

DOI: 10.12401/j.nwg.2022028

东昆仑巴什尔希晚奥陶世二长花岗岩成因及其地质意义

田龙, 康磊*, 刘良, 盖永升

(大陆动力学国家重点实验室, 西北大学地质学系, 陕西 西安 710069)

摘要: 巴什尔希花岗杂岩体侵位于东昆仑北部与南阿尔金造山带的结合部位。角闪二长花岗岩和灰色二长花岗岩均采自巴什尔希岩体中细粒状似斑状二长花岗岩单元。锆石 LA-ICP-MS 年代学研究显示其成岩年龄分别为 (452.8 ± 3.1) Ma 和 (454.2 ± 4.8) Ma, 后者还获得了一组残留核年龄为 (758 ± 15) Ma。样品具有高 SiO_2 含量 ($71.97\% \sim 73.49\%$ 和 $73.28\% \sim 74.12\%$) 和高 K_2O 含量 ($4.80\% \sim 5.61\%$ 和 $5.57\% \sim 5.79\%$) 的特点, Na_2O 含量分别为 $3.01\% \sim 3.13\%$ 和 $2.83\% \sim 2.91\%$, CaO 含量低, A/CNK 均为 $1.02 \sim 1.07$, 属于弱过铝质系列花岗岩。稀土配分模式呈“海鸥型”分布, LREE/HREE 值分别为 $17.80 \sim 26.06$ 和 $9.09 \sim 11.79$, 轻重稀土分馏程度较高, δEu 值为 $0.31 \sim 0.44$, 中等负 Eu 异常; 富集大离子亲石元素 Rb、K、U、Pb, 亏损高场强元素 Zr、Hf、Nb、Ta、P、Ti。样品均具有高 Si、富碱、相对贫 Na、高 K、低 Ca 的岩石地球化学特征。锆石的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 $0.86 \sim -8.65$, 绝大多数为负值, t_{DM}^2 值为 $1280 \sim 1734$ Ma, 指示源岩物质源于古中元古代地壳物质。岩浆起源温度均为 $\sim 800^\circ\text{C}$, 熔融压力为 $0.8 \sim 1.0$ GPa, 表明可能形成于碰撞造山后的初始伸展阶段。通过与南阿尔金以及东昆仑北缘祁漫塔格地区早古生代地质演化历史对比, 认为该杂岩体的形成时代、岩浆序列和构造背景与南阿尔金构造域更具亲缘性。

关键词: 东昆仑; 巴什尔希; 岩石成因; 构造背景

中图分类号: P581

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2023)02-0028-18

Petrogenesis and Geological Implications of Bashenerxi Monzogranite from East Kunlun Orogen Belt

TIAN Long, KANG Lei*, LIU Liang, GAI Yongsheng

(State Key Laboratory of Continental Dynamics, Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, Shaanxi, China)

Abstract: The Bashenerxi granitic complex intruded at the junction of East Kunlun and South Altyn orogenic belt. In this paper, the hornblende monzogranite and the gray monzonitic granite are both derived from the porphyritic monzogranite unit in the Bashenerxi intrusion. Zircon LA-ICP-MS geochronology shows that the diagenetic ages are (452.8 ± 3.1) Ma and (454.2 ± 4.8) Ma, respectively. A group of age (758 ± 15) Ma is concentrated in the core of zircon. The content of SiO_2 is between 71.97% and 74.12% , $A/\text{CNK} = 1.02 \sim 1.07$, $\text{K}_2\text{O} = 4.80\% \sim$

收稿日期: 2021-11-03; 修回日期: 2022-03-07; 责任编辑: 曹佰迪

基金项目: 国家自然科学基金项目“南阿尔金两期埃达克岩成因及其对洋-陆俯冲转换过程的指示意义”(41602052), 大陆动力学国家重点实验室自主研究课题“南阿尔金吐拉地区镁铁-超镁铁质岩浆作用成因”联合资助。

作者简介: 田龙(1992-), 男, 硕士研究生, 矿物学、岩石学、矿床学专业。E-mail: 1006018753@qq.com。

* 通讯作者: 康磊(1987-), 男, 博士, 讲师, 从事岩石大地构造学与成因矿物学研究。E-mail: kanglei@nwu.edu.cn。

5.79%, and $\text{Na}_2\text{O} = 2.83\% \sim 3.13\%$, which belongs to high-silica, high-potassium and peraluminous granites. The distribution pattern of rare earth elements is characterized by “gull type” distribution with strong negative europium anomaly ($\delta\text{Eu} = 0.31 \sim 0.44$), enrichment of large ion lithophile elements Rb, K, U, Pb and high field strength elements Zr, Hf, Nb, Ta, and loss of Sr, P, Ti. Zirconium saturation thermometer show that the magma origin temperature was about 800°C , and the melting pressure was about $0.8 \sim 1.0\text{ GPa}$. The samples are characterized by peraluminous, alkali rich, relatively poor in sodium, high in potassium and low in calcium. and they are strongly depleted in Ba, Sr, Ti, P and Eu, according this characterized, rock was judged to be S-type granite. The epsilon $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ value of the rocks is $0.86 \sim -8.65$. The age of the two-stage Hf model (t_{DM}^2) = $1280 \sim 1784\text{ Ma}$, mainly derived from the Paleo-Mesoproterozoic accretive crust. Based on the regional tectonic evolution and tectonic discrimination, it is considered that the rocks were formed after the Altyn deep subduction continental crust plate was broken off, and the regional tectonic background changed from compression to extension.

Keywords: Bashenerxi; monzogranite; petrogenesis; tectonic setting

东昆仑造山带地处于青藏高原北部,北部与柴达木盆地相接,其西端被阿尔金大型左行走滑断裂所截,东西延伸约 1500 km 。带内广泛分布元古宙到中生代的花岗质岩石,大致展布方向为北西西-南东东向(袁万明等, 2000)。近年来,随着一批区域地质调查工作的开展,众多学者对东昆仑造山带不同时代的花岗岩类进行了大量研究。东昆仑造山带内的花岗质岩石被前人划分为4个阶段,并分别对应4个构造旋回:①基底形成(前寒武世)。②洋盆扩张、俯冲、碰撞造山阶段(早寒武世—中泥盆世),造山后崩塌阶段(晚泥盆世)。③洋盆打开(晚泥盆世—早石炭世),俯冲造山时期(中晚二叠世—早三叠世),碰撞到后碰撞陆内造山阶段(晚三叠世),进入后造山垮塌阶段(晚侏罗世)。④受新特提斯构造影响强烈隆升阶段(晚中生代—新生代)(莫宣学等, 2007)。其中,以早古生代及晚古生代—早中生代的岩浆活动最为发育。早古生代花岗岩多呈大型线状复式岩基出于东昆仑北部祁漫塔格山一带,其年龄为 $485 \sim 384\text{ Ma}$ (高晓峰等, 2010; 黎敦朋等, 2010; 高永宝等, 2011; 孟繁聪, 2013; 熊富浩, 2014; 张斌等, 2014)。

东昆仑早古生代巴什尔希花岗杂岩体,北邻南阿尔金造山带,南部与东昆仑西北部祁漫塔格构造带相接。前人对该岩体已有部分研究,但关于其形成时代、构造背景及构造归属仍存在不同认识:①高晓峰等(2010)研究中给出了巴什尔希柯可·卡尔德岩体似斑状二长花岗岩锆石 U-Pb 年龄为 $(458 \pm 9)\text{ Ma}$, 钾长花岗岩锆石 U-Pb 年龄为 $(432 \pm 1)\text{ Ma}$, 认为其具有 A 型花岗岩的特征,可能是弧后盆地拉张过程中地幔底侵

的产物。②包亚范等(2008)研究认为,巴什尔希花岗岩为 S 型花岗岩,其形成于板内造山带或陆缘环境。③黎敦朋等(2010)认为巴什尔希花岗岩的构造环境属性可能并不属于祁漫塔格构造域。针对上述分歧,笔者拟以巴什尔希似斑状二长花岗岩为研究对象,通过详细的岩相学、地球化学、年代学及锆石 Hf 同位素分析等工作,在此基础上,与区内前人研究成果进行对比研究,以期对巴什尔希花岗杂岩体的形成时代、原岩属性及构造背景进行约束,并为进一步探讨东昆仑造山带北缘的构造演化过程提供依据。

1 区域地质概况和岩相学特征

巴什尔希岩体分布于东昆仑造山带祁漫塔格西翼与南阿尔金的接合部位(图 1),其北为南阿尔金俯冲碰撞杂岩带,以南为东昆仑祁漫塔格造山带。南阿尔金俯冲碰撞杂岩带是一条早古生代形成的板块缝合带,主要出露与陆壳深俯冲相关的超高压变质岩、中酸性花岗岩和蛇绿混杂岩等(张建新等, 2001; 刘良等, 2003, 2007, 2009)。此外,阿尔金南缘主断裂是一条长期活动的巨型左行走滑构造带,其新生代构造活动形成了一系列拉分盆地(车自成等, 1998)。东昆仑祁漫塔格造山带主要出露的地层为长城系金水口岩群的小庙岩组、青白口系冰沟岩群、古生界祁漫塔格群和志留系白干湖组,在古生代至中生代经历了强烈的岩浆活动。巴什尔希岩体以形态和规模不等的岩基或岩墙侵入于长城系金水口岩群小庙岩组和蓟县系至青白口系冰沟岩群中,主要的岩石组合由钾长花

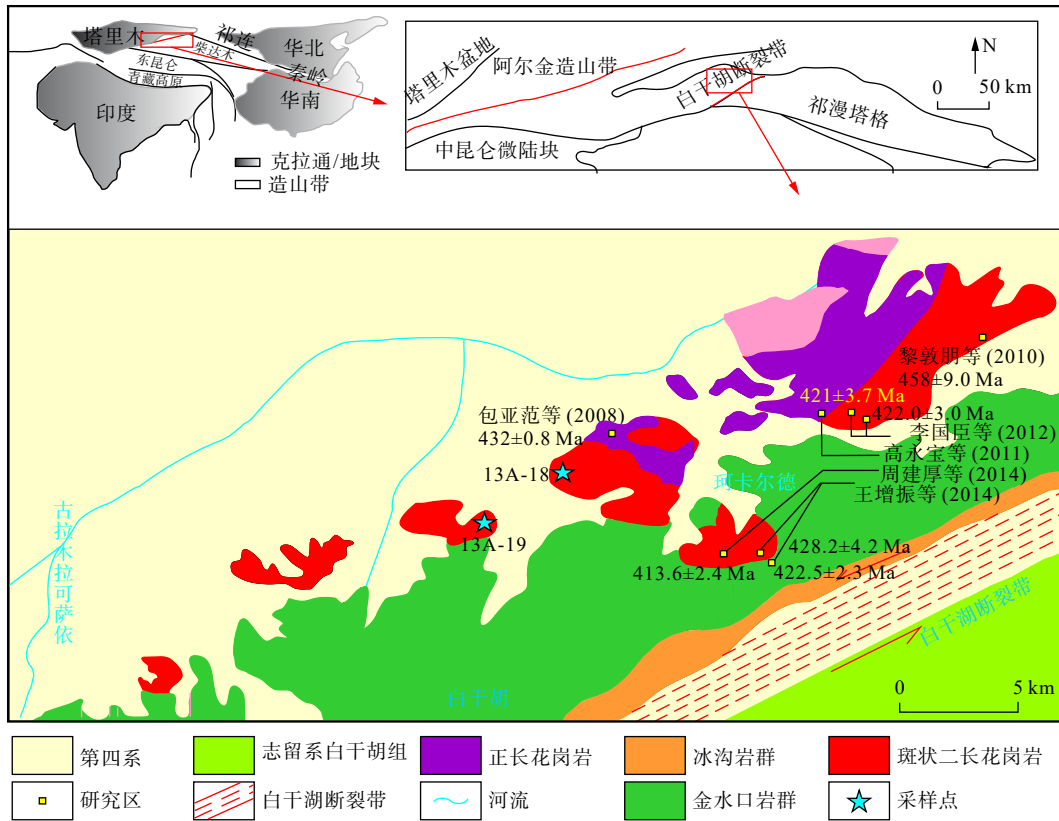


图1 东昆仑巴什尔希区域地质图(据黎敦朋, 2010 修编)

Fig. 1 Geological map of the Bashenerxi region of the East Kunlun Mountains

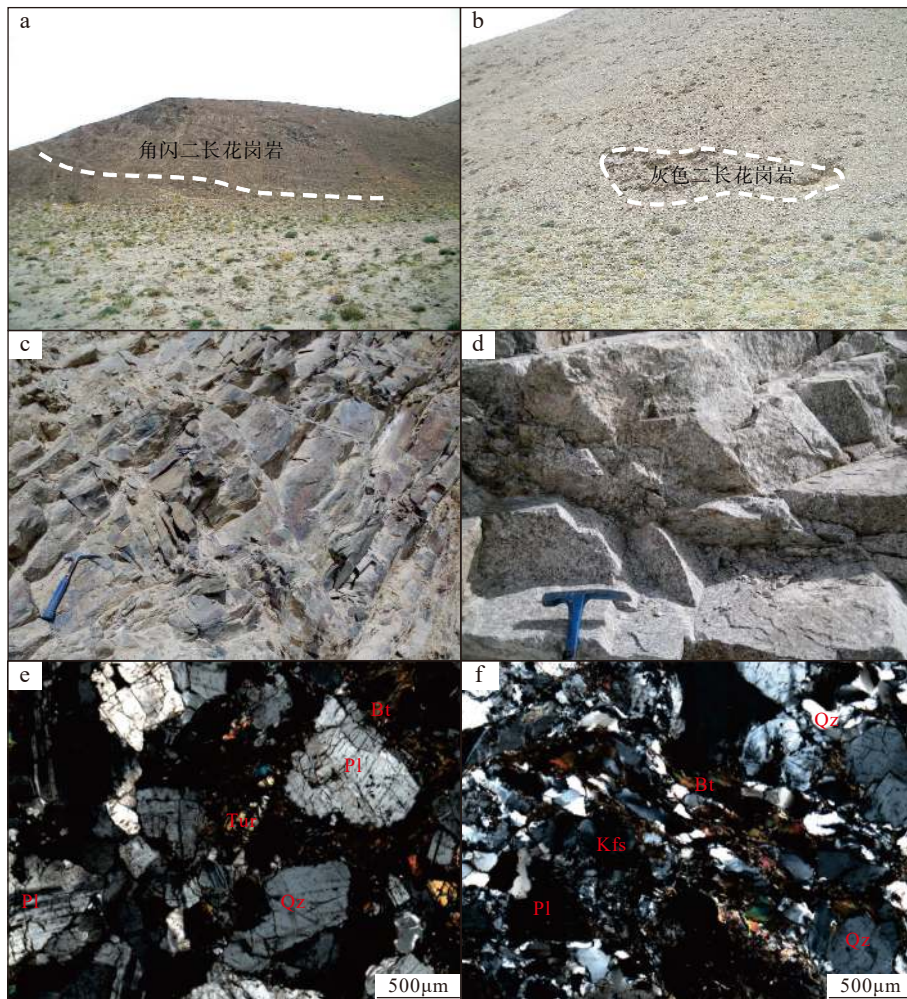
岗岩和二长花岗岩组成。

文中的角闪二长花岗岩(13A-18)和灰色二长花岗岩均采自巴什尔希岩体中细粒状似斑状二长花岗岩单元(图1),二者均呈岩株状侵入金水口岩群小庙岩组。角闪二长花岗岩(图2a、图2c)主要矿物组成为石英、斜长石、钾长石、角闪石和黑云母,副矿物有磷灰石、锆石和少量电气石,其中斜长石与钾长石含量均为30%~40%,自行-半自形,斜长石有双晶发育;石英含量约为25%~30%,可见波状消光,他形粒状;角闪石含量为5%~10%,分布于斜长石和石英颗粒间,半自形结构;黑云母含量不足5%。灰色二长花岗岩(图2b、图2d),主要矿物组合石英、斜长石、钾长石和少量黑云母,副矿物有锆石和磷灰石。斜长石钾长石含量均为30%~35%,半自形粒状结构;石英含量约为25%~30%,他形结构;黑云母含量约为10%,自形程度较差。

2 分析方法

文中样品委托河北廊坊诚信地质服务有限公司

进行锆石的分离和挑选等工作,其他测试分析工作在西北大学大陆动力学国家重点实验室完成。全岩微量元素分析在XRF(Rugaku RIX2100)仪上测定,全岩微量元素分析和稀土元素测试在Perkin Elmer公司Elan6100 DRC型ICP-MS上完成,标样使用BHVO-1、BCR-2和AVG-1进行监控。阴极发光(CL)分析在装有Mono CL³⁺阴极发光装置系统的场发射扫描电镜上完成,而U-Pb年龄测定及微量元素分析Agilent 7500a型ICP-MS上进行,连接Geolas 200 M激光剥蚀系统,测试中使用直径为32 μm激光剥蚀斑束进行刻蚀,剥蚀深度为20 μm,在测定时每5个测点测定一次91500、GJ-1和NIST 610,数据处理使用ICPMS Data Cal 8.9程序(Liu et al., 2010),年龄计算以标准锆石91500为外标进行同位素比值分馏校正,元素浓度校正以NIST610为外标,²⁹Si为内标,年龄谱和图和加权平均年龄计算绘制和计算均采用Isoplot(ver3.0)。锆石微区原位Lu-Hf同位素分析使用Nu Plasma II MC-ICP MS激光剥蚀系统为RESOLUTIONM-50, ASI,监控样品采用GJ-1和91500标准锆石样品,每8个样品插入一组国际标样,数据采集模式为TRA模式,积



a.角闪二长花岗岩; b.灰色二长花岗岩; c.角闪二长花岗岩正交镜下照片; d.灰色二长花岗岩正交镜下照片; Amp.角闪石; Bi.黑云母; Kfs.钾长石; Pl.斜长石; Qz.石英; Tur.电气石

图2 东昆仑巴什尔希角闪二长花岗岩和灰色二长花岗岩野外露头 and 显微镜岩石学照片

Fig. 2 Field outcrops and petrographic microscopic photographs of granite

分时间为 0.2 s, 背景采集时间为 30 s, 样品积分时间为 50 s, 吹扫时间为 40 s, 分析方法和仪器参数详见 Yuan 等(2008)。

3 分析结果

3.1 地球化学特征

3.1.1 主量元素

角闪二长花岗岩和灰色二长花岗岩 SiO_2 含量均较高, 分别为 71.97%~73.49% 和 73.28%~74.12%; K_2O 含量分别为 4.80%~5.61% 和 5.57%~5.79%, 均高于 Na_2O 含量(3.01%~3.13% 和 2.83%~2.91%), 里特曼指数 σ 均为 2.04~2.75, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 值分别为 1.55~1.76 和 1.92~2.05(表 1)。在 SiO_2 - K_2O 关系图

中可以看出, 角闪二长花岗岩和灰色二长花岗岩落点集中在高钾钙碱性岩系列(图 3a), 二者均具有富 Al 特征(Al_2O_3 含量为 13.06%~17.20%, 平均为 13.79%), 在 A/CNK - A/NK 关系图中显示为弱过铝质(图 3b); Mg、Ti 和 Ca 含量较低(MgO 、 TiO_2 、 CaO 含量分别为 0.28%~0.38%、0.18%~0.33% 和 0.92%~1.24%), 侵入岩 TAS 分类图如下(图 3c)。因此, 角闪二长花岗岩和灰色二长花岗岩均具有过 Al、富碱、相对贫 Na、高 K、低 Ca 的岩石地球化学特征。

3.1.2 稀土及微量元素特征

角闪二长花岗岩和灰色二长花岗岩的 LREE/HREE 值分别为 17.80~26.06 和 9.09~11.79; $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 值为 10.79~26.06, $(\text{La}/\text{Sm})_N$ 值为 1.62~3.20, 均表现出轻稀土元素相对富集, 重稀土相对亏损的特征, 轻重稀

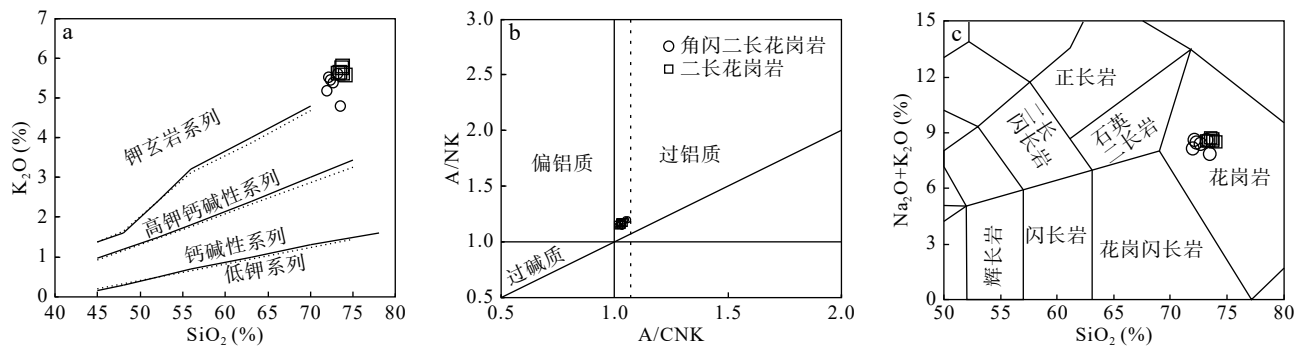
表1 角闪二长花岗岩和灰色二长花岗岩地球化学组成(主量元素:%;微量元素: 10^{-6})Tab. 1 Element compositions of granite (Major element: %; Trace element: 10^{-6})

元素	13A-18(a)	13A-18(b)	13A-18(c)	13A-18(d)	13A-18(e)	13A-18(g)	13A-19(a)	13A-19(b)	13A-19(c)	13A-19(d)	13A-19(e)	13A-19(f)
SiO ₂	72.09	73.49	73.22	71.97	72.67	72.31	73.67	74.12	73.49	73.84	73.28	73.83
TiO ₂	0.26	0.29	0.24	0.32	0.31	0.33	0.19	0.20	0.20	0.20	0.19	0.18
Al ₂ O ₃	13.98	13.09	13.51	13.76	13.55	13.48	13.61	13.53	13.64	13.61	13.65	13.48
Fe ₂ O ₃ ^t	2.01	2.14	1.74	2.36	2.45	2.21	1.57	1.54	1.53	1.56	1.55	1.51
MnO	0.04	0.05	0.03	0.04	0.05	0.04	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
MgO	0.34	0.36	0.29	0.42	0.38	0.38	0.30	0.31	0.28	0.30	0.31	0.28
CaO	1.18	1.17	0.92	1.21	1.24	1.21	0.99	1.11	1.17	1.17	1.08	1.06
Na ₂ O	3.13	3.10	3.01	3.04	3.06	3.08	2.91	2.90	2.86	2.90	2.89	2.83
K ₂ O	5.51	4.80	5.61	5.19	5.38	5.45	5.75	5.57	5.64	5.60	5.60	5.79
P ₂ O ₅	0.08	0.08	0.08	0.10	0.10	0.10	0.07	0.07	0.06	0.07	0.07	0.07
LOI	1.07	1.19	0.92	1.10	0.87	1.02	0.88	0.94	0.82	0.93	0.91	0.94
TOTAL	99.69	99.76	99.57	99.51	100.1	99.61	99.96	100.3	99.72	100.2	99.56	100.0
Li	31.2	28.6	26.3	33.1	37.6	24.6	41.8	47.6	45.6	42.2	44.4	43.9
Be	4.53	4.84	4.10	4.69	4.23	4.89	2.99	4.10	3.38	3.95	3.63	3.45
Sc	3.38	3.67	2.69	3.54	5.54	3.42	3.14	3.21	2.89	2.93	3.20	2.84
V	12.9	13.3	9.65	16.0	14.1	13.7	8.46	8.09	8.22	8.08	8.15	7.71
Cr	6.52	5.63	6.82	4.12	4.33	4.55	5.64	7.20	7.00	3.49	5.00	3.19
Co	19.2	32.2	33.2	20.2	24.5	35.9	32.3	36.2	33.4	34.8	35.9	26.4
Ni	2.33	3.69	4.05	2.38	2.59	2.88	4.93	4.32	4.11	2.39	3.29	2.06
Cu	1.56	2.21	1.54	2.53	4.10	1.81	1.41	1.10	1.16	1.03	1.00	1.01
Zn	32.7	38.4	29.6	38.0	43.5	37.8	29.3	33.4	31.3	35.7	31.9	29.8
Ga	20.8	20.0	19.4	21.5	21.1	20.3	18.6	19.4	18.8	19.0	18.7	18.2
Ge	1.57	1.36	1.48	1.52	1.54	1.44	1.53	1.62	1.60	1.61	1.53	1.57
Rb	203	183	187	178	206	208	235	214	224	198	223	240
Sr	80.7	73.9	75.9	83.9	79.6	79.5	86.1	77.5	78.6	79.5	80.2	76.0
Y	27.6	31.3	20.2	25.1	26.8	23.9	36.0	38.3	33.0	34.1	29.7	33.0
Zr	231	230	190	284	239	252	171	172	171	169	171	164
Nb	27.6	30.0	23.9	34.6	33.2	38.1	27.2	30.5	29.4	31.3	29.5	30.4
Cs	2.75	2.46	1.72	2.57	3.48	1.54	4.83	4.09	6.47	3.61	5.17	3.57
Ba	478	313	393	412	385	424	393	361	384	373	402	370
La	56.4	65.7	51.2	65.0	65.1	64.6	50.4	50.7	54.1	56.8	60.4	50.7
Ce	110	129	101	126	128	122	96.9	98.2	104	106	114	98.4
Pr	12.4	14.6	11.4	14.5	14.8	14.2	11.1	11.2	11.8	12.1	13.0	11.0
Nd	42.1	51.2	38.4	50.1	51.2	48.6	37.9	38.5	40.8	42.2	45.9	38.7
Sm	7.30	8.70	6.54	8.94	9.39	8.27	7.60	7.86	8.15	8.24	8.77	7.69
Eu	0.95	0.88	0.88	1.00	0.94	0.97	0.77	0.77	0.81	0.80	0.83	0.76
Gd	6.00	7.01	5.25	7.13	7.48	6.83	6.75	6.98	7.02	7.22	7.34	6.78

续表 1

元素	13A-18(a)	13A-18(b)	13A-18(c)	13A-18(d)	13A-18(e)	13A-18(g)	13A-19(a)	13A-19(b)	13A-19(c)	13A-19(d)	13A-19(e)	13A-19(f)
Tb	0.83	1.00	0.68	0.91	0.98	0.91	1.03	1.07	1.01	1.02	1.03	0.97
Dy	4.67	5.53	3.62	4.72	5.13	4.67	5.89	6.17	5.60	5.67	5.47	5.43
Ho	0.85	1.04	0.64	0.82	0.88	0.79	1.12	1.16	1.03	1.05	0.98	1.02
Er	2.49	2.97	1.82	2.25	2.37	2.14	3.14	3.33	2.82	2.92	2.65	2.88
Tm	0.37	0.42	0.25	0.30	0.32	0.30	0.46	0.49	0.42	0.42	0.38	0.42
Yb	2.27	2.52	1.54	1.79	1.97	1.88	2.96	3.15	2.66	2.72	2.42	2.72
Lu	0.31	0.34	0.23	0.26	0.27	0.28	0.42	0.45	0.39	0.39	0.35	0.38
Hf	5.54	5.79	4.81	6.76	5.72	6.12	4.61	4.63	4.73	4.56	4.81	4.45
Ta	2.32	2.23	1.43	1.84	1.87	2.37	1.87	2.52	2.23	2.79	2.24	2.61
Pb	22.7	18.9	17.6	19.0	19.4	18.1	27.1	27.6	29.2	30.2	32.6	29.8
Th	23.3	29.6	24.8	27.3	26.3	26.8	29.6	34.1	33.7	34.7	34.9	33.3
U	1.67	2.09	1.43	1.34	1.86	1.51	2.14	2.90	2.26	2.41	7.96	2.22
ΣREE	230	270	209	266	270	258	226	230	241	247	264	228
LREE	17.80	20.83	14.03	18.17	19.42	17.80	204.6	207.3	219.7	225.9	243.1	207.2
HREE	12.90	12.98	14.90	14.62	13.90	14.52	21.78	22.80	20.95	21.41	20.63	20.61
LREE/HREE	17.80	18.69	23.86	26.06	23.66	24.69	9.40	9.09	10.49	10.55	11.79	10.05
La _N /Yb _N	0.44	0.35	0.46	0.38	0.34	0.40	12.19	11.56	14.57	14.96	17.89	13.37
δEu	0.43	0.33	0.44	0.37	0.33	0.39	0.32	0.31	0.32	0.31	0.31	0.32
δCe	0.98	0.98	0.98	0.97	0.97	0.94	0.96	0.97	0.97	0.94	0.95	0.97
δ	2.57	2.05	2.46	2.34	2.40	2.48	2.45	2.31	2.37	2.34	2.38	2.41
Al ₂ O ₃ /TiO ₂	53.77	45.14	56.29	43.00	43.71	40.85	71.63	67.65	68.20	68.05	71.84	74.89
CaO/Na ₂ O	0.38	0.38	0.31	0.40	0.41	0.39	0.34	0.38	0.41	0.40	0.37	0.37
K ₂ O/Na ₂ O	1.76	1.55	1.86	1.71	1.76	1.77	1.98	1.92	1.97	1.93	1.94	2.05
Rb/Ba	0.42	0.58	0.48	0.43	0.53	0.49	0.60	0.59	0.58	0.53	0.56	0.65
Sr/Ba	0.17	0.24	0.19	0.20	0.21	0.19	0.22	0.21	0.20	0.21	0.20	0.21
A/CNK	1.05	1.05	1.06	1.07	1.03	1.02	1.06	1.06	1.05	1.05	1.07	1.05

注: A/CNK = Al₂O₃ / (CaO + K₂O + Na₂O); δ = (K₂O + Na₂O)² / (SiO₂ - 43); δEu = Eu_N / (Sm_N + Gd_N)^{1/2}; δCe = Ce_N / (La_N + Pr_N)^{1/2}; 原始地幔值据 Sun et al., 1989。



a. SiO₂-K₂O 图解 (Rickwood, 1989); b. A/CNK-A/NK 分类图解 (Peccerillo et al., 1976); c. TAS 图解 (Middlemost, 1994)

图 3 东昆仑地区巴什尔希花岗岩岩石类型判别图解

Fig. 3 Classification diagram of Bashenerxi granites from the eastern Kunlun area

土分馏程度较高;存在Eu元素“V”型谷, δEu 值为0.31~0.44; 稀土配分模式(图4a)显示, 样品稀土元素

具有相对一致的变化趋势, 总体表现为“右倾海鸥型”配分模式。

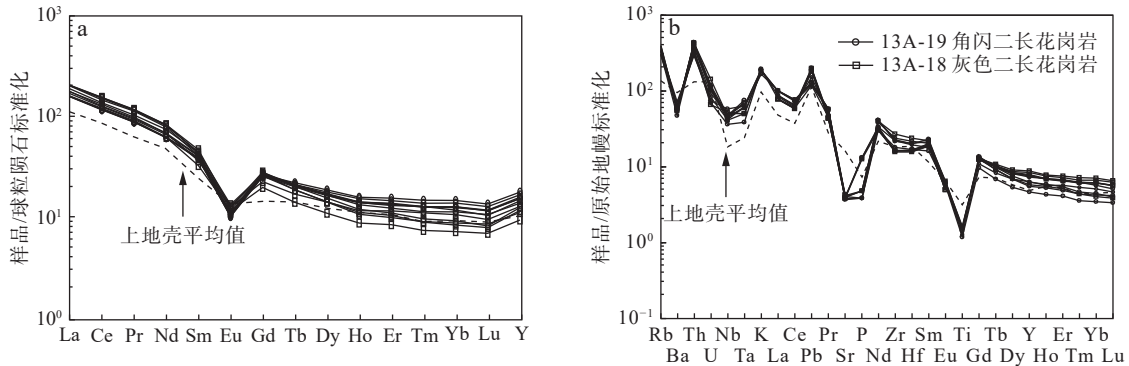


图4 角闪二长花岗岩和灰色二长花岗岩稀土模式图(a)和微量元素蛛网图(b)(原始地幔值据 Sun et al., 1989)

Fig. 4 (a) Patterns of rare earth elements and (b) spider webs of trace elements in granite

2个样品均富集K、Rb、Ba等大离子亲石元素(LILEs), 亏损Nb、Ta、P、Ti等高场强元素(HSFEs); Zr和Hf无明显分异; Nb和Ta的相对亏损可能暗示岩浆来源于地壳的重熔作用, 或是经历了Nb、Ta矿物的结晶分异作用; P、Ti异常可能与磷灰石、钛铁氧化物的分离结晶有关(图4b)。

3.2 锆石U-Pb年龄和微量元素特征:

角闪二长花岗岩中的锆石形态为自形-半自形, CL图像显示, 锆石颗粒有明显的震荡环带, 大多数长宽比接近1:1.5~1:2, 无继承核(图5); 13个锆石测点 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为(452.8±3.1)Ma; Th/U值分别为0.51~1.23, 平均为0.80。灰色二长花岗岩中

锆石形态为自形-半自形, CL图像显示锆石亦有较为清晰的震荡环带, 长宽比约为1:1.5, 20个锆石测点获得(454.2±4.8)Ma和(758±15)Ma 2组年龄, 前者的测点Th/U值为0.46~0.90, 平均为0.52; 后者的测点Th/U值为0.16~2.61, 平均为0.71, 测试结果见图6和表2。据以上锆石CL图像和Th/U值可判断可以确定角闪二长花岗岩与灰色二长花岗岩中的锆石为岩浆成因(Corfu et al., 2003; Hoskin et al., 2003), 其年龄可以代表岩浆的结晶年龄。因此认为, 角闪二长花岗岩的成岩年龄为(452.8±3.1)Ma, 灰色二长花岗岩的成岩年龄为(454.2±4.8)Ma, 其获得的一组(758±15)Ma为残留核年龄。

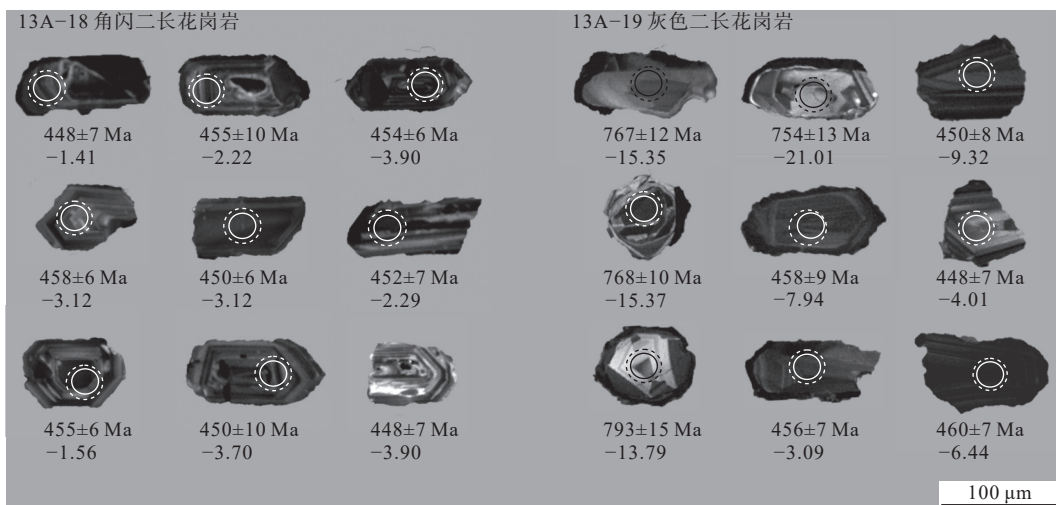


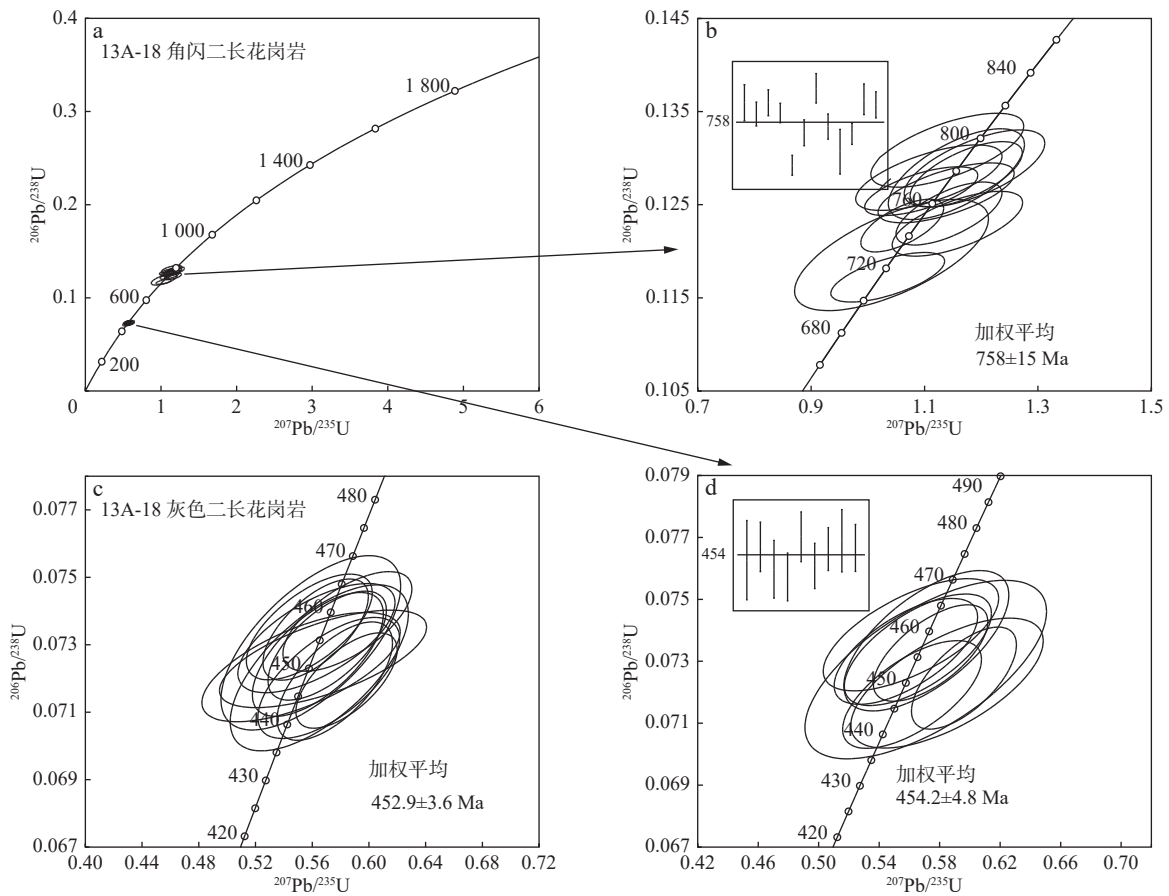
图5 样品代表性锆石CL图像及U/Pb年龄

Fig. 5 CL image of representative zircon samples

3.3 锆石Hf同位素

在角闪二长花岗岩中挑选了13个U-Pb年龄约

为460 Ma的锆石点位, 进行原位Lu-Hf同位素分析; 在灰色二长花岗岩中对U-Pb年龄约760 Ma和460



a、b、d. 灰色二长花岗岩锆石 U-Pb 年龄谱和图及加权平均年龄; c. 角闪二长花岗岩锆石 U-Pb 年龄谱和图及加权平均年龄

图 6 花岗岩锆石 U-Pb 年龄谱和图

Fig. 6 U-Pb diagrams of concordia and weighted mean ages for zircons

Ma 分别挑选了 11 个和 12 个锆石点位进行分析。2 组岩石 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 值为 0.000 278~0.003 492, 绝大多数小于 0.002, 表明放射成因 Hf 累积较少, 而 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值为 0.282 3~0.282 6, 基本可以代表锆石结晶时体系的 Hf 同位素组成(表 3)(第五春荣等, 2008)。角闪二长花岗岩 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值为 0.282 342~0.282 483; $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 -0.88~-5.89, 平均为 -2.78; 灰色二长花岗岩中, U-Pb 年龄约为 450 Ma 的测点 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值为 0.282 150~0.282 440; $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 -2.16~-8.65, 平均为 -9.71; U-Pb 年龄约 760 Ma 的测点 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值为 0.282 178~0.282 373, $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 0.86~-5.61, 暗示两花岗岩岩体的源岩来源于陆壳物质(表 3、图 7)。角闪二长花岗岩和灰色二长花岗岩的 t_{DM}^2 值分别为 1 280~1 533 和 1 333~1 784。花岗岩中锆石的二阶段 Hf 模式年龄并不能代表花岗岩和其源岩形成时代, 而是代表源岩地壳物质从亏损地幔库脱离的年龄(吴福元等, 2007), 表明角闪二长花岗岩和灰色二长花岗岩源岩

物质从地幔库中脱离的时代为古元古代—中元古代。

4 讨论

4.1 花岗岩类型及源岩特征

东昆仑巴什尔希角闪二长花岗岩和灰色二长花岗岩弱的过铝质(A/CNK 略小于 1.1), 略高的 10 000 Ga/Al 值以及富集 Rb、K、U、Pb, 亏损 Zr、Hf、Nb、Ta、P、Ti 等地球化学性质可能为弱分异作用的结果(Eby, 1990)。在 TFeO/MgO-SiO₂ 图解(图 8a)中, 绝大多数样品落入 “I&S” 区域。另外, P₂O₅ 的含量随 SiO₂ 增大无变化(Wolf et al., 1994), Rb/Sr 值为 2.12~3.16, 平均为 2.63(大于 0.9), 有别于 I 性花岗岩(王德滋, 1993), 表现为 S 型花岗岩地球化学特征(图 8b)。

一般认为 S 型花岗岩的源区主要为变质沉积岩(泥质岩、砂岩或杂砂岩)(Chappell et al., 1992; Harris et al., 1992; Williamson et al., 1996; Sylvester, 1998), 如

表 2 角闪二长花岗岩和灰色二长花岗岩的锆石 LA-ICP-MS 定年分析表

Tab. 2 Table of dating analysis of granite zircon LA-ICP-MS

样品编号	含量 (10^{-6})		Th / U	同位素比值						年龄值 (Ma)					
	^{232}Th	^{238}U		$^{207}\text{Pb} / ^{206}\text{Pb}$	1 σ	$^{207}\text{Pb} / ^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb} / ^{238}\text{U}$	1 σ	$^{207}\text{Pb} / ^{206}\text{Pb}$	1 σ	$^{207}\text{Pb} / ^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb} / ^{238}\text{U}$	1 σ
13A-18-01	215	361	0.5973	0.0579	0.0027	0.5759	0.0269	0.0720	0.0012	528	104	462	17	448	7
13A-18-02	556	454	1.2254	0.0589	0.0025	0.5842	0.0236	0.0719	0.0009	565	91	467	15	448	6
13A-18-03	293	369	0.7941	0.0578	0.0032	0.5848	0.0300	0.0737	0.0010	520	120	468	19	458	6
13A-18-04	455	526	0.8648	0.0555	0.0036	0.5630	0.0366	0.0732	0.0011	435	143	453	24	455	6
13A-18-05	333	382	0.8713	0.0568	0.0028	0.5706	0.0275	0.0730	0.0011	483	109	458	18	454	6
13A-18-06	260	510	0.5091	0.0554	0.0025	0.5624	0.0245	0.0735	0.0010	428	98	453	16	457	6
13A-18-07	355	387	0.9165	0.0561	0.0031	0.5640	0.0305	0.0727	0.0012	457	120	454	20	452	7
13A-18-08	193	317	0.6106	0.0553	0.0040	0.5590	0.0418	0.0731	0.0017	433	161	451	27	455	10
13A-18-09	386	470	0.8217	0.0548	0.0043	0.5522	0.0462	0.0723	0.0011	406	178	446	30	450	6
13A-18-10	169	309	0.5458	0.0567	0.0042	0.5650	0.0415	0.0723	0.0016	480	161	455	27	450	10
13A-18-11	536	585	0.9177	0.0571	0.0032	0.5716	0.0330	0.0720	0.0012	494	124	459	21	448	7
13A-18-12	431	491	0.8788	0.0547	0.0029	0.5580	0.0293	0.0735	0.0010	398	120	450	19	457	6
13A-18-13	427	473	0.9029	0.0567	0.0051	0.5677	0.0482	0.0726	0.0010	480	166	457	31	452	6
13A-19-01	35	174	0.1997	0.0659	0.0048	1.1562	0.0793	0.1283	0.0019	1200	152	780	37	778	18
13A-19-02	89	193	0.4628	0.0652	0.0046	1.1382	0.0793	0.1263	0.0032	781	147	772	38	767	12
13A-19-03	168	481	0.3496	0.0662	0.0037	1.1736	0.0653	0.1283	0.0021	813	114	788	31	778	13
13A-19-04	700	268	2.6131	0.0626	0.0038	1.0943	0.0659	0.1265	0.0023	694	127	751	32	768	10
13A-19-05	308	668	0.4609	0.0637	0.0041	1.0351	0.0662	0.1172	0.0017	731	137	721	33	715	10
13A-19-06	114	127	0.8976	0.0571	0.0055	0.5708	0.0527	0.0727	0.0012	494	181	459	34	453	11
13A-19-07	152	632	0.2400	0.0562	0.0035	0.5656	0.0321	0.0734	0.0023	457	137	455	21	456	7
13A-19-08	683	1474	0.4637	0.0676	0.0041	1.1581	0.0759	0.1230	0.0026	857	124	781	36	748	13
13A-19-09	101	92	1.1082	0.0636	0.0051	1.1402	0.0891	0.1309	0.0014	728	169	773	42	793	15
13A-19-10	383	349	1.0975	0.0664	0.0034	1.1432	0.0617	0.1241	0.0022	820	107	774	29	754	13
13A-19-11	21	125	0.1646	0.0632	0.0066	1.0419	0.1128	0.1196	0.0039	722	222	725	56	728	23
13A-19-12	529	582	0.9077	0.0565	0.0030	0.5617	0.0303	0.0719	0.0011	472	117	453	20	448	7
13A-19-13	669	1139	0.5871	0.0549	0.0037	0.5610	0.0383	0.0739	0.0012	406	150	452	25	459	7
13A-19-14	266	453	0.5873	0.0627	0.0028	1.0607	0.0482	0.1228	0.0019	698	96	734	24	746	11
13A-19-15	44	76	0.5809	0.0684	0.0051	1.1881	0.0818	0.1289	0.0027	880	156	795	38	782	16
13A-19-16	86	185	0.4655	0.0631	0.0051	1.1077	0.0853	0.1279	0.0023	722	172	757	41	776	13
13A-19-17	288	2028	0.1420	0.0598	0.0023	0.5961	0.0229	0.0725	0.0011	594	83	475	15	451	7
13A-19-18	338	3209	0.1054	0.0569	0.0026	0.5741	0.0250	0.0733	0.0010	487	102	461	16	456	6
13A-19-19	466	561	0.8304	0.0561	0.0033	0.5712	0.0360	0.0737	0.0015	457	131	459	23	458	9
13A-19-20	229	497	0.4607	0.0555	0.0032	0.5577	0.0313	0.0733	0.0011	435	132	450	20	456	7

强烈富铝和富钾质花岗岩可以由 K_2O 含量较高 (平均为 5.49%) 的泥砂质沉积岩类部分熔融形成 (Johannes et al., 1996)。在过铝质花岗岩中 (SiO_2 含量

为 67%~77%), 源区成分特征也可以由 $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$ 值来反映 (Sylvester, 1998)。如 $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$ 值一般小于 0.3 的过铝质花岗岩, 一般被认为是泥岩部分熔融形

表 3 角闪二长花岗岩和灰色二长花岗岩中锆石的 Hf 同位素分析结果

Tab. 3 Hf isotope analysis of zircons in granite

样品 编号	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	2s	$t_{\text{DM}}^{\text{Hf}}$ (Ma)	t_{DM}^2 (Ma)
13A-18-01	0.05	0.001 762	0.282 483	-0.88	1.62	1 132	1 514
13A-18-02	0.05	0.001 583	0.282 457	-1.75	1.43	1 161	1 566
13A-18-03	0.05	0.001 294	0.282 421	-2.72	1.4	1 200	1 630
13A-18-04	0.06	0.001 625	0.282 473	-1.06	1.48	1 142	1 529
13A-18-05	0.06	0.001 609	0.282 407	-3.41	1.33	1 235	1 676
13A-18-06	0.04	0.001 360	0.282 447	-1.87	2.12	1 167	1 576
13A-18-07	0.04	0.001 188	0.282 443	-2.03	1.24	1 164	1 580
13A-18-08	0.05	0.001 620	0.282 454	-1.72	1.9	1 167	1 570
13A-18-09	0.05	0.001 547	0.282 414	-3.23	2.02	1 222	1 661
13A-18-10	0.06	0.001 812	0.282 399	-3.85	2.2	1 255	1 704
13A-18-11	0.06	0.001 901	0.282 344	-5.86	1.93	1 338	1 831
13A-18-12	0.06	0.001 871	0.282 342	-5.72	2.05	1 340	1 829
13A-18-13	0.04	0.001 299	0.282 444	-2.07	1.53	1 169	1 584
13A-19-01	0.02	0.000 607	0.282 319	0.86	1.50	1 303	1 459
13A-19-02	0.03	0.000 694	0.282 338	1.22	1.37	1 280	1 431
13A-19-03	0.08	0.002 255	0.282 307	-0.44	1.98	1 380	1 525
13A-19-04	0.03	0.000 928	0.282 337	1.11	1.31	1 289	1 438
13A-19-05	0.07	0.002 191	0.282 206	-5.29	1.69	1 522	1 718
13A-19-06	0.05	0.001 340	0.282 424	-2.68	1.28	1 181	1 378
13A-19-07	0.14	0.003 492	0.282 289	-2.33	1.84	1 455	1 596
13A-19-08	0.01	0.000 278	0.282 382	3.57	1.20	1 206	1 333
13A-19-09	0.07	0.002 219	0.282 266	-8.65	3.70	1 437	1 676
13A-19-10	0.06	0.001 977	0.282 373	-4.46	3.04	1 274	1 477
13A-19-11	0.05	0.001 691	0.282 178	-5.22	1.75	1 542	1 747
13A-19-12	0.02	0.000 536	0.282 231	-3.31	1.33	1 422	1 630
13A-19-13	0.05	0.001 591	0.282 407	-3.53	1.38	1 213	1 415
13A-19-14	0.03	0.000 822	0.282 374	-4.04	1.59	1 234	1 457
13A-19-15	0.06	0.001 558	0.282 331	-5.95	1.21	1 319	1 547
13A-19-16	0.08	0.002 047	0.282 367	1.12	1.90	1 286	1 420
13A-19-17	0.04	0.001 104	0.282 280	-0.72	1.65	1 375	1 542
13A-19-18	0.05	0.001 422	0.282 150	-5.61	2.14	1 570	1 784
13A-19-19	0.05	0.001 526	0.282 291	-7.53	1.35	1 375	1 620
13A-19-20	0.06	0.001 655	0.282 383	-4.23	1.25	1 249	1 457
13A-19-21	0.05	0.001 465	0.282 440	-2.16	0.92	1 162	1 352
13A-19-22	0.07	0.001 984	0.282 297	-7.32	1.70	1 384	1 615
13A-19-23	0.04	0.001 186	0.282 341	-5.56	1.15	1 292	1 524

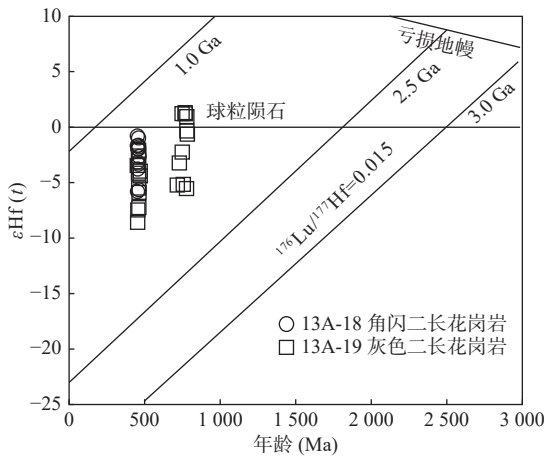
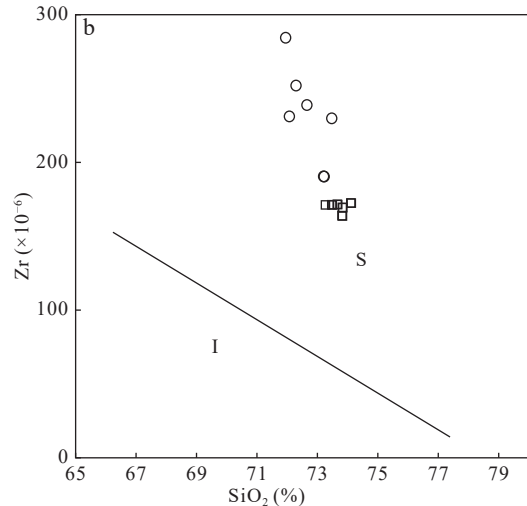
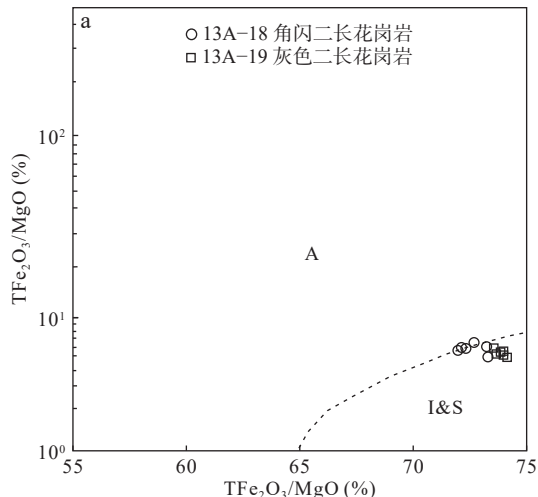
图7 锆石的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ - t 图解Fig. 7 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ - t diagram for zircon

图8 花岗岩类型判别图解

Fig. 8 Granite type discrimination diagram

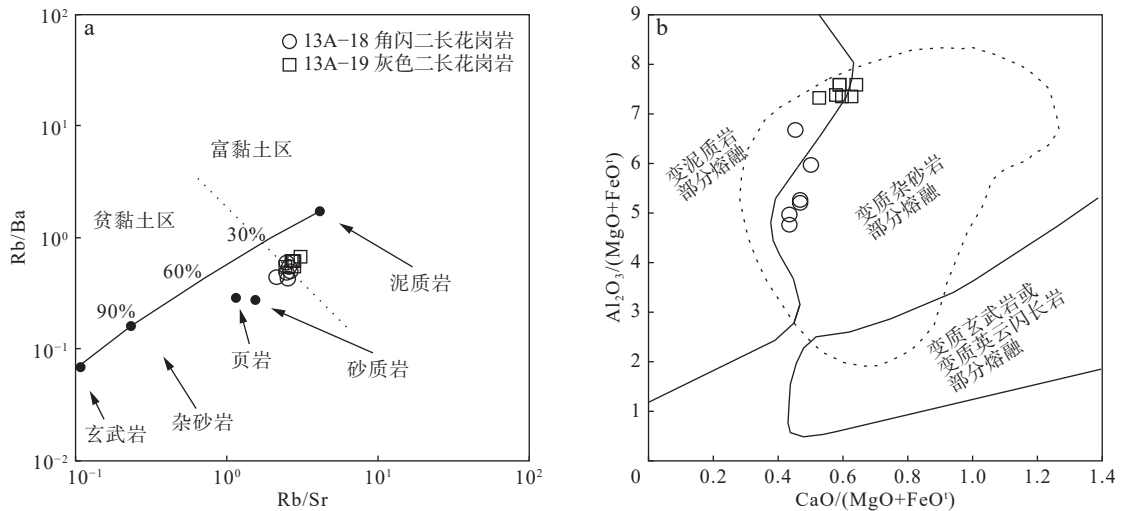
4.2 部分熔融条件

花岗岩在上升就位时,一般为绝热上升的,所以岩浆早期结晶的温度可以近似代表岩浆起源时最低温度(吴福元等,2007)。对于岩浆早期结晶温度的计算,目前常用的方法是全岩锆饱和温度计和锆石钛温度计(Watson et al., 1983; Ferry et al., 2007)2种方法。但文中样品未见与锆石共生金红石,故采用全岩锆饱和温度计。角闪二长花岗岩和灰色二长花岗岩的锆饱和温度计得出的温度范围分别为776~816℃、753~817℃(表4),结果基本一致,可近似地认为岩浆起源温度约为800℃。

花岗岩大上升就位过程中压力变化较大,所以就位时的压力不能有效限定,但是花岗岩起源的压力条件,可以通过源岩部分熔融过程中残留相特征来估计。

成,而CaO/Na₂O值大于0.3的过铝质花岗岩一般被认为是由砂屑岩部分熔融形成。而巴什尔希角闪二长花岗岩和灰色二长花岗岩具有高钾的特点,同时CaO/Na₂O值为0.31~0.41>0.3。在Rb/Sr-Rb/Ba图解中(图9a),样品落在砂质岩和泥质岩之间的区域;在CaO/(MgO+FeO^b)-Al₂O₃/(MgO+FeO^b)图解中(图9b),样品投在变泥质岩与变质杂砂岩之间的部分熔融起源的岩浆区域。此外,2个样品的锆石 ϵ_{Hf} 同位素值($t \approx 450$ Ma)均为负值(-0.88~-5.89和-2.16~-8.65),并且稀土元素和微量元素配分具有与上地壳相对一致的特征(图4),暗示岩浆岩起源于上地壳。综合分析,笔者认为岩浆源岩可能起源于泥砂质沉积岩类。

大量研究表明,岩石地球化学特征与残留矿物之间密切相关(Castillo, 2006),如高Sr($> 300 \times 10^{-6}$)、高Sr/Y(> 20)、低Yb($< 1.9 \times 10^{-6}$)和高La/Yb(> 20)表明源区中基本无斜长石残留;低Y($< 15 \times 10^{-6}$)、高Sr/Y(> 20)、低Yb($< 1.9 \times 10^{-6}$)和高La/Yb(> 20)则表明源区残留相中有石榴子石。文中2个岩石样品均具有低Sr($64.6 \times 10^{-6} \sim 86.1 \times 10^{-6}$)和明显的负Eu异常,可推测源区中有斜长石残留;高Y($20.2 \times 10^{-6} \sim 85.1 \times 10^{-6}$)、低Sr/Y(0.8~3.8)、高Yb($1.54 \times 10^{-6} \sim 5.58 \times 10^{-6}$)和低La/Yb($15.04 \times 10^{-6} \sim 36.33 \times 10^{-6}$),可推测源区中无石榴子石残留;低程度的HREE亏损可能暗示残留相中含有角闪石(Xiong et al., 2005)。同时,实验岩石学资料显示,低压条件(< 1.6 GPa)下石榴子石通常不会出现在残留相里,中酸性源区熔融时稳定压力



底图 a 据 Sylvester, 1998; 底图 b 据 Altherr et al., 2000

图 9 角闪二长花岗岩和灰色二长花岗岩源区判别图

Fig. 9 Source region discrimination diagrams of Bashierxi granites from the eastern Kunlun area

表 4 角闪二长花岗岩和灰色二长花岗的温度计计算结果

Tab. 4 Values for admellite by zircon saturation thermometer

样品编号	锆饱和温度计		
	M($\times 10^{-6}$)	D _{Zr}	T _{Zr} ($^{\circ}$ C)
13A-18a	1.74	2 147.16	793
13A-18b	1.71	2 159.33	794
13A-18c	1.74	2 605.78	776
13A-18d	1.69	1 744.33	816
13A-18e	1.74	2 077.57	796
13A-18f	1.76	1 969.10	799
13A-19a	1.34	2 893.36	796
13A-19b	1.35	2 877.50	796
13A-19c	1.36	2 897.50	795
13A-19d	1.36	2 928.57	794
13A-19e	1.34	2 899.91	796
13A-19f	1.36	3 030.87	791

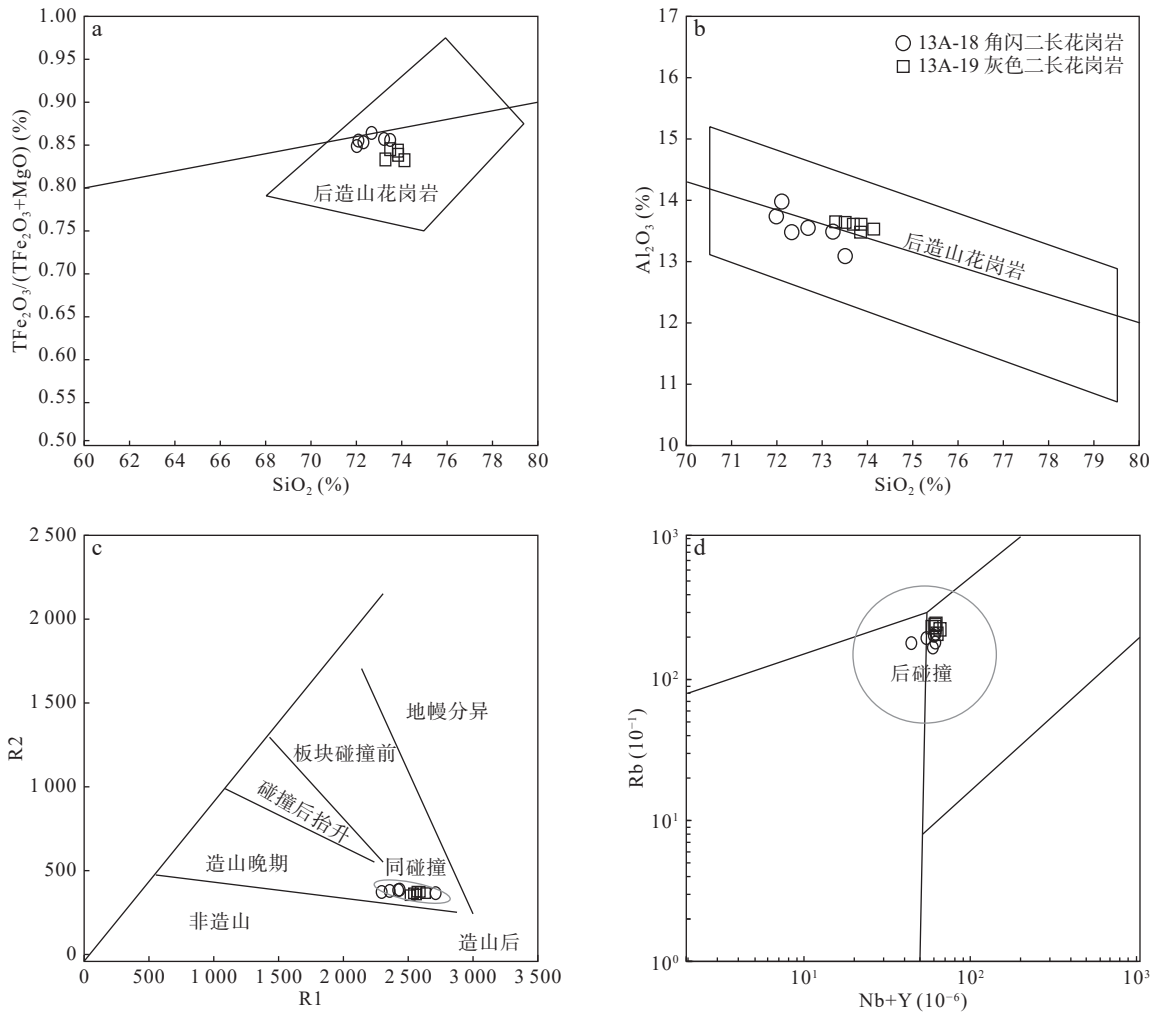
注: $T_{Zr}(^{\circ}C) = 12\ 900 / (\ln D_{Zr} + 0.85M + 2.95) - 273.15$, D_{Zr} 近似为 $496\ 000 / \text{全岩锆含量}$, $M = (2Ca + K + Na) / (Si \times Al)$, 令 $Si + Al + Fe + Mg + Ca + Na + K + P = 1$, 均为原子数分数 (Watson et al., 1983)。

的下限更低。结合部分熔融实验, 杂砂岩源岩在 $875\ ^{\circ}C$ 、 $1.0\ GPa$ 条件下便可发生黑云母脱水部分熔融, 并产生大量熔体 (Patiño Douce et al., 1991), 此温压条件与文中样品所处的条件相近, 角闪二长花岗岩和灰色二长花岗岩源区残留相矿物组合应为斜长石+角闪石(不含石榴子石), 估算其熔融时的压力较低 $< 1.0\ GPa$ 。综上所述, 角闪二长花岗岩和灰色二长花岗岩是

源岩为变质泥砂质岩石在压力 $< 1.0\ GPa$ 、温度约为 $800\ ^{\circ}C$, 可能由黑云母脱水部分熔融产生。

4.3 年代学及构造背景

2 个样品的锆石 U-Pb 年龄主体均为约 $455\ Ma$, 表明二者为同一期岩浆事件的产物。值得注意的是, 灰色二长花岗岩的锆石中还获得了约 $760\ Ma$ 的 U-Pb 年龄, 由于在有限锆石颗粒上未能在同一颗锆石上同时测定出核部约 $760\ Ma$ 且边部约 $460\ Ma$ 的 U-Pb 年龄, 因此无法直接判断 $760\ Ma$ 年龄的成因, 但推断其可能来自: ①在岩浆上升过程中, 捕获的围岩中的锆石。②原岩发生部分熔融的锆石残留核。野外产状特征显示, 灰色二长花岗岩以岩株方式侵入到东昆仑金水口岩群小庙组, 而东昆仑小庙组主体形成于约 $1\ 000 \sim 2\ 000\ Ma$ 的中元古代(陈能松等, 2002; 张建新等, 2003; 殷鸿福等, 2003; 王国灿等, 2004, 2007; 陈有忻等, 2011), 而文中灰色二长花岗岩中的锆石核部并未发现年龄在 $1\ 000 \sim 2\ 000\ Ma$ 的锆石, 因此 $760\ Ma$ 的锆石可能不是捕获的围岩锆石。新近巴什尔希二长花岗岩可能形成于金水口岩群小庙组的部分熔融 (Zheng et al., 2018), 相关研究中没有发现新元古代约 $760\ Ma$ 的残留锆石年龄。因此, 灰色二长花岗岩可能不是因金水口岩群小庙组部分熔融而形成。在弱过铝质(A/CNK 值分别为 $1.02 \sim 1.07$ 和 $1.05 \sim 1.07$) 花岗岩构造判别图中, 2 个样品基本落在同碰撞-造山后区域(图 10)。结合区域内前人研究成果综合分析(高永宝等, 2011; 王增振等, 2014), 2 个样品可能形成



底图 a 据 Batchelor et al., 1985; 底图 b 据 Pearce et al., 1984

图 10 角闪二长花岗岩和灰色二长花岗岩构造环境判别图解

Fig. 10 Discriminant diagram of granite tectonic environment

于同碰撞向后碰撞转换阶段的初始伸展构造背景。

4.4 区域地质意义

巴什尔希岩体出露于南阿尔金与东昆仑北部白干湖地区的交接部位, 目前关于其构造归属还存在不同认识。多数研究认为其属于东昆仑造山带祁漫塔格构造域, 但部分学者认为其可能属于南阿尔金构造域(王增振等, 2014)。黎敦朋等(2010)认为巴什尔希花岗岩侵入的地层围岩与东昆仑地区有显著的差别, 与阿尔金地块更具亲缘性。

已有研究表明, 南阿尔金地区在经历了 ~ 500 Ma 陆壳深俯冲及 ~ 460 Ma 的俯冲板片折返后, 在中晚奥陶世进入后碰撞演化阶段(马中平等, 2009; 曹玉亭等, 2010; 杨文强等, 2012; 康磊等 2016a, 2016b), 且广泛分布一期 ~ 450 Ma 花岗岩。东昆仑祁漫塔格晚奥陶世—早泥盆世初期为俯冲—碰撞阶段, 出露于祁漫塔

格主脊断裂以北岩浆岩具有岛弧岩浆岩的特点(肖爱芳, 2005; 崔美慧等, 2012); 而同碰撞阶段发生在早志留世末—早泥盆世初期, 同碰撞型岩浆岩分布在祁漫塔格哈拉达乌、十字沟、双石峡、乌兰乌珠尔和阿达滩断裂南侧等地(曹世泰等, 2011; 谈生祥, 2011); 后碰撞型花岗岩则形成时代晚于早志留世末—早泥盆世初(郝杰等, 2003; 谌宏伟等, 2006; 郭通珍等, 2011)。

前人研究认为, 在晚奥陶世—早泥盆世期间, 巴什尔希岩浆主体于后造山阶段伸展构造背景下产出(黎敦朋等, 2010; 高永宝等, 2011; 李国臣等, 2012; 王增振等, 2014), 而祁漫塔格地区在晚奥陶世—早泥盆世时期为俯冲—碰撞演化阶段的挤压环境, 与笔者及前人部分研究结果认为的后碰撞伸展环境不相符。区域年代学统计可将巴什尔希岩浆活动为 2 期, 第 I 期为

458~454 Ma(高晓峰等, 2010), 第Ⅱ期 432~410 Ma 为后碰撞伸展体系下形成的花岗岩(包亚范等, 2008; 高永宝等, 2011)。对比发现(表 5), 巴什尔希第Ⅰ期岩浆活动的形成时代、原岩性质、构造背景均与南阿尔金早古生代广泛分布的一期(466~451 Ma)花岗质岩浆活动(曹玉亭等, 2010; 康磊等, 2013, 2014)相一致; 第Ⅱ期岩浆活动(432~410 Ma)的形成时代与构造背景也可与南阿尔金~410 Ma 花岗质岩浆活动相对应(吴锁平等, 2007; 王超等, 2008; Liu et al., 2015)。

此外, 在南阿尔金塔特勒克布拉克片麻状花岗岩中获得了 (782.3 ± 6.9) Ma 残留岩浆锆石年龄, 成岩年龄为 450 Ma(康磊等, 2013), 与文中灰色二长花岗岩锆石中获得的 760 Ma 锆石 U-Pb 年龄(成岩年龄 454 Ma)相对一致。上述分析表明, 文中的 2 个二长花岗岩样品可能与南阿尔金早古生代花岗岩活动更具亲缘性。如前文所述, 南阿尔金地区在~450 Ma 处于陆壳俯冲碰撞后由挤压转换为初始伸展的构造背景, 也进一步证明了前述关于样品形成压力的合理性。

表 5 巴什尔希花岗岩类锆石年龄统计表

Tab. 5 Isotopic ages statistics of the granitoids in the Bashierxi magmatic series

位置	岩性	年龄(Ma)	构造背景	测试方法	资料来源
东昆仑巴什尔希地区	似斑状二长花岗岩	458±9.0	局部拉张构造背景	Zircon U-Pb LA-MC-ICP-MS	高晓峰等, 2010
	角闪二长花岗岩	452.9±3.6	碰撞造山后的初始伸展构造背景	Zircon U-Pb LA-ICP-MS	本文
	灰色二长花岗岩	454.2±4.8			本文
南阿尔金构造带西段	二长花岗岩	462±2.0	碰撞造山后的抬升初期	Zircon U-Pb LA-ICP-MS	曹玉亭等, 2010
	钾长花岗岩	452.8±3.1	俯冲陆壳断离后的伸展背景		杨文强等, 2012
	黑云母花岗岩	454.0±1.8	后碰撞初始伸展	Zircon U-Pb LA-MC-ICP-MS	康磊, 2014
	钾长花岗岩	453.4±2.5			
	二长花岗岩	453.1±2.1			
石英闪长岩	458.3±6.2	深俯冲陆壳折返抬升		康磊等, 2016b	
东昆仑巴什尔希地区	粗粒碱长花岗岩	432.3±0.8	造山花岗岩(板内和陆缘造山带)后造山构造环境	Zircon U-Pb LA-MC-ICP-MS	包亚范等, 2008 黎敦朋等, 2010
	碱长花岗岩	430.5±1.2	造山后局部拉张环境		高永宝等, 2011
	碱长花岗岩	422.0±3.0	后碰撞伸展阶段	Zircon U-Pb SIMS	李国臣等, 2012
	正长花岗岩	428.2±4.2		Zircon U-Pb LA-ICP-MS	王增振等, 2014
	正长花岗岩	422.5±2.3		Zircon U-Pb LA-ICP-MS	周建厚等, 2014
南阿尔金构造带东段	似斑状钾长花岗岩	424	造山后伸展阶段	Zircon U-Pb LA-ICP-MS	王超等, 2008
	花岗细晶岩	406			
	碱性花岗岩	385.2±8.1	造山后的拉张环境	Zircon U-Pb LA-ICP-MS	吴锁平等, 2007

5 结论

(1) 巴什尔希角闪二长花岗岩和灰色二长花岗岩为过铝质 S 型花岗岩, 微量元素及锆石 Hf 同位素特征表明其源岩为上地壳的变质泥砂质沉积岩, 岩浆起源温度、压力分别为~800 °C 和 0.8~1.0 GPa。

(2) LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年获得角闪二长花岗岩和灰色二长花岗岩的形成年龄基本一致, 分别

为 (452.9 ± 3.6) Ma 和 (454.2 ± 4.8) Ma, 后者还获得了一组残留锆石约为 760 Ma 的年龄。

(3) 巴什尔希角闪二长花岗岩和灰色二长花岗岩可能形成于碰撞造山后的初始伸展构造背景, 其形成时代、岩浆序列和构造背景研究结果显示其与南阿尔金构造域更具亲缘性。

致谢: 由衷感谢盖永升、郝江波、赵国军、马拓同学在工作中给予的帮助和建议; 特别感谢两位审稿人提出的宝贵意见。谨此致谢!

参考文献(References):

- 包亚范, 刘延军, 王鑫春. 东昆仑西段巴什尔希花岗岩与白干湖钨锡矿床的关系[J]. 吉林地质, 2008, 03(03): 56-59+67.
- BAO Yafan, LIU Yanjun, WANG Xinchun. Relationship between Bashierxi granite west Dongkunlun and Baiganhu tungsten-tin deposit[J]. Jilin Geology, 2008, 03(03): 56-59+67.
- 曹世泰, 刘晓康, 马永胜, 等. 祁漫塔格地区早志留世侵入岩的发现及其地质意义[J]. 青海科技, 2011, 18(05): 26-30.
- CAO Shitai, LIU Xiaokang, MA Yongsheng, et al. Discovery and geological significance of early Silurian intrusive rocks in Qimantage area[J]. Qinghai Science and Technology, 2011, 18(05): 26-30.
- 曹玉亭, 刘良, 王超, 等. 阿尔金南缘塔特勒克布拉克花岗岩的地球化学特征、锆石 U-Pb 定年及 Hf 同位素组成[J]. 岩石学报, 2010, 26(11): 3259-3271.
- CAO Yuting, LIU Liang, WANG Chao, et al. Geochemical, zircon U-Pb dating and Hf isotopic compositions studies for Tatelekebulake granite in South Altyn Tagh[J]. Acta Petrologica Sinica, 2010, 26(11): 3259-3271.
- 车自成, 刘良, 刘洪福, 等. 阿尔金断裂系的组成及相关中生代含油气盆地的成因特征[J]. 中国区域地质, 1998, (4): 42-49.
- CHE Zicheng, LIU Liang, LIU Hongfu, et al. Composition of Altun fault system and genetic characteristics of related Mesozoic petroliferous basins[J]. Regional Geology of China, 1998, (4): 42-49.
- 陈能松, 何蕾, 王国灿, 等. 东昆仑造山带早古生代变质峰期和逆冲构造变形年代的精确限定[J]. 科学通报, 2002, (08): 628-631.
- CHEN Nengsong, HE Lei, WANG Guocan, et al. Precise dating of early Paleozoic metamorphic peak and thrust tectonic deformation in east Kunlun orogenic belt[J]. Chinese Science Bulletin, 2002, (08): 628-631.
- 陈有焯, 裴先治, 李瑞保, 等. 东昆仑造山带东段元古界小庙岩组的锆石 U-Pb 年龄[J]. 现代地质, 2011, 25(03): 510-521.
- CHEN Youxin, PEI Xianzhi, LI Ruibao, et al. Zircon U-Pb age of the Xiaomiao formation of Proterozoic in the eastern section of the East Kunlun orogenic belt[J]. Geoscience, 2011, 25(03): 510-521.
- 谌宏伟, 罗照华, 莫宣学, 等. 东昆仑喀雅克登塔格杂岩体的 SHRI MP 年龄及其地质意义[J]. 岩石矿物学杂志, 2006, 25(01): 25-32.
- CHEN Hongwei, LUO Zhaohua, MO Xuanxue, et al. SHRIMP ages of Kayakedengtage complex in the East Kunlun Mountains and their geological implications[J]. Acta Petrologica Mineral, 2006, 25(01): 25-32.
- 崔美慧. 新疆祁漫塔格鸭子泉中基性火成岩及硅质岩成因[D]. 北京: 中国地质科学院, 2012.
- CUI Meihui. Petrogenesis of intermediate-basic igneous rocks from Yaziquan, Xinjiang Qimantag Mountain[D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences, 2012.
- 第五春荣, 孙勇, 袁洪林, 等. 河南登封地区嵩山石英岩碎屑锆石 U-Pb 年代学、Hf 同位素组成及其地质意义[J]. 科学通报, 2008, (16): 1923-1934.
- DIWU Chunrong, SUN Yong, YUAN Honglin, et al. U-Pb chronology, Hf isotope composition and geological significance of detrital zircons from quartzite in Songshan mountain, Dengfeng, Henan province[J]. Chinese Science Bulletin, 2008, (16): 1923-1934.
- 高晓峰, 校培喜, 谢从瑞, 等. 东昆仑阿牙克库木湖北巴什尔希花岗岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年及其地质意义[J]. 地质通报, 2010, 29(7): 1001-1008.
- GAO Xiaofeng, XIAO Peixi, XIE Congrui, et al. Zircon LA-ICP-MS U-Pb dating and geological significance of Bashierxi granite in the eastern Kunlun area, China[J]. Geological Bulletin of China, 2010, 29(7): 1001-1008.
- 高永宝, 李文渊. 东昆仑造山带祁漫塔格地区白干湖含钨锡矿花岗岩: 岩石学、年代学、地球化学及岩石成因[J]. 地球化学, 2011, 40(4): 324-336.
- GAO Yongbao, LI Wenyuan. Petrogenesis of granites containing tungsten and tin ores in the Baiganhu deposit, Qimantage, NW China: Constraints from petrology, chronology and geochemistry[J]. Geochimica, 2011, 40(4): 324-336.
- 郭通珍, 刘荣, 陈发彬, 等. 青海祁漫塔格山乌兰乌珠尔斑状正长花岗岩 LA-MC-ICPMS 锆石 U-Pb 定年及地质意义[J]. 地质通报, 2011, 30(08): 1203-1211.
- GUO Tongzhen, LIU Rong, CHEN Fabin, et al. LA-MC-ICPMS zircon U-Pb dating of Wulanwuzhuer porphyritic syenite granite in the Qimantag Mountain of Qinghai and its geological significance[J]. Geological Bulletin of China, 2011, 30(08): 1203-1211.
- 郝杰, 刘小汉, 桑海清. 新疆东昆仑阿牙克岩体地球化学与 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代学研究及其大地构造意义[J]. 岩石学报, 2003, 19(03): 517-522.
- HAO Jie, LIU Xiaohan, SANG Haiqing. Geochemical characteristics and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age of the Ayake adamellite and its tectonic significance in the east Kunlun, Xinjiang[J]. Acta Petrologica Sinica, 2003, 19(03): 517-522.
- 康磊, 刘良, 曹玉亭, 等. 阿尔金南缘塔特勒克布拉克复式花岗岩体东段片麻状花岗岩的地球化学特征、锆石 U-Pb 定年及其地质意义[J]. 岩石学报, 2013, 29(09): 3039-3048.
- KANG Lei, LIU Liang, CAO Yuting, et al. Geochemistry, zircon U-Pb dating and its geological significance of gneissic granite from the eastern segment of the Takelekebulake composite granite in the south Altyn Tagh[J]. Acta Petrologica Sinica,

- 2013, 29(09): 3039–3048.
- 康磊. 南阿尔金高压—超高压变质带早古生代多期花岗质岩浆作用及其地质意义[D]. 西安: 西北大学, 2014.
- KANG Lei. Early Paleozoic Multi-stage Granitic Magmatism and the Geological Significance in the South Altyn Tagh HP-UHP Metamorphic Belt[D]. Xi'an: Northwest University, 2014.
- 康磊, 校培喜, 高晓峰, 等. 阿尔金山南缘早古生代岩浆作用及碰撞造山过程[J]. *地质学报*, 2016a, 90(10): 2527–2550.
- KANG Lei, XIAO Peixi, GAO Xiaofeng et al. Early Paleozoic Magmatism and Collision Orogenic Process of the South Altyn[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2016a, 90(10): 2527–2550.
- 康磊, 校培喜, 高晓峰, 等. 茫崖二长花岗岩、石英闪长岩的年代学、地球化学及岩石成因: 对阿尔金山南缘早古生代构造-岩浆演化的启示[J]. *岩石学报*, 2016b, 32(06): 1731–1748.
- KANG Lei, XIAO Peixi, GAO Xiaofeng, et al. Chronology, geochemistry and petrogenesis of monzonitic granite and quartz diorite in Mangai area: Its inspiration to Early Paleozoic tectonic-magmatic evolution of the southern Altyn Tagh[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2016b, 32(06): 1731–1748.
- 黎敦朋, 肖爱芳. 祁漫塔格西段白干湖钨锡矿区巴什尔希花岗岩序列及构造环境[J]. *西北地质*, 2010, 43(04): 53–61.
- LI Dunpeng, XIAO Aifang. Magmatic sequence and tectonic setting of Bashierxi granite in W-Sn deposit of Baiganhu area, the Western sector of Qimantage Mountains[J]. *Northwestern Geology*, 2010, 43(04): 53–61.
- 李国臣, 丰成友, 王瑞江, 等. 新疆白干湖钨锡矿田东北部花岗岩锆石 SIMS U-Pb 年龄、地球化学特征及构造意义[J]. *地球学报*, 2012, 33(02): 216–226.
- LI Guochen, FENG Chengyou, WANG Ruijiang, et al. SIMS Zircon U-Pb Age, Petrochemistry and Tectonic Implications of Granitoids in Northeastern Baiganhue W-Sn Orefield, Xinjiang[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2012, 33(02): 216–226.
- 刘良, 孙勇, 罗金海, 等. 阿尔金英格利萨依花岗岩质片麻岩超高压变质[J]. *中国科学 (D辑: 地球科学)*, 2003, (12): 1184–1192.
- LIU Liang, SUN Yong, LUO Jinhai, et al. Ultra-high pressure metamorphism of granitic gneiss in the Yinggelisayi area, Altyn Mountains, NW China[J]. *Science in China (Series D)*, 2003, (12): 1184–1192.
- 刘良, 张安达, 陈丹玲, 等. 阿尔金山杂岩依榴辉岩和围岩锆石 LA-ICP-MS 微区原位定年及其地质意义[J]. *地学前缘*, 2007, 14(1): 98–107.
- LIU Liang, ZHANG Anda, CHEN Danling, et al. Implications based on LA-ICP-MS zircon U-Pb ages of eclogite and its country rock from Jianggalesayi area, Altyn Tagh[J]. *China Earth Science Frontiers*, 2007, 14(1): 98–107.
- 刘良, 陈丹玲, 王超, 等. 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[J]. *西北大学学报 (自然科学版)*, 2009, 39(03): 472–479.
- LIU Liang, CHEN Danling, WANG Chao, et al. 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[J]. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 2009, 39(03): 472–479.
- 马中平, 李向民, 孙吉明, 等. 阿尔金山南缘长沙沟镁铁-超镁铁质层状杂岩体的发现与地质意义——岩石学和地球化学初步研究[J]. *岩石学报*, 2009, 25(04): 793–804.
- MA Zhongping, LI Xiangmin, SUN Jiming, et al. Discovery of layered mafic-ultramafic intrusion in Changshagou, Altyn Tagh, and its geological implication: A pilot study on its petrological and geochemical characteristics[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2009, 25(04): 793–804.
- 孟繁聪, 崔美慧, 吴祥珂, 等. 东昆仑祁漫塔格花岗岩片麻岩记录的岩浆和变质事件[J]. *岩石学报*, 2013, (6): 2107–2122.
- MENG Fancong, CUI Meihui, WU Xiangke, et al. Magmatic and metamorphic events recorded in granitic gneisses from the Qimantage, East Kunlun Mountains, Northwest China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2013, (6): 2107–2122.
- 莫宣学, 罗照华, 邓晋福, 等. 东昆仑造山带花岗岩及地壳生长[J]. *高校地质学报*, 2007, 13(3): 403–414.
- MO Xuanxue, LUO Zhaohua, DENG Jinfu, et al. Granitoids and Crustal Growth in the East-Kunlun Orogenic Belt[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2007, 13(3): 403–414.
- 谈生祥, 郭通珍, 董进生, 等. 青海乌兰乌珠尔地区晚志留世过铝质花岗岩地质特征及意义[J]. *青海大学学报 (自然科学版)*, 2011, 29(01): 36–43.
- TAN Shengxiang, GUO Tongzhen, DONG Jinsheng, et al. Geological characteristics and significance of the peraluminous granite in late Silurian epoch in Wulanvuzhuer region of Qinghai[J]. *Journal of Qinghai University (Nature Science)*, 2011, 29(01): 36–43.
- 王超, 刘良, 张安达, 等. 阿尔金山造山带南缘岩浆混合作用: 玉苏普阿勒克塔格岩体岩石学和地球化学证据[J]. *岩石学报*, 2008, 24(12): 2809–2819.
- WANG Chao, LIU Liang, ZHANG Anda, et al. Geochemistry and Petrography of Early Paleozoic Yusupuleke Tagh rapakivi-taxed granite complex, South Altyn: An example for magma mixing[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2008, 24(12): 2809–2819.
- 王德滋, 刘昌实, 沈渭洲, 等. 桐庐 I 型和相山 S 型两类碎斑熔岩对比[J]. *岩石学报*, 1993, 9(01): 44–54.
- WANG Dezi, LIU Changshi, SHEN Weizhou, et al. The contrast between Tonglu I-type and Xiangshan S-type clastoporphyritic lava[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 1993, 9(01): 44–54.
- 王国灿, 王青海, 简平, 等. 东昆仑前寒武纪基底变质岩系的锆石 SHRIMP 年龄及其构造意义[J]. *地学前缘*, 2004, 11(4):

- 481–490.
- WANG Guocan, WANG Qinghai, JIAN Ping, et al. Zircon SHRIMP ages of Precambrian metamorphic basement rocks and their tectonic significance in the eastern Kunlun Mountains, Qinghai Province, China[J]. *Earth Science Frontiers (China University of Geosciences, Beijing)*, 2004, 11(4): 481–490.
- 王国灿, 魏启荣, 贾春兴, 等. 关于东昆仑地区前寒武纪地质的几点认识[J]. *地质通报*, 2007, 26(8): 929–937.
- WANG Guocan, WEI Qirong, JIA Chunxing, et al. Some Ideas of Precambrian Geology in East Kunlun, China[J]. *Geology Bulletin of China*, 2007, 26(8): 929–937.
- 王增振, 韩宝福, 丰成友, 等. 新疆白干湖地区花岗岩年代学、地球化学研究及其构造意义[J]. *岩石矿物学杂志*, 2014, 33(4): 597–616.
- WANG Zengzhen, HAN Baofu, FENG Chengyou, et al. Geochronology, geochemistry and tectonic significance of granites in Baiganhu area, Xinjiang[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2014, 33(4): 597–616.
- 吴福元, 李献华, 杨进辉, 等. 花岗岩成因研究的若干问题[J]. *岩石学报*, 2007, (6): 1217–1238.
- WU Fuyuan, LI Xianhua, YANG Jinhui, et al. Discussions on the petrogenesis of granites[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007, (6): 1217–1238.
- 吴锁平, 吴才来, 陈其龙. 阿尔金断裂南侧吐拉铝质 A 型花岗岩的特征及构造环境[J]. *地质通报*, 2007, 26(10): 1385–1392.
- WU Suoping, WU Cailai, CHEN Qilong. Characteristics and tectonic setting of the Tula aluminous A-type granite at the south side of the Altyn Tagh fault, NW China[J]. *Geological Bulletin of China*, 2007, 26(10): 1385–1392.
- 肖爱芳. 东昆仑祁漫塔格山西段鸭子泉志留纪火山岩特征[J]. *陕西地质*, 2005, 23(02): 50–60.
- XIAO Aifang. Yaziquan Silurian volcanic rocks in western qimantaha mountain of Eastern Kunlun[J]. *Geology of Shaanxi*, 2005, 23(02): 50–60.
- 熊富浩. 东昆仑造山带东段古特提斯域花岗岩类时空分布, 岩石成因及其地质意义[D]. 武汉: 中国地质大学, 2014.
- XIONG Fuhao. Spatial-temporal Pattern, Petrogenesis and Geological Implications of Paleo-Tethyan Granitoids in the East Kunlun Orogenic Belt (Eastern Segment) [D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2014.
- 杨文强, 刘良, 丁海波, 等. 南阿尔金迪木那里克花岗岩地球化学、锆石 U-Pb 年代学与 Hf 同位素特征及其构造地质意义[J]. *岩石学报*, 2012, 28(12): 4139–4150.
- YANG Wenqiang, LIU Liang, DING Haibo, et al. Geochemistry, geochronology and zircon Hf isotopes of the Dimunlike granite in South Altyn Tagn and its geological significance[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2012, 28(12): 4139–4150.
- 殷鸿福, 张克信. 中华人民共和国区域地质调查报告: 冬给措纳湖 (I47C001002)(1: 250 000)[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2003.
- YIN Hongfu, ZHANG Kexin. Report of Regional Geological Survey of the People's Republic of China: Dongjicuona Lake (I47C001002), scale 1: 250000[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2003.
- 袁万明, 莫宣学, 喻学惠, 等. 东昆仑印支期区域构造背景的花岗岩记录[J]. *地质论评*, 2000, 46(2): 203–211.
- YUAN Wanming, MO Xuanxue, YU Xuehui, et al. The Record of Indosinian Tectonic Setting from the Granotoid of Eastern Kunlun Mountains[J]. *Geological Review*, 2000, 46(2): 203–211.
- 张斌, 孙新春, 郭兵, 等. 新疆东昆仑地区鸭子泉-鸭子达坂构造混杂岩的地质特征及其意义[J]. *西北地质*, 2014, 47(04): 95–104.
- ZHANG Bin, SUN Xinchun, GUO Bing, et al. Geological characteristics and significance of Yaziquan–Yazidaban tectonic melange in East Kunlun area, Xinjiang[J]. *Northwestern Geology*, 2014, 47(04): 95–104.
- 张建新, 孟繁聪, 万渝生, 等. 柴达木盆地南缘金水口群的早古生代构造热事件: 锆石 U-Pb SHRIMP 年龄证据[J]. *地质通报*, 2003, 22(6): 397–404.
- ZHANG Jianxin, MENG Fancong, WAN Yusheng, et al. Early Paleozoic tectonic thermal events of Jinshui kou Group in the southern margin of Qaidam Basin: Zircon U–Pb SHRIMP age evidence[J]. *Geology Bull of China*, 2003, 22(6): 397–404.
- 张建新, 许志琴, 杨经绥, 等. 阿尔金西段榴辉岩岩石学、地球化学和同位素年代学研究及其构造意义[J]. *地质学报*, 2001, 75(02): 186–197.
- ZHANG Jianxin, XU Zhiqin, YANG Jingsui, et al. Petrology, geochemistry and isotopic chronology of eclogites in the western Altyn section and their tectonic significance[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2001, 75(02): 186–197.
- 周建厚, 丰成友, 李大新, 等. 东昆仑白干湖钨锡矿床成矿岩体岩石学、年代学和地球化学[J]. *岩石学报*, 2014, 31(08): 2277–2293.
- ZHOU Jianhou, FENG Chengyou, LI Daxin, et al. Petrology, geochronology and geochemistry of metallogenic granite in Baiganhu W-Sn deposit, East Kunlun[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2014, 31(08): 2277–2293.
- Altherr R, Holl A, Hegner E, et al. High-potassium, calc-alkaline I-type plutonism in the European Variscides: northern Vosges (France) and northern Schwarzwald (Germany)[J]. *Lithos*, 2000, 50(1): 51–73.
- Batchelor R A, Bowden P. Petrogenetic interpretation of granitoid rock series using multicationic parameters[J]. *Chemical Geology*, 1985, 48(1–4).
- Castillo P R. An overview of adakite petrogenesis[J]. *Chinese Sci-*

- ence Bulletin, 2006, 51(3): 258–268.
- Chappell B W, White A J R. I-and S-type granites in the Lachlan Fold Belt[J]. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth Sciences*, 1992, 83: (1–2).
- Corfu F, Hancher JM, Hoskin PWO, et al. Atlas of Zircon Textures[J]. *Reviews in Mineralogy & Geochemistry*, 2003, 53(1): 469–500.
- Eby G N. The A-type granitoids: A review of their occurrence and chemical characteristics and speculations on their petrogenesis[J]. *Lithos*, 1990, 26(1–2): 115–134.
- Ferry J M, Watson E B. New thermodynamic models and revised calibrations for the Ti-in-zircon and Zr-in-rutile thermometers[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2007, 154(4): 429–437.
- Harris N B W, Inger S. Trace element modelling of pelite-derived granites[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1992, 110(1): 46–56.
- Hoskin P W O, Schaltegger U. The Composition of Zircon and Igneous and Metamorphic Petrogenesis[J]. *Zircon*, 2003, 53(1): 27–62.
- Johannes W, Holtz F. Petrogenesis and Experimental Petrology of Granitic Rocks[J]. *Minerals and Rocks*, 1996.
- Liu L, Kang L, Cao Y T, et al. Early Paleozoic granitic magmatism related to the processes from subduction to collision in South Altyn, NW China[J]. *Science China (Earth Sciences)*, 2015, 58(09): 1513–1522.
- Liu Y S, Gao S, Hu Z C, et al. 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[J]. *Journal of Petrology*, 2010, 51(1–2): 537–571.
- Middlemost E A K. Naming materials in the magma/igneous rock system[J]. *Earth-Science Reviews*, 1994, 37(3–4): 215–224.
- Patiño D A E, Johnston A D. Phase equilibria and melt productivity in the pelitic system: Implications for the origin of peraluminous granitoids and aluminous granulites[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1991, 107(2): 202–218.
- Pearce J A, Harris N B W, Andrew G T. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks[J]. *Journal of Petrology*, 1984, 25(4): 959–983.
- Peccerillo A, Taylor S R. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, Northern Turkey[J]. *Contributions to Mineralogy & Petrology*, 1976, 58(1): 63–81.
- Rickwood P C. Boundary lines within petrologic diagrams which use oxides of major and minor elements[J]. *Lithos*, 1989, 22(4): 247–263.
- SUN S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematic of oceanic basalts: Implication for mantle composition and processes[J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 1989, 42(1): 313–345.
- Sylvester P J. Post-collisional strongly peraluminous granites[J]. *Lithos*, 1998, 45(1–4): 29–44.
- Watson E B, Harrison T M. Zircon saturation revisited: temperature and composition effects in a variety of crustal magma types[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1983, 64(2): 295–304.
- Williamson B J, Shaw A, Downes H, et al. Geochemical constraints on the genesis of Hercynian two-mica leucogranites from the Massif Central, France[J]. *Chemical Geology*, 1996, 127(1–3): 25–42.
- Wolf M B, London D. Apatite dissolution into peraluminous haplogranitic melts: An experimental study of solubilities and mechanisms[J]. *Geochimica Cosmochimica Acta*, 1994, 58(19): 4127–4145.
- Xiong X L, Adam J, Green T H. Rutile stability and rutile/melt HF–SE partitioning during partial melting of hydrous basalt: Implications for TTG genesis[J]. *Chemical Geology*, 2005, 218(3–4): 339–359.
- Yuan H L, Gao S, Dai M N, et al. Simultaneous determinations of U–Pb age, Hf isotopes and trace element compositions of zircon by excimer laser-ablation quadrupole and multiple-collector ICP–MS[J]. *Chemical Geology*, 2008, 247: 100–118.
- Zheng Z, Chen Y J, Deng X H, et al. Fluid evolution of the Qiman Tagh W–Sn ore belt, East Kunlun Orogen, NW China[J]. *Ore Geology Reviews*, 2018, 95: 280–291.