

东昆仑卡尔却卡地区中志留世 A 型花岗岩岩石成因及构造环境

陈海福¹, 何书跃², 张爱奎², 孙金磊^{3*}, 严正平¹, 刘金龙⁴, 张亮⁵, 钱烨³

CHEN Haifu¹, HE Shuyue², ZHANG Aikui², SUN Jinlei^{3*}, YAN Zhengping¹, LIU Jinlong⁴, ZHANG Liang⁵, QIAN Ye³

1. 青海省有色地质矿产勘查局, 青海 西宁 810001;

2. 青海省第三地质勘查院, 青海 西宁 810029;

3. 吉林大学地球科学学院, 吉林 长春 130061;

4. 中国地质调查局沈阳地质调查中心, 辽宁 沈阳 110000;

5. 中国地质科学院郑州矿产综合利用研究所, 河南 郑州 450006

1. Qinghai Provincial Non-ferrous Metal Geological and Minerals Exploration Bureau, Xining 810001, Qinghai, China;

2. The Thirdly Geological Survey Institute of Qinghai Province, Xining 810029, Qinghai, China;

3. College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun 130061, Jilin, China;

4. Shenyang Center, China Geological Survey, Shenyang 110000, Liaoning, China;

5. Zhengzhou Institute of Multipurpose Utilization of Mineral Resource, Chinese Academy of Geological Sciences, Zhengzhou 450006, Henan, China

摘要:东昆仑造山带西部卡尔却卡地区出露大量似斑状二长花岗岩,对其展开岩相特征、锆石 U-Pb 年龄和岩石地球化学研究,结果显示,似斑状二长花岗岩年龄为 425 ± 2.3 Ma,表明其形成于中志留世。岩石具有高 SiO_2 (69.0%~71.2%) 和 K_2O (4.3%~5.54%) 含量,富集大离子亲石元素(Rb、K、Th 和 U),亏损高场强元素(Nb、Ta 和 Ti),强烈的负 Eu 异常($\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0.40 \sim 0.51$)特征。岩石较低的 Cr、Ni 含量($\text{Cr} = 13.81 \times 10^{-6} \sim 32.9 \times 10^{-6}$, $\text{Ni} = 5.48 \times 10^{-6} \sim 12.05 \times 10^{-6}$)、低的 Ce/Pb (2.01~4.19) 和 Nb/U (4.1~7.57) 值,表明该岩体来自上地壳的部分熔融。岩体高 10000Ga/Al 值(3.22~3.42)、Zr+Nb+Ce+Y 元素含量($459 \times 10^{-6} \sim 656 \times 10^{-6}$)和锆石饱和温度(827~881℃),表明其为 A 型花岗岩。构造图解和高的 Y/Nb 值(2.93~3.15)指示,该岩体为 A₂ 型花岗岩,形成于碰撞后伸展背景。结合区域岩浆岩的时空分布,表明东昆仑造山带从中志留世开始进入碰撞后伸展阶段。

关键词: A 型花岗岩; 中志留世; 碰撞后伸展; 卡尔却卡; 东昆仑造山带

中图分类号: P534.43; P588.12⁺1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-2552(2021)08-1380-14

Chen H F, He S Y, Zhang A K, Sun J L, Yan Z P, Liu J L, Zhang L, Qian Y. Petrogenesis and tectonic setting of Middle Silurian A-type granite in Kaerqueka area, East Kunlun. *Geological Bulletin of China*, 2021, 40(8): 1380-1393

Abstract: A lot of porphyritic monzogranites are outcropped in the Kaerqueka area, west of the East Kunlun orogenic belt. Zircon U-Pb age and geochemistry of the porphyritic monzonites were studied. Zircon U-Pb dating yields an age of 425 ± 2.3 Ma, indicating Middle Silurian. The rocks are characterized by high contents of SiO_2 (69.0%~71.2%) and K_2O (4.3%~5.54%), enrichment of large ion lithophile element (Rb, K, Th and U), depletion of high field strength element (Nb, Ta and Ti), and strong Eu negative anomaly

收稿日期: 2020-12-01; 修订日期: 2021-05-07

资助项目: 青海省科学技术项目《东昆仑西段金矿规律及找矿突破》(编号: 2019-ZJ-7009)

作者简介: 陈海福(1975-), 男, 硕士, 高级工程师, 从事成矿预测与地质找矿研究。E-mail: 1078260129@qq.com

* 通信作者: 孙金磊(1994-), 男, 博士, 从事矿产普查与矿床成因研究。E-mail: jinleisun123@163.com

($\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0.40 \sim 0.51$)。Their lower content of Cr, Ni ($\text{Cr} = 13.81 \times 10^{-6} \sim 32.9 \times 10^{-6}$, $\text{Ni} = 5.48 \times 10^{-6} \sim 12.05 \times 10^{-6}$) and the lower Ce/Pb ($2.01 \sim 4.19$) and Nb/U ($4.1 \sim 7.57$) values indicate that they were originated from partial melting of the upper crust. The high ratio of $10000\text{Ga}/\text{Al}$ ($3.22 \sim 3.42$), high contents of $\text{Zr}+\text{Nb}+\text{Ce}+\text{Y}$ ($459 \times 10^{-6} \sim 656 \times 10^{-6}$) and zircon saturation temperature ($827 \sim 881^\circ\text{C}$) imply they belong to A-type granite. Tectonic diagram and high Y/Nb ratio ($2.93 \sim 3.15$) indicate that they are A_2 type granites, and were formed in the post-collision extension setting. Combined with the spatial and temporal distribution of magmatic rocks in the region, it is suggested that the East Kunlun Orogen entered the post-collision extension stage from the Middle Silurian period.

Key words: A-type granite; Middle Silurian; post-collision extension; Kaerqueka area; East Kunlun orogen

东昆仑造山带位于青藏高原的北缘(图 1-a), 是中央造山带的重要组成部分, 带内广泛出露早古生代和晚古生代—早中生代 2 个重要时期的岩浆岩, 其形成分别与原特提斯洋和古特提斯洋的演化有关^[1-7]。相比古特提斯洋, 前人对原特提斯洋的研究略显薄弱。研究表明, 原特提斯洋的打开与扩张应发生在早寒武世之前^[4], 俯冲消减阶段从寒武纪末期开始^[3], 与后碰撞相关的岩浆岩大量出现在早—中泥盆世^[4]。然而, 对于原特提斯洋从碰撞到伸展阶段的转换时限仍存在争议。例如, 田广阔等^[8]通过对大干沟花岗岩的研究, 认为在早—中泥盆世东昆仑地区正式进入碰撞后伸展阶段; 王晓霞等^[9]根据东昆仑万宝沟花岗岩的研究, 认为碰撞后伸展阶段应始于晚奥陶世; 刘彬等^[10]研究带内胡晓钦镁铁质岩体, 认为在早志留世东昆仑地区仍处于俯冲消减阶段。可见由于原特提斯洋由挤压碰撞向碰撞后伸展转换时限不确定, 严重制约了东昆仑早古生代造山作用的研究。

A 型花岗岩因其具有指示伸展构造的意义, 是碰撞后造山过程的标志性产物, 对于揭示造山作用过程具有重要意义^[11-13]。本次在东昆仑卡尔却卡地区发现有 A 型花岗岩出露, 选取卡尔却卡地区 A 型花岗岩作为研究对象, 进行岩相学特征、锆石 U-Pb 年龄、地球化学等研究, 探讨其成岩时代、岩石成因与构造环境, 以期东昆仑早古生代造山作用过程提供新的制约。

1 地质背景与样品特征

东昆仑造山带是青藏高原的重要组成部分, 北邻柴达木盆地, 南接巴颜喀拉—松潘甘孜地体, 总体呈近 EW 向展布, 延长超过 1000 km, 南北宽 50~200 km (图 1-a)。区域上由北向南发育昆北、昆中和昆南 3 条近 EW 向的区域性深大断裂带(图 1-b), 姜春发等^[25]据此将东昆仑造山带进一步划分为昆北弧后裂陷带、昆中基底隆起花岗岩带和昆南复合拼接带。

卡尔却卡地区位于东昆仑造山带昆中基底隆起花岗岩带的西段(图 1-b)。区内出露地层较简单, 主要有古元古界金水口群白沙河组、奥陶系—志留系滩间山群、三叠系鄂拉山组和第四系。白沙河组岩性以含石榴子石、矽线石的斜长片麻岩为主。滩间山群岩石组合为安山质的玄武岩夹大理岩, 白沙河组和滩间山群都以剥蚀残留体形式零星分布于侵入岩体中。三叠系鄂拉山组岩性是以流纹岩为主的火山岩组合。第四系主要为河谷冲积砂砾和粘土, 分布于河谷和山前地区(图 2)。研究区构造以断裂构造为主, 褶皱构造不发育。断裂主要有 NWW 向和 NE 向 2 组, NWW 向断裂显示为强烈挤压特征, NE 向断裂显示张性特征, 其中 NE 向断裂切穿 NWW 向断裂和花岗岩类岩体(图 2)。区内岩浆岩分布较广, 主体为酸性岩, 其中似斑状二长花岗岩分布面积最广, 其周围出露有花岗闪长岩和石英闪长岩(图 2)。

本次研究采集的样品为似斑状二长花岗岩, 主要以岩基形式出露在区内西南部, 约占研究区面积的 50%。岩石为浅肉红色, 块状构造, 似斑状结构, 基质为中细粒结构(图 3-a、b)。镜下观察, 斑晶以钾长石为主, 基质为钾长石、斜长石、石英和黑云母, 可见少量角闪石。主要矿物为钾长石(45%)、斜长石(35%)、石英(15%)和黑云母(5%), 含有少量磷灰石、锆石等副矿物。钾长石呈半自形, 负低突起, 表面混浊, 呈尘土状, 大小为 0.5~3 mm; 斜长石呈自形—半自形板状, 表面呈绢云母化和尘土化, 发育有聚片双晶, 大小为 0.5~2 mm; 石英呈他形分布在矿物颗粒间, 粒径为 0.5~1 mm; 黑云母呈鳞片状, 显示为棕色, 有轻微蚀变现象, 长度可达 0.5~1 mm(图 3-c、d)。

2 分析方法

2.1 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年

锆石年龄测试样品采自野外新鲜露头。去除

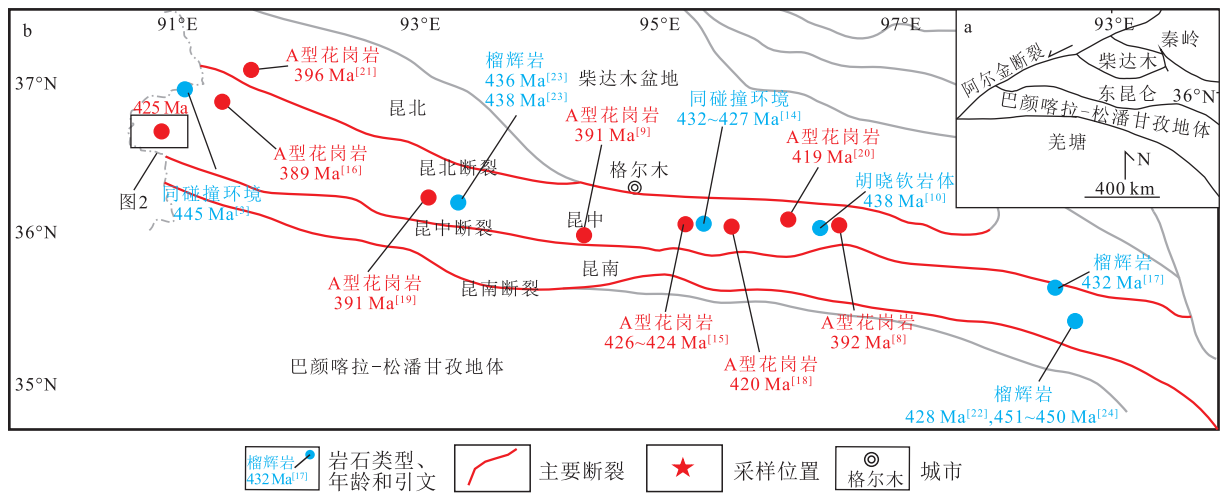


图 1 东昆仑造山带大地构造位置图(a)和区域地质简图(b)

Fig. 1 The tectonic location(a) and simplified geological map(b) of East Kunlun orogen

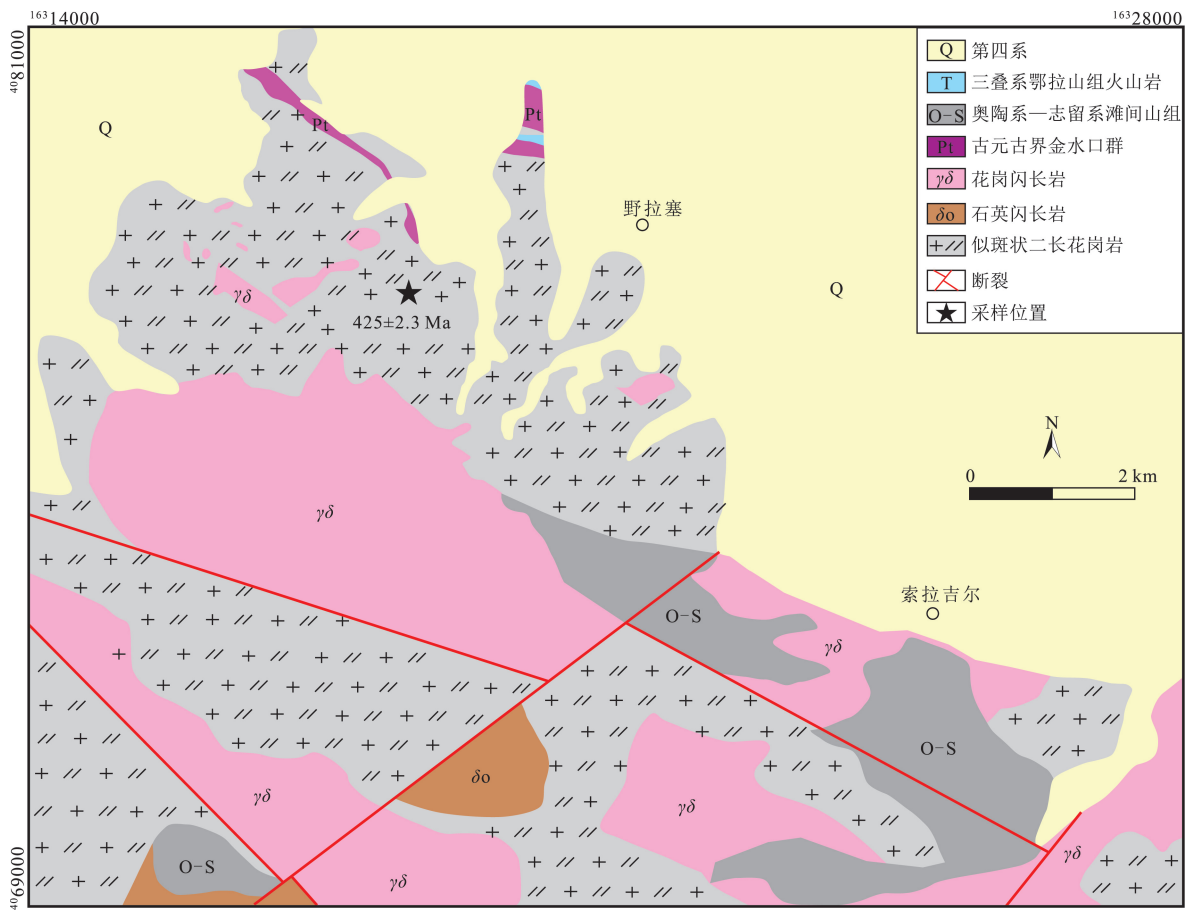


图 2 东昆仑造山带卡尔却卡地区地质图

Fig. 2 Geological map of Kaerqueka area in East Kunlun orogen

样品风化面后,进行破碎,用磁法和重液法分选锆石颗粒。锆石制靶完成后,对其进行反射光、透射光和阴极发光(CL)研究,以选择锆石 U-Pb 同位素

最佳分析点。锆石测年在吉林大学自然资源部东北亚矿产资源评价重点实验室通过 LA-ICP-MS 完成。激光剥蚀光束直径为 32 μm ,频率为 7 Hz,剥

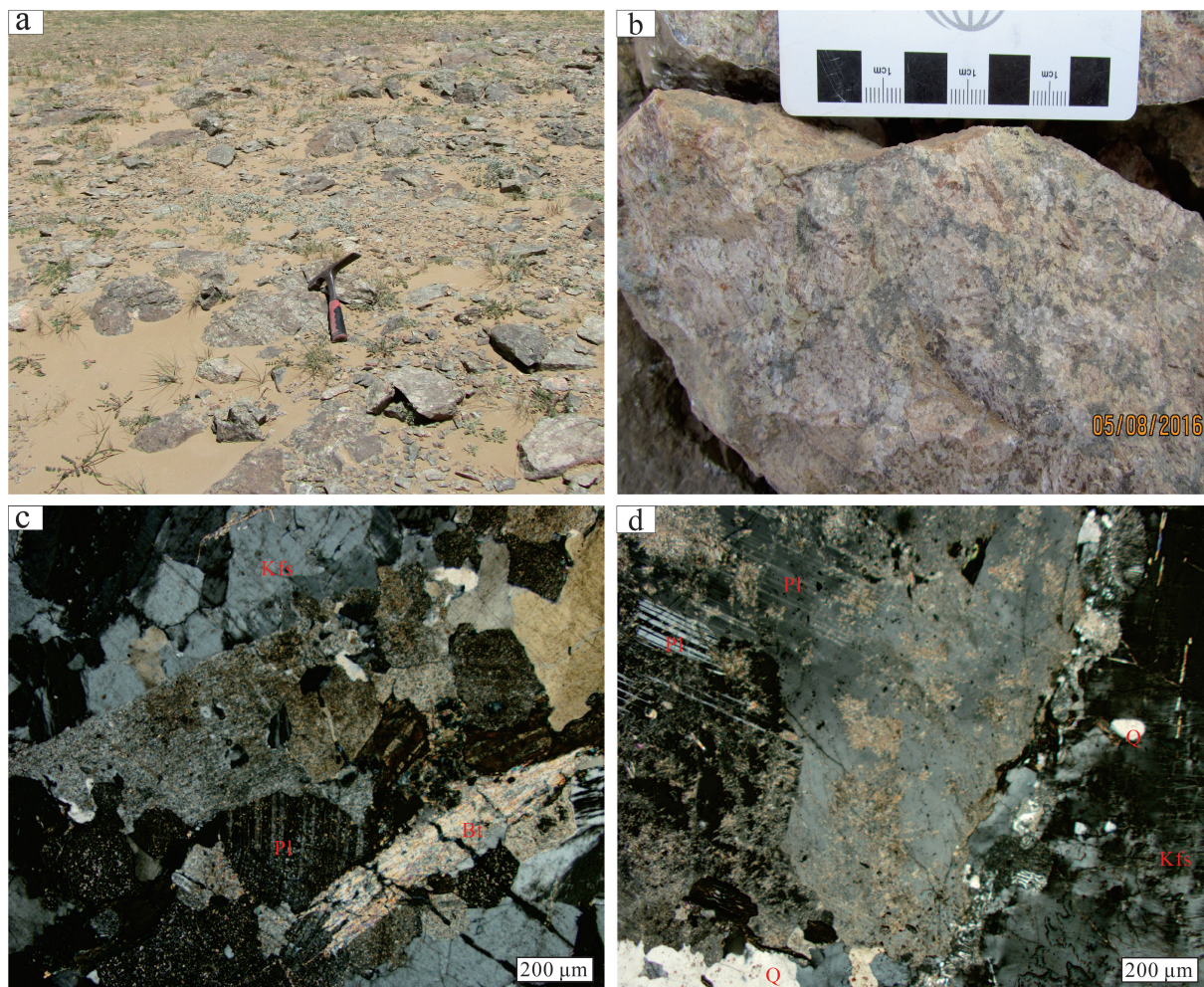


图 3 卡尔却卡地区似斑状二长花岗岩野外露头(a,b)及显微照片(c,d)

Fig. 3 Field outcrop(a,b) and microphotographs(c,d) of porphyritic monzogranite in the Kaerqueka area
Q—石英; Bt—黑云母; Pl—斜长石; Kfs—钾长石

蚀深度为 20 μm , 以氦气为载气; 采用 ^{29}Si 为内标元素, 国际标准锆石 91500 为外标, 硅酸盐玻璃 NIST610 为锆石元素含量外标, 具体的实验方法参见 Yuan 等^[26]。普通铅校正采用 Andersen^[27] 的方法, 利用 Isoplot 3 程序进行锆石年龄计算与谐和图的绘制。

2.2 岩石地球化学分析

全岩主量和微量元素测试在吉林大学自然资源部东北亚矿产资源评价重点实验室完成。主量元素分析测试方法为 X 射线荧光法。将岩石样品粉碎至 200 目以下, 在 105℃ 下干燥 4 h。冷却至室温后, 将样品与溶剂、氧化剂、助熔剂等混合, 置于铂金坩埚中, 在 1150℃ 使样品熔化, 然后在室温下冷却以待测试。分析仪器为日本 RIX 2100 型

XRF, 采用国家标准物质中心的花岗岩和玄武岩作为标准参考物, 主量元素分析误差小于 1%。

微量元素测试选用电感耦合等离子体质谱仪 (ICP-MS) 分析, 分析方法采用混合酸溶样法。称 40~60 mg 样品置于溶样罐中, 进行加酸 ($\text{HF} + \text{HNO}_3$)、加热赶硅处理, 随后进行 2 次高压高温溶解, 最后加入 Rh 内标溶液进行测试。微量元素分析误差小于 5%。

3 分析结果

3.1 锆石 U-Pb 年代学

似斑状二长花岗岩测试分析点为 25 个, 其中有效数据为 21 个, 分析结果见表 1。锆石自形程度较好, 显示为长柱状 (图 4), 其长轴为 50~150 μm , 长宽比为 1:1~2:1。大多数锆石阴极发光 (CL) 图

表 1 卡尔却卡地区似斑状二长花岗岩锆石 U-Th-Pb 测年分析结果
Table 1 Zircon U-Th-Pb dating results of the porphyritic monzogranite in Kaerqueka area

样品点	Th / 10^{-6}	U / 10^{-6}	Th/U	$^{207}\text{Pb}/$ ^{206}Pb	1σ	$^{207}\text{Pb}/$ ^{235}U	1σ	$^{206}\text{Pb}/$ ^{238}U	1σ	$^{207}\text{Pb}/$ ^{206}Pb	1σ	$^{207}\text{Pb}/$ ^{235}U	1σ	$^{206}\text{Pb}/$ ^{238}U	1σ
KEQK-1	644	2185	0.29	0.05346	0.00205	0.50514	0.01851	0.06825	0.00094	350	85	415	12	425.6	5.7
KEQK-2	444	1845	0.24	0.05523	0.00210	0.52174	0.01873	0.06818	0.00076	420	81	426	13	425.2	4.6
KEQK-3	598	1286	0.46	0.05968	0.00296	0.55212	0.02483	0.06782	0.00139	591	107	446	16	423.0	8.4
KEQK-4	324	553	0.58	0.05610	0.00318	0.53019	0.02990	0.06807	0.00110	457	126	432	20	424.5	6.7
KEQK-5	445	1654	0.27	0.05650	0.00215	0.53636	0.02045	0.06823	0.00080	472	85	436	13	424.5	4.8
KEQK-6	652	1834	0.36	0.05649	0.00218	0.53195	0.01948	0.06806	0.00080	472	83	433	14	425.5	4.8
KEQK-7	1189	3249	0.37	0.06934	0.00238	0.65760	0.02360	0.06799	0.00080	909	76	513	14	424.1	4.8
KEQK-8	851	2870	0.30	0.05678	0.00179	0.53991	0.01729	0.06826	0.00073	483	69	438	11	425.7	4.4
KEQK-9	872	2648	0.33	0.05577	0.00196	0.52723	0.01799	0.06827	0.00080	443	80	430	12	425.7	4.8
KEQK-10	570	1254	0.45	0.06093	0.00269	0.57766	0.02628	0.06816	0.00093	635	94	463	17	425.1	5.6
KEQK-11	477	1184	0.40	0.05676	0.00205	0.53761	0.01909	0.06832	0.00077	483	47	437	13	426.0	4.6
KEQK-12	918	2493	0.37	0.06719	0.00260	0.64587	0.03016	0.06795	0.00098	843	80	506	19	423.8	5.9
KEQK-13	1092	3152	0.35	0.05545	0.00174	0.52268	0.01634	0.06794	0.00077	432	66	427	11	423.7	4.6
KEQK-14	541	3258	0.17	0.06240	0.00205	0.59267	0.02036	0.06821	0.00081	687	75	473	13	425.4	4.9
KEQK-15	821	2765	0.30	0.06650	0.00207	0.63209	0.02030	0.06843	0.00081	833	60	497	13	426.7	4.9
KEQK-16	549	1694	0.32	0.06627	0.00226	0.62327	0.02098	0.06805	0.00082	817	71	492	13	424.4	5.0
KEQK-17	1124	2801	0.40	0.06431	0.00209	0.60648	0.01969	0.06812	0.00074	754	69	481	12	424.8	4.4
KEQK-18	656	1248	0.53	0.05982	0.00219	0.55415	0.02052	0.06776	0.00107	598	80	448	13	422.7	6.5
KEQK-19	262	738	0.36	0.05798	0.00897	0.54309	0.08881	0.06758	0.00215	528	343	440	58	421.6	13.0
KEQK-20	313	1057	0.30	0.06212	0.00286	0.58292	0.02830	0.06773	0.00126	680	98	466	18	422.5	7.6
KEQK-21	513	1385	0.37	0.05674	0.00224	0.53783	0.02165	0.06817	0.00082	480	87	437	14	425.1	4.9

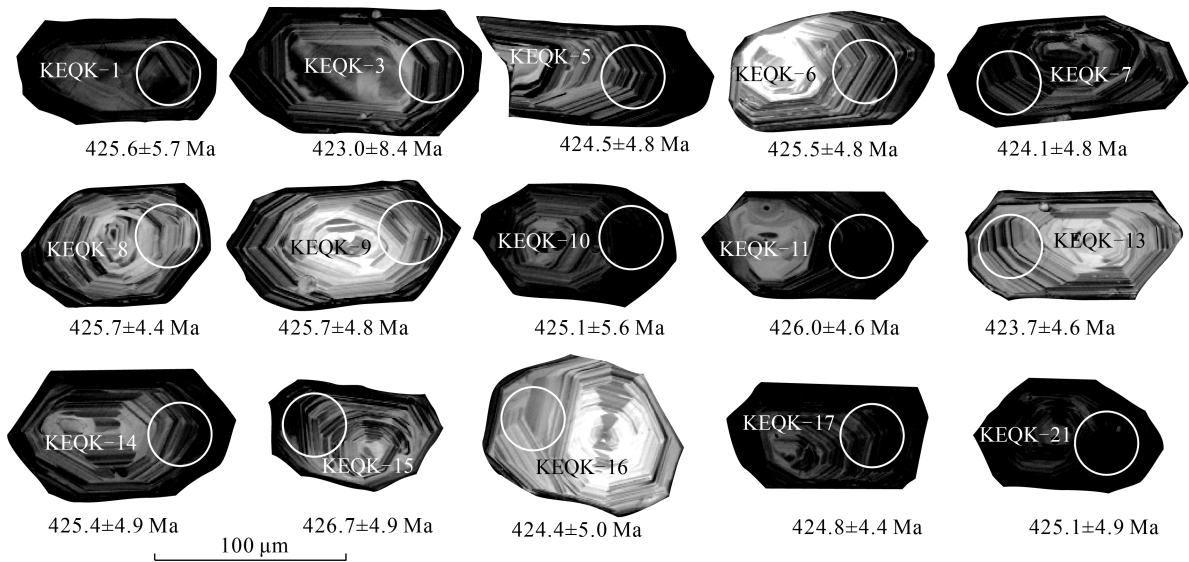


图 4 似斑状二长花岗岩锆石阴极发光 (CL) 图像及 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄
Fig. 4 CL images and ages of the zircons from porphyritic monzogranite

像较为暗淡,可能是锆石 U ($553 \times 10^{-6} \sim 3258 \times 10^{-6}$) 和 Th ($262 \times 10^{-6} \sim 1189 \times 10^{-6}$) 浓度较高导致。锆石显示出明显的振荡环带(图 4), 且具有较高的 Th/U 值(0.17~0.58), 表明为典型的岩浆锆石^[28]。21 个测点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄变化为 421.6~426.7 Ma, 得到年龄加权平均值为 425.0 ± 2.3 Ma (图 5), 可以代表本区似斑状二长花岗岩的形成年龄, 即形成于中志留世。

3.2 主量和微量元素特征

样品主量及微量元素测试结果见表 2。似斑状二长花岗岩 SiO_2 含量较高, 介于 69.0%~71.2% 之间, Al_2O_3 含量为 13.37%~14.05%, 全碱含量较高(7.46%~8.12%), Na_2O 和 K_2O 的含量分别为 2.52%~3.16%

和 4.3%~5.54%, 具有富钾特征。在 TAS 图解中, 主要落入亚碱性花岗岩区域(图 6-a)。样品的 MgO 含量较低(0.73%~0.94%), 其 $\text{Mg}^\#$ 值为 30.85~33.34。 CaO 含量为 1.7%~2.0%, A/CNK 值为 0.96~1.08, 显示为偏铝质到弱过铝质性质(图 6-b)。

岩石的稀土元素含量较高($\Sigma\text{REE} = 199 \times 10^{-6} \sim 338 \times 10^{-6}$), 轻、重稀土元素分馏明显($(\text{La}/\text{Yb})_N = 8.67 \sim 21.68$), 呈现出轻稀土元素富集、重稀土元素相对亏损的右倾分配模式, 此外, 所有样品具明显的负 Eu 异常($\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0.40 \sim 0.51$) (图 7-a)。在微量元素原始地幔标准化蛛网图(图 7-b)中, 样品显示出富集大离子亲石元素(Rb、K、Th 和 U), 亏损高场强元素(Nb、Ta 和 Ti)的特征。

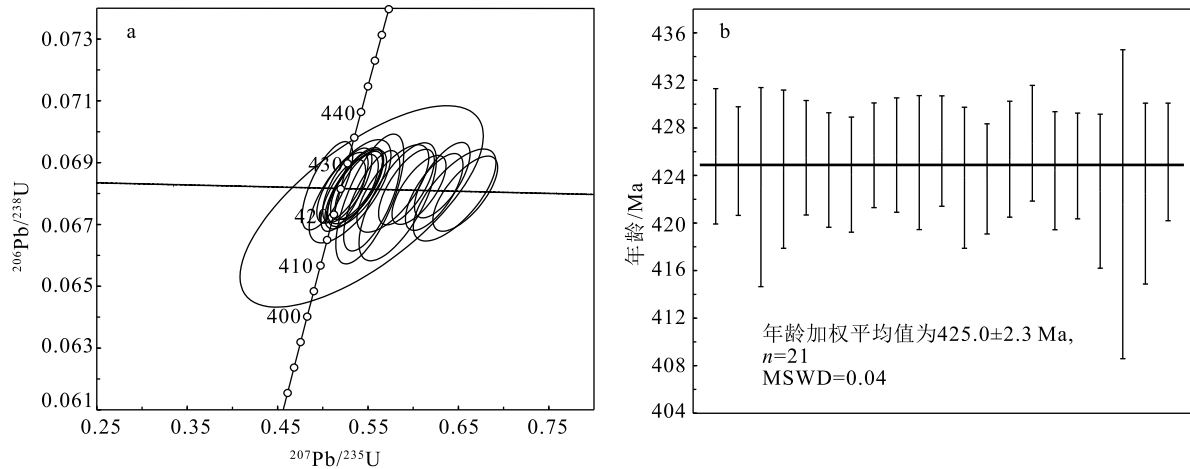


图 5 似斑状二长花岗岩锆石 U-Pb 谐和图(a)与加权平均年龄图(b)

Fig. 5 U-Pb concordia (a) and average age (b) diagrams of the zircons from porphyritic monzogranite

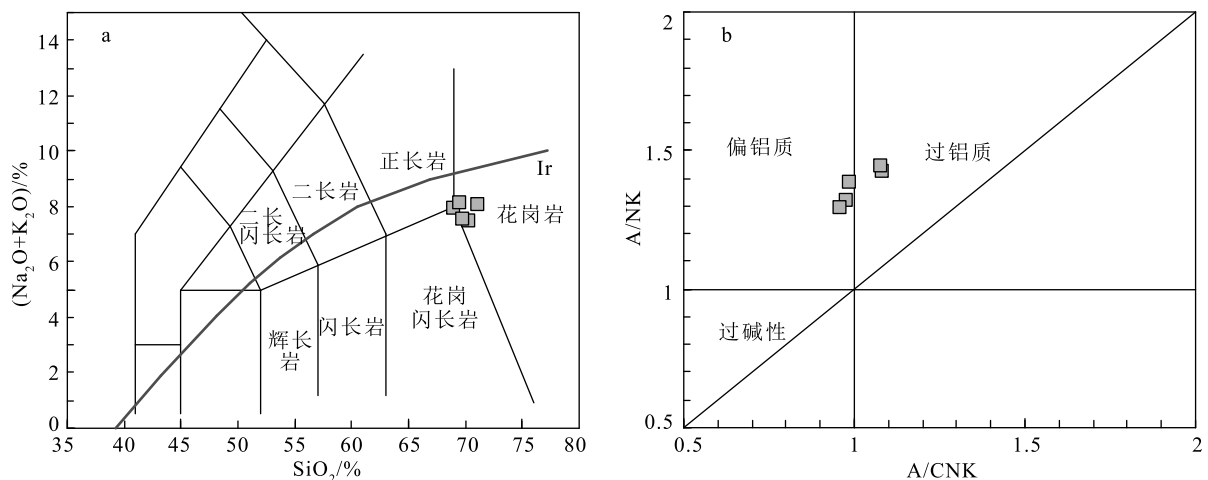


图 6 似斑状二长花岗岩 TAS 图解(a)和 A/CNK-A/NK 图解(b)^[29]

Fig. 6 TAS (a) and A/CNK-A/NK (b) diagrams of the porphyritic monzogranite

表 2 卡尔却卡地区似斑状二长花岗岩全岩主量、微量和稀土元素数据

Table 2 Major, trace elements and RRE composition of the porphyritic monzogranite in Kaerqueka area

元素	KE-1	KE-2	KE-3	KE-4	KE-5	元素	KE-1	KE-2	KE-3	KE-4	KE-5
SiO ₂	71.16	68.99	70.26	69.77	69.50	Cd	1.76	2.35	2.15	2.35	1.67
Al ₂ O ₃	13.37	13.91	14.05	13.90	13.39	Sn	4.22	4.27	4.65	6.55	5.18
Fe ₂ O ₃	0.93	1.30	1.07	1.11	1.05	Sb	2.63	1.72	1.43	1.41	1.49
FeO	2.08	2.56	2.43	2.28	2.46	Cs	7.23	8.86	5.72	6.04	7.83
CaO	1.94	2.25	1.71	1.80	2.00	Ba	580.1	498.9	531.7	900.7	612.3
MgO	0.73	0.94	0.88	0.92	0.91	La	70.12	60.25	39.06	68.07	56.59
K ₂ O	5.54	5.24	4.30	4.96	5.37	Ce	116.0	117.1	85.1	142.9	115.4
Na ₂ O	2.52	2.66	3.16	2.60	2.75	Pr	14.03	12.72	9.31	16.74	13.40
TiO ₂	0.39	0.60	0.49	0.42	0.52	Nd	44.56	42.55	33.55	59.84	47.77
P ₂ O ₅	0.11	0.16	0.15	0.16	0.15	Sm	7.14	7.55	7.14	12.22	9.47
MnO	0.08	0.09	0.08	0.07	0.10	Eu	1.15	1.10	1.17	1.57	1.27
烧失量	0.96	0.98	1.06	1.55	1.52	Gd	6.31	6.84	7.20	11.62	8.93
Li	30.11	35.55	28.78	25.50	27.38	Tb	0.88	0.97	1.15	1.77	1.32
Be	3.38	3.66	3.96	3.38	3.84	Dy	4.86	5.41	6.72	9.97	7.38
B	37.43	14.57	14.90	13.83	14.19	Ho	0.96	1.07	1.35	1.98	1.48
Sc	4.69	7.96	7.68	9.49	7.24	Er	2.64	2.98	3.72	5.44	4.06
Ti	2908	4115	3324	4103	3375	Tm	0.37	0.42	0.51	0.75	0.58
V	28.84	45.12	30.18	31.79	26.42	Yb	2.18	2.54	3.04	4.42	3.38
Cr	28.84	32.90	15.54	16.88	13.81	Lu	0.32	0.37	0.44	0.63	0.48
Mn	748	740	733	852	645	Hf	6.72	8.46	7.89	9.28	6.40
Co	6.15	8.02	5.96	4.44	5.83	Ta	0.57	0.67	0.79	1.38	1.07
Ni	7.22	12.05	6.30	5.48	5.53	W	1.09	1.09	1.77	1.56	1.32
Cu	17.20	12.57	8.66	5.92	15.69	Tl	1.31	1.28	1.23	1.53	1.45
Zn	61.43	83.04	77.18	77.66	66.08	Pb	34.79	31.12	42.30	34.13	37.69
Ga	22.76	23.74	24.33	25.20	23.28	Bi	0.26	0.31	0.29	0.20	0.46
Ge	4.20	4.69	3.82	4.19	4.15	Th	32.03	23.46	19.29	26.61	28.37
As	5.31	3.77	8.21	2.86	4.32	U	2.45	2.03	2.26	2.62	3.45
Se	3.06	3.74	3.10	4.80	3.68	10000Ga/Al	3.22	3.22	3.27	3.42	3.28
Rb	260.6	259.7	230.0	317.9	288.8	Zr+Nb+Ce+Y	458.65	564.61	507.56	655.58	467.12
Sr	154.7	155.5	188.3	159.9	167.7	T _{Zr} /°C	836	860	865	881	827
Y	29.48	34.74	42.16	60.73	46.65	ΣREE	271.51	261.86	199.46	337.92	271.50
Zr	303.1	399.9	366.9	432.1	289.6	(La/Yb) _N	21.68	15.97	8.67	10.38	11.27
Nb	10.07	12.87	13.39	19.85	15.47	Eu/Eu [*]	0.51	0.46	0.49	0.40	0.42
Mo	1.16	1.43	1.64	0.98	1.14	Mg [#]	34.42	34.58	35.23	37.04	35.92
Ag	0.31	0.37	0.34	0.38	0.35	A/CNK	0.98	0.98	1.08	1.08	0.96

注:主量元素含量单位为%,微量和稀土元素含量单位为 10⁻⁶

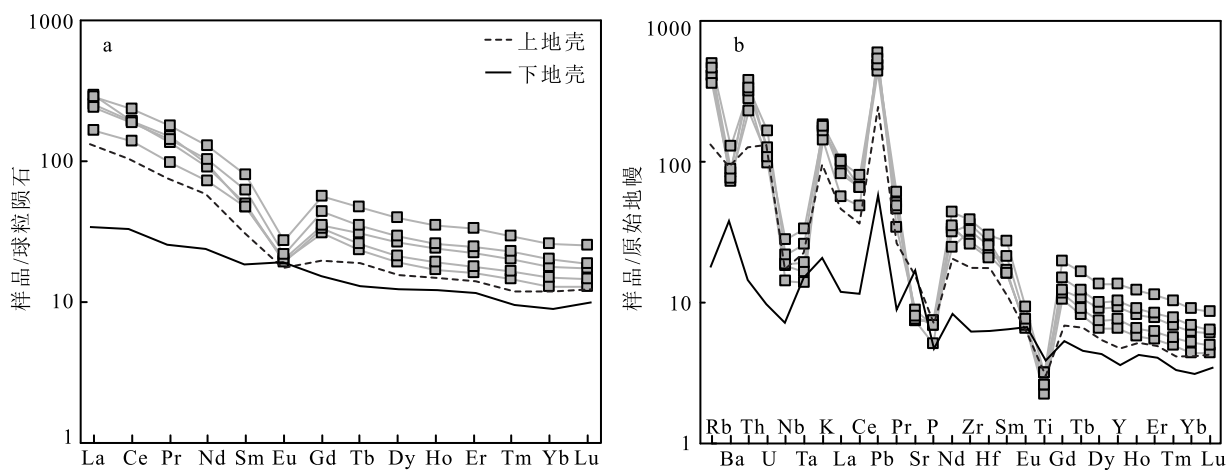


图 7 似斑状二长花岗岩稀土元素球粒陨石标准化图(a)和微量元素原始地幔标准化蛛网图(b)^[30]

Fig. 7 Chondrite-normalized REE patterns(a) and primitive mantle-normalized trace element patterns(b) of the porphyritic monzogranite

4 讨论

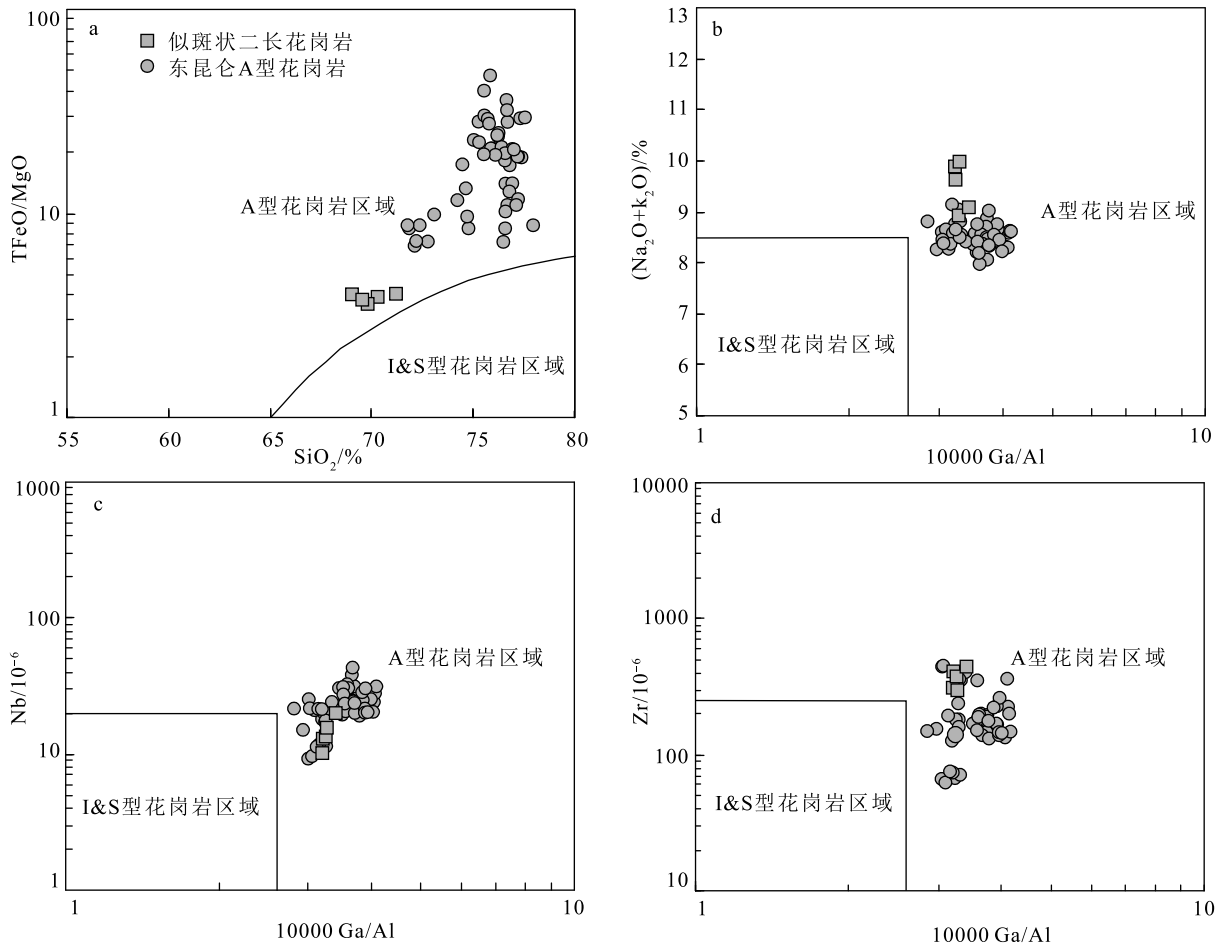
4.1 岩石成因

花岗质岩石根据其来源和地球化学特征可分为 I 型、S 型和 A 型花岗岩^[11, 13]。通常 S 型花岗岩表现出强过铝质的特征,而似斑状二长花岗岩样品显示偏铝质到弱过铝质性质,且 $A/CNK < 1.1$ (图 6-b),这与 S 型花岗岩特征不相符^[31]。另外,岩石中缺乏蓝闪石、白云母等富铝质矿物(图 3),且 P_2O_5 含量较低(0.11%~0.16%),这也与 S 型花岗岩有一定的区别。样品的 TFeO 含量、锆石饱和温度(T_{zr})也可以用来区分花岗岩类型。A 型花岗岩通常具有较高的 TFeO 含量(大于 1.0%)、TFeO/MgO 值(大于 1)和锆石饱和温度(平均为 839℃)^[12-13],而高分异 I 型花岗岩 TFeO 含量较小(小于 1.0%),且锆石饱和温度较低(平均 764℃)^[32]。本文样品 TFeO 含量为 2.92%~3.73%,且有较高的 TFeO/MgO 值(3.56~4.0),锆石饱和温度为 827~881℃,这些特征与典型的 A 型花岗岩相似。岩石具有较高的 10000Ga/Al 值(3.22~3.42)和 Zr+Nb+Ce+Y 元素含量($459 \times 10^{-6} \sim 656 \times 10^{-6}$),也符合 A 型花岗岩的判定标准^[33]。在 A 型花岗岩判别图解(图 8)中^[31],样品均落入 A 型花岗岩的范围。因此,笔者认为似斑状二长花岗岩为典型的 A 型花岗岩。

目前国内外学者对 A 型花岗岩成因模式主要

有以下几种认识:①幔源玄武质岩浆或碱性岩浆的结晶分异^[34];②壳-幔混合成因^[35];③富 F/Cl 麻粒岩相下地壳的低程度部分熔融^[11];④硅铝质中—上地壳的部分熔融^[36]。通常,幔源岩浆结晶分异形成 A 型花岗岩的同时会伴有大规模同时期的基性—超基性岩,而且会产生基性—中性—酸性连续变化的岩石系列^[37]。在卡尔却卡地区未发现同时期大规模的基性—超基性岩石,也缺少中性岩浆岩(图 2),因此,推测卡尔却卡 A 型花岗岩不是由幔源岩浆产生的。壳幔混合成因的 A 型花岗岩通常会含有大量暗色镁铁质包体^[35],而岩石样品中未见暗色包体,表明其不是壳-幔混合成因。

样品的 Cr、Ni 含量较低($Cr = 13.81 \times 10^{-6} \sim 32.9 \times 10^{-6}$, $Ni = 5.48 \times 10^{-6} \sim 12.05 \times 10^{-6}$),显示出地壳岩浆源区的特征。研究表明,地壳中 Ce/Pb 值小于 15,而地幔 Ce/Pb 值约为 25^[38]。岩石的 Ce/Pb 值较小(2.01~4.19),也符合壳源的特点。样品的 Nb/U 与 Sm/Nd 值分别为 4.1~7.57 和 0.16~0.21,相似于地壳对应元素含量值($Nb/U = 8.93$, $Sm/Nd = 0.30$),且与地幔的 Nb/U 值(33.59)显著不同^[39],因此,推测卡尔却卡 A 型花岗岩为壳源成因。研究表明,麻粒岩相下地壳部分熔融虽然可以产生具有低水和高卤特征的 A 型花岗岩,但无法获得其全部特征。此种 A 型花岗岩通常具有低 TFeO/MgO 和 K_2O/Na_2O 值,低 Si、K 的特征^[40],这与卡尔却卡 A 型花岗岩明显不符。样品具有明显的负 Eu 异常、

图8 A型花岗岩判别图解^[31]

(岩石数据据参考文献[8,10,15,18-21])

Fig. 8 Discriminant diagram of A-type granite

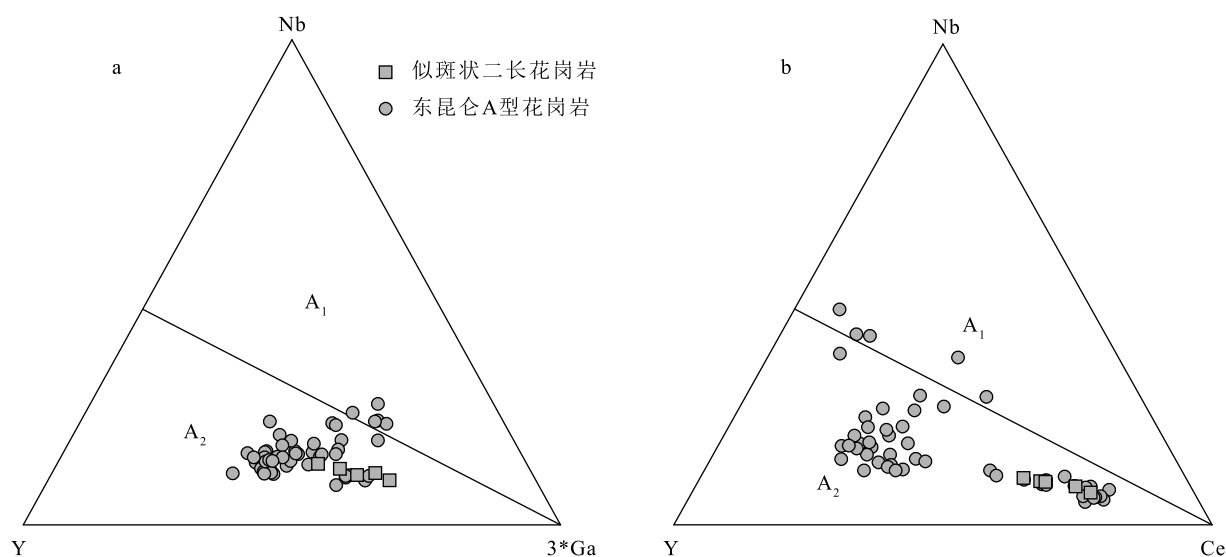
强烈亏损 Sr 的特征(图7),表明岩浆形成于富集斜长石且无石榴子石残留的浅部低压地区^[41]。样品的 Rb/Sr 值为 1.22~1.99(平均 1.66),远大于地幔平均值(0.03)和地壳平均值(0.35)^[39],表明岩石源区可能来自于上地壳。在稀土元素配分图解和微量元素蛛网图(图7)中,岩石显示出上地壳特征,而不同于下地壳,这也符合岩浆形成于低压的特点。因此,推测卡尔却卡地区 A 型花岗岩可能来自上地壳的部分熔融。

4.2 构造背景及意义

A 型花岗岩被普遍认为是伸展环境的重要岩石学标志,但其伸展环境、规模、深度等差异往往会导致 A 型花岗岩具有不同的特征。因此,Eby 等^[42]又进一步将 A 型花岗岩划分为 A₁ 和 A₂ 两种类型,其中 A₁ 类型代表幔源熔体分离结晶成因岩石,主要形

成于非造山环境(大陆裂谷或板内拉伸);A₂ 类型代表地壳部分熔融成因岩石,主要形成于造山后环境^[42-43]。似斑状二长花岗岩具有较高的 Y/Nb 值(2.93~3.15),大于 1.2,具有 A₂ 型花岗岩特征^[15,42]。在 A 型花岗岩亚型判别图解(图9)中,岩石样品均落入 A₂ 类型区域,表明其形成与造山后伸展环境有关,这也与其壳源成因符合。在岩石构造环境判别图解(图10)中^[44],样品也都落入后碰撞区域内。因此,推测研究区似斑状二长花岗岩形成于造山后伸展环境。

研究表明,东昆仑地区在早寒武世已经进入原特提斯洋的打开与扩张阶段^[45-46],洋盆经过扩张之后,进入俯冲消减阶段,形成岛弧型岩浆岩^[46-47]。而东昆仑造山带内榴辉岩、S 型花岗岩及同碰撞环境岩石的出现(图1-b;表3),如温泉地区榴辉岩

图 9 A 型花岗岩亚型判别图解^[31, 42]

(岩石数据据参考文献[8,10,15,18-21])

Fig. 9 Discriminant diagrams of A-type granite subtype

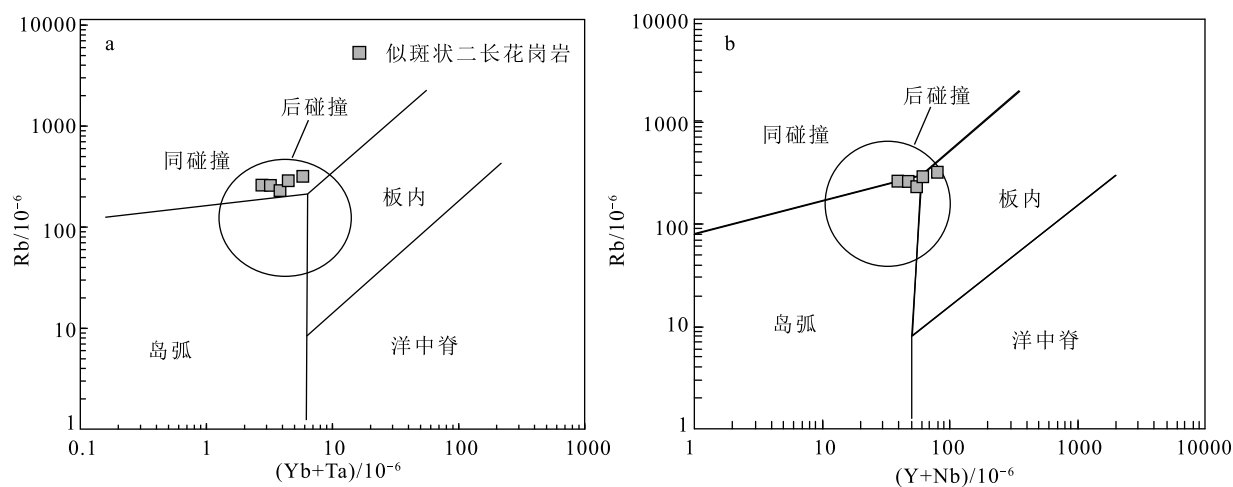
图 10 花岗岩构造环境判别图解^[44]

Fig. 10 Tectonic setting discriminant diagrams of granite

(451~428 Ma)^[22, 24]、夏日哈木榴辉岩(438~436 Ma)^[23, 57]、浪木日榴辉岩(432 Ma)^[17]、哈日扎地区 S 型花岗岩(443.8±3.5 Ma)^[49]、以及形成于同碰撞环境的吐木勒克蓝闪石片岩(445 Ma)^[3]、三铜沟岩体(432~427 Ma)^[14], 表明原特提斯洋在晚奥陶世—中志留世发生碰撞。目前, 大多数学者认为在早—中泥盆世东昆仑造山带已处于造山后伸展阶段, 然而对于由碰撞向伸展转换的时限却没有统一的认识^[7, 19]。本次获得卡尔却卡 A₂ 型花岗岩年龄为 425±

2.3 Ma, 表明在中志留世东昆仑局部已处于造山后伸展环境。近年来, A 型花岗岩在东昆仑其他地区也有被发现(图 1-b), 如东部五龙沟花岗岩(424~426 Ma)^[15]、红旗沟地区花岗岩(420±3 Ma)^[18]、猴头沟地区花岗岩(419.0±1.9 Ma)^[20]、冰沟花岗岩(391 Ma)^[9]和大干沟花岗岩(392 Ma)^[8]、西部地区白干湖花岗岩(421~422 Ma)^[50]、乌兰乌珠尔花岗岩(389 Ma)^[16]、拉陵灶火花岗岩(396 Ma)^[21]和夏日哈木花岗岩(391 Ma)^[19]。这些 A 型花岗岩与本

表 3 东昆仑造山带岩浆岩记录
Table 3 Magmatic records in East Kunlun orogen

岩性	年龄/Ma	地球化学特征	采样地区	构造背景
闪长岩	493±6 ^[47]	钙碱性	祁漫塔格	俯冲
闪长岩	480±3 ^[47]	钙碱性	祁漫塔格	
闪长岩	474±2 ^[51]	拉班玄武岩	加当	
玄武岩	474±8 ^[52]	拉班钙碱玄武岩	纳赤台	
花岗岩	454±2 ^[53]	埃达克岩	沟里	
花岗岩	452±3 ^[54]	钙碱性	祁漫塔格	
花岗闪长岩	441±6 ^[45]	埃达克岩	布青山	
花岗闪长岩	439±2 ^[55]	埃达克岩	清水泉	
流纹岩	438±3 ^[45]	钙碱玄武岩	布青山	
蓝闪石片岩	445 ^[3]	S 型	吐木勒克	同碰撞
二长花岗岩	444 ^[49]		哈日扎	
榴辉岩	438~436 ^[23]		夏日哈木	
闪长岩、花岗闪长岩	432±2, 432±2, 427±3 ^[14]		三铜沟	
榴辉岩	450~410 ^[56]		阿确墩	
榴辉岩	432±2 ^[17]		浪日木	
榴辉岩	428±2 ^[22]		温泉	
似斑状二长花岗岩	425±2	A ₂ 型	卡尔缺卡	后碰撞伸展
花岗岩	425±2, 424±2, 426±3, 424±2 ^[15]	A ₂ 型	五龙	
花岗岩	422~421 ^[50]	A ₂ 型	白干湖	
花岗岩	421±2 ^[48]	高钾钙碱性	祁漫塔格	
花岗岩	420±3 ^[48]	高钾钙碱性	祁漫塔格	
二长花岗岩	419±2 ^[20]	A ₂ 型	五龙沟	
花岗闪长岩	404±3 ^[48]	高钾钙碱性	祁漫塔格	
正长花岗岩	396±2 ^[21]	A ₂ 型	拉陵灶火	
正长花岗岩	392±2 ^[8]	A ₂ 型	大干沟	
正长花岗岩	391±1 ^[19]	A ₂ 型	夏日哈木	
斑状花岗岩	391±3 ^[57]	高钾钙碱性	祁漫塔格	
正长花岗岩	391±3 ^[10]	A ₂ 型	哈拉郭勒	
正长花岗岩	389±4 ^[16]	A ₂ 型	祁漫塔格山乌兰乌珠尔	
花岗岩	381±1 ^[48]	高钾钙碱性	祁漫塔格	

次研究的岩石相似,普遍显示具有 A₂型花岗岩的特征(图 9),表明它们都形成于造山后伸展环境。本次研究的 A 型花岗岩是东昆仑造山带发现年龄最早的 A 型花岗岩之一,代表了原特提斯洋造山后伸展的最早记录,即从中志留世开始东昆仑造山带开始进入碰撞后伸展阶段,而不是晚奥陶世或早一中泥盆世。

基于以上认识,结合东昆仑地区地质资料和造

山带内岩石地球化学性质,推测在晚寒武世,原特提斯洋开始进入俯冲消减阶段,晚寒武世—晚奥陶世钙碱性、埃达克质岩石等弧岩浆岩在这一阶段产生(图 11-a)。晚奥陶世—中志留世原特提斯洋闭合,产生具有碰撞属性的榴辉岩和 S 型花岗岩(图 11-b)。在中志留世,以卡尔却卡花岗岩为代表的 A 型花岗岩开始出现,标志着东昆仑地区进入碰撞后伸展阶段(图 11-c)。

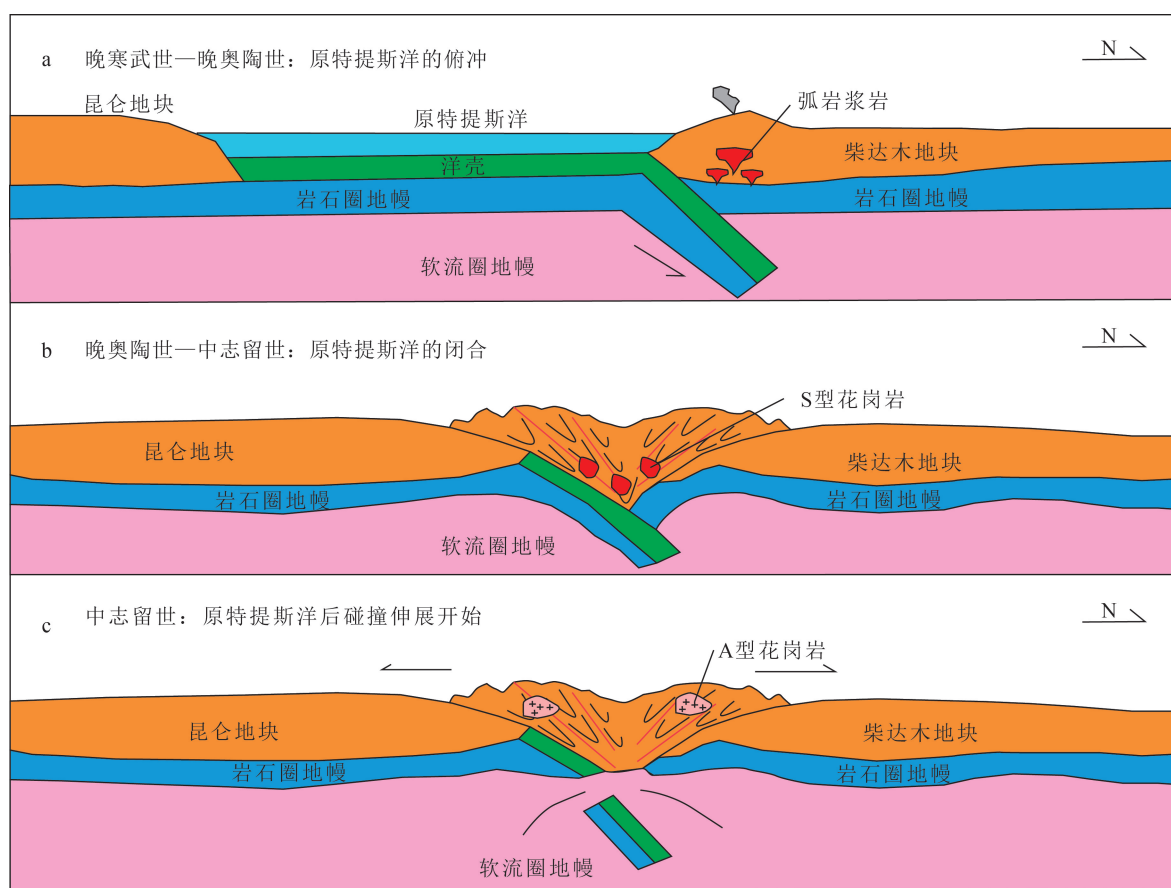


图 11 东昆仑原特提斯洋构造演化图解

Fig. 11 Tectonic evolution diagram of the Proto-Tethys Ocean in the Eastern Kunlun orogen

5 结 论

(1) 东昆仑卡尔却卡地区似斑状二长花岗岩锆石 U-Pb 年龄为 425.0 ± 2.3 Ma, 表明其形成于中志留世。

(2) 地球化学特征表明, 卡尔却卡似斑状二长花岗岩属于 A 型花岗岩, 由上地壳的部分熔融形成。

(3) 卡尔却卡似斑状二长花岗岩具有 A_2 型花岗岩特征, 形成于原特提斯洋闭合后的碰撞后伸展阶段, 表明东昆仑造山带从中志留世开始进入碰撞后伸展阶段。

致谢: 野外地质工作得到了青海地质矿产勘查三院大力帮助, 吉林大学地球科学学院肖国拾、李予晋、霍亮研究员在地球化学测试与岩石鉴定方面提供了帮助, 审稿专家给出了建设性的修改意见, 在此一并表示诚挚的感谢。

参考文献

- [1] 许志琴, 杨经绥, 李海兵, 等. 中央造山带早古生代地体构架与高压/超高压变质带的形成[J]. 地质学报, 2006, 80(12): 1793-1806.
- [2] 杨经绥, 许志琴, 马昌前, 等. 复合造山作用和中国中央造山带的科学问题[J]. 中国地质, 2010, 37(1): 1-11.
- [3] 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.
- [4] Yang J S, Robinson P T, Jiang C F, et al. Ophiolites of the Kunlun Mountains, China and their tectonic implications[J]. Tectonophysics, 1996, 258(1/4): 215-231.
- [5] 陆松年. 青藏高原北部前寒武纪地质初探[M]. 北京: 地质出版社, 2002: 1-125.
- [6] 张亚峰, 裴先治, 丁仁平, 等. 东昆仑都兰县可可沙地区加里东期石英闪长岩锆石 LAICP-MS U-Pb 年龄及其意义[J]. 地质通报, 2010, 29(1): 79-85.
- [7] 赵振明, 马华东, 王秉璋, 等. 东昆仑早泥盆世碰撞造山的侵入岩证据[J]. 地质论评, 2008, 54(1): 49-58.
- [8] 田广阔, 孟繁聪, 范亚洲, 等. 东昆仑早古生代造山后花岗岩的特征——以大干沟花岗岩为例[J]. 岩石矿物学杂志, 2016, 35(3): 371-390.

- [9] 王晓霞,胡能高,王涛,等.柴达木盆地南缘晚奥陶世万宝沟花岗岩: 锆石 SHRIMP U-Pb 年龄、Hf 同位素和元素地球化学[J].岩石学报,2011,28(9): 2950-2962.
- [10] 刘彬,马昌前,蒋红安,等.东昆仑早古生代洋壳俯冲与碰撞造山作用的转换: 来自胡晓钦镁铁质岩石的证据[J].岩石学报,2013,29(6): 2093-2106.
- [11] Collins W J, Beams S D, White A J R, et al. Nature and origin of A-type granites with particular reference to southeastern Australia [J]. Contributions to Mineralogy & Petrology, 1982, 80(2): 189-200.
- [12] King P L, White A J R, Chappell B W, et al. Characterization and Origin of Aluminous A-type Granites from the Lachlan Fold Belt, Southeastern Australia [J]. Journal of Petrology, 1997, 38(3): 371-391.
- [13] Loiselle M C, Wones D R. Characterization and origin of anorogenic granites [J]. Geological Society of America, Abstracts with Programs, 1979, 11(2): 448-468.
- [14] Zhang J, Ma C Q, Xiong F H, et al. Early Paleozoic high-Mg diorite-granodiorite in the eastern Kunlun Orogen, western China: Response to continental collision and slab break-off [J]. Lithos, 2014, 210/211: 129-146.
- [15] Xin Wei, Sun F Y, Li L, et al. The Wulonggou metaluminous A2-type granites in the Eastern Kunlun Orogenic Belt, NW China: Rejuvenation of subduction-related felsic crust and implications for post-collision extension [J]. Lithos, 2018: 108-127.
- [16] 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-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年及地质意义 [J]. 地质通报, 2011, 30(8): 1203-1211.
- [17] 祁晓鹏,范显刚,杨杰,等.东昆仑东段浪木日上游早古生代榴辉岩的发现及其意义 [J]. 地质通报, 2016, 35(11): 1771-1783.
- [18] 王艺龙,李艳军,魏俊浩,等.东昆仑五龙沟地区晚志留世 A 型花岗岩成因: U-Pb 年代学、地球化学、Nd 及 Hf 同位素制约 [J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2018, 43(4): 1219-1236.
- [19] 王冠,孙丰月,李碧乐,等.东昆仑夏日哈木矿区早泥盆世正长花岗岩锆石 U-Pb 年代学、地球化学及其动力学意义 [J]. 大地构造与成矿学, 2013(4): 127-139.
- [20] 严威,邱殿明,丁清峰,等.东昆仑五龙沟地区猴头沟二长花岗岩年龄、成因、源区及其构造意义 [J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2016, 46(2): 443-460.
- [21] 陈静,谢智勇,李彬,等.东昆仑拉陵灶火地区泥盆纪侵入岩成因及其地质意义 [J]. 矿物岩石, 2013, 33(2): 28-36.
- [22] Meng F, Zhang J, Cui M. Discovery of Early Paleozoic eclogite from the East Kunlun, Western China and its tectonic significance [J]. Gondwana Research, 2013, 23(2): 825-836.
- [23] 张照伟,钱兵,李文渊,等.东昆仑夏日哈木铜镍矿区发现早古生代榴辉岩: 锆石 U-Pb 定年证据 [J]. 中国地质, 2017, 44(4): 816-817.
- [24] 贾丽辉,孟繁聪,冯惠彬.榴辉岩相峰期流体活动: 来自东昆仑榴辉岩石英脉的证据 [J]. 岩石学报, 2014, 30(8): 2339-2350.
- [25] 姜春发,杨经绥,冯秉贵.昆仑开合构造 [M]. 北京: 地质出版社, 1992: 59-78.
- [26] Yuan H, Gao S, Liu X, et al. Accurate U-Pb Age and Trace Element Determinations of Zircon by Laser Ablation-Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry [J]. Geostandards and Geoanalytical Research, 2010, 28(3): 353-370.
- [27] Anderson T. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report 204Pb [J]. Chemical Geology, 2002, 192(1): 59-79.
- [28] Hoskin P W O. The Composition of Zircon and Igneous and Metamorphic Petrogenesis [J]. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 2003, 53(1): 27-62.
- [29] Chappell B W. Aluminium saturation in I- and S-type granites and the characterization of fractionated haplogranites [J]. Lithos, 1999, 46(3): 535-551.
- [30] Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes [J]. Geological Society London Special Publications, 1989, 42(1): 313-345.
- [31] Whalen J B, Currie K L, Chappell B W. A-type granites: geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis [J]. Contributions to Mineralogy & Petrology, 1987, 95(4): 407-419.
- [32] Sun J L, Qian Y, Li Y J, et al. The Late Paleoproterozoic A-Type Granites in the Jiao-Liao-Ji Orogenic Belt, North China Craton: Petrogenesis and Implications for Post-Collision Extension [J]. Geochemistry International, 2021, 59(4): 388-412.
- [33] Mushkin A, Navon O, Halicz L, et al. The petrogenesis of A-type magmas from the Amram Massif, southern Israel [J]. Journal of Petrology, 2003, 44(5): 815-832.
- [34] Mingram B, Trumbull R B, Littman S, et al. A petrogenetic study of anorogenic felsic magmatism in the Cretaceous Paresis ring complex, Namibia: evidence for mixing of crust and mantle-derived components [J]. Lithos, 2000, 54(1): 1-22.
- [35] Yang J H, Wu F Y, Chung S L, et al. A hybrid origin for the Qianshan A-type granite, Northeast China: Geochemical and Sr-Nd-Hf isotopic evidence [J]. Lithos, 2006, 89(1): 89-106.
- [36] Douce A E P. Generation of metaluminous A-type granites by low-pressure melting of calc-alkaline granitoids [J]. Geology, 1997, 25(8): 743-746.
- [37] Turner S P, Foden J D, Morrison R S. Derivation of some A-type magmas by fractionation of basaltic magma: An example from the Padthaway Ridge, South Australia [J]. Lithos, 1992, 28(2): 151-179.
- [38] Hofmann A W, Jochum K P, Seufert M, et al. Nb and Pb in oceanic basalts: new constraints on mantle evolution [J]. Earth and Planetary Science Letters, 1986, 79(1): 33-45.
- [39] Taylor S R, McLennan S M. The Continental Crust: its Composition and Evolution. An Examination of the Geochemical Record Preserved in Sedimentary Rocks [J]. Geology, 1985, 94(4): 196-197.
- [40] Wu F Y, Sun D Y, Li H, et al. A-type granites in northeastern China: age and geochemical constraints on their petrogenesis [J]. Chemical Geology, 2002, 187(1/2): 143-173.
- [41] Rapp R P, Watson E B. Dehydration Melting of Metabasalt at 8-32 kbar: Implications for Continental Growth and Crust-Mantle Recycling [J]. Journal of Petrology, 1995, 36(4): 891-931.
- [42] Eby N G. Chemical subdivision of the A-type granitoids: Petrogenetic and tectonic implications [J]. Geology, 1992, 20(7): 641.

- [43] Whalen J B, Jenner G A, Longstaffe F J, et al. Geochemical and Isotopic (O, Nd, Pb and Sr) Constraints on A-type Granite Petrogenesis Based on the Topsails Igneous Suite, Newfoundland Appalachians[J]. *Journal of Petrology*, 1996, 37(6): 1463-1489.
- [44] Pearce J. Sources and settings of granitic rocks[J]. *Episodes*, 1996, 19(4): 120-125.
- [45] 刘战庆, 裴先治, 李瑞保, 等. 东昆仑南缘阿尼玛卿构造带布青山地区两期蛇绿岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年及其构造意义[J]. *地质学报*, 2011, 85(2): 185-194.
- [46] 李王晔, 李曙光, 郭安林, 等. 青海东昆仑构造带苦海辉长岩和德尔尼闪长岩的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及痕量元素地球化学——对“祁-柴-昆”晚新元古代-早奥陶世多岛洋南界的制约[J]. *中国科学(D 辑)*, 2007, 37(增刊 I): 288-294.
- [47] 崔美慧, 孟繁聪, 吴祥珂. 东昆仑祁漫塔格早奥陶世岛弧: 中基性火成岩地球化学、Sm-Nd 同位素及年代学证据[J]. *岩石学报*, 2011, 27(11): 3365-3379.
- [48] Hao N, Yuan W, Zhang A, et al. Evolution process of the late Silurian-late Devonian tectonic environment in Qimantagh in the western portion of East Kunlun, China: evidence from the geochronology and geochemistry of granitoids[J]. *Journal of Earth System Science*, 2015, 124: 171-196.
- [49] Li J Y, Qian Y, Li H R, et al. The Late Ordovician granitoids in the East Kunlun Orogenic Belt, Northwestern China: petrogenesis and constraints for tectonic evolution of the Proto-Tethys Ocean[J]. *International Journal of Earth Sciences*, 2020, 109(1): 1439-1461.
- [50] 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(2): 216-226.
- [51] 孔会磊, 李金超, 栗亚芝, 等. 青海东昆仑东段加当辉长岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年及其地质意义[J]. *地质与勘探*, 2017, 53(5): 0089-0902.
- [52] 陈有圻, 裴先治, 李瑞保, 等. 东昆仑东段纳赤台岩群变火山岩锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及其构造意义[J]. *地学前缘*, 2013, 20(6): 1215-1216.
- [53] 陈加杰, 付乐兵, 魏俊浩, 等. 东昆仑沟里地区晚奥陶世花岗闪长岩地球化学特征及其对原特提斯洋演化的制约[J]. *地球科学——中国地质大学学报*, 2016, 41(11): 1863-1882.
- [54] 李瑶. 东昆仑祁漫塔格阿确墩地区古生代花岗岩成因及大地构造意义[D]. 中国地质大学(北京)硕士学位论文, 2017.
- [55] 李瑞保. 东昆仑造山带(东段)晚古生代-早中生代造山作用研究[D]. 长安大学博士学位论文, 2012.
- [56] 李猛, 查显锋, 胡朝斌, 等. 东昆仑西段阿确墩地区白沙河岩组锆石 U-Pb 年龄——对前寒武纪基底演化的约束[J]. *地质通报*, 2021, 40(1): 41-57.
- [57] 王冠. 东昆仑造山带镍矿成矿作用研究[D]. 吉林大学博士学位论文, 2014.