不明确。近来,笔者在对该岩体开展了岩石学、地球 化学、锆石 U-Pb 定年及 Hf 同位素等方面的研究, 锆石 U-Pb LA-ICP-MS 定年结果显示,该岩体侵位 时代为 425~423 Ma,为北阿尔金地区早古生代岩 浆活动晚期产物。

花岗岩通常被划分为I型、S型、M型或A型。 A型花岗岩中常缺少含水矿物,具较高的碱含量和 REE 总量,高的 Ga/Al 和 Fe/Mg 比率,低的 Ba、 Sr、Eu 含量,明显的负 Eu 异常(Whalen et al., 1987; White et al., 1983)。S型花岗岩常呈过铝质, 含有石榴子石、白云母、堇青石等富铝矿物,A/CNK >1.1,K₂O>Na₂O(Sylvester,1998)。而 I 型花岗 岩常含有角闪石、磷灰石、榍石等矿物, A/CNK 通 常小于1.1。另外,有研究表明,在准铝质-弱过铝 质 I 型花岗岩中 P_2O_5 与 SiO₂含量呈负相关,而在 S 型花岗岩中 P2O5含量随 SiO2含量的增加而增加或 基本不变(Chappell, 1999)。喀孜萨依二长花岗岩 中不含石榴子石、白云母、堇青石等富铝矿物,A/ CNK<1.1。岩石样品中基本没有继承锆石,且锆 石 ε_щ(t)值均为正值,上述这些特征均表明其并不 属于S型花岗岩。喀孜萨依二长花岗岩含有角闪 石、磷灰石、榍石、磁铁矿等矿物,REE总量(86.6×

 $10^{-6} \sim 208.8 \times 10^{-6}$)不高, Eu 异常不明显, 且 10000×Ga/Al < 2.6, 与 A 型花岗岩明显不同 (Whalen et al., 1987)。另外, 岩石中 P_2O_5 与 SiO₂ 含量呈明显负相关关系(图 6), 上述这些特征均表 明喀孜萨依二长花岗岩属 I 型花岗岩(Chappell, 1999)。





I型花岗岩成因一直存在争论,一般认为是来 自下地壳火成岩石的部分熔融(Chappell et al., 1988;White et al.,1983)。近些年来的研究显示, 许多 I型花岗岩来自壳幔岩浆的混合(Barbarin, 2005;Kocak et al.,2011)。另外,一些研究表明,幔 源铁镁质岩浆的结晶分异可以产生花岗岩 (Dessimoz,2012;Grove et al.,2003;Jagoutz et al., 2012)。通过幔源铁镁质岩浆分异形成的花岗岩常 与大规模同时代的铁镁质岩有关(Turner et al.,

表 3	二长花	岗岩主量元素(%)和微量元素(×10⁻°)数据
	Table 3	Major($\%$) and trace element($ imes 10^{-6}$)

compositions of the monzogranites

样号	16CL220	16CL221	16CL222	16CL223	16CL224
SiO_2	64.87	65.52	67.91	68.86	75.09
TiO_2	0.78	0.76	0.44	0.46	0.08
$\mathrm{Al}_2\mathrm{O}_3$	16.77	16.53	15.68	16.06	13.39
$\mathrm{Fe}_2\mathrm{O}_3$	1.41	0.96	0.67	0.56	0.33
FeO	2.04	2.41	1.46	1.77	0.62
MnO	0.05	0.06	0.05	0.06	0.05
MgO	1.76	1.59	1.03	1.02	0.30
CaO	3.25	3.95	2.39	3.24	1.30
Na_2O	4.59	4.60	4.35	4.87	3.63
K_2O	2.27	1.37	4.29	1.55	4.42
P_2O_5	0.21	0.19	0.13	0.12	0.03
LOI	1.82	1.91	1.37	1.25	0.64
Total	99.82	99.85	99.74	99.83	99.87
A/NK	1.67	1.82	1.33	1.66	1.24
A/CNK	1.05	1.02	0.97	1.03	1.02
La	51.0	41.7	37.7	37.1	22.6
Ce	93.8	78.5	64.2	55.2	34.0
Pr	10.2	8.50	6.39	5.99	3.60
Nd	34.6	29.0	22.3	20.8	12.4
Sm	5.58	4.74	3.68	3.33	2.44
Eu	1.62	1.36	1.22	1.16	0.68
Gd	4.99	4.38	3.31	3.32	2.36
Tb	0.64	0.56	0.45	0.40	0.43
Dy	2.77	2.65	2.33	1.90	2.88
Ho	0.47	0.45	0.40	0.33	0.58
Er	1.42	1.38	1.18	1.00	1.78
Tm	0.20	0.20	0.18	0.15	0.32
Yb	1.32	1.29	1.17	0.96	2.19
Lu	0.20	0.18	0.16	0.14	0.33
ΣREE	208.82	174.96	144.61	131.80	86.60
LREE/HREE	16.37	14.77	14.74	15.10	6.96
δEu	0.92	0.89	1.05	1.06	0.86
Cs	1.94	0.96	1.22	1.61	6.64
Rb	89.3	42.4	108	43.7	164
Ba	742	514	1812	816	793
Th	13.3	11.6	10.7	9.34	22.1
U	3.12	2.17	1.74	2.02	2.54
Ta	1.25	1.19	0.95	0.88	2.61
Nb	11.2	12.4	10.1	8.41	14.7
Sr	563	553	400	482	144
Hf	6.81	5.79	4.93	5.28	3.09
Zr	270	247	205	229	96.0
Y	12.7	13.2	11.4	9.83	18.9
LI	14.22	13.53	5.46	2.35	5.70
Be	1.99	1.92	1.30	1.89	2.14
Sc	5.43	2.91	2.27	2.27	2.27
V	61.3	58.0	48.0	41.9	15.9
Cr	11.2	13.2	6.53	6.29	1.39
Со	9.19	9.44	5.15	5.08	1.13
Ni	6.43	7.58	4.26	3.15	1.59
Cu	19.2	17.1	6.07	4.82	6.98
Pb	17.6	17.4	24.9	15.8	44.9

1992),考虑到研究区内缺少与喀孜萨依岩体同时代 的铁镁质岩石,岩石样品中 Nb/Ta 比值(平均为 9.0)及 Sm/Nd 比值(0.16~0.20)均比较接近壳源 岩石(Taylor et al., 1985),因此铁镁质岩浆分异这 一成因被排除。岩浆混合形成的花岗岩通常含有大 量的暗色微粒包体,且具有较宽范围的地球化学及 同位素组成(Griffin et al., 2002; Janousek et al., 2004)。喀孜萨依二长花岗岩体中有时可见暗色包 体,但二长花岗岩地球化学及 Hf 同位素组成变化 范围均较窄,暗示喀孜萨依岩体形成过程中可能存 在岩浆混合作用,但岩浆混合并不是主要的。研究 表明,CaO/Na₂O比值主要受控于源岩成分,泥质岩 部分熔融产生的过铝质花岗岩通常 CaO/Na₂O < 0.3, 而 CaO/Na2O 值介于 0.3~1.5 的花岗质岩石 主要来源于变杂砂岩或火成岩熔融(Jung et al., 2007)。喀孜萨依二长花岗岩样品 CaO/Na2O 比值 为 0.36~0.86, 暗示可能来自变火成岩或变杂砂岩 的熔融。结合锆石的 Hf 同位素特征,锆石 ε_{Hf}(t)值 均为正值(+2.65 ~ +6.23),二阶段模式年龄 t_{DM2} 为1015~1243 Ma(表 2,图 7),表明喀孜萨依岩体 主要起源于新生地壳的部分熔融(Taylor et al., 1985; Wu Fuyuan et al., 2007)。样品重稀土明显 亏损,暗示源区可能残留有石榴子石等矿物(Douce et al., 1991; Bea et al., 1994)。而 Sr、Eu 亏损不明 显,则表明源区基本无斜长石的残留。





4.2 构造环境

北阿尔金蛇绿混杂岩带内出露有蛇绿岩块,主要由超基性岩、辉长岩、变玄武岩、枕状玄武岩、辉绿岩、硅质岩等组成,其中变玄武岩及枕状玄武岩 Sm-Nd等时线年龄为 $508 \sim 524$ Ma(Liu liang, 1999), 辉长岩年龄为 479 ± 8 Ma(Yang Jingsui et al., 2008),暗示红柳沟蛇绿岩形成于早古生代(Liu Liang, 1999; Wu Jun et al., 2002; Yang Jingsui et al.,2008)。混杂岩带西段的贝克滩及红柳泉一带 出露有高压泥质变质岩、榴辉岩及蓝片岩,被认为与 洋壳俯冲有关,其中榴辉岩多硅白云母³⁹ Ar-⁴⁰ Ar 等 时线年龄为 513 Ma,蓝片岩钠白云母³⁹ Ar-⁴⁰ Ar 年龄 为 497 Ma,暗示北阿尔金地区在早古生代发生过洋 壳俯冲(Zhang Jianxin et al.,2007)。此外,区内还 出露有大量与俯冲有关的侵入岩和火山岩,这些火 成岩的年代学研究表明北阿尔金地区洋壳俯冲可能 发生在 520~460 Ma(Qi Xuexiang et al.,2005a; Wu Cailai et al.,2007;Kang Lei et al.,2011;Han Fengbin et al.,2012;Li Songbin,2013;Meng Lingtong et al.,2016,2017)。

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 40 Ar/39 Ar 定年结果表明蛇绿岩 构造侵位时间为 455Ma, 暗示俯冲结束和碰撞开始 可能在 450 Ma 左右(Hao Jie et al., 2006)。Wu Cailai et al. (2005,2007,2009)报道了混杂岩带西段 巴什考供盆地南北两侧的S型花岗杂岩体,获得杂 岩体的主要侵位时代为(446~431 Ma),并认为形 成于碰撞环境(Wu Cailai et al., 2005, 2007, 2009)。 Yu Shengyao et al. (2018)报道了红柳沟一带的高 Mg 和低 Mg 两种类型的埃达克质花岗岩,并认为 低 Mg 型埃达克质花岗岩(445~439Ma)形成于陆 陆碰撞加厚环境,而高 Mg 型埃达克质花岗岩(425 ~422Ma)则形成于碰撞后伸展阶段。本文研究的 喀孜萨依二长花岗岩体(425~423Ma),与红柳沟高 Mg 型埃达克质花岗岩(425~422 Ma, Yu Shengyao et al.,2018)及混杂岩带东段的阿北岩体(417Ma, Han Fengbin et al., 2012) 形成时代相近, 均为北阿 尔金早古生代花岗岩浆作用晚期的产物,可能形成 于碰撞后伸展环境。

5 结论

(1)喀孜萨依二长花岗岩主要由石英、钾长石、 斜长石、角闪石和黑云母等矿物组成,岩体侵位时代 为425~423 Ma,岩石铝饱和指数 A/CNK 为0.97 ~1.07,属弱过铝质钙碱性-高钾钙碱性岩石,P₂O₅ 与 SiO₂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,Eu 异常不明显,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。

(2)喀孜萨依二长花岗岩锆石 ε_{Hf}(t)值为+
 2.65 ~ +6.23, 二阶段模式年 t_{DM2}为 1015~1243
 Ma,其源岩主要来自新生地壳。结合区域构造背

景,喀孜萨依二长花岗岩体可能形成于碰撞后伸展 环境。

致谢: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

- Bea F, Pereira M D, Stroh A. 1994. Mineral/leucosometraceelement partitioning in a peraluminous migmatite (a Laser Ablation-ICP-MS Study). Chemical Geology, 117(1-4): 291 ~312.
- Barbarin B. 2005. Mafic magmatic enclaves and mafic rocks associated with some granitoids of the central Sierra Nevada batholith, California: nature, origin, and relations with the hosts. Lithos, 80(1-4): 155~177.
- Bouvier A, Vervoort J D, Patchett P J. 2008. The Lu-Hf and Sm-Ndisotopic 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.
- Chappell B W. 1999. Aluminium saturation in I-and S-type granites and the characterization of fractionated haplogranites. Lithos, 46(3): 535~551.
- Chappell B W, Stephens W E. 1988. Origin of infracrustal (I-type) granite magmas. Transactions of the Royal Society of Edinburgh Earth Sciences, 79(2~3): 71~86.
- Corfu F. 2003. Atlas of zircon textures. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 53(1): $469 \sim 500$.
- Dessimoz M. 2012. A case for hornblende dominated fractionation of arc magmas: The Chelan Complex (Washington Cascades). Contributions to Mineralogy & Petrology, 163(4): 567~589.
- Douce A E P, Johnston A D. 1991. Phaseequilibria 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.
- Gai Yongsheng, Liu Liang, Kang Lei, Yang Wenqiang, Liao Xiaoying, Wang Yawei. 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).
- Griffin W L, Wang X, Jackson S E, Pearson N J, O'Reilly S R, Xu X S, Zhou X M. 2002. Zircon chemistry and magma mixing, SE China: In-situ analysis of Hf isotopes, Tonglu and Pingtan igneous complexes. Lithos, 61(3-4): 237~269.
- Grove T L, Elkins-Tanton L T, Parman S W, Chatterjee N, Müntener O, Gaetani G A. 2003. Fractional crystallization and mantle-melting controls on calc-alkaline differentiation trends. Contributions to Mineralogy & Petrology, 145(5): 515~533.
- Han Fengbin, Chen Bailin, Cui Lingling, Wang Shixin, Chen Zhengle, Jiang Rongbao, Li Li, Qi Wanxiu. 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 Jie, Wang Erqi, Liu Xiaohan, Sang Haiqing. 2006. Jinyanshan collisional oroginic belt of the early Paleozoic in the Altun Mountains: Evidence from eingle 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 Ruixiang, Chen Bailin, Chen Zhengle, Wang Yong, Li Songbin, Han Fengbin, Zhou Yonggui. 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).
- Jagoutz O, Schmidt M W. 2012. The formation and bulk composition of modern juvenile continental crust: The Kohistan

arc. Chemical Geology, 298~299: 0~96.

- Janousek V, Braithwaite C J R, Bowes D R, Gerdes A. 2004. Magma-mixing in the genesis of Hercynian calc-alkaline granitoids: An integrated petrographic and geochemical study of the Sazava intrusion, Central Bohemian Pluton, Czech Republic. Lithos, 78(1-2): 67~99.
- Jung S, Pfänder J A. 2007. Source composition and melting temperatures of orogenic granitoids: Constraints from CaO/Na₂ O, Al₂O₃/TiO₂ and accessory mineral saturation thermometry. European Journal of Mineralogy, 19(6):859~870.
- Kang Lei, Liu Liang, Cao Yuting, Wang Chao, Yang Wenqiang, Zhu Xiaohui. 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).
- Kocak K, Zedef V, Kansun G. 2011. Magma mixing/mingling in the Eocene Horoz (Nigde) granitoids, central southernTurkey: Evidence from mafic microgranular enclaves. Mineralogy and Petrology, 103(1-4): 149~167.
- Koschek G. 1993. Origin and Significance of the SEM Cathodoluminescence from Zircon. Journal of Microscopy, 171 (3): 223~232.
- Li Songbin. 2013. The Early Paleozoic Tectonic evolution of Kaladawan area, Northern Altyn Tagh. [Master Dissertation]. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences. (in Chinese with English abstract).
- Liu Liang. 1999. High Pressure metamorphic rocks and ophiolite in Altun, and its tectonic significance. [Ph. D. dissertation]. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Geological Sciences. (in Chinese with English abstract).
- Liu Yongsheng, Gao Shan, Hu Zhaochu, Gao Changgui, Zong Keqing, Wang Dongbing. 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.
- Liu Liang, Chen Danling, Wang Chao, Zhang Chengli. 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).
- 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.
- Meng Lingtong, Chen Bailin, Wang Yong, Sun Yue, Wu Yu, Zhang Wengao, He Jiangtao. 2016. Timing of early Paleozoic tectonic regime transition in North Altun: Evidence from granite. Geotectonica et Metallogenia, 40(02): 295~307 (in Chinese with English abstract).
- Meng Lingtong, Chen Bailin, Zhao Nina, Wu Yu, Zhang Wengao, He Jiangtao, Wang Bin, Han Meimei. 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.
- Qi Xuexiang, Li Haibing, Wu Cailai, Yang Jingsui, Zhang Jianxin, Meng Fancong, Shi Rendeng, Chen Songyong. 2005a. SHRIMP U-Pb zircon dating for Qiashikansayi granodiorite, the Northern Altyn Tagh Mountains and its geological implications. Chinese Science Bulletin, 50(3): 440~445 (in Chinese with English abstract).
- Qi Xuexiang, Wu Cailai, Li Haibing. 2005b. SHRIMP U-Pb age of zircon from Kazisayi granite in the northern Altyn Tagh Mountains and its significations. Acta Petrologica Sinica, 21

(3): $859 \sim 866$ (in Chinese with English abstract).

- Rickwood P C. 1989. Boundary lines within petrologic diagrams which use oxides of major and minor Elements. Lithos, 22(4): $247 \sim 263$.
- Scherer E, Münker C, Mezger K. 2001. Calibration of the Lutetium-Hafnium clock. Science, 293(5530): 683~687.
- Sun S S, McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. Geological Society London Special Publication, 42 (1): 313~345.
- Sylvester P J. 1998. Post-collisional strongly peraluminous granites. Lithos, 45(1-4): 29~44.
- Taylor S R, Mclennan S M. 1985. The continental crust: Its composition and evolution. Blackwell Scientific Publication, Oxford.
- Turner S P, Foden J D, Morrison R S. 1992. Derivation of some A-type magmas by fractionation of basaltic magma an example from the Padthaway Ridge, South Australia. Lithos, 28 (2), $151{\sim}179$.
- 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.
- White A J R, Chappell B W. 1983. Granitoid types and their distribution in the Lachlan Fold Belt, southeastern Australia. Geol Soc Am Mem, 159: 21~34.
- Wu Cailai, Yang Jingsui, Robinson P T, Wooden J L, Mazdab F K, Gao Yunhong, Wu Suoping, Chen Qilong. 2009. Geochemistry, age and tectonic significance of granitic rocks in North Altun, Northwest China. Lithos, 113(3-4):423~436.
- Wu Cailai, Lei Min, Wu Di, Zhang Xin, Chen Hongjie, Li Tianxiao. 2016. Zircon U-Pb dating of paleozoic granites from Sourth Altun and response of the magmatic activity to the tentonic evolution of the Altun Orogenic Belt. Acta Geologica Sinica, 90(9): 2276~2315 (in Chinese with English abstract).
- Wu Cailai, Yang Jingsui, Yao Shangzhi, Zeng Lingsen, Chen Songyong, Li Haibing, Qi Xuexiang, Wooden J L, Mazdab F K. 2005. Characteristics of the granitoid complex and its zircon SHRIMP dating at the south margin of the Bashikaogong basin, North Altun, NW Chin. Acta Petrologica Sinica, 21(3): 846~ 858 (in Chinese with English abstract).
- Wu Cailai, Yao Shangzhi, Zeng Lingsen, Yang Jingsui, Wooden J L, Chen Songyong, Mazadab F K. 2007. Bashikaogongshimierbulake granitic complex, North Altun, NW China: Geochemistry and zircon SHRIMP ages. Science in China Series D: Earth Sciences, 37(1): 10~26 (in Chinese with English abstract).
- Wu Fuyuan, Li Xianhua, Yang Jinhui, Zheng Yongfei. 2007. Discussions on the petrogenesis of granites. Acta Petrologica Sinica, 23 (6): 1217 ~ 1238 (in Chinese with English abstract).
- Wu Jun, Lan Chaoli, Li Jiliang, Yu Liangjun. 2002. Geochemical evidence of MORB and OIB combination in Hongliugou Ophiolite Melanges. Acta Petrologica et Mineralogica, 21(1): 24~30 (in Chinese with English abstract).
- 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. Acta Geologica Sinica, 73 (3): 193~205 (in Chinese with English abstract).
- Yang Jingsui, Shi Rendeng, Wu Cailai, Su Dechen, Chen Songyong, Wang Xibin, Wooden J. 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 Wenqiang, Liu Liang, Ding Haibao, 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. Acta Petrologica Sinica, 28(12): 4139

 \sim 4150 (in Chinese with English abstract).

- Yu Shengyao, Zhang Jianxin, Li Sanzhong, Sun Deyou, Peng Yinbiao, Zhao Xilin. 2018. 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, 155(80): 1684~1704.
- Zhang Jianxin, Meng Fancong, Yu Shengyao. Chen Wen, Chen Songyong. 2007. ³⁹Ar-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).

参考文献

- 盖永升,刘良,康磊,杨文强,廖小莹,王亚伟.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.
- 韩凤彬,陈柏林,崔玲玲,王世新,陈正乐,蒋荣宝,李丽,祁万修. 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.
- 郝瑞祥,陈柏林,陈正乐,王永,李松彬,韩凤彬,周永贵. 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.
- 郝杰,王二七,刘小汉,桑海清.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⁴⁰ Ar^{/39} Ar 年代学研究的证据.岩石学报,22(11):2743 ~2752.
- 康磊,刘良,曹玉亭,王超,杨文强,朱小辉.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. 阿尔金北缘喀腊大湾地区早古生代构造演化. [硕士 学位论文]. 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]. 中国科学院地质与地球物理研究所.
- 刘良,陈丹玲,王超,张成立.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,孙岳,吴玉,张文高,何江涛. 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,杨经绥,张建新,孟繁聪,史仁灯,陈松 永. 2005a. 北阿尔金恰什坎萨依花岗闪长岩的锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其地质意义. 科学通报,50(6):571~576.
- 戚学祥,吴才来,李海兵.2005b.北阿尔金喀孜萨依花岗岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其构造意义.岩石学报,21(03):859 ~866
- 吴才来, 雷敏, 吴迪, 张昕, 陈红杰, 李天啸. 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,曾令森,陈松永,李海兵,戚学祥, Wooden J L, Mazdab F K. 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,杨经绥,Wooden J L,陈松永,Mazadab F K. 2007.北阿尔金巴什考供-斯米尔布拉克花岗杂岩特征及 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,郑永飞.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,俞良军.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.
- 许志琴,杨经绥,张建新,姜枚,李海兵,催军文.1999. 阿尔金断 裂两侧构造单元的对比及岩石圈剪切机制.地质学报,73(3): 193~205.
- 杨经绥, 史仁灯, 吴才来, 苏德辰, 陈松永, 王希斌, Wooden Joseph. 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,校培喜,曹玉亭,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.岩石学报,28(12):4139~4150.
- 张建新,孟繁聪,于胜尧,陈文,陈松永. 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.

Petrogenesis of the Kazisayi monzogranite from North Altun and its tectonic implications

ZHENG Kun^{1,2)}, WU Cailai^{*1)}, WU Di³⁾, GAO Dong¹⁾, CHEN Hongjie⁴⁾, XU Nan¹⁾

1) Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 100037;

2) School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing, 100871;

3) Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 100081;

4) Zhengzhou University, Zhengzhou, 450001;

 $*\ Corresponding\ author:\ wucailai @ 126.\ com$

Abstract

Kazisayi monzogranite pluton crops out at the northern margin of the North Altun ophiolitic mélange belt. In this paper, we present petrological, geochemical, and zircon U-Pb and Lu-Hf isotopic data of the Kazisayi monzogranites to constrain their petrogenesis, source and tectonic setting. The Kazisay monzogranites consist of mainly quartz, alkali feldspar, plagioclase, amphibole and biotite. Zircon U-Pb dating yielded ages of $425 \sim 423$ Ma. The rocks have high K₂O with A/CNK varying from 0.97 to 1.07. The granites are weakly peraluminous and and plotted within the medium-K to high-K calc-alkaline fields. These rocks show a negative correlation between P₂O₅ and SiO₂ and show significant features of I-type granite. The REE patterns show a significant depletion in HREE, relative to LREE, and lack Eu anomalies. In the primitive mantle-normalized trace-element diagram, the samples show highly enrichments in Rb, Ba, Th, U and K and depletions in Nb, Ta, P and Ti. The $\epsilon_{\rm Hf}(t)$ values range from 2.65~6.23 with $T_{\rm DM2}$ (two-stage model ages) from 1015 Ma to 1243 Ma. These characteristics indicate that Kazisayi monzogranites derived mainly from the juvenile crust. Considering the regional tectonic setting, the Kazsayi monzogranites may have formed in a post-collision extensional setting.

Key words: monzogranite; geochemistry; zircon U-Pb dating; petrogenesis; North Altun