

阿尔泰造山带北部喀拉加热克岩体 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及地质意义

曹小红¹, 韩琼², 赵同阳², 郑加行²

(1. 新疆工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830000; 2. 新疆维吾尔自治区地质调查院, 新疆 乌鲁木齐 830000)

摘要:喀拉加热克岩体的岩性为片麻状花岗闪长斑岩, 其形成时代为 (450.6 ± 3) Ma, 为晚奥陶世侵入岩, 主量元素表明该岩体为过铝质钙碱性岩岩石系列, 推断其形成上是地幔基性岩浆以底侵方式就位于年轻地幔底部, 大量的热量促使上覆地壳物质部分熔融形成壳-幔混合花岗岩质岩浆。在饱和水的条件下, 由富含白云母和黑云母的变质砂岩脱水熔融形成的。微量元素 Ba、Nb、Sr、Ti 元素呈现明显的负异常, Rb、U、La、Nd、Zr、Hf、Y 的正异常。并且 Nb 的亏损不明显, K、Rb 等有明显的增加。反映了碰撞花岗岩的基本特征。稀土元素整体上表现为轻稀土富集, 重稀土亏损, 轻重稀土分馏不明显, 并出现 Eu 的弱的负异常。结合大地构造演化, 认为喀拉加热克花岗闪长斑岩岩体所处的环境为同碰撞-俯冲的环境。

关键词:阿尔泰造山带北部; 锆石 U-Pb 定年; 片麻状花岗闪长斑岩; 喀拉加热克岩体

中图分类号: P597.3

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2018)03-0067-13

LA-ICP-MS Zircon U-Pb Dating and Geochemical Characteristics of Kalajiareke Rock Mass in Northern Altay Orogenic Belt and Its Geological Significance

CAO Xiaohong¹, HAN Qiong², ZHAO Tongyang², ZHENG Jiaxing²

(1. Xinjiang Institute of Engineering, Urumqi 830000, Xinjiang, China

2. Xinjiang Institute of Geological Survey, Urumqi 830000, Xinjiang, China)

Abstract: The Kalajiareke rock mass is composed of gneissic granite porphyry, with formation age of (450.6 ± 3) Ma, which is the Late Ordovician intrusive rock. The geochemical data suggests that this rock mass belongs to peraluminous cal-alkaline rock series. It's inferred that the mantle-based magma is located at the bottom of the young mantle in the forming process of this intrusion, and a large amount of heat causes the overlying crust material to partially melt for forming the crust-mantle mixed granite magma. In the unsaturated water conditions, this intrusion was formed by the dehydration melting of rich muscovite and biotite metamorphic sandstone. The Ba, Nb, Sr and Ti elements show obvious negative anomalies, while the Rb, U, La, Nd, Zr, Hf and Y have positive anomalies. The loss of Nb is not obvious, but the K and Rb contents have a significant increase. All of these characters reflect the basic characteristics of collision granite. Rare

收稿日期: 2017-08-23; 修回日期: 2018-03-22

基金项目: 国土资源部“全国地质构造区划与区域地质调查综合集成”子项目“新疆区域地质调查片区总结与服务产品开发”(DD20160345-04), 新疆教育厅项目“头屯河区高教园路基冻融破坏及边坡防护研究(XJEDU2016S088)”

作者简介: 曹小红(1985-), 女, 新疆阿克苏人, 实验师, 硕士。主要从事区域地质调查及地质灾害防治的教学及研究工作。E-mail: cxhong15@163.com

earth elements show the enrichment of light rare earth and the loss of heavy rare earth, with not obvious fractionation of light and heavy rare earth and weak negative anomalies of Eu element. Combined with the tectonic evolution, it is believed that the Kalajiareke granite granodiorite porphyry was formed in the syn-collision subduction environment.

Keywords: Northern Altay orogenic belt; zircon U - Pb dating; gneissic granite porphyry; Kalajiareke rock mass

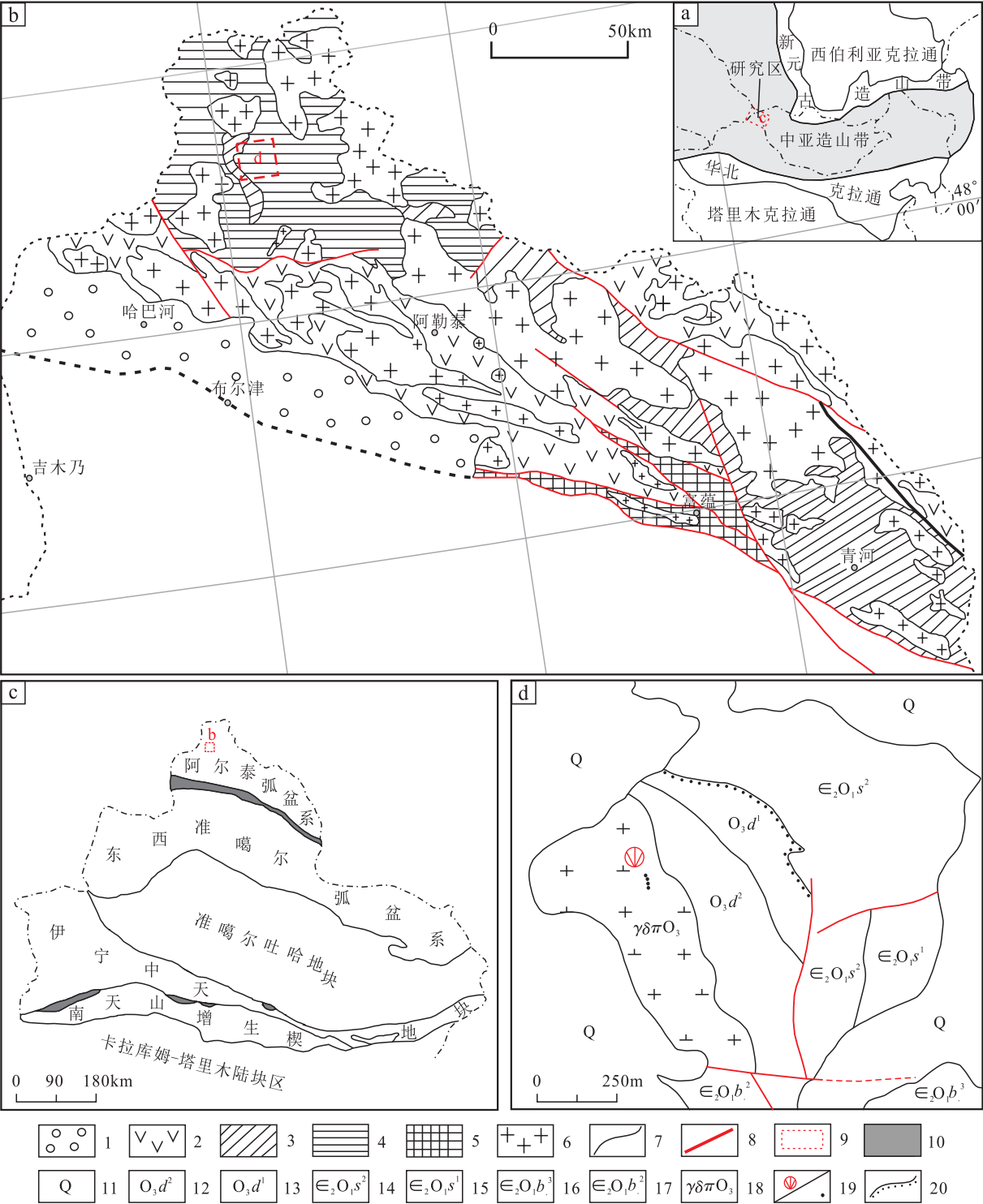
阿尔泰造山带位于中亚造山带的西南部(图1a),呈北西—南东向横贯于中、俄、哈、蒙4国。是中亚造山带的典型区域(于淑艳等,2011;曾祥武等,2017)。是有一系列大陆块体、岛弧和增生杂岩带的显生宙增生型造山带(SENGÖR A M C et al., 1993;胡霭琴等,2002),该显生宙造山带对广泛分布的花岗岩类的形成和成矿作用具有重要的控制作用。该造山带内的花岗岩占基岩出露面积的50%以上,前人对其形成时代、成因类型、形成的构造环境开展过大量的研究和探讨。以前一般认为该花岗岩主要形成于晚古生代(邹天人等,1988;王中刚等,1998;程裕淇,2004),阿尔泰也被认为是华力西造山带(肖序常等,1992;王中刚等,1988)。近年来,通过高精度的锆石U - Pb定年,获得了一批可靠的同位素测年数据,在阿尔泰识别出大量的早—中古生代花岗岩体(肖庆辉等,2009),形成于460~375 Ma,大致分为460 Ma、400 Ma、375 Ma(童英等,2007),根据锆石年龄和形成环境分为3个阶段5个期次,认为早古生代(470~360 Ma)为钙碱性I型花岗岩类,具有不同程度的变形,其中在470~440 Ma的岩体一般片麻状较为发育,为造山俯冲增生的产物,形成于陆源俯冲(470~440 Ma)、继续俯冲—弧后盆地伸展(420~390 Ma)到聚合碰撞(380~360 Ma)过程的陆缘裂解增生演化的构造模式(王涛等,2010)。

对于喀拉加热克岩体的形成时代及形成环境存在争议。根据1:20万琼库尔幅(M-45-XXXIV)认为该岩体的岩性为花岗斑岩,为华力西晚期的侵入岩浆的产物。据1:25万冲乎尔幅(M45E004003构造建造图),认为该岩体为偏铝质高钾钙碱性系列的正常花岗岩,为混源岩浆的产物,形成于活动大陆边缘的弧。通过区域侵入岩年龄对比,认为该岩体为早泥盆世岩浆活动的产物。陈毓川院士编制的1:50万阿勒泰成矿省成矿系列图中,将该划分为泥盆纪二长花岗岩类型。鉴于以上不同的争议,本次研究选择出露于喀纳斯湖东南侧的小黑湖一带的喀

拉加热克岩体开展研究,其岩性为片麻状花岗闪长斑岩,至今未见其年龄的研究报道。因此笔者对该片麻状花岗闪长斑岩进行测年和岩石地球化学测试分析,对该岩体的研究为阿尔泰造山带的构造演化以及建立该区的构造—岩浆事件序列提供资料依据。

1 地质背景

研究区位于中亚造山带(图1a),阿尔泰造山带北部(图1b),阿尔泰弧盆系(图1c),阿尔泰古生代陆缘弧之喀纳斯被动陆缘带。研究区内为一套中深变质岩系,为原厘定的震旦系—下寒武统喀纳斯群($Z\in_1K$),为一套巨厚复理石建造(图1b),其上被上奥陶统东锡勒克组(O_3d)变质火山碎屑岩—火山熔岩建造不整合覆盖。新疆地质调查院(2016)将震旦系—下寒武统喀纳斯群($Z\in_1K$)进行解体,并结合同位素测年,对其进行了重新厘定和划分,自下而上解体为中寒武—下奥陶统依列克塔斯岩组($\in_2O_{1y}$)、贝留特岩组($\in_2O_{1b}$)、苏木代尔格组($\in_2O_{1s}$)和哲里开特组($\in_2O_{1z}$)(王乐民等,2016;赵同阳等,2016;韩琼等,2016)。本次研究对象喀拉加热克岩体与地层之间的侵入界限很模糊,不易确定,岩体侵入的地层东侧为下奥陶统东锡勒克组二段;南侧与中寒武—下奥陶统贝留特岩组三段为断层接触关系,断层走向近东西向;岩体西侧为第四系冰碛堆积层,与岩体之间为掩盖接触关系,接触界限模糊。侵入的最新地层为上奥陶统东锡勒克组第二岩性段(O_3d^2)。形状呈条带状,该岩体出露面积为2.82 km²。岩体风化破碎严重,在地表基本为碎块状,棱角清晰,碎块大小在1 cm×2 cm~10 cm×50 cm,岩体中绿帘石化普遍发育,呈黄绿色、绿色,呈薄膜状,部分岩石裂隙中可见薄膜状褐铁矿化,但规模不大。在岩体中常见有石英细脉,脉宽多在3~5 cm,石英脉颜色纯净,为灰白色,以集合体形式产出。



1. 第四系;2. 上古生界;3. 下古生界;4. 喀纳斯群;5. 前寒武系;6. 中酸性侵入岩;7. 地质界线;8. 断裂;9. 位置示意图;10. 缝合带;11. 第四系;12. 上奥陶统东锡勒克组二段;13. 上奥陶统东锡勒克组一段;14. 中寒武一下奥陶统苏木代尔格组二段;15. 中寒武一下奥陶统苏木代尔格组一段;16. 中寒武一下奥陶统贝留特岩组三段;17. 中寒武一下奥陶统贝留特岩组二段;18. 晚奥陶世花岗岩岗长斑岩;19. 同位素/全岩样取样位置;20. 不整合界线

图1 研究区喀拉加加热克岩体综合地质图

Fig. 1 Compsivial Geology map of Kalajiareke rock mass

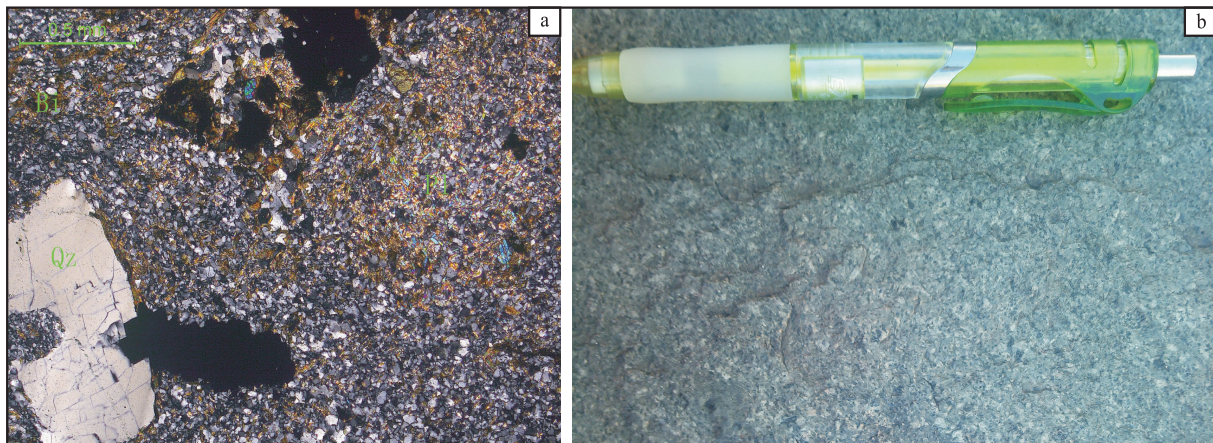
2 岩石学特征及分析方法

2.1 样品特征

本次工作采集同位素样品 1 件,编号为 16TW₆-4005,采样位置:X:5 390 616,Y:511 443,采集全岩分析样品 4 件,编号为:14YQ₆-4005~4008。笔者通过镜下鉴定,岩性为花岗闪长斑岩,其显微特征如下。

岩石风化面为灰白、黄绿、灰绿色(图 2b),新鲜面为灰色、灰白色,岩石为残余斑状-鳞片微粒变晶结构,块状构造,岩石由斑晶和基质组成,斑状结构还有残留,斑晶大小为 0.4~2.4 mm,由石英、斜长

石组成(图 2a)。石英斑晶有的呈溶圆状,有的呈溶蚀港湾状,并有重结晶现象,具波状消光,其含量约为 3%,斜长石呈微粒状分布,另外有个别暗色矿物斑晶和斜长石聚斑状分布,以黑云母为主组成,分布少量铁质,原矿物已不能分辨,其含量约为 2%。基质主要由长石、石英和黑云母组成,长石发生重结晶,可能为钾长石,其粒径大小在 0.01~0.1 mm,其含量约为 59%;石英为粒状,粒径在 0.01~0.1 mm,其含量约为 25%。此外含有少量的细鳞片状黑云母,黑云母呈细小鳞片状,其含量约为 10%。磷灰石呈他形粒状、柱状,分散在基质中,此外含有少量的磁铁矿,其粒径为 0.04~0.4 mm。



Qz. 石英;Pl. 斜长石;Bi. 黑云母

图 2 喀拉加热克岩体镜下(50×正交偏光)及岩石照片

Fig. 2 Mirror (50× Orthogonal polarized light) and rock photos of Kalajiareke rock mass

2.2 测试方法

为保证样品测试的需要,锆石分选在河北省区域地质矿产调查研究所实验室完成。用盐酸擦拭样品后破碎,用常规重力和磁选方法分选出锆石,在双目镜下挑纯。样品靶制和显微照相拍摄在重庆宇劲科技有限公司完成,对制成的样品靶上的锆石进行光学显微镜下的透射光、反射光和电子显微镜下的阴极发光照相,以便在进行测定时作为选取分析部位的依据,以及在测定完成后进行合乎逻辑的数据解释。

测年在南京大学内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室完成,测试使用与 New Wave 213nm 激光取样系统连接起来的 Agilent 7500a ICP-MS 完成。分析过程中,激光束斑直径采用 20~30 μm,频率 5Hz。样品经剥蚀后,由氦气作为载气,再和氩

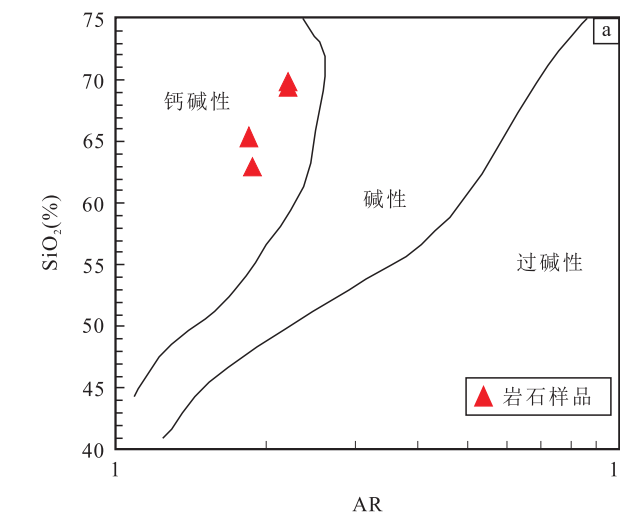
气混合后进入 ICP-MS 进行分析,U-Pb 分馏根据澳大利亚锆石标样 GEMOC GJ-1(²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 年龄为(608±1.5) Ma,JACKSON S E et al.,2004)来校正,锆石标样 Mud Tank(Inercept age of (732±5) Ma,BLACK L P et al.,1978)为内标,控制分析精度。每个测试流程的开头和结尾分别测试 2 个 GJ 标样,另外测试 1 个 MT 标样和 20 个待测样品点。U-Pb 年龄和 U、Th、Pb 的计算由 GLITTER 软件(ver. 4.4)获得,普通 Pb 的校正及谐和图的绘制运用 Isoplot(ANDERSEN T,2002)完成。

3 地球化学特征

3.1 主要元素

SiO₂ 的含量为 63%~63.9%,TiO₂ 含量为

0.58%~1.07%,全碱($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$)的含量为5.7%~6.42%(表1),里特曼指数 σ 为1.47~1.82,均小于3.3。碱度率AR为1.85~2.21(表1),以上特征表明岩体具有钙碱性地球化学特征。



在AR-SiO₂图解中(图3a),多有样品落在钙碱性区内;在SiO₂-K₂O图解中(图3b),所有样品落在高钾钙碱性区域,表明岩石具有钙碱性岩石的特征。

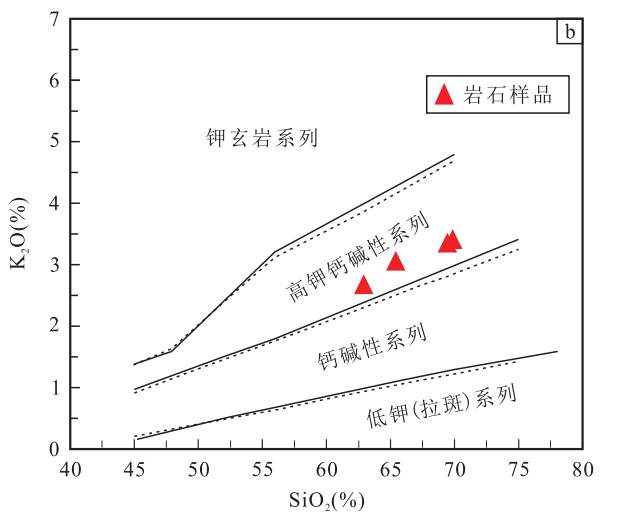


图3 喀拉加热克岩体岩石序列判别图

Fig. 3 Rock sequence discrimination chart of Kalajiareke Rock Mass

表1 喀拉加热克岩体主量元素测试结果表(%)及CIPW计算表
Tab. 1 Main Elementsresults (%)and CIPW results of Kalajiareke rock mass

样品编号	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	P ₂ O ₅	CaO	K ₂ O	MgO	MnO	Na ₂ O	FeO	烧失量	吸附水
14YQ ₅ -4005	69.9	0.58	14.7	3.76	0.2	2.32	3.41	1.11	0.07	3.01	1.44	0.87	0.04
14YQ ₅ -4006	69.4	0.59	14.8	3.83	0.21	2.14	3.36	1.04	0.08	3.04	1.78	0.97	0.07
14YQ ₅ -4007	65.4	0.8	16.1	5.42	0.25	3.05	3.06	1.87	0.09	2.64	2.75	1.17	0.03
14YQ ₅ -4008	63	1.07	15.9	6.53	0.26	3.62	2.69	2.65	0.11	3.22	4.31	0.72	0.02

样品编号	Q	A	P	An	Ab	Or	C	Hy	Il	Mt	Ap	A/CNK	A/NK
14YQ ₅ -4005	32.39	36.95	18.70	10.17	25.39	20.09	2.28	4.42	1.10	3.71	0.46	1.14	1.66
14YQ ₅ -4006	32.41	37.33	17.37	9.22	25.67	19.81	2.78	4.50	1.12	4.00	0.49	1.18	1.68
14YQ ₅ -4007	27.75	30.49	22.76	13.33	22.06	17.86	3.46	8.08	1.50	5.39	0.57	1.22	2.04
14YQ ₅ -4008	20.13	28.45	29.10	15.75	26.40	15.40	1.72	11.09	1.97	6.97	0.58	1.08	2.01

样品编号	SI	AR	DI	σ	R1	R2	A/MF	C/MF	Fe ³⁺ /Fe ²⁺	液相线温度	F1	F2	F3
14YQ ₅ -4005	8.80	2.21	77.87	1.54	2 630	589	1.52	0.44	2.61	853	0.71	-1.15	-2.48
14YQ ₅ -4006	8.03	2.21	77.89	1.55	2 594	570	1.47	0.39	2.15	860	0.71	-1.15	-2.47
14YQ ₅ -4007	12.01	1.85	67.67	1.47	2 439	726	1.04	0.36	1.97	946	0.69	-1.19	-2.43
14YQ ₅ -4008	13.77	1.87	61.93	1.82	2 046	806	0.75	0.31	1.52	1 012	0.65	-1.26	-2.41

注:测试单位:新疆维吾尔自治区矿产实验研究所。

在A/CNK-A/NK图解中(图4),所有样品均落在过铝质范围内,表明岩石为过铝质的岩石,同

时,Al₂O₃的含量为14.7%~16.1%,在CIPW计算中出现了刚玉,也表明了岩石具有过铝质的特征。

综上所述,认为喀拉加热克岩体为过铝质钙碱性岩石系列。

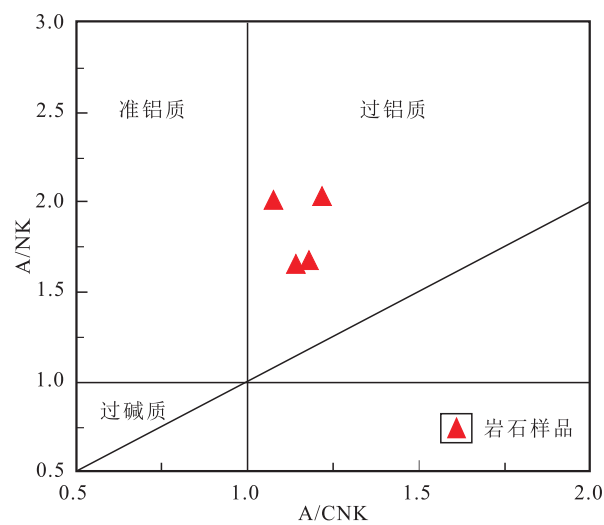


图 4 喀拉加热克岩体 A/CNK - A/NK 图解
Fig. 4 A/CNK - A/NK diagram of Kalajiateke rock mass

3.2 微量元素

岩石中高场强元素(HFSE)元素的含量相对较高,Nb/Ta 值较高为 10~10.6。岩石还具有高的 Y 和 Yb,其含量分别为 $33.3 \times 10^{-6} \sim 41.5 \times 10^{-6}$ 和 $2.6 \times 10^{-6} \sim 3 \times 10^{-6}$ (表 2),在原始地幔标准化蛛网图中(图 5a),总体上显示了较为一致的分布模式,Ba、Nb、Sr、Ti 元素呈现明显的负异常,Rb、U、La、Nd、Zr、Hf、Y 的正异常。并且 Nb 的亏损不明

显,K、Rb 等有明显的增加。反映了碰撞花岗岩的基本特征。

3.3 稀土元素

喀拉加热克岩体岩石稀土元素成分及特征见表 2, ΣREE 为 $152.17 \times 10^{-6} \sim 179.11 \times 10^{-6}$,LREE 为 $129.2 \times 10^{-6} \sim 151.2 \times 10^{-6}$,HREE 为 $21.57 \times 10^{-6} \sim 27.91 \times 10^{-6}$,LREE/HREE 为 5.42~6.91。在稀土元素球粒陨石标准化分配形式图上(图 5b),曲线一致性较好,总体上表现为向右倾斜的曲线,表现为轻稀土富集,重稀土亏损, L_{a_N}/Y_{b_N} 为 5.6~8.31,也反映了轻稀土富集,重稀土亏损的特点, δEu 为 0.63~0.75,在配分图上 Eu 表现为负异常,而呈现出“V”的谷状,表明岩浆在演化过程中存在斜长石的分离结晶作用。

综上所述,喀拉加热克岩体稀土元素整体上表现为轻稀土富集,重稀土亏损,轻重稀土分馏不明显,并出现 Eu 的弱的负异常。

4 LA - ICP - MS 锆石 U - Pb 年龄

在阴极发光照片中(图 6),锆石形态大多为长柱状,部分锆石中含有不透明的包体,个别锆石中发育有裂纹,锆石环带清晰,表面比较光滑,在样品中的锆石晶体内部均发育有较好的震荡环带结构,环带清楚,具有岩浆锆石的基本特征。在测年时选择环带清晰的进行测年,避免包体和裂纹对测年结果的影响。

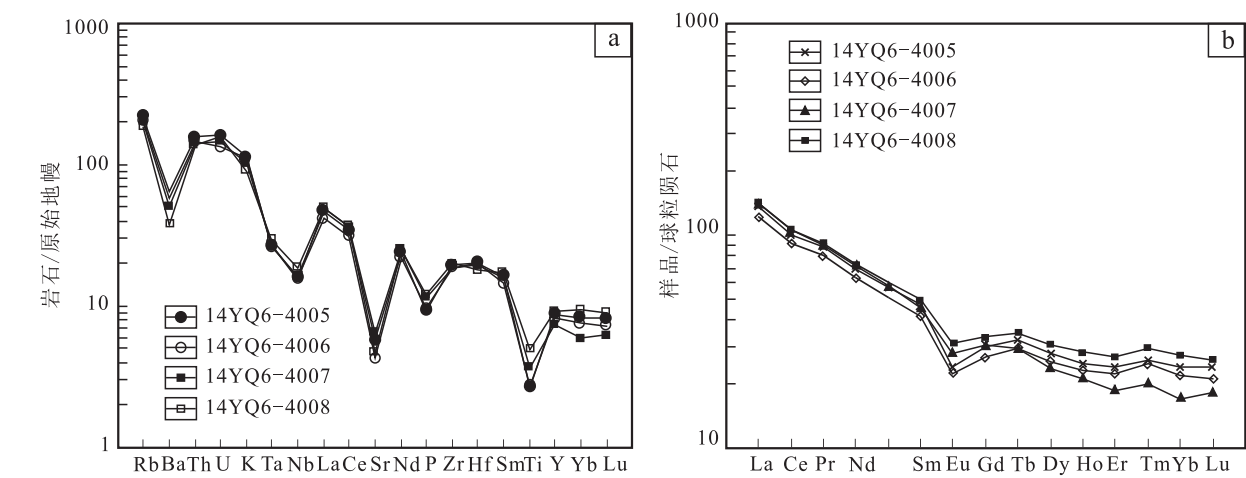


图 5 喀拉加热克岩体微量元素标准化蛛网图和稀土元素球标准化分配形式图
Fig. 5 Trace elements standardized spider diagram and REE chondirite standardized diagram of Kalajiareke rock mass

表 2 喀拉加加热克岩体微量元素测和稀土元素测试结果表(10⁻⁶)及其特征值表
Tab. 2 Trace elements and REE elementstest results(10⁻⁶) and Eigenvalues of Kalajiareke rock mass

样品编号	14YQ6-4005	14YQ6-4006	14YQ6-4007	14YQ6-4008
	片麻状花岗岩闪长斑岩	片麻状花岗岩闪长斑岩	片麻状花岗岩闪长斑岩	片麻状花岗岩闪长斑岩
Rb	140.00	132.00	129.00	118.00
Ba	446.00	411.00	356.00	266.00
Th	13.30	12.50	12.20	11.65
U	3.40	2.80	3.10	3.30
K	28 307.06	27 892.00	25 401.64	22 330.20
Ta	1.09	1.12	1.10	1.22
Nb	11.50	11.20	11.00	13.30
La	32.20	28.90	33.60	33.80
Ce	61.60	55.60	64.30	65.20
Sr	121.00	89.60	138.00	98.12
Nd	32.40	29.40	33.90	34.10
P	872.76	916.40	1 090.96	1 134.59
Zr	220.00	209.00	210.00	226.00
Hf	6.25	6.17	6.11	5.58
Sm	7.20	6.40	7.00	7.60
Ti	3 476.51	3 536.45	4 795.19	6 413.57
Y	40.10	37.00	33.30	41.50
Yb	4.1	3.7	2.9	4.6
Lu	0.61	0.54	0.46	0.66
La	32.2	28.9	33.6	33.8
Ce	61.6	55.6	64.3	65.2
Pr	8.4	7.6	8.6	8.7
Nd	32.4	29.4	33.9	34.1
Sm	7.2	6.4	7	7.6
Eu	1.4	1.3	1.6	1.8
Gd	6.2	5.5	6.3	6.8
Tb	1.2	1.1	1.1	1.3
Dy	7	6.5	6	7.8
Ho	1.4	1.3	1.2	1.6
Er	4	3.7	3.1	4.4
Tm	0.66	0.63	0.51	0.75
Yb	4.1	3.7	2.9	4.6
Lu	0.61	0.54	0.46	0.66
Y	40.1	37	33.3	41.5
ΣREE	168.37	152.17	170.57	179.11
LREE	143.20	129.20	149.00	151.20
HREE	25.17	22.97	21.57	27.91
LREE/HREE	5.69	5.62	6.91	5.42
La _N /Yb _N	5.63	5.60	8.31	5.27
δEu	0.63	0.65	0.72	0.75
δCe	0.90	0.90	0.90	0.91

注:δEu=2Eu_N/(Sm_N+Gd_N); δCe=2Ce_N/(La_N+Pr_N);测试单位:新疆维吾尔自治区矿产实验研究所。

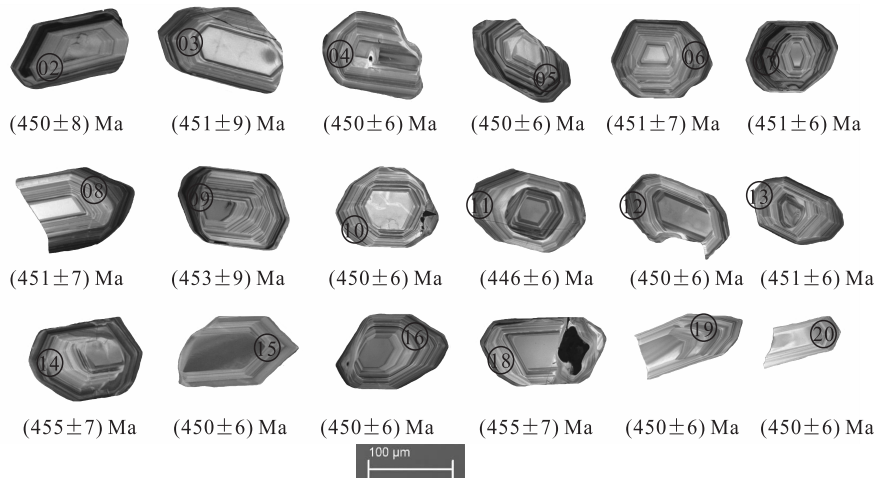


图 6 喀拉加热克岩体锆石 CL 照片
Fig. 6 Zircon CL photos of Kalajiareke rock mass

在锆石 U - Pb 年龄谐和图上(图 7),测点全部落在谐和线上,表现出成群集中分布的特点,给出一致的²⁰⁶Pb/²³⁸U,集中在 446~451 Ma(表 3),获得²⁰⁶Pb/²³⁸U 加权平均年龄为 (450.6 ± 3) Ma (MSDW=0.091, n=18),结合岩浆型锆石的特点,将该加权平均年龄解释为花岗闪长斑岩的结晶年龄,说明其为晚奥陶世岩浆侵入活动的产物。

5 讨论

5.1 岩石成因

CHAPPELL B W(2000)对澳大利亚拉克兰褶

皱带中的花岗岩研究,认为不仅强过铝质花岗岩,即使是弱过铝质花岗岩,其大部分也是部分熔融形成的,而不是分离结晶作用形成的。CLEMENS JD (2003)结合地球化学、同位素和实验岩石学证据认为:大多数巨型的 S 型花岗岩是变沉积岩为主的岩石通过部分熔融形成的。

岩石化学表明,喀拉加热克岩体为过铝质钙碱性系列的岩石,且有高 SiO₂ 含量(63%~63.9%),其不可能直接来源于地幔(蔡克大等,2007)。该过铝质花岗岩具有较高的 Al₂O₃、K₂O 含量及较高的 CaO,说明其岩浆可能来源于年轻地壳物质中云母类物质的脱水熔融。较高的 K、Rb 含量以及 K₂O/

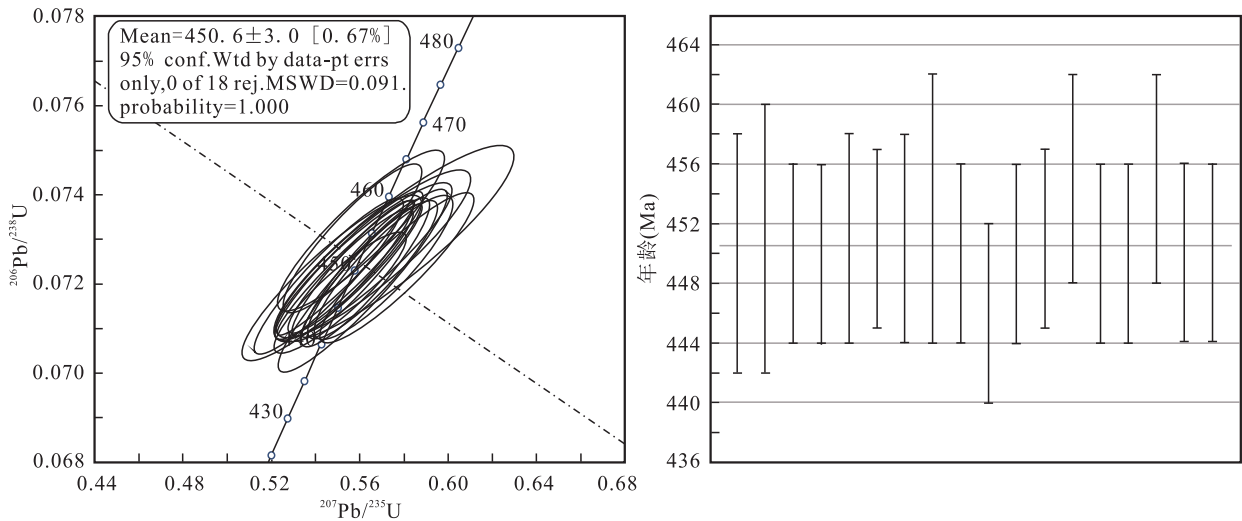


图 7 喀拉加热克岩体 LA - ICP - MS 锆石 U - Pb 年龄谐和图及统计直方图
Fig. 7 LA - ICP - MS zircon ages diagram and statistical histogram of Kalajiareke rock mass

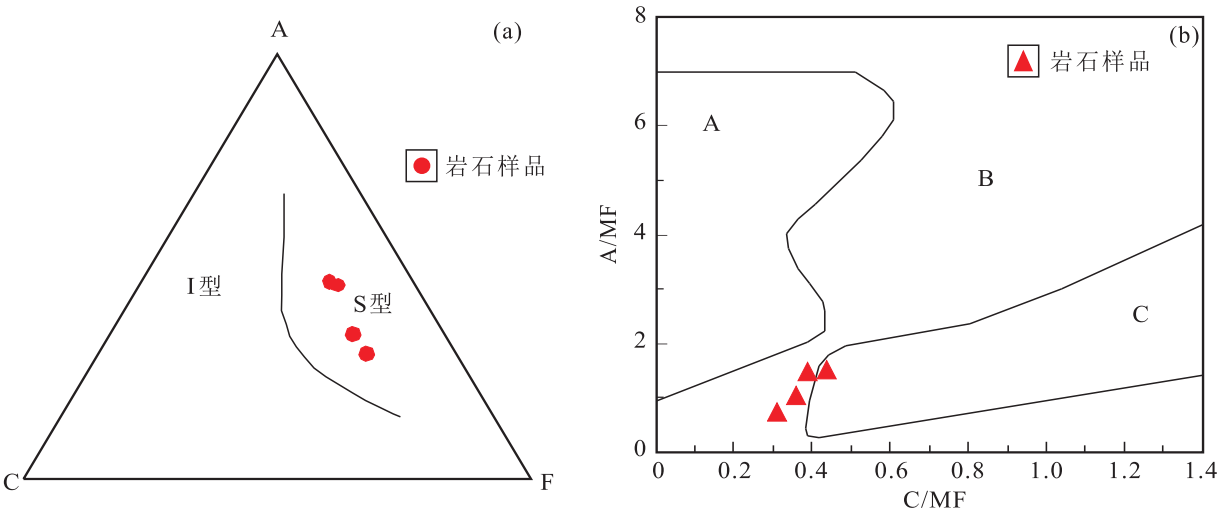
表 3 喀拉加热克岩体花岗岩闪长斑岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 法测年分析结果表
Tab. 3 Granite diorite porphyry LA-ICP-MS zircon U-Pb dating of Kalajareke rock mass

测点	同 位 素 比 值						年 龄(Ma)									
	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$	1σ		
4005-02	0.056 26	0.002 41	0.561 04	0.026 38	0.072 34	0.001 26	0.018 79	0.001 26	463	73	452	17	450	8	376	25
4005-03	0.055 94	0.003 24	0.558 33	0.033 88	0.072 4	0.001 43	0.017 92	0.001 25	450	100	450	22	451	9	359	25
4005-04	0.055 92	0.001 8	0.557 97	0.020 21	0.072 38	0.001 06	0.021 01	0.000 77	449	54	450	13	450	6	420	15
4005-05	0.055 45	0.001 73	0.552 99	0.019 85	0.072 34	0.001 08	0.019 14	0.000 77	430	53	447	13	450	6	383	15
4005-06	0.057 83	0.002	0.577 18	0.022 29	0.072 39	0.001 1	0.020 01	0.000 84	523	58	463	14	451	7	400	17
4005-07	0.056 71	0.001 45	0.566 2	0.016 93	0.072 41	0.000 96	0.021 31	0.000 75	480	43	456	11	451	6	426	15
4005-08	0.056 63	0.002 19	0.565 96	0.024 07	0.072 5	0.001 16	0.019 52	0.001 01	477	66	455	16	451	7	391	20
4005-09	0.056 92	0.003 69	0.570 58	0.038 44	0.072 74	0.001 56	0.015 35	0.001 46	488	111	458	25	453	9	308	29
4005-10	0.056 34	0.001 82	0.561 62	0.020 55	0.072 31	0.001 07	0.019 59	0.000 88	466	55	453	13	450	6	392	17
4005-11	0.055 9	0.001 73	0.551 66	0.019 41	0.071 58	0.001 04	0.019 92	0.000 65	448	52	446	13	446	6	399	13
4005-12	0.056 98	0.001 48	0.568 33	0.017 47	0.072 34	0.000 99	0.021 02	0.000 58	491	44	457	11	450	6	420	11
4005-13	0.056 92	0.001 85	0.568 56	0.020 84	0.072 46	0.001 08	0.019 85	0.000 73	488	54	457	13	451	6	397	14
4005-14	0.055 56	0.002 27	0.560 68	0.024 98	0.073 2	0.001 2	0.019 33	0.000 93	435	70	452	16	455	7	387	18
4005-15	0.057 17	0.001 85	0.570 27	0.020 71	0.072 35	0.001 06	0.020 73	0.000 75	498	54	458	13	450	6	415	15
4005-16	0.055 25	0.001 68	0.550 88	0.019 17	0.072 32	0.001 05	0.020 07	0.000 78	422	52	446	13	450	6	402	15
4005-18	0.055 28	0.001 82	0.556 72	0.020 55	0.073 05	0.001 09	0.020 3	0.000 89	424	56	449	13	455	7	406	18
4005-19	0.057 14	0.001 87	0.570 01	0.020 86	0.072 36	0.001 06	0.021 09	0.000 98	497	55	458	13	450	6	422	19
4005-20	0.056 39	0.001 74	0.562 63	0.019 32	0.072 37	0.001 01	0.021 16	0.000 86	468	51	453	13	450	6	423	17

注:测试单位:南京大学内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室。

Na₂O、Rb/Sr 值进一步表明源区有大量的云母类物质存在,稀土配分模式也表明云母类矿物的脱水熔融,并且源区有斜长石的残留,推断该强过铝质花岗岩岩浆是在中等地壳深度由地壳物质中的云母类矿物熔融所形成的。在 ACF 图解中(图 8a),所有样品均落在“S”型花岗岩区内,说明其为地壳物质部分熔融形成的,其原岩为沉积岩,CaO/Na₂O 为 0.7~1.16,均大于 0.3,表明其原岩为砂岩或者副变质岩,进一步说明其物质来源为砂岩或者副变质岩。在 C/MF-A/FM 图解中(图 8b),3 个样品落在“B”区,1 个样品落在“C”,说明原岩为变质砂岩

的部分熔融,仅有少部分为基性岩的部分熔融,在 Q-Ab-An 图解中(图 9),显示其熔融的温度在 750~800℃,为高温熔融的。该岩石 Rb/Sr 值为 0.97~1.47,在 0.7~1.6 的范围内,Sr/Ba 为 0.22~0.39,在 0.2~0.5,表明其具有高 Rb/Sr,中低 Sr/Ba 的特点,结合其过铝质、高钾以及高温熔融的特点,推断其形成是地幔基性岩浆以底侵方式就位于年轻地幔底部,大量的热量促使上覆地壳物质部分熔融形成壳-幔混合花岗岩质岩浆,在不饱和水的条件下,由富含白云母和黑云母的变质砂岩脱水熔融形成的。



A. 变质泥岩部分熔融区;B. 变质砂岩部分熔融区;C. 基性岩部分熔融

图 8 喀拉加热克岩体成因判别图

Fig. 8 Genetic discrimination chart of Kalajiareke rock mass

在标准矿物作花岗岩类 Q-Ab-An 等温等压力图解中(图 9),在温度方面,4 件样品落为 750~800℃的范围内,表明喀拉加热克岩体在侵入时的熔融温度为 750~800℃;在压力方面,1 件样品在大于 3 000bar,其为高压的环境,其余 3 件在 500bar 附近,为相对低压环境。压力的特征与岩石成因保持一致。反映原岩主要为变质砂岩的部分熔融,掺杂有少量的熔融基性岩。

5.2 构造环境探讨

阿尔泰造山带古生代构造演化模式一直是研究重点,存在被动大陆边缘和活动大陆边缘环境的争议。近年来的研究成果表明,阿尔泰造山带为早古生代造山而不是晚古生代造山(WANG Tao et al., 2006;童英等,2007;韩琼等,2006)。在新元古代末

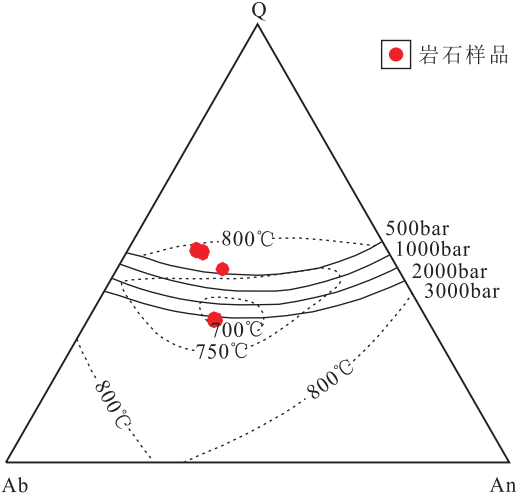


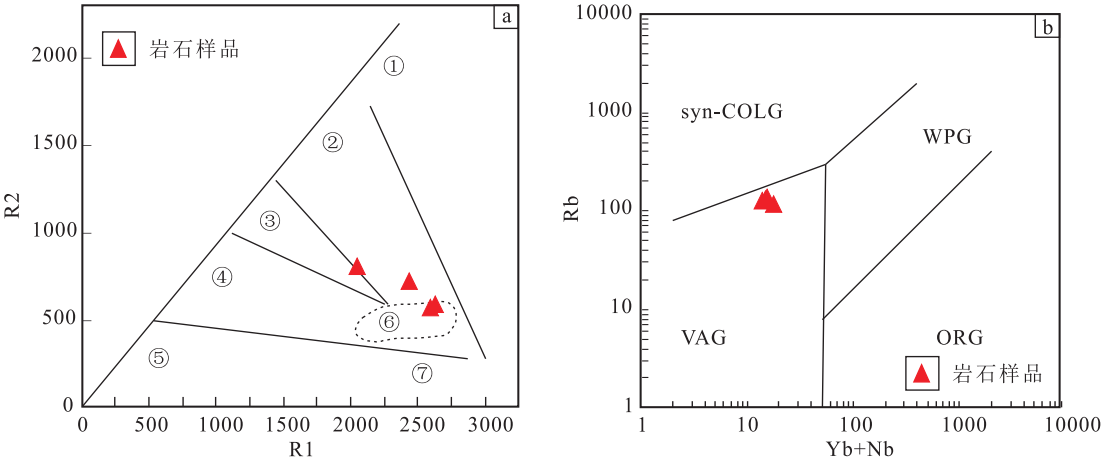
图 9 喀拉加热克岩体温压图解

Fig. 9 Worm pressure diagram of Kalajiareke rock mass

期—寒武纪,在阿尔泰地体与西伯利亚板块之间萨伊尔洋盆分开(也称西萨彦岭-蒙古西部湖区洋盆),可能属于早期古亚洲洋的北支。在震旦—寒武纪蒙古湖洋盆封闭拼贴在西伯利亚板块的西南缘,形成巨厚的复理石沉积(即:喀纳斯群),之后由于斋桑洋盆(古亚洲洋的分支)开始向北俯冲,发生大规模的花岗岩化,形成片麻-花岗岩穹窿。晚古生代的俯冲与碰撞生成花岗伟晶岩。本次工作在喀纳斯湖—禾木一带厘定出大量的中奥陶世—泥盆世花岗岩,并对其进行了划分,分别为中奥陶世碱性碰撞型侵入构造岩石组合和晚志留—早泥盆世俯冲型侵入岩构造岩石组合。中奥陶世花岗岩为“S”型花岗岩,形成于同碰撞构造环

境(韩琼等,2006);晚志留—早泥盆世花岗岩为“I-S”型花岗岩,形成于俯冲的构造环境(郑加行等,2006)。并且认为同碰撞花岗岩形成于 460~360 Ma,460 Ma 为古亚洲洋向北俯冲的下限,中奥陶世至早石炭世处于造山阶段。中奥陶世为早古生代亚洲洋洋壳俯冲向阿尔泰微陆块转化的时限。

喀拉加热克岩体形成于晚奥陶世,在花岗岩 R1-R2 图解中(图 10a),2 个样品落在“6”区,显示其为同碰撞花岗岩,另外 2 号样品落在“2”区,为俯冲花岗岩,在 Rb30-Hf-Ta $\times$ 3 图解中(图 10b),所有样品落在“火山弧”区内。因此,认为喀拉加热克花岗闪长斑岩岩体所处的环境为同碰撞-俯冲,为同碰撞-俯冲转换的环境。



①. 地幔斜长花岗岩;②. 破坏性活动板块边缘(板块碰撞前)花岗岩;③. 板块碰撞后隆起期花岗岩;④. 晚造山期花岗岩;⑤. 非造山区 A 型花岗岩;⑥. 同碰撞(S 型)花岗岩;⑦. 造山期后 A 型花岗岩;syn-COLG. 同碰撞花岗岩;WPG. 板内花岗岩;VAG. 火山弧花岗岩;ORG. 洋脊花岗岩

图 10 喀拉加热克岩体构造环境判别图

Fig. 10 Tectonic setting discriminant of Kalajiareke rock mass

6 结论

(1)喀拉加热克岩体为过铝质钙碱性岩岩石,推断其形成是地幔基性岩浆以底侵方式就位于年轻地幔底部,大量的热量促使上覆地壳物质部分熔融形成壳-幔混合花岗岩质岩浆,在不饱和水的条件下,由富含白云母和黑云母的变质砂岩脱水熔融形成的。

(2)喀拉加热克花岗闪长斑岩岩体的形成时代

为(450.6 $\pm$ 3) Ma,为晚奥陶世侵入岩。

(3)喀拉加热克花岗闪长斑岩的形成环境为同碰撞-俯冲转换的环境。

参考文献(References):

张越,陈隽璐,白建科,等. 阿尔泰造山带南缘乌恰沟片麻状花岗岩质侵入体 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及地质意义[J]. 西北地质,2015,48(3):127-139.
ZHANG Yue, CHEN Junlu, BAI Jianke, et al. LA-ICP-MS

- Zircon U - Pb Dating of Gneissic Granitic Intrusive Mass in Wuqiagou on the southern of Altay Orogenic Belt and Its Geological Significance[J]. *Northwestern Geology*, 2015, 48(3):127-139 (in Chinese with English abstract).
- 陈毓川,王登红,徐志刚,等. 阿尔泰成矿省的成矿系列及成矿规律研究[R]. 北京:中国地质科学院,2000.
- 于淑艳,许英霞,郭正林,等. 新疆苏普特背斜花岗岩和变安山质凝灰岩 LA-ICP-MS 锆石 U - Pb 年代学特征及意义[J]. *西北地质*, 2011, 44(2):15-24.
- YU Shuyan, XU Yingxia, GUO Zhenglin, et al. LA-ICP-MS Zircon U - Pb Dating for Granite and Meta-Andesitic Tuff and Its Geological Significance[J]. *Northwestern Geology*, 2011, 44(2):15-24 (in Chinese with English abstract).
- 胡霁琴,张国新,张前锋,等. 阿尔泰造山带变质岩系时代问题的讨论[J]. *地质科学*, 2002, 37(2):129-142.
- HU Aiqin, ZHANG Guoxin, ZHANG Qianfeng, et al. A Review on ages of Precambrian metamorphic rocks from Altay orogen in Xinjiang, NW China[J]. *Chinese Journal of Geology*, 2002, 37(2):129-142 (in Chinese with English abstract).
- 曾祥武,刘家军. 新疆阿尔泰大东沟乌雷库-克朗岩体 LA-ICP-MS 锆石 U - Pb 年龄、地球化学特征及其地质意义[J]. *西北地质*, 2017, 50(2):37-48.
- ZENG Xiangwu, LIU Jiajun. LA-ICP-MS Zircon U - Pb Age, Geochemistry of the Wuleiku-kelang Pluton from the Dadonggou Area of Altay in Xinjiang and Its Tectonic Implications[J]. *Northwestern Geology*, 2017, 50(2):37-48 (in Chinese with English abstract).
- 邹天人,曹惠志,吴柏青. 新疆阿尔泰造山花岗岩和非造山花岗岩及其判别标志[J]. *地质学报*, 1988, (3):228-243.
- ZOU Tianren, CAO Huizhi, WU Baiqing. Orogenic and anorogenic granites of the Altai Mountains, Xinjiang and their discrimination criteria. [J]. *Acta Geologica Sinica*, 1988, (3):228-243 (in Chinese with English abstract).
- 王中刚,赵振华,邹天人,等. 阿尔泰花岗岩类地球化学[M]. 北京:科学出版社,1998,1-152.
- 程裕淇. 1:400 万中国地质图[M]. 北京:地质出版社,2004.
- 肖序常,汤耀庆,冯益民,等. 新疆北部及其邻区大地构造[M]. 北京:地质出版社,1992,169.
- 童英,王涛,洪大卫,等. 中国阿尔泰北部山区早泥盆世花岗岩的年龄、成因及构造意义[J]. *岩石学报*, 2007, 23(8):1933-1944.
- TONG Ying, WANG Tao, HONG Dawei, et al. Ages and origin of the early Devonian granites from the north part of Chinese Altai Mountains and its implications[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007, 23(8):1933-1944 (in Chinese with English abstract).
- 肖庆辉,邓晋福,邹天人,等. 中国典型造山型花岗岩与大陆地壳增长研究[M]. 北京:地质出版社,2009,1-528.
- 王涛,童英,李舫,等. 阿尔泰造山带花岗岩时空演变、构造环境及地壳生长意义——以中国阿尔泰为例[J]. *岩石矿物学杂志*, 2010, (3):595-618.
- WANG Tao, TONG Ying, LI Shan, et al. Spatial and temporal variations of granitoids in the Altay orogen and their implications for tectonic setting and crustal growth: perspectives from Chinese Altay[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2010, (3):595-618 (in Chinese with English abstract).
- 王乐民,赵同阳,朱志新,等. 新疆阿尔泰山地区“喀纳斯群”的形成时代及其解体方案初论[J]. *地质学杂志*, 2016, 40(1):67-75.
- WANG Lemin, ZHAO Tongyang, ZHU Zhixin, et al. A Discussion on stratigraphy and age of the “Kanas Group” in Altay, Xinjiang [J]. *Journal of Stratigraphy*, 2016, 40(1):67-75 (in Chinese with English abstract).
- 赵同阳,朱志新,韩琼,等. 新疆阿尔泰山西段喀纳斯群碎屑锆石 LA-ICP-MS U - Pb 测年及地质意义[J]. *新疆地质*, 2016, 34(1):25-29.
- ZHAO Tongyang, ZHU Zhixin, HAN Qiong, et al. LA-ICP-MS zircon U - Pb age and its geological implication of the Kanas Group in western Altai tectonic Belt[J]. *Xinjiang Geology*, 2016, 34(1):25-29 (in Chinese with English abstract).
- 韩琼,赵同阳,唐智,等. 阿尔泰山西段比列乌提溪岩体锆石

- U-Pb 年龄及地质意义[J]. 新疆地质, 2016, 34(1): 46-53.
- HAN Qiong, ZHAO Tongyang, TANG Zhi, et al. Zircon U-Pb age and its geological significance of Biliewutixi rock body in western Altay mountains[J]. Xinjiang Geology, 2016, 34(1): 46-53 (in Chinese with English abstract).
- 郑加行, 赵同阳, 唐智, 等. 新疆阿尔泰山西段铁列里克岩体地球化学特征 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及地质意义[J]. 新疆地质, 2016, 34(1): 54-61.
- ZHENG Jiaying, ZHAO Tongyang, TANG Zhi, et al. Geochemical characters, LA-ICP-MS zircon U-Pb dating of Tielielike rock in western Altay Mountains of Xinjiang and its geological Significances[J]. Xinjiang Geology, 2016, 34(1): 54-61 (in Chinese with English abstract).
- 蔡克大. 阿尔泰造山带西段岩浆活动的时代、成因机制及其构造意义[D]. 北京: 中国科学院, 2007.
- CAI Keda. Magmatism of the Western Chinese Altai orogen: Geochronology, Petrogenesis and Tectonic implications [D]. Beijing: Chinese Academy of Sciences, 2007 (in Chinese with English abstract).
- CHAPPELL BW. Aluminium saturation in I-and S-type granites and the characterization of fractionated haplogranite[J]. Lithos, 2000, 46: 535-551.
- CLEMENSJ D. S-type granitic magmas-pertogenetic issues, model and evidence[J]. Earth-Science Reviews, 2003, 61: 1-18.
- JACKSON S E, PEARSON N J, GRIFFIN W L. The implication of laser ablation microprobe-inductively coupled plasma-mass spectrometry(LAM-ICP-MS) to in situ U-Pb zircon geochronology[J]. Chemical Geology, 2004, 211: 47-69.
- BLACK LP, GULSON B L. The age of the Mud Tank carbonatite, Strangways Range, Northern Territory [J]. BMR Journal of Australian Geology and Geophysics, 1978, 3: 227-232.
- ANDERSEN T. Correction of common Pb in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb [J]. Chemical Geology, 2002, 192: 59-79.
- SENGÖR A M C, N ATAL' in B A, BURTMAN V S. Evolution of the Altaid tectonic collage and Paleozoic crustal growth in Eur-asia[J]. Nature[J], 1993, 364: 299-307.
- WANG Tao, HONG Dawei, JAHN B F, et al. Timing, petrogenesis, and setting of Palaeozoic synorogenic intrusions from the Aletai mountains, northwest China: Implications for the tectonic evolution of an accretionary orogen[J]. The Journal of Geology, 2006a, 114: 735-751.