

北阿尔金喀腊大湾南段二长花岗岩地球化学、SHRIMP 锆石 U-Pb 年代学、Hf 同位素特征及其对壳-幔相互作用的指示

吴玉^{1,2)}, 陈正乐^{2,3)}, 陈柏林²⁾, 王永²⁾, 孟令通²⁾, 何江涛^{2,4)}, 王斌⁴⁾, 韩梅梅^{2,4)}

1) 核工业北京地质研究院, 北京, 100029; 2) 中国地质科学院 地质力学研究所, 北京, 100081;
3) 东华理工大学, 南昌, 330013; 4) 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京, 100083

内容提要: 喀腊大湾位于北阿尔金山的中东段, 区内分布有大量早古生代中-酸性侵入岩体, 这些岩体为探索北阿尔金早古生代构造-岩浆活动及其区域构造演化提供了重要依据。本文对出露在喀腊大湾南段的二长花岗岩展开了详细的锆石 SHRIMP U-Pb 年代学、全岩地球化学和锆石 Hf 同位素分析。锆石 SHRIMP U-Pb 定年获得二长花岗岩的成岩年龄为 484.2 ± 4.9 Ma (MSDW=0.46, $n=14$), 属早奥陶世。在地球化学组成上, 二长花岗岩具有富碱(全碱 8.31%~8.66%)、高钾($K_2O=3.65\% \sim 4.76\%$)和贫 MgO (0.6%~0.9%)、 P_2O_5 (0.06%~0.11%)、 TiO_2 (0.39%~0.58%) 和 FeO^T (1.82%~2.34%) 的特征, 岩石铝饱和指数(A/CNK)为 0.96~1.01, 属准铝质-弱过铝质高钾钙碱性 I 型花岗岩。二长花岗岩具有弱的正 Eu 异常, 明显富集大离子亲石元素(如 K、Rb、Ba、Th、U)和 LREE, 相对亏损高场强元素(如 Ti、Ta、Nb)和 HREE, 显示出弧岩浆岩的地球化学特征。锆石 Hf 同位素分析结果表明, 二长花岗岩的 $\epsilon_{Hf}(t)$ 均为正值(+4.08~+8.26), 且变化范围较小, 对应的二阶段模式年龄(t_{DM2})为 875~1099 Ma, 反映成岩过程中有显著的幔源新生地壳物质加入。综合区域地质背景及前人研究成果, 认为喀腊大湾南段二长花岗岩应形成于北阿尔金洋向南侧阿中地块俯冲消减的活动大陆边缘弧环境, 其岩浆源区可能起源于新生地壳和古老基底地壳构成混合地壳的部分熔融, 岩体在形成过程中经历了壳幔岩浆混合作用, 这些特征与北祁连早古生代形成于俯冲消减背景下的中-酸性侵入岩体相似, 进而为北阿尔金曾是北祁连的西延部分提供了新的佐证。

关键词: 二长花岗岩; 地球化学; 锆石 SHRIMP U-Pb 年龄; Hf 同位素; 北阿尔金

横亘于我国西部的阿尔金山是青藏高原北缘的重要组成部分, 其东侧与祁连山相连, 向西与西昆仑相接, 南北分割了塔里木和柴达木两大盆地。其中, 北阿尔金地区发育有著名的红柳沟-拉配泉蛇绿混杂岩带以及高压/低温变质岩带, 前人研究表明该区在早古生代经历了大洋扩张、俯冲折返以及碰撞闭合等造山过程(Liu Liang et al., 1999; Wu Jun et al., 2002; Yang Jingsui et al., 2002, 2008; Zhang Ruoyu et al., 2016; Zhang Jianxin et al., 2005, 2007; Xui Qunye et al., 2007; Meng Fancong et al., 2010; Liu Han et al., 2013; Gao Xiaofeng et al., 2012a), 并伴随着强烈的构造变形(Chen Bailin

et al., 2008, 2014)。此外, 在北阿尔金地区还广泛发育早古生代不同期次的中-酸性侵入岩体, 这些岩体呈长条状断续出露于红柳沟、巴什考供、冰沟、喀腊大湾以及拉配泉-安南坝等地, 其延伸方向与北阿尔金 E-W 向的区域构造方向一致, 它们作为北阿尔金构造活动的岩浆响应, 记录着深部壳幔相互作用、造山带的构造演化等重要信息。到目前为止, 一些学者已对部分岩体开展了岩石地球化学、同位素年代学等方面的研究, 分别从成岩时代、形成机制及其动力学背景等角度, 探讨北阿尔金早古生代时期发生的俯冲、碰撞以及后碰撞等造山过程(Cowgill et al., 2003; Gehrels et al., 2003; Chen

注: 本文由“十二·五”国家科技支撑计划项目(编号: 2011BAB06B08-04)、国家自然科学基金(编号: U1403292、41502086)和国土资源部公益行业科研专项(201411024-3)联合资助。

收稿日期: 2015-10-31; 改回日期: 2016-07-25; 责任编辑: 黄敏。

作者简介: 吴玉, 男, 1987 年生, 博士, 主要从事区域构造与岩石大地构造研究。通讯地址: 100081, 北京朝阳区安外小关东里 10 号。Email: 21wu.yu@163.com。通讯作者: 陈正乐, 男, 1967 年生, 研究员, 博士生导师, 主要从事构造地质与矿田构造研究。Email: chenzhengle@163.com。

Xuanhua et al. , 2003a; Hao Jie et al. , 2006; Wu Cailai et al. , 2005, 2007, 2009; Qi Xuexiang et al. , 2005a, b; Han Fengbin et al. ,2012; Zhang Zhanwu et al. , 2012)。然而,受恶劣的自然环境及野外地质条件的影响,北阿尔金仍是我国西部研究程度较低的地区之一,区内众多岩浆岩体尚未开展详细的岩石学和地球化学研究;此外,在以往的岩浆源区讨论中缺乏 Hf 同位素的有效约束,这在一定程度上影响了对北阿尔金地区花岗岩成因探讨和区域构造演化的全面认识。

近年来,笔者及所在项目组深入北阿尔金山腹地,开展了详细的野外地质调查工作,本文选取了喀腊大湾南段的二长花岗岩作为研究对象,进行了详细的岩相学、岩石地球化学、锆石 SHRIMP U-Pb 年代学以及锆石 Hf 同位素研究,以期探讨该岩体的成岩时代、构造环境及其岩浆源区,为进一步认识北阿尔金早古生代岩浆作用特征和区域构造演化提供更多的科学依据。

1 区域地质概况

阿尔金山地处青藏高原北缘,是连接祁连、昆仑、塔里木和柴达木等构造单元的重要衔接部位(图 1a),前人依据不同走向的构造单元将其划分为 3 个次级构造单元,由北向南分别为 E-W 向的红柳沟-拉配泉褶皱构造带和 NE-SW 向的索尔库里-且末隆起带以及 NEE-SWW 向的阿尔金巨型左旋走滑断裂带(Yin, 2002; Chen Zhengle et al. , 2002, 2006)。E-W 向的红柳沟-拉配泉褶皱构造带构成了地理意义上的北阿尔金地区,该构造带向东延伸至阿克塞、肃北一带被 NEE 向的阿尔金左行走滑断裂带所截切,向西延伸至红柳沟沟口被塔里木盆地第四系沉积覆盖,北接塔里木盆地东南缘,南邻索尔库里断陷盆地(图 1b)。

喀腊大湾位于北阿尔金的中东段地区(图 1b),该区矿产资源丰富,目前已发现有喀腊大湾铁矿、白尖山铁矿、达坂铅锌矿及阿北铅锌矿等一系列重要

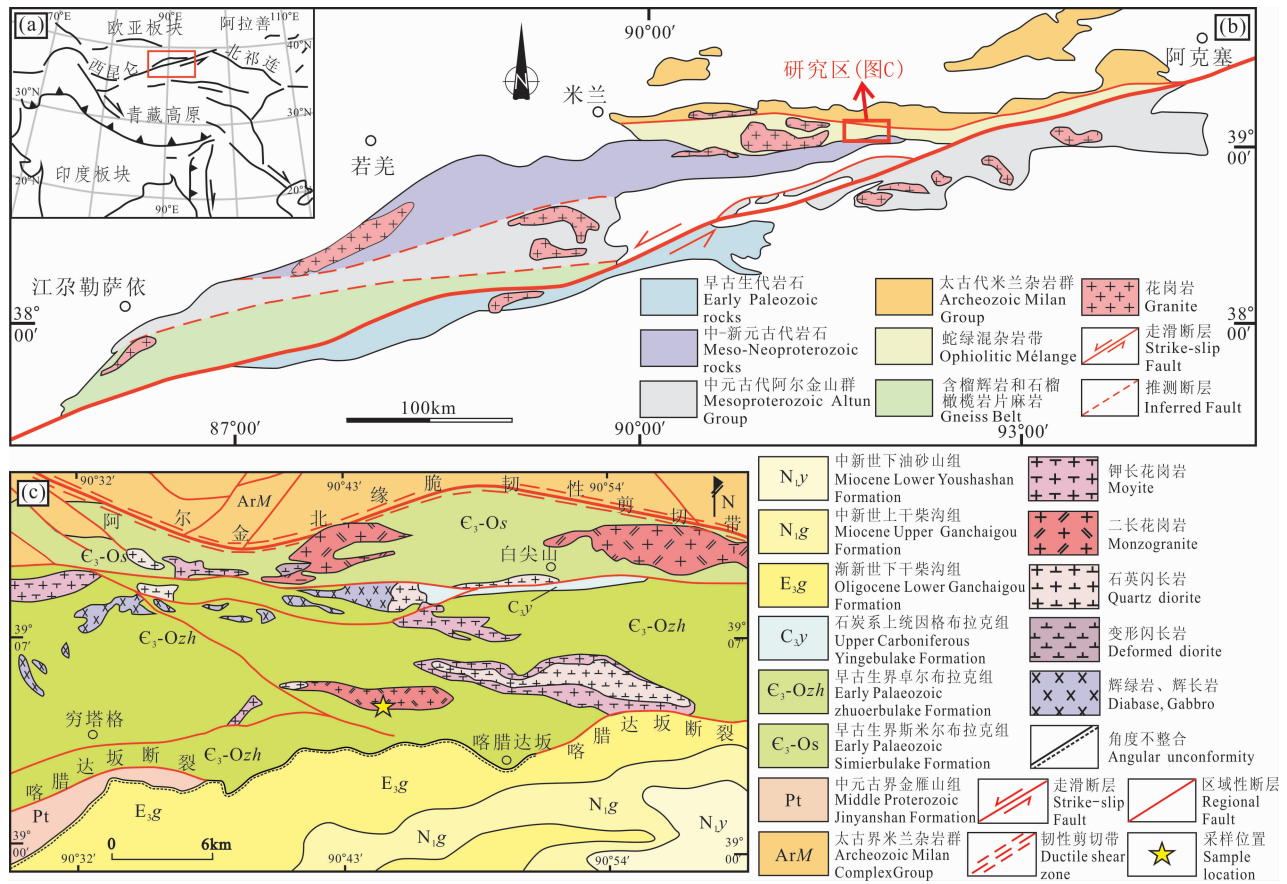


图 1 阿尔金山古构造格架简图(b,据张建新等, 2011 修改)和研究区区域地质简图(c,据 Chen Bailin et al. , 2016 修改)
Fig. 1 Tectonic sketch map of the Altyn Tagh (b, modified after Zhang et al. , 2011)and simplified regional geological map of the study area (c, modified after Chen Bailin et al. , 2016)

的铁、铜、铅锌矿床及矿点,是北阿尔金地区重要的铁、铜等多金属矿集区和找矿潜力靶区(Wang Xiaofeng et al. , 2004; Chen Bailin et al. , 2009, 2015)。区内广泛分布一套早古生代海相浅变质火山-沉积岩系,该套火山-沉积岩系可进一步划分为卓阿布拉克组($\epsilon_3\text{-Ozh}$)和斯米尔布拉克组($\epsilon_3\text{-Os}$),岩性主要为浅变质的玄武岩、玄武安山岩、英安岩、流纹岩、中酸性火山碎屑岩和陆源碎屑岩以及碳酸盐岩等。该套火山-沉积岩系北侧以阿尔金北缘脆-韧性剪切带为界与太古宇米兰杂岩群(Ar_{2-3}M)呈断层接触关系,南侧以喀腊达坂断裂为界与中元古界蓟县系金雁山组(Pt_2j)呈断层接触关系,新生代地层干柴沟组(E_3g)不整合覆盖其上,在区内东北侧出露有少量上石炭统的因格布拉克组(C_3y)

沉积岩系(图 1c)。区内断裂构造发育,除阿尔金北缘脆-韧性剪切带和喀腊达坂断裂以外,还可见白尖山断裂以及一系列次级小断裂,区域构造线以近 E-W 向为主。此外,区内岩浆活动强烈,主要为中-酸性的闪长岩、花岗闪长岩、似斑状二长花岗岩及辉绿、辉长岩脉等,原 1 : 20 万区域地质调查报告曾将这些中-酸性侵入岩体划入晚古生代,但通过锆石 U-Pb 稀释法及最新的 SHRIMP 锆石 U-Pb 测年将其修订为早古生代(Gehrels et al. , 2003; Han Fengbin et al. , 2012)。

2 岩相学特征

本文报道的二长花岗岩位于喀腊大湾地区南段,呈近 E-W 向的长条状展布,与区域构造构造方

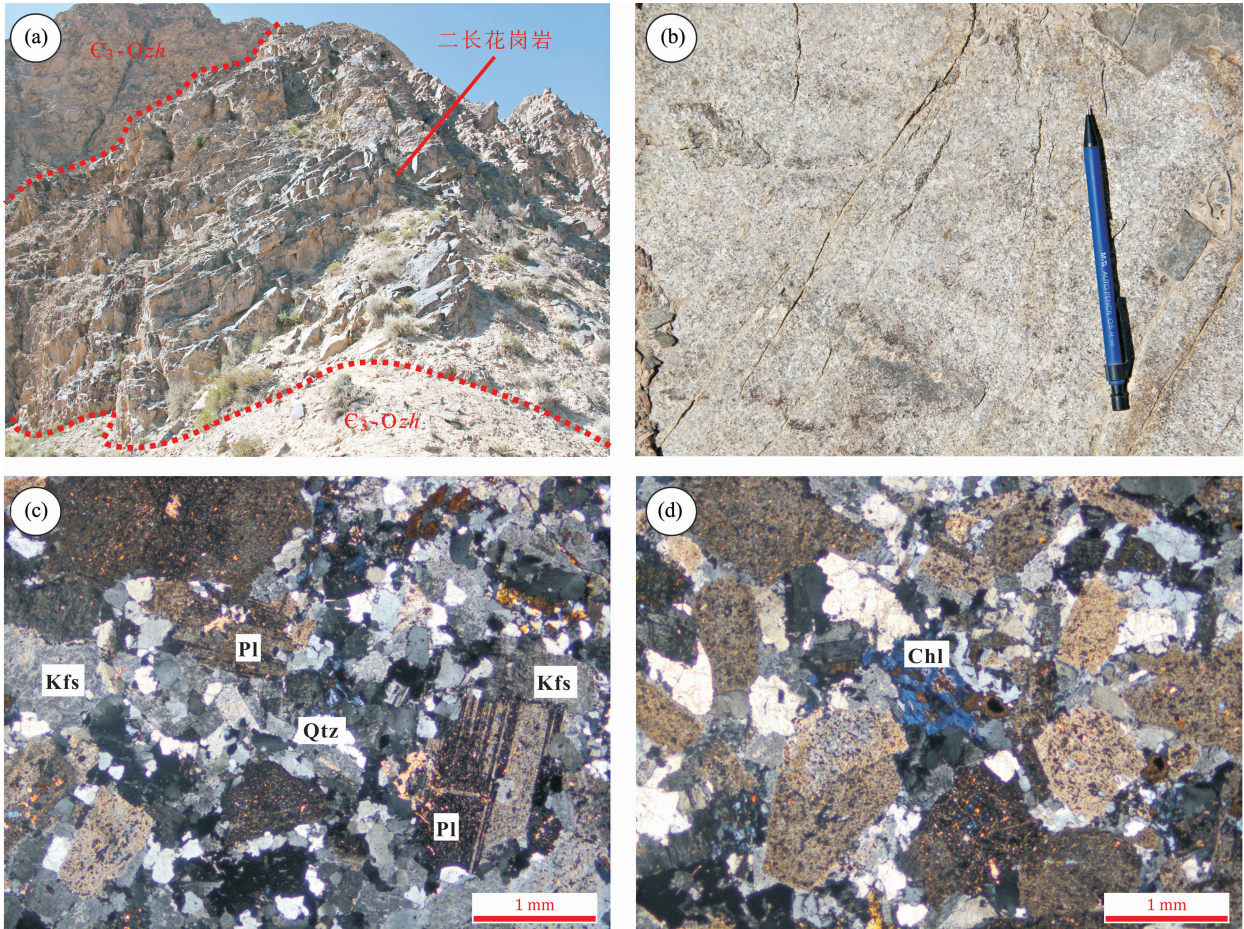


图 2 喀腊大湾南段二长花岗岩野外及显微镜下照片

Fig. 2 Field photos and photomicrographs of the monzogranite from the southern Kaladawan area

(a)—二长花岗岩侵入于卓尔布拉克组内; (b)—二长花岗岩野外露头; (c)—二长花岗岩镜下特征(正交偏光);

(d)—黑云母蚀变成绿泥石(正交偏光); Qtz—石英; Kfs—钾长石; Pl—斜长石; Chl—绿泥石

(a)—monzogranite intruding into the Zhoubulake Group; (b)—Outcrop for the monzogranite; (c)—photomicrographs

for the monzogranite(crossed-polarized light); (d)—Biotite replaced by chlorite (crossed-polarized light);

Qtz—Quartz; Kfs—K-feldspar; Pl—Plagioclase; Chl—Chlorite

向一致,总出露面积约 20km²,二长花岗岩与卓尔布拉克组(Є₃-O_{3h})火山-沉积岩呈明显的侵入接触关系(图 2a),其西侧被后期的一小岩株所侵入。野外可见二长花岗岩呈灰白色,细粒结构,块状构造(图 2b)。显微镜下可见喀腊大湾南段二长花岗岩主要由斜长石(40%~45%)、钾长石(30%~35%)、石英(20%~25%)及少量的黑云母(~5%)等矿物组成,含有少量磷灰石、榍石和磁铁矿等副矿物。斜长石颗粒大小为 1~3mm,呈自形板状,An 牌号在 10~20 之间,为更长石-钠长石,镜下可见钠长石双晶;同时,少量斜长石发生了绢云母化、黏土化及绿泥石化,并经熔蚀作用形成了熔蚀麻点(图 2c);钾长石呈它形分布在斜长石粒间,形成二长结构;石英多呈它形粒状,粒径一般在 0.2~0.8mm 之间,充填于长石的间隙(图 2c);镜下可见少量黑云母蚀变成绿泥石,形成了黑云母的假象(图 2d)。

3 样品分析方法

本文共选取了 5 件新鲜的岩石样品进行地球化学全分析。实验在中国地质科学院国家测试中心完成,氧化物检测使用仪器型号为 X 荧光光谱仪 3080E,其中 FeO 采用容量滴定法,检测下限为 0.05%。微量及稀土元素分析测试使用仪器型号为等离子质谱(X-series)测定,其中稀土元素和部分微量元素检测下限为 0.05×10⁻⁶。

锆石测年样品按常规方法将岩石样品粉碎至

300μm,经磁法和重液分选后,在双目镜下挑选出无裂隙、无包体、干净透明的自形程度较好的锆石颗粒,并将其与标准锆石 TEM(417Ma)一起在玻璃板上用环氧树脂固定、抛光,然后进行透射光、反射光及阴极发光照相,SHRIMP 锆石 U-Pb 测年在北京离子探针中心 SHRIMP II 型离子仪上完成。标准锆石 TEM 用于元素分馏校正,U、Th、Pb 含量的测定用标准斯里兰卡锆石 SL13(U=238×10⁻⁶,t=572Ma)校正。详细的分析流程和仪器工作调节见 Song Biao et al. (2002)和 Williams(1998)。为确保仪器的稳定性和离子计数的精确性,每测试 3 个测点,进行一次标样监控。数据处理采用 Squid 程序和 Isoplot 程序完成(Ludwig, 2001),普通铅校正使用实测²⁰⁴Pb,单个数据误差为 1σ,加权平均年龄误差为 95%置信度。

锆石 Hf 同位素原位微区分析在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室完成,使用仪器为 Neptune 多接收电感耦合等离子体质谱仪(MC-ICP-MS)和 Geolas2005 193nm 激光剥蚀系统联机,分析所用的激光束斑直径为 44μm,剥蚀频率为 8Hz,采用国际标准锆石 91500 作为外标,详细的仪器运行条件及实验流程见 Hu et al. (2012),Hf 模式年龄计算方法见 Griffin et al. (2002)。

4 分析结果

4.1 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年

图 3a 为喀腊大湾南段二长花岗岩被测锆石颗

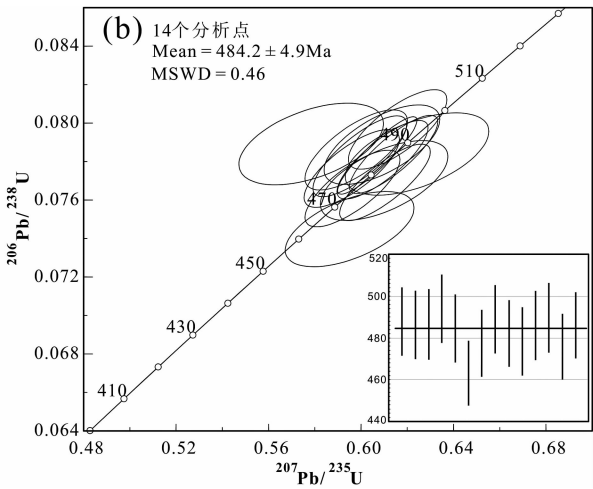
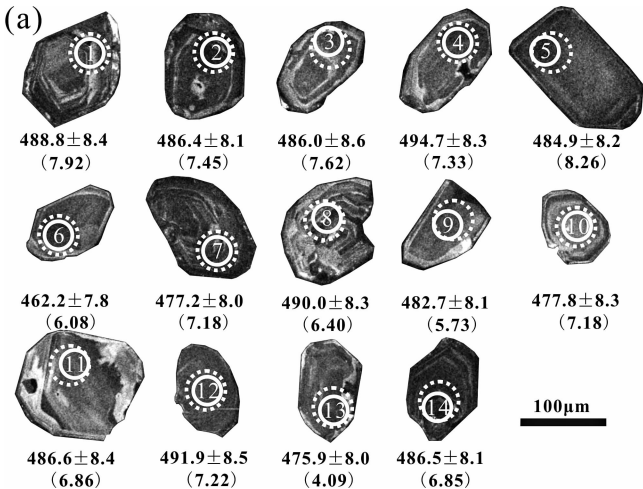


图 3 喀腊大湾南段二长花岗岩的锆石阴极发光图像、SHRIMP U-Pb 年龄和 Hf 同位素激光点(a)及 U-Pb 年龄谱和图(b)
Fig. 3 Representative cathodoluminescence (CL) images, localities of the points for SHRIMP U-Pb and Hf isotope measurement (a) and U-Pb Concordia diagram (b) for zircons of monzogranite from the southern Kaladawan
白色实线圈代表 U-Pb 年龄测点;白色虚线圈代表 Hf 同位素测点
White full line circle means laser spot position of U-Pb measurement; white dotted line circle means laser spot position of Hf isotope analysis

粒的阴极发光 (CL) 图像以及测定点位 (白色实线圈), 图 3b 和表 1 分别为被测锆石的 U-Pb 年龄谐和图和测定结果。

从图 3a 中可以看出喀腊大湾南段二长花岗岩的锆石形态主要以自形一半自形短柱状为主, 锆石颗粒呈透明一半透明的无色或淡黄色, 粒径长约 100~150 μm , 宽约 69~100 μm , 长宽比多数在 1:1~2:1, 大部分锆石具有典型的岩浆振荡环带。表 1 中可见所测锆石的 U、Th 含量变化较大, 分别为 $330 \times 10^{-6} \sim 2098 \times 10^{-6}$ 和 $142 \times 10^{-6} \sim 1576 \times$

10^{-6} , Th/U 比值介于 0.44~1.64, 平均为 0.77, 表明锆石为岩浆成因锆石 (Rubatto et al., 2002)。14 个测试点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 475.9~494.7Ma, 变化范围较小。在锆石谐和图曲线图上 (图 3b), 所有数据均位于 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 与 $^{207}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 谐和线上或附近, 并密集成群分布在一起, 14 颗锆石获得的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 $484.2 \pm 4.9\text{Ma}$ (MSDW=0.46), 该年龄代表了喀腊大湾南段二长花岗岩的形成年龄。

表 1 喀腊大湾南段二长花岗岩锆石 SHRIMP U-Pb 分析结果

Table 1 Zircon SHRIMP U-Pb analysis date of monzogranite from the southern Kaladawan

测 点 号	$^{206}\text{Pb}_\text{c}$ (%)	U($\times 10^{-6}$)	Th($\times 10^{-6}$)	$^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}^*$ ($\times 10^{-6}$)	总 $^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$	误差 ($\pm\%$)	总 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	误差 ($\pm\%$)	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ ($\pm\%$)	误差 ($\pm\%$)	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ ($\pm\%$)	误差 ($\pm\%$)	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ (Age)①	误差 (1 σ)	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ (Age)②	误差 (1 σ)
1.1	0.23	861	530	0.64	58.3	12.69	1.7	0.05704	1.2	0.0786	1.7	0.05517	1.7	487.8	± 8.2	488.8	± 8.4
1.2	0.11	1273	661	0.54	85.8	12.75	1.7	0.05776	0.96	0.0784	1.7	0.05683	1.1	486.4	± 8.0	486.4	± 8.1
1.3	0.46	330	142	0.44	22.3	12.70	1.8	0.0615	1.7	0.0784	1.8	0.0578	2.7	486.5	± 8.4	486.0	± 8.6
1.4	0.25	963	621	0.67	66.1	12.52	1.7	0.05809	1.0	0.0797	1.7	0.05606	1.5	494.2	± 8.2	494.7	± 8.3
1.5	0.11	699	601	0.89	47.0	12.79	1.7	0.05750	1.2	0.0781	1.7	0.05659	1.3	484.7	± 8.1	484.9	± 8.2
1.6	1.07	885	1401	1.64	57.2	13.28	1.7	0.06658	1.2	0.0745	1.7	0.0579	2.6	463.1	± 7.7	462.2	± 7.8
1.7	0.20	1057	1091	1.07	70.0	12.97	1.7	0.05919	0.93	0.0769	1.7	0.05755	1.3	477.7	± 7.9	477.2	± 8.0
1.8	0.38	729	445	0.63	49.6	12.63	1.7	0.05912	1.2	0.0789	1.7	0.0560	2.1	489.4	± 8.2	490.0	± 8.3
1.9	0.23	853	620	0.75	57.0	12.85	1.7	0.05757	1.1	0.0776	1.7	0.05567	1.5	482.0	± 8.0	482.7	± 8.1
1.10	0.56	401	362	0.93	26.7	12.91	1.8	0.06202	1.5	0.0770	1.8	0.0574	2.4	478.3	± 8.2	477.8	± 8.3
1.11	0.16	860	480	0.58	57.9	12.76	1.8	0.05682	1.1	0.0783	1.8	0.05555	1.4	485.8	± 8.3	486.6	± 8.4
1.12	0.62	422	253	0.62	28.8	12.59	1.8	0.05822	1.5	0.0789	1.8	0.0532	3.1	489.6	± 8.4	491.9	± 8.5
1.13	0.24	871	578	0.69	57.5	13.02	1.7	0.05843	1.1	0.0766	1.7	0.05646	1.5	475.8	± 7.9	475.9	± 8.0
1.14	0.08	2098	1576	0.78	141	12.76	1.7	0.05686	0.68	0.0783	1.7	0.05621	0.78	486.1	± 7.9	486.5	± 8.1

注: 误差为 1 σ ; Pb_c 和 Pb 分别代表普通铅和放射性成因铅;

① 为假设 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ - $^{204}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$ 年龄谐和校正普通铅, ② 为假设 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ - $^{207}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄谐和校正普通铅。

4.2 地球化学特征

4.2.1 主量元素

喀腊大湾南段二长花岗岩的主量元素含量及特征值列于表 2, 从表 2 中可以看出其主要特征为: ① SiO₂ 含量介于 66.34%~69.87% 之间, 平均值为 68.29%, 属酸性岩体, 在 SiO₂-Na₂O+K₂O 图解 (图 4a) 中, 大部分样品落在石英二长岩区域内, 仅有一个样品落在花岗岩区域内, 但也紧靠石英二长岩区域; ② 相对富碱, 其全碱 (Na₂O+K₂O) 含量为 8.31%~8.66%, 均值为 8.42%, 除样品 H359-1 外, 其余所有样品 K₂O/Na₂O 比值介于 1 左右; ③ 里特曼指数 $\sigma=2.67 \sim 2.96$, 在 K₂O-SiO₂ 图上 (图 4b), 所有样品均落入高钾钙碱性系列; ④ Al₂O₃ 含量为 15.23%~16.11%, 变化范围较小, 铝饱和指数 (A/CNK) 为 0.96~1.01, 在 A/CNK-A/NK 图解 (图 4c) 中, 样品落在准铝质-弱过铝质区域; ⑤

TiO₂、MgO、P₂O₅ 和 FeO^T 的含量均较低, 分别为 0.39%~0.58%、0.6%~0.9%、0.06%~0.11% 和 1.82%~2.34%, Mg[#] 值介于 37.07~40.65 之间。

4.2.2 微量与稀土元素

二长花岗岩体的微量及稀土元素分析结果列于表 2, 图 5a 和 b 分别为微量元素的蛛网图和稀土元素的标准配分曲线。在微量元素原始地幔标准化蛛网图 (图 5a) 上, 岩石富集大离子亲石元素 (如 Rb、Ba、Th、U 和 K) 和 Zr、Hf 等高场强元素, 亏损 Ti、Ta、Nb 等高场强元素和 Sr、P 等元素。

喀腊大湾南段二长花岗岩的稀土元素总量较高, ΣREE 为 $153.7 \times 10^{-6} \sim 217.04 \times 10^{-6}$, LREE/HREE 比值为 15.74~24.09, 平均为 20.15。在球粒陨石标准化稀土元素配分曲线图解上 (图 5b), 样品表现出轻稀土相对富集、重稀土相对亏损的右倾特征。(La/Yb)_N 变化范围较大, 在 20.74~36.96

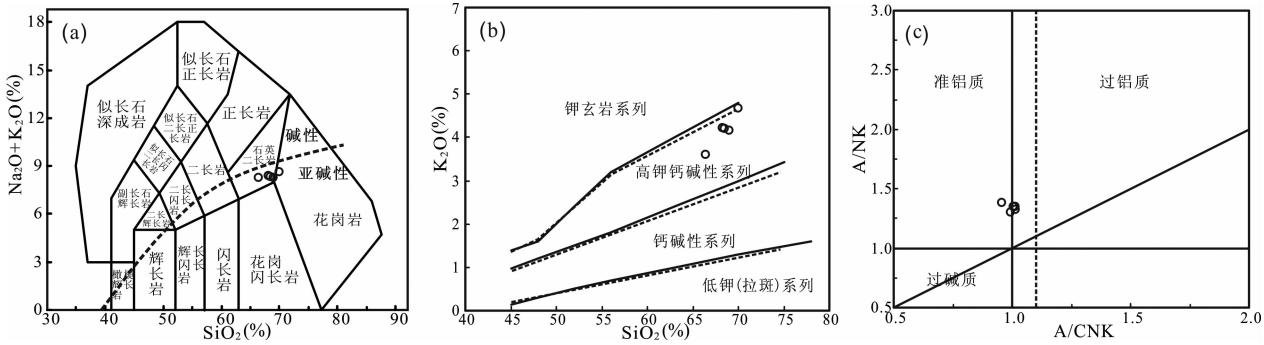


图 4 喀腊大湾南段二长花岗岩的 TAS(全碱— SiO_2)图解(a, 据 Middelmost, 1994)、 SiO_2 — K_2O 图解(b, 据 Peccerillo and Taylor, 1976)和 A/CNK—A/NK 图解(c, 据 Maniar and Piccoli, 1989)

Fig. 4 TAS(Alk vs. SiO_2) diagram (a, after Middelmost, 1994); SiO_2 vs. K_2O diagram (b, after Peccerillo and Taylor, 1976); A/CNK vs. A/NK diagram (after Maniar and Piccoli, 1989) of monzogranite from the southern Kaladawan

表 2 喀腊大湾南段二长花岗岩的主量元素(%)、微量及稀土元素($\times 10^{-6}$)分析结果

Table 2 Major (%), trace and rare element ($\times 10^{-6}$) analyses of monzogranite from the southern Kaladawan

样品号	H359-1	H359-2	H359-3	H359-4	H359-5	样品号	H359-1	H359-2	H359-3	H359-4	H359-5
SiO_2	66.34	68.87	69.87	68.3	68.44	Th	19.5	28.2	28.2	23.5	23.4
TiO_2	0.58	0.48	0.39	0.53	0.52	U	3.08	3.52	3.56	3.14	3.08
Al_2O_3	16.11	15.28	15.23	15.6	15.5	Nb	11.7	9.45	7.67	9.27	9.21
CaO	2.88	2.08	2.09	2.24	2.21	Ta	0.82	0.89	0.63	0.67	0.71
Fe_2O_3	0.77	0.49	0.54	0.84	0.69	Zr	564	389	338	485	424
FeO	1.65	1.72	1.33	1.47	1.58	Hf	11.9	9.08	8.11	10.6	9.8
MgO	0.9	0.78	0.6	0.84	0.83	La	52.2	72.2	50.8	50.8	49.5
MnO	0.04	0.03	0.03	0.03	0.03	Ce	69.6	95.1	68.1	67.3	66.6
K_2O	3.65	4.19	4.76	4.25	4.23	Pr	6.52	8.6	5.84	6.06	6.04
Na_2O	4.66	4.12	3.9	4.19	4.14	Nd	21.3	27.3	18.5	19.2	19.4
P_2O_5	0.11	0.09	0.06	0.09	0.09	Sm	3.83	4.07	3.38	3.72	3.6
LOI	1.83	1.16	1.13	1.58	1.31	Eu	1.3	1.12	1.13	1.23	1.19
Total	99.52	99.29	99.93	99.96	99.57	Gd	2.63	2.82	1.95	2.35	2.19
$\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$	8.31	8.31	8.66	8.44	8.37	Tb	0.36	0.34	0.23	0.27	0.26
$\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$	0.78	1.02	1.22	1.01	1.02	Dy	2.44	1.95	1.61	1.86	1.73
Mg #	40.65	39.16	37.07	40.22	40.20	Ho	0.52	0.39	0.32	0.35	0.36
σ	2.96	2.67	2.79	2.82	2.75	Er	1.63	1.42	1.11	1.26	1.21
A/CNK	0.96	1.01	0.99	1.00	1.01	Tm	0.23	0.15	0.13	0.17	0.18
FeO^{T}	2.34	2.16	1.82	2.23	2.20	Yb	1.7	1.32	1.11	1.33	1.2
$\text{FeO}^{\text{T}}/\text{MgO}$	2.60	2.77	3.03	2.65	2.65	Lu	0.32	0.26	0.22	0.23	0.24
$10000 \times \text{Ga}/\text{Al}$	2.29	2.23	2.20	2.28	2.11	Y	13.8	10.2	7.92	9.88	8.95
Li	2.8	2.39	1.98	2.54	2.24	Th/U	6.33	8.01	7.92	7.48	7.60
Be	1.42	1.32	1.3	1.36	1.37	Nb/Ta	14.27	10.62	12.17	13.84	12.97
Cr	3.93	1.88	4.18	4.71	2.39	La/Nb	4.46	7.64	6.62	5.48	5.37
Co	9.54	8.22	5.8	7.21	6.44	ΣREE	164.58	217.04	154.43	156.13	153.7
Ni	6.61	4.32	5.54	5.19	5.09	LREE	154.8	208.4	147.8	148.3	146.3
Cu	13.1	14.5	17.6	16.9	14.8	HREE	9.83	8.65	6.68	7.82	7.37
Zn	21.7	19.1	16.5	22.1	21.7	LREE/HREE	15.74	24.09	22.12	18.97	19.85
Ga	19.5	18	17.7	18.8	17.3	(La/Yb) _N	20.75	36.96	30.93	25.81	27.87
Rb	103	99.2	106	100	94.6	(La/Sm) _N	8.58	11.17	9.46	8.60	8.65
Sr	197	156	142	177	168	(Gd/Yb) _N	1.25	1.73	1.42	1.43	1.48
Ba	1922	1875	2208	2220	2166	δEu	1.19	0.96	1.24	1.19	1.2

之间,反映岩石具有较强的轻重稀土分馏;(La/Sm)_N和(Gd/Yb)_N分别为 8.58~11.17 和 1.25~1.73,表明轻稀土内部分馏明显,而重稀土内部分馏不明显。 δEu 介于 0.96~1.24 之间,平均为 1.14,

具有弱的正 Eu 异常,表明岩浆演化过程中斜长石没有发生显著的分离结晶或堆晶作用。

4.3 Hf 同位素特征

本文对已完成锆石 U-Pb 测年的 14 颗锆石进

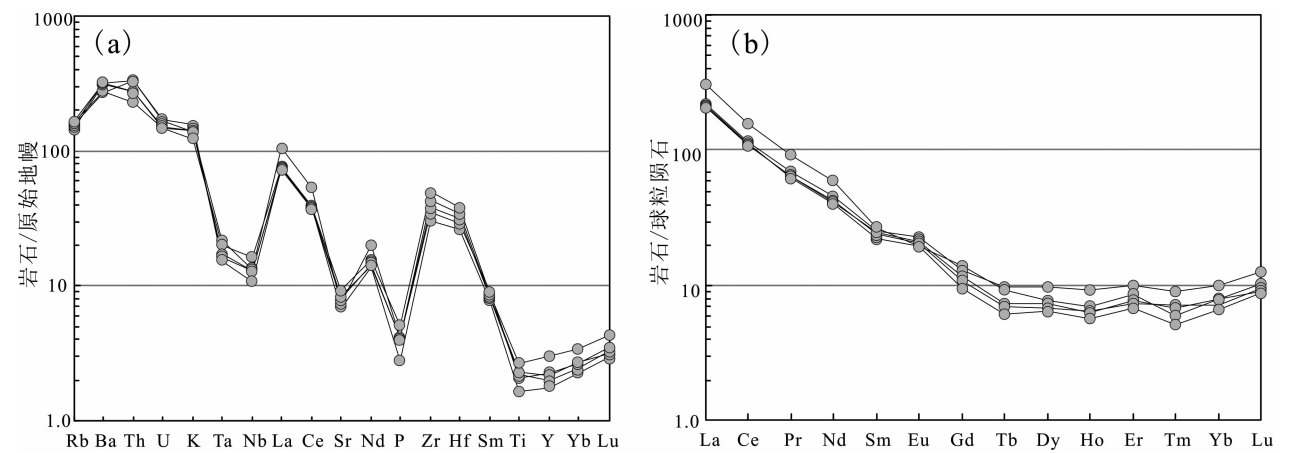


图 5 喀腊大湾南段二长花岗岩微量元素蛛网图解(a)及其稀土元素配分图解(b)
(原始地幔标准化值和球粒陨石标准化值据 Sun et al, 1989)

Fig. 5 Primitive mantle-normalized trace element patterns(a) and Chondrite-normalized REE distribution patterns (b) for monzogranite from the southern Kaladawan (The chondrite and Primitive mantle values are from Sun et al, 1989)

行了原位微区 Lu-Hf 同位素分析,测点位置见图 3a (白色虚线圈),分析结果列于表 3。从表 3 中可以看出被测锆石的¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf 比值变化范围在 0.001069~0.003051 之间,平均值为 0.002378,基本小于或略大于 0.002,表明锆石形成后具有很低放射性成因 Hf 积累,所测¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf 比值基本可以代表锆石结晶时岩浆体系的 Hf 同位素组成。同时,样品的 *f*_{Lu/Hf} 值介于-0.91~-0.97 之间,均值为-0.93,明显小于镁铁质及硅铝质地壳的 *f*_{Lu/Hf} 值(分别为-0.34 和-0.72),故二阶段模式年龄更能

反映其源区物质从亏损地幔被抽取的时间或源区物质在地壳的平均存留年龄(Di Wuchunrong et al. , 2007)。表 3 中可见喀腊大湾二长花岗岩的¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf 比值变化范围在 0.282608~0.282731 之间,加权平均值为 0.282686±0.000025,锆石 Hf 同位素初始比值 ε_{Hf}(*t*=484.2Ma)均为正值且相对集中,介于+4.26~+8.24 之间,平均为+6.88,显示了较为均一的 Hf 同位素组成,二阶段模式年龄(*t*_{DM2})为 875~1096Ma(平均为 951Ma)。

表 3 喀腊大湾南段二长花岗岩锆石 Hf 同位素分析结果												
Table 3 Zircon in-situ Hf isotopic compositions of monzogranites from the southern Kaladawan												
测点号	¹⁷⁶ Hf/ ¹⁷⁷ Hf	2σ	¹⁷⁶ Lu/ ¹⁷⁷ Hf	2σ	¹⁷⁶ Yb/ ¹⁷⁷ Hf	2σ	ε _{Hf} (0)	ε _{Hf} (<i>t</i>)	<i>t</i> _{DM1} (Ma)	<i>t</i> _{DM2} (Ma)	<i>f</i> _{Lu/Hf}	
1. 1	0.282710	0.000022	0.002045	0.000032	0.056662	0.000705	-2.19	7.82	790	898	-0.94	
1. 2	0.282706	0.000024	0.002954	0.000059	0.083121	0.001562	-2.32	7.40	815	922	-0.91	
1. 3	0.282710	0.000023	0.002749	0.000180	0.076558	0.004716	-2.20	7.59	806	912	-0.92	
1. 4	0.282687	0.000024	0.001729	0.000056	0.046474	0.001925	-3.00	7.11	816	938	-0.95	
1. 5	0.282731	0.000026	0.003051	0.000080	0.085416	0.001932	-1.45	8.24	781	875	-0.91	
1. 6	0.282678	0.000024	0.002529	0.000027	0.069607	0.000679	-3.33	6.53	847	970	-0.92	
1. 7	0.282703	0.000029	0.002841	0.000041	0.079890	0.001848	-2.43	7.33	817	926	-0.91	
1. 8	0.282670	0.000031	0.002422	0.000067	0.069176	0.001783	-3.61	6.28	857	984	-0.93	
1. 9	0.282652	0.000023	0.002031	0.000030	0.057859	0.000748	-4.26	5.76	874	1013	-0.94	
1. 10	0.282687	0.000022	0.001069	0.000053	0.027234	0.001601	-3.01	7.32	802	926	-0.97	
1. 11	0.282690	0.000023	0.003036	0.000199	0.086614	0.005507	-2.88	6.81	841	955	-0.91	
1. 12	0.282693	0.000022	0.002533	0.000015	0.067254	0.000489	-2.79	7.07	825	940	-0.92	
1. 13	0.282608	0.000022	0.001839	0.000018	0.051387	0.000829	-5.82	4.26	933	1096	-0.94	
1. 14	0.282685	0.000029	0.002462	0.000035	0.067312	0.001086	-3.07	6.80	835	955	-0.93	

5 讨论

5.1 岩石类型与构造环境

地球化学分析显示,喀腊大湾南段二长花岗岩

的 Ga/Al×10⁴=2.10~2.29,明显低于 A 型花岗岩的下限值(Ga/Al×10⁴=2.6, Whalen et al. , 1987);同时,岩体较小的 FeO^T/MgO 比值(2.60~3.02)也与 A 型花岗岩显著富铁的特征(FeO^T/

MgO=13.4, Whalen et al. , 1987)相区别,表明该岩体不属于 A 型花岗岩。主量元素分析表明该岩体为准铝质—弱过铝质($A/CNK=0.96\sim1.01$)和钙碱性岩石系列,此外,岩体具有低的 P_2O_5 含量($0.06\%\sim0.11\%$),并且随 SiO_2 含量的增高而减少,在 CIPW 标准矿物中,二长花岗岩的刚玉分子含量也均小于 1%,这些特征均与 I 型花岗岩相似(Wolf et al. , 1994; Chappell, 1999; Chappell et al. , 2001),表明喀腊大湾南段二长花岗岩属 I 型花岗岩范畴。

在微量元素原始地幔标准化蛛网图(图 5a)上,岩石显著富集 K、Rb、Ba、Th、U 等大离子亲石元素,而亏损 Ta、Nb 和 Ti 等高场强元素,显示出与俯

冲、消减作用有关的岛弧岩浆岩特征(Wood et al. , 1979; Pearce et al. , 1984; Sun et al, 1989)。在 Nb-Y 和 Rb-(Yb+Nb)构造判别图解(图 6a 和 b)上,样品分别落入火山弧花岗岩(VAG)+同碰撞花岗岩(Syn-COLG)区域和火山弧花岗岩(VAG)区域内,反映出与火山弧花岗岩的亲缘性;在 Rb/30-Hf-Ta $\times$ 3 判别图解(图 6c)中,所有样品也均落入火山弧花岗岩区域,进一步证实其形成于与大洋俯冲有关的火山弧环境。在 Th/Yb-La/Yb 图解(图 6d)中,所有样品均落在大陆边缘弧的区域内;同时,所有样品的 La/Nb 比值介于 4.46~7.64 之间,平均为 5.92,而在大陆活动边缘,岩石的 La/Nb 比值普遍大于 2(Salters et al. , 1991)。结合北阿尔金地

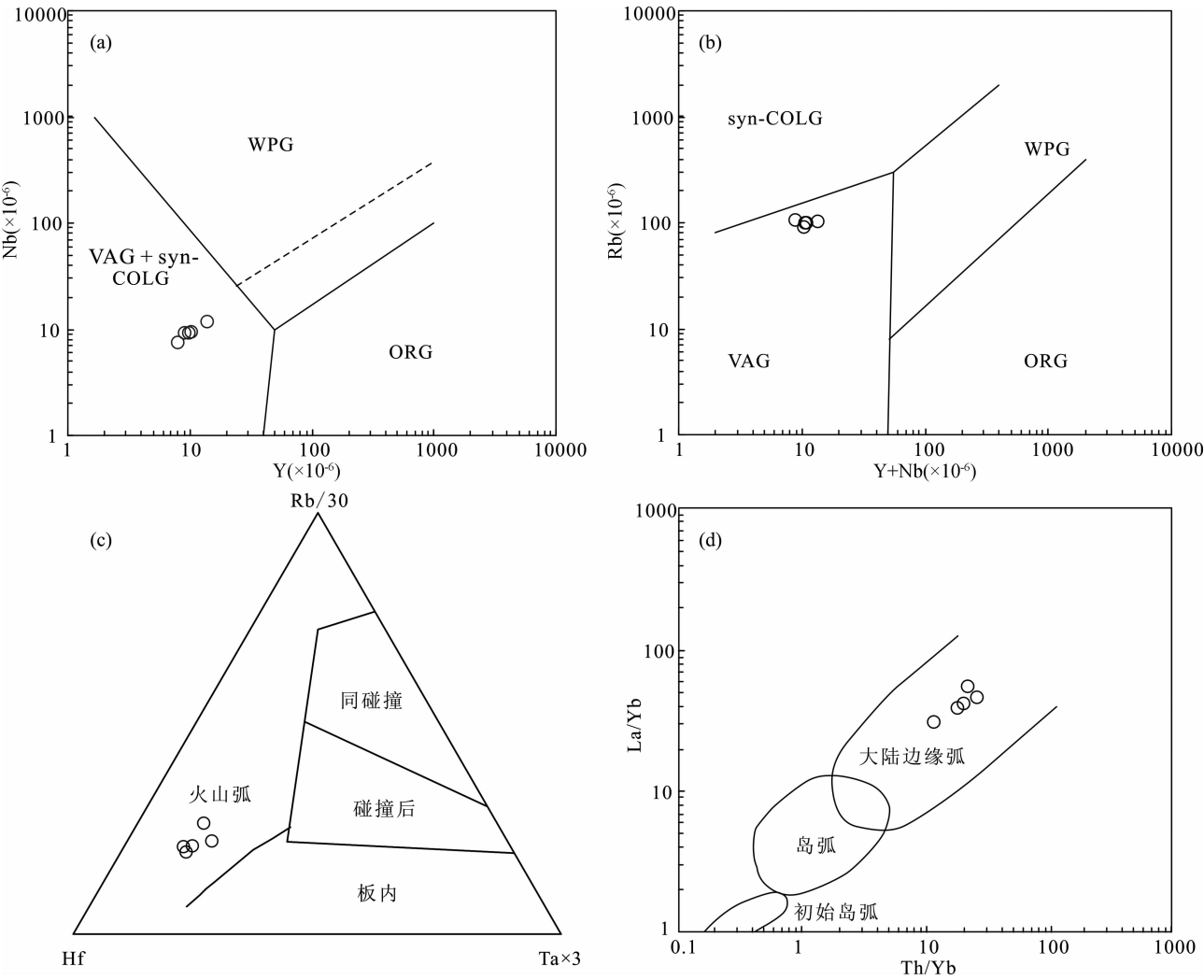


图 6 喀腊大湾南段二长花岗岩的构造环境判别图解

Fig. 6 Tectonic discrimination diagrams for monzogranite from the southern Kaladawan

(a)—Y-Nb 图解(据 Pearce et al. , 1984);(b)—Y+Nb-Rb 图解(据 Pearce et al. ,1984);

(c)—Rb/30-Hf-Ta $\times$ 3 图解(据 Harris et al, 1986);(d)—Th/Yb-La/Yb 图解(据 Condie, 1989)

(a)—Y vs. Nb diagram(after Pearce et al. , 1984); (b)—Y+Nb vs. Rb diagram (after Pearce et al. , 1984);

(c)—Rb/30-Hf vs. Ta $\times$ 3 diagram (after Harris et al, 1986); and (d)—Th/Yb vs. La/Yb diagram(after Condie, 1989)

区出露有与洋壳形成有关的蛇绿岩(Yang Jingsui et al., 2008)和与俯冲折返有关的榴辉岩、蓝片岩等高压/低温变质岩(Zhang Jianxin et al., 2005, 2007),笔者认为喀腊大湾南段二长花岗岩应形成于活动大陆边缘的火山弧环境,这与前人对该地区卓尔布拉克组和斯米尔布拉克组火山岩研究结果相一致(Gao Xiaofeng et al., 2012b; Hao Ruixiang et al., 2013; Li Songbin et al., 2013; Chen Bailin et al., 2016)。

5.2 岩浆源区讨论

实验岩石学表明,玄武质岩石部分熔融形成的岩浆具有低的 MgO 、 $\text{Mg}^\# (<40)$ 、Cr 以及 Ni 含量(Rapp, 1991; Rapp et al., 1995)。喀腊大湾南段二长花岗岩的 $\text{MgO}(0.6\% \sim 0.9\%)$ 、 $\text{Mg}^\#(37.1 \sim 40.6)$ 、Cr($1.88 \times 10^{-6} \sim 4.71 \times 10^{-6}$)和 Ni($4.32 \times 10^{-6} \sim 6.61 \times 10^{-6}$)含量较低,暗示其岩浆源区可能来自于玄武质岩石的部分熔融;同时,所有样品的 Th/U 比值在 6.33~8.01 之间,平均为 7.38,接近于下地壳的 Th/U 比值(6.0, Rudnick et al., 2003);Nb/Ta 比值范围在 10.62~14.27,平均为 12.77,明显低于幔源岩石(17.5 ± 2 , Hofmann, 1988; Green, 1995),而非常接近壳源岩石(11~12, Taylor et al., 1985; Green, 1995)。以往研究成果显示岩浆源区中石榴子石或角闪石的残留对岩浆熔体的 HREE 分配模式和 Y/Yb 比值具有显著影响,即当源区主要以石榴子石为残留相时,形成的熔体具有倾斜的 HREE 配分模式和 Y/Yb 比值明显大于 10;而当角闪石为源区主要残留相时,形成的熔体具有轻微向上凹的 HREE 配分模式及其 Y/Yb 比值一般接近于 10(Rollinson, 2003; Gao Yongfeng et al., 2003),此次获得的喀腊大湾南段二长花岗岩的 Y/Yb 比值为 7.14~8.12,平均值为 7.57, HREE 配分模式表明其基本无分馏,球粒陨石标准化稀土元素配分曲线图解显示 HREE 配分曲线具有稍微上凹的特征(图 4b),表明岩浆源区残留相以角闪石为主,由此推测喀腊大湾南段二长花岗岩应来源于下地壳角闪岩相基性岩石的部分熔融形成。

近年来,由于锆石具有高的 Hf 含量及 Hf 同位素体系封闭温度、低的 Lu 含量和 Lu/Hf 比值以及锆石形成后没有明显放射性成因 Hf 的积累等一系列优势,从而使得 Hf 同位素分析成为了示踪岩浆源区的重要工具(Amelin et al., 1999; Scherer et al., 2000; Griffin et al., 2000; Wu Fuyang et al.,

2007)。此次,本文获得的二长花岗岩初始 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值为 0.282608~0.282731, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值介于 +4.26~+8.24,均值为 +6.88;二阶段模式年龄(t_{DM2})为 875~1096Ma,均值为 951Ma。在 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ - t 图解(图 7a)中,所有数据均落在亏损地幔演化线和球粒陨石演化线之间,显示在成岩过程中有较多幔源物质的参与。以往研究表明,幔源物质参与花岗岩成岩过程的方式可能有两种情形,一种为幔源岩浆与其诱发的地壳物质部分熔融形成的长英质岩浆在地壳深部混合形成壳幔混源岩浆;另一种为幔源岩浆首先侵入到地壳基底岩石中形成新生地壳,然后在后期热事件的影响下,这种既有新生地壳又有古老基底地壳构成的混合地壳原岩发生部分熔融而形成混合岩浆(Qiu Jiansheng et al., 2008)。就喀腊大湾南段二长花岗岩而言,所有锆石的 Hf 同位素组成均显示为正的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值,且具有变化范围较小的特征(图 7b),这种特征与幔源岩浆和其诱发的地壳物质部分熔融形成的长英质岩浆在地壳深部直接混合形成的壳幔混合岩浆所具有的 Hf 同位素组成变化范围较大、 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值散布于正值和负值之间的特征明显不同(Qiu Jiansheng et al., 2008; Zhao Jiaolong et al., 2012),而与新生地壳和古老基底地壳组成的混合地壳发生部分熔融形成的混合岩浆所具有的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 均为正值且 Hf 同位素组成变化较小的特征更为相似,因此推测喀腊大湾南段二长花岗岩的岩浆源区更可能经历了后一种壳幔混合模式,而这种模式也更好地解释了壳幔混合 I 型花岗岩的成因(Pithcher et al., 1985; Jahn et al., 2000; Wu Fuyuan et al., 2003)。另外,在反映岩浆演化方式的 MgO-FeO^T 图解(图 8)中,也可以明显看出喀腊大湾南段二长花岗岩呈现的趋势与分离结晶的趋势线明显不同,而与岩浆混合的趋势线相一致,进一步支持该岩体经历了岩浆混合作用。

5.3 地质意义

近年来,随着国内外众多学者对北阿尔金地区构造岩浆事件的详细研究,获得了一大批重要成果和关键数据。已有年代学资料显示,北阿尔金在早古生代时期构造岩浆活动十分强烈,并可大致划分为两期岩浆作用,第一期岩浆作用主要为与洋壳俯冲消减作用有关的弧岩浆岩,其形成的岩石类型主要为辉长岩、闪长岩、石英闪长岩、花岗闪长岩等岩浆岩,显示出一套较为完整从基性到中性再到酸性的岩浆演化序列, TIMS 锆石 U-Pb 测年、LA-ICP-MS 和 SHRIMP 锆石 U-Pb 测年显示它们的成岩年

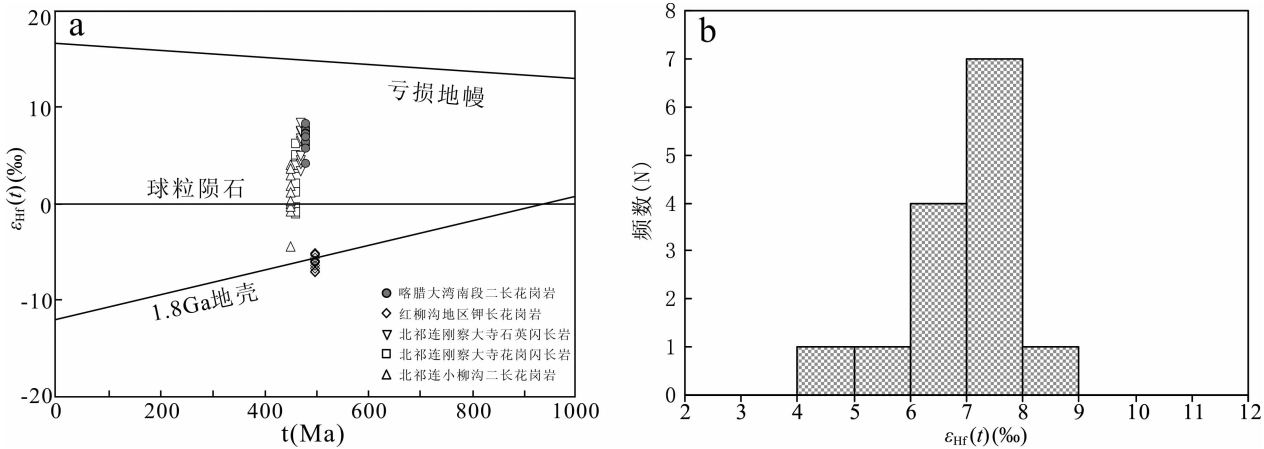


图 7 喀腊大湾南段二长花岗岩的 $\epsilon_{Hf}(t)$ -锆石 U-Pb 年龄图解(a)和锆石 $\epsilon_{Hf}(t)$ 值的频率分布直方图(b)

Fig. 7 $\epsilon_{Hf}(t)$ vs. U-Pb ages diagram(a)and histogram of zircon $\epsilon_{Hf}(t)$ values(b)

for monzogranite from the southern Kaladawan

红柳沟钾长花岗岩数据引自 Kang Lei et al. (2011);北祁连褶皱带南侧的刚察大寺岩体数据引自

Qin Haipeng et al. (2012);北祁连小柳沟二长花岗岩数据引自 Zhao Xinmin et al. (2014)

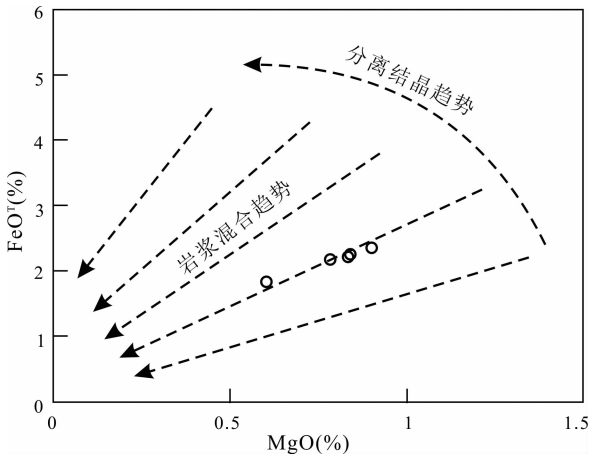


图 8 喀腊大湾南段二长花岗岩的 FeO^T - MgO

图解(底图据 Zorpi, 1989)

Fig. 8 FeO^T vs. MgO diagrams of monzogranite from the southern Kaladawan(after Zorpi, 1989)

龄主要集中在 $500.3 \pm 1.2 \sim 443 \pm 5$ Ma (Gehrels et al., 2003; Qi Xuexiang et al., 2005a; Chen Xuanhua et al., 2003a; Hao Jie et al., 2006; Zhang Zhanwu et al., 2012; Wu Cailai et al., 2007; Kang Lei et al., 2011; Han Fengbin et al., 2012; Meng Lingtong et al., 2015; Wu Yu et al., 2016; Chen Bailin et al., 2016), 这意味着在中寒武世一晚奥陶世, 北阿尔金经历了大规模的与大洋俯冲消减作用有关的岩浆活动事件, 形成了众多具有火山弧特征的岩浆岩; 第二期岩浆作用主要为与同碰撞一后碰撞构造环境有关的花岗岩体, 其形成的岩石类型以中一酸性侵入岩为主, LA-ICP-MS 和

SHRIMP 锆石 U-Pb 测年获得其成岩时代主要介于 404.7 ± 9.8 Ma $\sim 446.6 \pm 5.2$ Ma (Gehrels et al., 2003; Qi Xuexiang et al., 2005b; Wu Cailai et al., 2005, 2007, 2009; Han Fengbin et al., 2012; Yang Zijiang et al., 2012), 说明在早志留世一早泥盆世, 北阿尔金洋主体已基本关闭, 北阿尔金已处于同碰撞一后碰撞的造山演化阶段, 并且根据 Sr/Y 比值的变化, 将 $440 \sim 420$ Ma 作为北阿尔金由同碰撞阶段(挤压, 地壳加厚)向碰撞后阶段(伸展, 地壳减薄)的构造转换时期 (Meng Lingtong et al., 2016)。本文利用 SHRIMP 锆石 U-Pb 测年获得喀腊大湾南段二长花岗岩的 $^{206}Pb/^{238}U$ 加权平均年龄为 484.2 ± 4.9 Ma, 地球化学分析显示其具有陆缘弧岩浆岩的特征, 其成岩时代与构造背景均与第一期弧岩浆岩事件相吻合, 由此, 笔者认为喀腊大湾南段二长花岗岩应形成于大洋俯冲消减背景下的活动大陆边缘弧环境, 是北阿尔金洋在早古生代俯冲消减作用的产物。在大地构造位置上, 喀腊大湾南段二长花岗岩与同时期形成的其它弧岩浆岩一同出露在红柳沟-拉配泉蛇绿混杂岩带和阿中地块所夹持的狭长地带内(图 9), 共同构成了一条巨大的近 E-W 向展布的弧岩浆岩带, 暗示在早古生代时期阿中地块属于安第斯型活动大陆边缘。空间上, 这些弧岩浆岩主要分布在红柳沟-拉配泉蛇绿混杂岩带的南侧, 部分中一酸性弧岩浆岩体还侵入到阿中地块中元古代的浅变质岩系之中 (Hao Jie et al., 2006), 表明在中寒武一晚奥陶世时期北阿尔金洋向南侧阿中地块发生了强烈的俯冲消减作用 (Sobel et

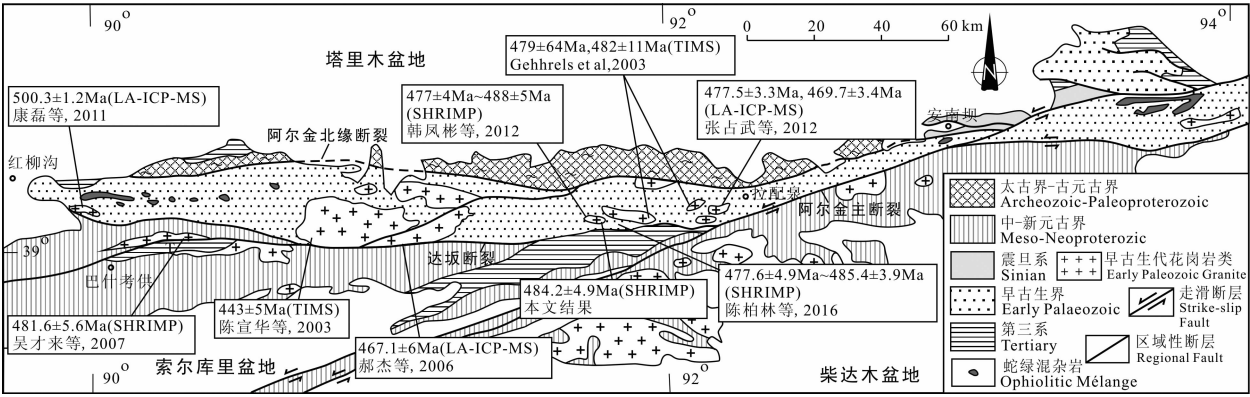


图 9 北阿尔金早古生代弧岩浆岩分布简图(底图据 Chen Xuanhua et al. , 2003b,修改)
Fig. 9 Geological map of the Northern Altyn Tagh showing distribution the Early Paleozoic arc-related magmatic rocks (modified after Chen Xuanhua et al. , 2003b)

al. , 1999; Gehrels et al. , 2003; Chen Xuanhua et al. , 2003a; Hao Jie et al. , 2006)。

此外,Hf 同位素已成为示踪和探讨岩浆源区的重要方法和手段(Griffin et al. , 2000, 2002; Wu Fuyuan et al. , 2007)。到目前为止,对于北阿尔金早古生代弧岩浆岩的源区探讨,前人仅对其西段红柳沟地区的钾长花岗岩开展了 Hf 同位素研究,通过 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年获得该岩体成岩年龄为 $500.3 \pm 1.2\text{Ma}$,其形成于与洋壳俯冲消减作用有关的火山弧(陆缘弧)环境(Kang Lei et al. , 2011),这和本文报道的喀腊大湾南段二长花岗岩在形成时代和构造环境具有极强的相似性,但在 Hf 同位素特征上,钾长花岗岩显示为负的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值($-7.13 \sim -5.12$) (图 7)和较老的二阶段模式年龄($t_{\text{DM}2} = 1786 \sim 1912\text{Ma}$),被认为是由元古宇地壳中变砂屑质沉积岩部分熔融形成的(Kang Lei et al. , 2011),本文获得喀腊大湾南段二长花岗岩的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值均为正值($+4.26 \sim +8.24$),并且变化范围较小,反映有幔源新生地壳物质参与成岩过程,这说明北阿尔金早古生代弧岩浆岩的源区除具有单一的地壳物质来源以外,还具有幔源新生地壳物质的贡献,并与地壳物质发生了一定程度的壳幔混合作用。值得注意的是,在北阿尔金邻区北祁连地区也广泛出露有早古生代与洋壳俯冲消减作用有关的中-酸性侵入岩体,近几年的研究成果揭示,这些岩体在成岩过程中也经历了显著的壳幔岩浆混合作用(Qin Haipeng et al. , 2012; Chen Yuxiao et al. , 2014; Zhao Xinmin et al. , 2014),尤其是位于北祁连褶皱带南侧的刚察大寺杂岩体,该岩体的成因被认为与北祁连洋向南俯冲有关,前人获得该岩体的形成年龄为 $462.7 \pm 2.8\text{Ma} \sim 473.4 \pm 3.8\text{Ma}$,其中花岗闪长岩

的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值和二阶段模式年龄分别为 $-1.1 \sim +6.2$ 和 $680 \sim 1430\text{Ma}$,石英闪长岩的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值和二阶段模式年龄分别为 $+3.4 \sim +8.8$ 和 $890 \sim 1240\text{Ma}$,均反映出在成岩过程中发生了不同程度的壳幔岩浆混合作用(Qin Haipeng et al. , 2012),与本文报道的喀腊大湾南段二长花岗岩具有非常良好的可对比性(图 7),表明北阿尔金和北祁连两地的早古生代与俯冲消减作用相关的中-酸性侵入岩体均具有壳幔岩浆混合的特征。前人通过对比研究发现,北阿尔金与北祁连不论是在古构造岩石单元、构造演化历程及动力学背景方面,还是在成矿地质条件和矿床成因类型方面均具有非常好的相似性,进而认为两者在阿尔金左行走滑断裂形成以前可能为一个统一的整体,北阿尔金是北祁连的西延部分(Xu Zhiqin et al. , 1999; Zhang Jianxin et al. , 2005, 2006, 2010; Yang jingsui et al. , 2008; Wu Cailai et al. , 2009; Meng Fancong et al. , 2010; Chen Bailin et al. , 2010)。而此次在北阿尔金和北祁连两地的早古生代与俯冲消减作用有关的岩浆弧侵入岩均具有壳幔岩浆混合作用的发现,也为北阿尔金曾是北祁连的西延部分提供了新的佐证,同时,这一认识也为北阿尔金及其邻区造山带内弧岩浆岩的成因探讨以及深部壳-幔物质循环研究提供了重要信息。

6 结论

(1)喀腊大湾南段二长花岗岩具有富碱、高钾和低 MgO 、 P_2O_5 、 TiO_2 和 FeO^{T} 的特征,岩石铝饱和指数(A/CNK)为 $0.96 \sim 1.01$,属准铝质-弱过铝质钙碱性 I 型花岗岩。

(2)喀腊大湾南段二长花岗岩富集大离子亲石

元素(如 K、Rb、Ba、Th、U),亏损高场强元素(如 Ti、Ta、Nb、P),显示出弧岩浆岩地球化学特征,根据构造判别图解及区域地质背景分析,认为岩体形成于活动大陆边缘的火山弧环境,是北阿尔金洋向南俯冲消减过程的岩浆响应。

(3)SHRIMP 锆石 U-Pb 定年获得二长花岗岩的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 $484.2 \pm 4.9\text{Ma}$ (MSDW=0.46),反映岩体成岩时代为早奥陶世。

(4)喀腊大湾南段二长花岗岩岩浆锆石的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 $+4.08 \sim +8.26$,且相对集中,二阶段模式年龄(t_{DM2})为 $875 \sim 1099\text{Ma}$,指示成岩过程中有显著的幔源新生地壳物质参与。综合分析表明,二长花岗岩可能起源于新生地壳和古老基底地壳构成混合地壳的部分熔融,岩体在形成过程中经历岩浆混合作用。

致谢:匿名审稿人对本文提出宝贵的建设性意见和建议,在此谨表示衷心的感谢!

References

- Amelin Y, Lee D C, Halliday A N, Pidgeon R T. 1999. Nature of the Earth's earliest crust from hafnium isotopes in single detrital zircons. *Nature*, 399(6733):252~255.
- 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, White A J R. 2001. Two contrasting granite types: 25 years later. *Australian Journal of Earth Science*, 48(4): 489~499.
- Chen Bailin, Wang Shixin, Qi Wanxiu, Chen Zhengle, Liu Rong, Yang Feng, Jiang Rongbao, Li Li, Yang Yi, Li Xuezh. 2008. Study on the Dapinggou ductile-brittle deformation belt in northern Altun margin area, NW China. *Acta Petrologica Sinica*, 24(4): 0637~0644(in Chinese with English abstract).
- Chen Bailin, Jiang Rongbao, Li Li, Chen Zhengle, Qi Wanxiu, Liu Rong, Cui Lingling, Wang Shixin. 2009. Discovery of iron ore zones in the Kaladawan area within the eastern part of the Altun Mountains and Its significance. *Acta Geoscientia sinica*, 30(2): 143~154 (in Chinese with English abstract).
- Chen Bailin, Cui Lingling, Bai Yanfei, Wang Shixin, Chen Zhengle, Li Xuezh, Qi Wanxiu, Liu Rong. 2010. A determining on the displacement of the Altun Tagh sinistral strike-slip fault, NW China: New evidence from the tectonic metallogenetic belt in the eastern part of Altun Tagh Mountains. *Acta Petrologica Sinica*, 26(11): 3387~3396 (in Chinese with English abstract).
- Chen Bailin, Cui Lingling, Chen Zhengle. 2014. EBSD fabrics analysis of deformed rocks from Kaladawan area, Altun Mountains, NW China. *Acta Geologica Sinica*, 88(8):1475~1484(in Chinese with English abstract).
- Chen Bailin, Wang Yong, Chen Zhengle, Li Songbin, Jiang Rongbao, Han Fengbin, Cui lingling, Li Li, Zhao Shuming, Qi Wanxiu, Yang Yi, Wang Shixin, Zhou Yonggui, Hao Ruixiang. 2015. A study of the structural system of ore-forming in Kaladawan ore clustering area, Altun Tagh Mountains, NW China. *Earth Science Frontiers*, 22(4):67~77 (in Chinese with English abstract).
- Chen Bailin, Li Songbin, Jiang Rongbao, Chen Zhengle, Han Fengbin, Cui lingling, Li Li, Zhao Shuming, Qi Wanxiu, Yang Yi, Wang Shixin, Wang Yong, Zhou Yonggui, Hao Ruixiang. 2016. Zircon SHRIMP U-Pb dating of intermediate-felsic volcanic rocks from the Kaladawan Area, Altun Mountains and Its tectonic environment. *Acta Geologica Sinica*, 90(4): 708~727(in Chinese with English abstract).
- Chen Xuanhua, Gehrels G E, Wang Xiaofeng, Yang Feng, Chen Zhengle. 2003a. 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).
- Chen Xuanhua, Yin An, Gehrels G E, Cowgill E S, Grove M, Harrison T M, Wang Xiaofeng. 2003b. Two phases of Mesozoic north-south extension in the eastern Altyn Tagh range, northern Tibetan Plateau. *Tectonics*, 22(5):1053. doi: 10.1029/2001TC001336.
- Chen Yuxiao, Song Shuguang, Niu Yaoling, Wei Chunjing. 2014. Melting of continental crust during subduction initiation: A case study from the Chaidanuo peraluminous granite in the North Qilian suture zone. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 132:311~336.
- Chen Zhengle, Wan Jinglin, Wang Xiaofeng, Chen Xuanhua, Pan Jinhua. 2002. Rapid strike-slip of the Altyn Tagh fault at 8 Ma and Its geological implications. *Acta Geoscientia sinica*, 23(4): 295~300(in Chinese with English abstract).
- Chen Zhengle, Gong Hongliang, Li Li, Wang Xiaofeng, Chen Bailin, Chen Xuanhua. 2006. Cenozoic uplifting and exhumation process of the Altyn Tagh mountains. *Earth Science Frontiers*, 13(4): 91~102 (in Chinese with English abstract).
- Condie K C. 1989. Geochemical changes in basalts and andesites across the Archean-Proterozoic boundary: Identification and significance. *Lithos*, 23(1):1~18.
- Cowgill E, Yin An, Harrison T M, Wang Xiaofeng. 2003. Reconstruction of the Altyn Tagh fault based on U-Pb geochronology: Role of back thrusts, mantle sutures, and heterogeneous crustal strength in forming the Tibetan Plateau.

- Journal of Geophys Research, 108(87):2346. doi: 10. 1029/2002 JB002080.
- Diwu Chunrong, Sun Yong, Lin Ciluan, Liu Xiaoming, Wang Hongliang. 2007. Zircon U-Pb ages and Hf isotopes and their geological significance of Yiyang TTG gneisses from Henan province, China. *Acta Petrologica Sinica*, 23(2): 253~262(in Chinese with English abstract).
- Gao Xiaofeng, Xiao Peixi, Guo Lei, Dong Zengchan, Xi Rengang. 2012a. Opening of an early Paleozoic limited oceanic basin in the northern Altyn area: Constraints from plagiogranites in the Hongliugou-Lapeiquan ophiolitic mélange. *Science China (Earth Science)*, 54(12): 1871~1879.
- Gao Xiaofeng, Xiao Peixi, Kang Lei, Guo Lei, Dong Zengchan, Xi Rengang. 2012b. The origin of volcanic rocks in the Kaladawan iron ore district of eastern Altun Mountains and its geological and metallogenic significance. *Geological Bulletin of China*, 31(12):2070~2075(in Chinese with English abstract).
- Gao Yongfeng, Hou Zengqian, Wei Ruihua. 2003. Neogene porphyries from gangdese: petrological geochemical characteristics and geodynamic significances. *Acta Petrologica Sinica*, 19(3): 418~428(in Chinese with English abstract).
- Gehrels G, Yin An, Wang Xiaofeng. 2003. Magmatic history of the northeastern Tibetan Plateau. *Journal of Geophys Research*, 108(B9): 2423. doi: 10. 1029/2002 JB002080.
- Green T H. 1995. Significance of Nb/Ta as an indicator of geochemical processes in the crust-mantle system. *Chemical Geology*, 120: 347~359.
- Griffin W L, Wang Xiang, Jackson S E, Pearson N J, O'Reilly S Y, Xu Xisheng, Zhou Xinmin. 2002. Zircon chemistry and magma mixing, SE China: in-situ analysis of Hf isotopes, Tonglu and Pingtan igneous complexes. *Lithos*, 61(3): 237~269.
- Griffin W L, Pearson N J, Belousova E, Jackson S E, Van Acherbergh E, O'Reilly S Y, Shee S R. 2000. The Hf isotope composition of cratonic mantle: LAM-MC-ICPMS analysis of zircon megacrysts in kimberlites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64(1):133~147.
- Han Fengbin, Chen Bailin, Cui Lingling, Wand 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): 2271~2281(in Chinese with English abstract).
- Hao Jie, Wang Erqi, Liu Xiaohan, Sang Haiqing. 2006. Jinyanshan collisional orogenic belt of the early Paleozoic in the Altun mountains: evidence from single zircon U-Pb and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 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 implication. *Acta Geoscientia Sinica*, 34(3): 307~317(in Chinese with English abstract).
- Harris N B W, Pearce J A, Tindle A G. 1986. Geochemical characteristics of collision-zone magmatism. Geological Society, London, Special Publications, 19(1): 67~81.
- Hofmann A W. 1988. Chemical differentiation of the earth: the relationship between mantle, continental crust, and oceanic crust. *Earth and Planetary Science Letters*, 90(3): 297~314.
- Hu Zhaochu, Liu Yongsheng, Gao Shan, Liu Wengui, Zhang Wen, Tong Xirun, Lin Lin, Zong Keqing, Li Ming, Chen Haihong, Zhou Lian, Yang Lu. 2012. Improved in situ Hf isotope ratio analysis of zircon using newly designed X-skimmer cone and jet sample cone in combination with the addition of nitrogen by laser ablation multiple collector ICP-MS. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 27(9): 1391~1399.
- Jahn B M, Wu Fuyuan, Chen Bin. 2000. Granitoids of the Central Asian Orogenic Belt and continental growth in the Phanerozoic. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth Sciences*, 91(1-2):181~193.
- 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).
- Li Songbin, Chen Bailin, Chen Zhengle, Hao Ruixiang, Zhou Yonggui, Han Fengbin. 2013. Geochemistry and tectonic implications of the Early Paleozoic felsic to intermediate volcanic rocks from Kaladawan area, North Altyn. *Geological Review*, 59(3): 423~436(in Chinese with English abstract).
- Liu Han, Wang Guocan, Yang Zijiang, Luo Yanjun, Gao Rui, Huang Wenxing. 2013. Geochronology, geochemistry of Qashikansayi basalts and its constraint on closure progress of the North Altyn Ocean. *Acta Geologica Sinica*, 87(1):38~54 (in Chinese with English abstract).
- 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. *Acta Petrologica Sinica*, 15(1): 57~64 (in Chinese with English abstract).
- Ludwig K R. 2001. *Squid 1.02: a user's manual*. Berkeley Geochronology Centre. Special Publication, 2:1~19.
- Maniar P D, Piccoli P M. 1989. Tectonic discrimination of granitoids. *Geological Society of America Bulletin*, 101(5): 635~643.
- Meng Fancong, Zhang Jianxin, Yu Shengyao, Cheng Songyong.

2010. The early Paleozoic pillow basalt in Northern Altyn, Western China and its tectonic implications. *Acta Geologica Sinica*, 84(7): 981~999(in Chinese with English abstract).
- Meng Lingtong, Chen Bailin, Luo Dike, Wang Yong, Sun Yue, Wu Yu, Zhang Hao, Wang Tong. 2015. SHRIMP Zircon U-Pb geochronology of Northern 4337 highland granodiorite in Kaladawan Area of Northern Altun Mountains and its tectonic implications. *Journal of Jilin University: Earth Science Edition*, 45(6): 1757~1771 (in Chinese with English abstract).
- 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(2): 295~307 (in Chinese with English abstract).
- Middlemost E A K. 1994. Naming materials in the magma/igneous rock system. *Earth-Science Reviews*, 37(3-4): 215~224.
- Pearce J A, Harris N B W, Tindle A G. 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *Journal of Petrology*, 25(4): 956~983.
- Peccerillo A, Taylor S R. 1976. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, Northern Turkey. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 58: 63~81.
- Pitcher W S, Atherton M D, Cobbing E J, Beckinsale R D. 1985. Magmatism at a plate edge: the Peruvian Andes. Glasgow: Blackie-Halsted Press, 1~328.
- Qiu Jiansheng, Xiao E, Hu Jian, Xu Xisheng, Jiang Shaoyong, Li Zhen. 2008. Petrogenesis of highly fractionated I-type granites in the coastal area of northeastern Fujian Province: Constraints from zircon U-Pb geochronology, geochemistry and Nd-Hf isotopes. *Acta Petrologica Sinica*, 24(11): 2468~2484 (in Chinese with English abstract).
- Qi Xuexiang, Li Haibin, Wu Cailai, Yang Jingsui, Zhang Jianxin, Meng Fancong, Shi Rendeng, Chen Songyong. 2005a. SHRIMP U-Pb zircon dating for Qishikansayi granodiorite, the Northern Altyn Tagh Mountains and its geological implications. *Chinese Science Bulletin*, 50(5): 440~445 (in Chinese with English abstract).
- Qi Xuexiang, Wu Cailai, Li Haibin. 2005b. SHRIMP U-Pb age of zircons from Kazisayi granite in the northern Altyn Tagh mountains and its significations. *Acta Petrologica Sinica*, 21(3): 859~866(in Chinese with English abstract).
- Qin Haipeng. 2012. Petrology of early paleozoic granites and their relation to tectonic evolution of orogen in the North Qinlian orogenic belt. Beijing: Institute of Geology Chinese Academy of Geological Sciences, 1~141 (in Chinese with English abstract).
- Rapp R P, Watson E B, Miller C F. 1991. Partial melting of amphibolite/eclogite and the origin of Archean trondhjemites and tonalites. *Precambrian Research*, 51(1): 1~25.
- Rapp R P, Watson E B. 1995. Dehydration melting of metabasalt at 8-32 kbar: Implications for continental growth and crust-mantle recycling. *Journal of Petrology*, 36(4): 891~931.
- Rollinson H R. 1993. Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation, Interpretation. Longman Singapore Publishers (Pte) Ltd., Singapore, pp. 1~352.
- Rubatto D. 2002. Zircon trace element geochemistry: Partitioning with garnet and the link between U-Pb ages and metamorphism. *Chemical Geology*, 184(1-2): 123~138.
- Rudnick R L, Gao Shan. 2003. Composition of the continental crust. In: Rudnick R L (ed.). *The Crust Treatise on geochemistry*. Oxford: Elsevier Pergamon, 3: 1~64.
- Salter V J M., Hart S R. 1991. The mantle sources of ocean ridges, islands and arcs: The Hf isotope connection. *Earth and Planetary Science Letters*, 104(2): 364~380.
- Scherer E E, Cameron K L, Blichert-Toft J. 2000. Lu-Hf garnet geochronology: Closure temperature relative to the Sm-Nd system and the effects of trace mineral inclusions. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64(19): 3413~3432.
- Sobel E R, Arnaud N. 1999. A possible middle Paleozoic suture in the Altyn Tagh, NW China. *Tectonics*, 18(1): 64~74.
- Song Biao, Zhang Yuhai, Wan Yusheng, Jian Ping. 2002. Mount making and procedure of the SHRIMP dating. *Geological Review*, 48(S1): 26~40 (in Chinese with English abstract).
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. *Geological Society Special Publication*, 42: 313~345.
- Taylor S R, McLennan S M. 1985. The continental crust: Its composition and evolution. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1~328.
- Wang Xiaofeng, Chen Xuanhua, Chen Zhengle, Chen Bailin. 2004. Geological setting for metallogenesis and prospecting of ore deposits in the Altyn Tagh area, Beijing. Geological Publishing House. 1~463 (in Chinese with English abstract).
- 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.
- Williams I S. 1998. U-Th-Pb geochronology by ion microprobe. In: McKibben M A, Shanks W C and Ridley W I (Eds.). *Applications of Microanalytical Techniques to Understanding Mineralizing Processes*. *Reviews in Economic Geology*, 7: 1~35.
- Wolf M B, London D. 1994. Apatite dissolution into peraluminous haplogranitic melts: an experimental study of solubilities and

- mechanisms. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 58(19): 4127~4145.
- Wood D A, Joron J L, Treuil M. 1979. A re-appraisal of the use of trace elements to classify and discriminate between magma series erupted in different tectonic settings. *Earth and Planetary Science Letters*, 45: 326~336.
- Wu Cailai, Yang Jingsui, Yao Shangzhi, Zeng Lingsen, Chen Songyong, Li Haibin, 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 Bashilcaogong Basin, North Altun, NW China. *Acta Petrologica Sinica*, 21(3): 846~858(in Chinese with English abstract).
- Wu Cailai, Yao Zhishang, Zeng Lingsen, Yang Jingsui, Joseph L. Wooden, Chen Songyong, Frank K. Mazadab. 2007. Bashikaogong-Simierbulake granitic complex, North Altun, NW China: geochemistry and zircon SHRIMP ages. *Science China (Series D)*, 37(1): 10~26(in Chinese without English abstract).
- Wu Cailai, Yang Jingsui, Robinson PT, Wooden JL, Mazdab FK, 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 Fuyuan, Jahn B M, Wilde S A, Lo Chinghua, Yui Tzenfu, Lin Qiang, Ge Wenchun, Sun Deyou. 2003. Highly fractionated I-type granites in NE China (II): Isotopic geochemistry and implications for crustal growth in the Phanerozoic. *Lithos*, 67(3): 191~204.
- Wu Fuyuan, Li Xianhua, Zheng Yongfei, Gao Shan. 2007. Lu-Hf isotopic systematics and their applications in petrology. *Acta Petrologica Sinica*, 23(2): 185~220(in Chinese with English abstract).
- Wu Jun, Lan Chaoli, Li Jiliang, Yu Liangjun. 2002. Geochemical evidence of MORE and OIB combination in Hongliugou ophiolite mélanges, Altun fault belt. *Acta Petrologica Et Mineralogica*, 21(1): 24~30(in Chinese with English abstract).
- Wu Yu, Chen Zhengle, Chen Bailin, Wang Yong, Meng Lingtong, He Jiangtao, Han Meimei, Wang Bin. 2016. Geochronology and geochemistry characteristics of the deformed diorite from the North Altun brittle-ductile shear zone and its constraint on the Early Paleozoic tectonic evolution of the North Altyn Tagh. *Acta Petrologica Sinica*, 32(2): 555~570(in Chinese with English abstract).
- Xiu Qunye, Yu Haifeng, Liu Yongshun, Lu Songnian, Mao Debao, Li Houmin, Li quan. 2007. Geology and zircon U-Pb age of pillow basalts at Qiashikansoy in northern Altun Tagh, NW China. *Acta Geologica Sinica*, 81(6): 787~794(in Chinese with English abstract).
- Xu Zhiqin, Yang Jingsui, Zhang Jianxin, Jiang Mei, Li Haibin, 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, Wu Cailai, Shi Rendeng. 2002. Sheeted dike swarm in Hongliugou, northwest of the Altun region: Evidence for seafloor spreading. *Geological Bulletin of China*, 21(2): 69~74(in Chinese with English abstract).
- Yang Jingsui, Shi Rendeng, Wu Cailai, Su Dechen, Chen Songyong, Wang Xibin, Wooden J L. 2008. Petrology and SHRIMP age of the Hongliugou ophiolite at Milan, north Altun, at the northern margin of the Tibetan Plateau. *Acta Geologica Sinica*, 24(7): 1567~1584(in Chinese with English abstract).
- Yang Zijiang, Ma Huadong, Wang Zhongxui, Xiao Weifeng. 2012. SHRIMP U-Pb zircon dating of gabbro from the Binggou ophiolite mélange in the northern Altyn, and geological implication. *Acta Petrologica Sinica*, 28(7): 2269~2276(in Chinese with English abstract).
- Yin An, Rumelhart P E, Butler R, Cowgill E, Harrison T M, Foster D A, Ingersoll R V, Zhang Qing, Zhou Xianqiang, Wang Xiaofeng, Hanson A, Raza A. 2002. Tectonic history of the Altyn Tagh fault system in northern Tibet inferred from Cenozoic sedimentation. *Geological Society of America Bulletin*, 114(10): 1257~1295.
- Zhang Jianxin, Meng Fancong, Yang Jingsui. 2005. A New HP/LT Metamorphic Terrane in the Northern Altyn Tagh, Western China. *International Geology Review*, 47(4): 371~386.
- Zhang Jianxin, Meng Fancong. 2006. Lawsonite-bearing eclogites in the north Qilian and north Altyn Tagh: evidence for cold subduction of oceanic crust. *Chinese Science Bulletin*, 51(14): 1683~1688.
- Zhang Jianxin, Meng Fancong, Yu Shengyao, Chen Wen, Chen Songyong. 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 Jianxin, Meng Fancong, Yu Shengyao. 2010. Two contrasting HP/LT and UHP metamorphic belts: Constraint on early paleozoic orogeny in Qilian-Altun orogen. *Acta Petrologica Sinica*, 26(7): 1967~1992(in Chinese with English abstract).
- Zhang Jianxin, Li Huaikun, Meng Fancong, Xiang Zhenqun, Yu Shengyao, Li Jinping. 2011. Polyphase tectonothermal events recorded in "metamorphic basement" from the Altyn Tagh, the southeastern margin of the Tarim basin, western China: Constraint from U-Pb zircon geochronology. *Acta Petrologica*

- Sinica, 27(1): 23~46(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 AltynTagh. *Geological Review*, 62(5):1283~1299.
- Zhang Zhanwu, Huang Gang, Li Haimin, Zhang Wenfeng. 2012. LA-ICP-MS zircon U-Pb geochronology and geochemistry of gabbro and diorite from Qilesayi pluton in Lapeiquan area of northern Altun Mountains and their tectonic implications. *Acta Petrologica Et Mineralogica*, 31(1): 13~27(in Chinese with English abstract).
- Zhao Jiaolong, Qiu Jiansheng, Li Zhen, Liu Liang, Li Youlian. 2012. Petrogenesis of the Taiwushan granite pluton in Fujian Province: Constraints from zircon U-Pb ages and Hf isotopes. *Acta Petrologica Sinica*, 28(12): 3938~3950(in Chinese with English abstract).
- Zhao Xinmin, Zhang Zuoheng, Liu Min, Li Yusen, Guo Shaofeng. 2014. Zircon U-Pb geochronology, geochemistry and petrogenesis of the granites from the Xiaoliugou deposit in the western of the North Qilian. *Acta Petrologica Sinica*, 30(1): 16~34(in Chinese with English abstract).
- Zorpi M J, Coulon C, Orsini J B, Cocirca C. 1989. Magma mingling, zoning and emplacement in calc-alkaline granitoid plutons. *Tectonophysics*, 157(4): 315~329.
- ## 参 考 文 献
- 陈柏林, 王世新, 祁万修, 陈正乐, 刘荣, 杨风, 蒋荣宝, 李丽, 杨屹, 李学智. 2008. 阿尔金北缘大平沟韧—脆性变形带特征. *岩石学报*, 24(4):0637~0644.
- 陈柏林, 蒋荣宝, 李丽, 陈正乐, 祁万修, 刘荣, 崔玲玲, 王世新. 2009. 阿尔金山东段喀腊大湾地区铁矿带的发现及其意义. *地球学报*, 30(2):143~154.
- 陈柏林, 崔玲玲, 白彦飞, 王世新, 陈正乐, 李学智, 祁万修, 刘荣. 2010. 阿尔金断裂走滑位移的确定——来自阿尔金山东段构造带的新证据. *岩石学报*, 26(11):3387~3396.
- 陈柏林, 崔玲玲, 陈正乐. 2014. 阿尔金山喀腊大湾地区变形岩石 EBSD 组构分析. *地质学报*, 88(8):1475~1484.
- 陈柏林, 王永, 陈正乐, 李松彬, 蒋荣宝, 韩凤彬, 郝瑞祥, 崔玲玲, 李丽, 赵树铭, 祁万修, 杨屹, 王世新, 周永贵, 郝瑞祥. 2015. 阿尔金山喀腊大湾地区控矿构造系统研究. *地质前缘*, 22(4): 67~77.
- 陈柏林, 李松彬, 蒋荣宝, 陈正乐, 韩凤彬, 崔玲玲, 李丽, 赵树铭, 祁万修, 杨屹, 王世新, 王永, 周永贵, 郝瑞祥. 2016. 阿尔金山喀腊大湾地区中酸性火山岩 SHRIMP 年龄及其构造环境. *地质学报*, 90(4): 708~727.
- 陈宣华, Gehrels G E, 王小凤, 杨风, 陈正乐. 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.
- 陈正乐, 万景林, 王小凤, 陈宣华, 潘锦华. 2002. 阿尔金断裂带 8 Ma 左右的快速走滑及其地质意义. *地球学报*, 23(4): 295~300.
- 陈正乐, 宫红良, 李丽, 王小凤, 陈柏林, 陈宣华. 2006. 阿尔金山脉新生代隆升—剥露过程. *地质前缘*, 13(4): 91~102.
- 第五春荣, 孙勇, 林慈奎, 柳小明, 王洪亮. 2007. 豫西宜阳地区 TTG 质片麻岩锆石 U-Pb 定年和 Hf 同位素地质学. *岩石学报*, 23(2): 253~262.
- 高晓峰, 校培喜, 康磊, 过磊, 董增产, 奚仁刚. 2012. 新疆南部阿尔金东段喀腊大湾铁矿区火山岩成因及地质矿产意义. *地质通报*, 31(12): 2070~2075.
- 高永丰, 侯增谦, 魏瑞华. 2003. 冈底斯晚第三纪斑岩的岩石学、地球化学及其地球动力学意义. *岩石学报*, 19(3): 418~428.
- 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): 2271~2281.
- 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⁴⁰Ar/³⁹Ar 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, 王永, 李松彬, 韩凤彬, 周永贵. 2013. 新疆阿尔金山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, 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, 陈柏林, 陈正乐, 郝瑞祥, 周永贵, 韩凤彬. 2013. 阿尔金北缘喀腊大湾地区早古生代中酸性火山熔岩岩石地球化学特征及其构造环境. *地质评论*, 59(3): 423~436.
- 刘函, 王国灿, 杨子江, 罗彦军, 高睿, 黄文星. 2013. 恰什坎萨伊沟玄武岩年代学、地球化学特征及其对北阿尔金洋盆闭合过程的制约. *地质学报*, 87(1):38~54.
- 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. *岩石学报*, 15(1): 57~64.
- 孟繁聪, 张建新, 于胜尧, 陈松永. 2010. 北阿尔金红柳泉早古生代枕状玄武岩及其大地构造意义. *地质学报*, 84(7): 981~999.
- 孟令通, 陈柏林, 罗迪柯, 王永, 孙岳, 吴玉, 张昊, 王铜. 2015. 北阿尔金山喀腊大湾地区 4337 高地北花岗闪长岩 SHRIMP U-Pb 定年及其构造意义. *吉林大学学报(地球科学版)*, 45(6): 1757~1771.
- 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.
- 邱检生, 肖娥, 胡建, 徐夕生, 蒋少涌, 李真. 2008. 福建北东沿海高分异 I 型花岗岩的成因: 锆石 U-Pb 年代学、地球化学和 Nd-Hf 同位素制约. *岩石学报*, 24(11): 2468~2484.
- 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 SHRIMP U-Pb 锆石定年及其地质意义. 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(3): 859~866.

秦海鹏. 2012. 北祁连造山带早古生代花岗岩岩石学特征及其与构造演化的关系. 北京: 中国地质科学院地质研究所. 1~141.

宋彪, 张玉海, 万渝生, 简平. 2002. 锆石 SHRIMP 样品靶制作、年龄测定及有关现象讨论. 地质论评, 48(增刊): 26~40.

王小凤, 陈宣华, 陈正乐, 陈柏林. 2004. 阿尔金地区成矿地质条件与远景预测. 北京: 地质出版社. 1~463.

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, Joseph L. Wooden, 陈松永, Frank K. Mazadab. 2007. 北阿尔金巴什考供一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, 郑永飞, 高山. 2007. Lu-Hf 同位素体系及其岩石学应用. 岩石学报, 23(2): 185~220.

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.

吴玉, 陈正乐, 陈柏林, 王永, 孟令通, 何江涛, 韩梅梅, 王斌. 2016. 阿尔金北缘脆-韧性剪切带内变形闪长岩的年代学、地球化学特征及其对北阿尔金早古生代构造演化的指示. 岩石学报, 32(2): 555~570.

修群业, 于海峰, 刘永顺, 陆松年, 毛德宝, 李厚民, 李铨. 2007. 阿尔金北缘枕状玄武岩的地质特征及其锆石 U-Pb 年龄. 地质学报, 81(6): 787~794.

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. 地质学报, 73(13): 193~205.

杨经绥, 吴才来, 史仁灯. 2002. 阿尔金山米兰红柳沟的席状岩墙群: 海底扩张的重要证据. 地质通报, 21(2): 69~74.

杨经绥, 史仁灯, 吴才来, 苏德辰, 陈松永, 王希斌, Wooden J L. 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.

杨子江, 马华东, 王宗秀, 肖伟峰. 2012. 阿尔金山北缘冰沟蛇绿混杂岩中辉长岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其地质意义. 岩石学报, 28(7): 2269~2276.

张建新, 孟繁聪. 2006. 北祁连和北阿尔金含硬柱石榴辉岩: 冷洋壳俯冲作用的证据. 科学通报, 51(14): 1683~1688.

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.

张建新, 孟繁聪, 于胜尧. 2010. 两条不同类型的 HP/LT 和 UHP 变质带对祁连-阿尔金早古生代造山作用的制约. 岩石学报, 26(7): 1967~1992.

张建新, 李怀坤, 孟繁聪, 相振群, 于胜尧, 李金平. 2011. 塔里木盆地东南缘(阿尔金山)“变质基底”记录的多期构造热事件: 锆石 U-Pb 年代学的制约. 岩石学报, 27(1): 23~46.

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档岩体锆石 U-Pb 年代学、地球化学特征及地质意义. 地质论评, 62(5): 1283~1299.

张占武, 黄岗, 李怀敏, 张文峰. 2012. 北阿尔金拉配泉地区齐勒萨依岩体的年代学、地球化学特征及其构造意义. 岩石矿物学杂志, 31(1): 13~27.

赵蛟龙, 邱检生, 李真, 刘亮, 李友连. 2012. 福建太武山花岗岩体成因: 锆石 U-Pb 年代学与 Hf 同位素制约. 岩石学报, 28(12): 3938~3950.

赵辛敏, 张作衡, 刘敏, 李育森, 郭少丰. 2014. 北祁连西段小柳沟矿区花岗质岩石锆石 U-Pb 年代学, 地球化学及成因研究. 岩石学报, 30(1): 16~34.

Geochemistry, Zircon SHRIMP U-Pb Dating and Hf Isotopic Compositions of the Monzogranite from the Southern Kaladawan of North Altyn and Their Implications for Crust-Mantle Interaction

WU Yu^{1,2)}, CHEN Zhengle^{2,3)}, CHEN Bailin²⁾, WANG Yong²⁾,

MENG Lingtong²⁾, HE Jiangtao^{2,4)}, WANG Bin⁴⁾, HAN Meimei^{2,4)}

1) *Beijing Research Institute of Uranium Geology, CNNC, Beijing, 100029;*

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

3) *East China Institute of Technology, Nanchang, 330013, Jiangxi;*

4) *School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences(Beijing), Beijing, 100083*

Abstract

Large-scale Early Paleozoic intermediate-felsic granitic plutons are distributed at Kaladawan in the middle-eastern segment of North Altyn, and provide important evidence for understanding early Paleozoic tectonic-magmatic activities and regional tectonic evolution in North Altyn. In this paper, the monzogranite exposed in southern Kaladawan was analyzed using zircon SHRIMP U-Pb dating, whole-rock geochemistry and Hf isotopes. Zircon SHRIMP U-Pb dating yields an age of 484.2 ± 4.9 Ma (MSDW = 0.46) for the monzogranite, suggesting its emplacement in Early Ordovician. The monzogranite is geochemically characterized by high K_2O (3.65%~4.76%) and alkali ($Na_2O + K_2O = 8.31\% \sim 8.66\%$), low MgO (0.6%~0.9%), P_2O_5 (0.06%~0.11%), TiO_2 (0.39%~0.58%) and FeO^T (1.82%~2.34%), with A/CNK values ranging from 0.96 to 1.01, suggesting that it can be classified as the high K calc-alkaline and metaluminous-weak peraluminous I-type granite. The primitive mantle normalized trace element patterns and chondrite-normalized REE diagrams of monzogranite show obvious enrichment in LILEs (such as K, Rb, Ba, Th, U) and LREE, depletion in HFSEs (such as Ti, Ta, Nb, P) and HREE, with slight positive Eu anomalies, revealing the arc magma affinity. In-situ zircon Hf isotope data display that the monzogranite has depleted Hf isotopic compositions with positive $\epsilon_{Hf}(t)$ values (+4.08 to +8.26) and young t_{DM2} (875~1099 Ma), reflecting that mantle-derived juvenile crust plays a significant role in the magmatic process. Together with the tectonic regime of the monzogranite and previously published data, we suggest that the monzogranite probably formed in an active continental-arc setting related to southward subduction of the North Altyn Ocean during the Early Paleozoic. The magma likely originated from partial melting of hybrid crust consisting of mantle-derived juvenile crust and ancient continental crust, suggesting that the rock experienced mixing of crustal and mantle magma. These features of the monzogranite are consistent with that of the Early Paleozoic arc-type magmatic rocks in North Qilian. Therefore, our research provides new evidence that North Altyn was the western extensional part of the North Qilian.

Key words: Monzogranite; Geochemistry; Zircon SHRIMP U-Pb dating; Hf isotope; North Altyn