

东昆仑祁漫塔格地区中志留世环斑花岗岩和角闪辉长岩的发现及构造意义

徐博^{1, 2)}, 童海奎^{2, 3)}, 刘备¹⁾, 刘利双^{4, 5)}

1) 中国电建集团青海省电力设计院有限公司, 西宁, 810000;

2) 青藏高原北部地质过程与矿产资源重点实验室, 西宁, 810012;

3) 青海省地质调查局, 西宁, 810000;

4) 北京师范大学 教育部巨灾模拟与系统性风险应对国际合作联合实验室,

广东珠海, 519087;

5) 北京师范大学国家安全与应急管理学院, 广东珠海, 519087



内容提要:东昆仑地区原特提斯洋经历了早古生代的俯冲—造山演化过程,但对俯冲和碰撞造山等重要地质过程还存在较大争议。东昆仑祁漫塔格地区发现一套中志留世环斑花岗岩和角闪辉长岩组合,本文对其开展岩石学、岩石地球化学、LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学及 Sr—Nd—Pb 同位素研究,环斑花岗岩和角闪辉长岩的锆石 U-Pb 年龄分别为 430.1 ± 1.1 Ma 和 430.5 ± 1.2 Ma。全岩地球化学分析结果显示,环斑花岗岩的 K_2O+Na_2O 含量和 TFeO/MgO 值较高, MgO、CaO 含量较低,属准铝质—弱过铝质花岗岩、钾玄岩系列,相对富集轻稀土元素和大离子亲石元素 (Rb、Th、K 等),明显亏损 Nb、Ta、P、Ti 等高场强元素,显示负铕异常, $[n(^{87}\text{Sr})/n(^{86}\text{Sr})]_i$ 值 (0.712932~0.724711) 较高, $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值为 -4.60~ -5.61, 亏损地幔模式年龄 T_{DM2} 为 1622~1540 Ma, 属 A 型花岗岩;角闪辉长岩属低钾 (拉斑) 系列,富集大离子亲石元素,亏损高场强元素, $[n(^{87}\text{Sr})/n(^{86}\text{Sr})]_i$ 值 (0.709000~0.723957) 较高, $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值为 -4.82~ -5.89, 亏损地幔模式年龄 T_{DM2} 为 1646~1559 Ma。环斑花岗岩和角闪辉长岩来源于不同的岩浆源区,环斑花岗岩主要为低压、高温条件下古元古代长英质地壳部分熔融的产物,角闪辉长岩的岩浆源区为俯冲板片之上的地幔楔,该地幔楔曾受到俯冲流体交代的影响。由此推测,自寒武纪中期原特提斯洋开始向北俯冲,并持续至 430 Ma 之后,428~423 Ma 东昆仑地区总体处于碰撞造山阶段,423~406 Ma 东昆仑地区进入隆起阶段。在 430 Ma 左右,东昆仑地区处于俯冲—回撤的伸展构造背景。

关键词:东昆仑;中志留世;环斑花岗岩;锆石 U-Pb 年龄;Sr—Nd—Pb 同位素

东昆仑造山带是位于中央造山系西段的巨型构造岩浆岩带,经历了复杂的构造演化历史,也是地质界的研究热点地区(罗照华等,2002;刘成东等,2004;莫宣学等,2007;许志琴等,2013;陈加杰等,2016)。目前关于东昆仑原特提斯洋俯冲消减和造山的准确时限仍存在不同认识,例如,莫宣学等(2007)和刘彬等(2013)认为原特提斯洋俯冲结束和碰撞造山开始于早志留世,但王晓霞等(2012)认为早志留世东昆仑地区已处于后造山阶段。王冠等(2014)通过对夏日哈木铜镍矿镁铁质—超镁铁质岩体(423 ± 1 Ma)的研究,认为其形成于碰撞后伸展环境;祁生胜等(2014)认为夏日哈木—苏海图—

带榴辉岩(411 ± 2 Ma)的形成可能与大规模陆—陆碰撞事件有关。由此可见,东昆仑早古生代的构造演化历史还亟需进一步研究。

环斑花岗岩是地壳中具环斑结构的一种特殊岩石类型,典型的环斑花岗岩常与铁镁质岩石在时间和空间上密切共生,构成双峰式岩浆组合(卢欣祥等,2007)。近年来,通过详实的野外地质调查和室内研究,发现夏拉杂诺地区出露的环斑花岗岩与喀拉克登塔格地区出露的角闪辉长岩构成双峰式侵入岩组合,这对于研究该区原特提斯洋晚期的构造演化过程具有重要指示意义。

因此,本文对环斑花岗岩和角闪辉长岩开展详

注:本文为国家重点研发计划课题“多灾种快速评估与精准损失评估天空地一体化关键技术(编号:2022YFC3004404)”资助的成果。

收稿日期:2025-05-06;改回日期:2025-07-05;网络首发:2025-07-20;责任编辑:章雨旭。Doi: 10.16509/j. georeview. 2025. 07. 065

作者简介:徐博,男,1988年生,硕士,高级工程师,地质工程专业;Email: 857243227@qq.com。

细的岩石学、锆石 U-Pb 同位素年代学以及地球化学研究,分析环斑花岗岩和角闪辉长岩的成因及形成的构造背景,为东昆仑造山带的构造—岩浆演化过程提供科学证据。

1 区域地质背景

自中元古代以来,东昆仑地区经历了多期洋—陆转换、弧—弧和弧—陆碰撞过程,岩浆岩广泛发育,形成了显著的构造—岩浆岩带。莫宣学等(2007)通过与北祁连造山带进行对比,划分了东昆仑造山带加里东期造山旋回的四个阶段,分别为洋盆打开与扩张(579~518 Ma)、俯冲造山(508~450 Ma)、碰撞和后碰撞(413~380 Ma)、晚泥盆世以后造山崩塌隆升,建立起了东昆仑加里东期运动的构造框架。以昆中断裂(F3)为界,东昆仑造山带可以划分为东昆仑弧盆系和南昆仑结合带两个主要构造单元;以昆北断裂(F2)为界,东昆仑弧盆系可进一步划分为祁漫塔格构造带和北昆仑岩浆弧两个次级构造单元(图1)。研究区大地构造位置属北昆仑岩浆弧(图1、图2),经历了早古生代和晚古生代—早中生代多期强烈的构造运动,伴有多期岩浆活动与

成矿作用。区内出露的主要地层为古元古界金水口岩群、长城系小庙岩组、奥陶系祁漫塔格群。古元古界金水口岩群,是一套层状无序的中高级变质岩系,变质程度普遍以角闪岩相为主,岩性主要为片麻岩、斜长角闪岩、二辉麻粒岩、条带状大理岩等;长城系小庙岩组,主要岩石类型为—套石英岩、条带状大理岩、云母石英片岩,变质程度可达高绿片岩相,原岩建造是一套石英质砂岩、杂砂岩类沉积碎屑岩为主,少量黏土岩类、碳酸盐岩和中—基性火山岩的岩石组合,沉积环境应当为滨浅海相;奥陶系祁漫塔格群台缘浅滩相碎屑岩、碳酸盐岩及基性火山岩;上三叠统鄂拉山组陆相火山岩。区内侵入岩浆活动强烈,岩体多呈岩株状产出,空间上呈长条状、不规则状,多近东西向展布。区内断裂主要呈NW向展布,NE向次之,总体构造线方向为北西向。

2 岩石学、岩相学特征及样品采集

2.1 夏拉杂诺环斑花岗岩

夏拉杂诺岩体位于哈拉达乌环斑花岗岩体(428.5 Ma,吴少峰等,2012)东南侧,以岩株状呈近东西向展布,出露面积约68 km²,平面形态呈不规

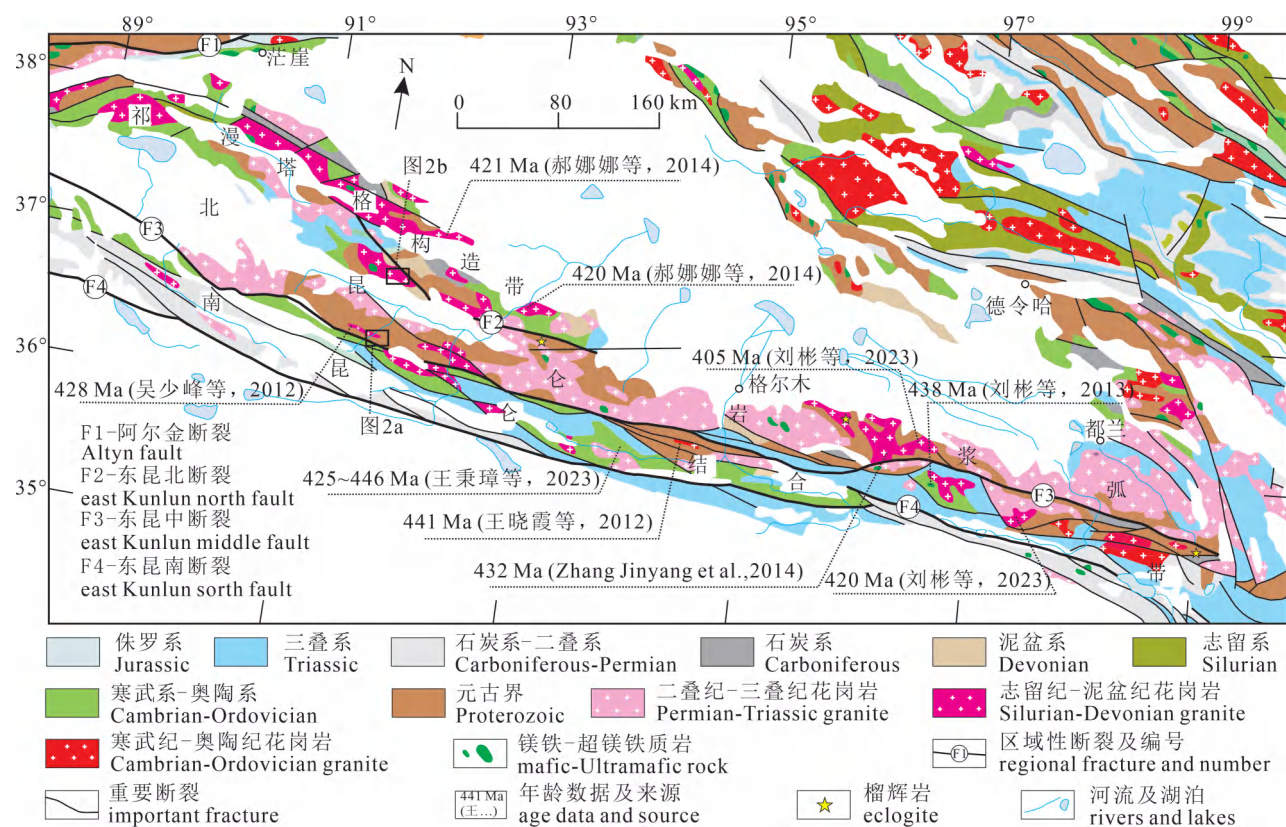


Fig. 1 Simplified geological map of Eastern Kunlun orogenic belt(modified from Wang Bingzhang et al., 2023&)

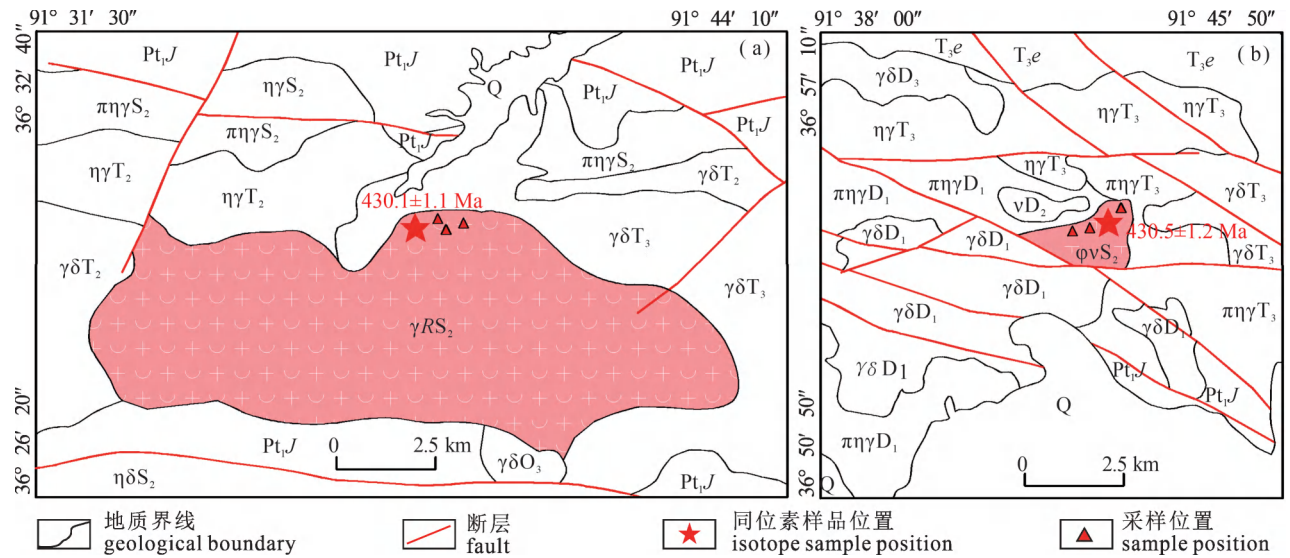


图 2 东昆仑造山带夏拉尕诺 (a) 和喀雅克登塔格 (b) 地区地质图

Fig. 2 The geological maps of Xialaganuo (a) and Kayakedengtage (b) areas, Eastern Kunlun orogenic belt

Q—第四系; T_3e —上三叠统鄂拉山组; Pt_1J —古元古界金水口岩群; $\pi\eta\gamma T_3$ —晚三叠世斑状二长花岗岩; $\eta\gamma T_3$ —晚三叠世二长花岗岩; $\gamma\delta T_3$ —晚三叠世花岗闪长岩; $\eta\gamma T_2$ —中三叠世二长花岗岩; $\gamma\delta T_2$ —中三叠世花岗闪长岩; $\gamma\delta D_3$ —晚泥盆世花岗闪长岩; vD_2 —中泥盆世辉长岩; $\pi\eta\gamma D_1$ —早泥盆世斑状二长花岗岩; $\gamma\delta D_1$ —早泥盆世花岗闪长岩; $\pi\eta\gamma S_2$ —中志留世斑状二长花岗岩; $\eta\gamma S_2$ —中志留世二长花岗岩; γRS_2 —中志留世环斑花岗岩; $\gamma\delta S_2$ —中志留世花岗闪长岩; ψS_2 —中志留世角闪辉长岩; $\gamma\delta O_3$ —晚奥陶世花岗闪长岩

Q—Quaternary; T_3e —Upper Triassic Elashan Formation; Pt_1J —Paleoproterozoic Jinshuiou Group; $\pi\eta\gamma T_3$ —Late Triassic porphyritic monzogranite; $\eta\gamma T_3$ —Late Triassic monzogranite; $\gamma\delta T_3$ —Late Triassic granodiorite; $\eta\gamma T_2$ —Middle Triassic monzogranite; $\gamma\delta T_2$ —Middle Triassic granodiorite; $\gamma\delta D_3$ —Late Devonian granodiorite; vD_2 —Middle Devonian gabbro; $\pi\eta\gamma D_1$ —Early Devonian porphyritic monzogranite; $\gamma\delta D_1$ —Early Devonian granodiorite; $\pi\eta\gamma S_2$ —Middle Silurian porphyritic monzogranite; $\eta\gamma S_2$ —Middle Silurian monzogranite; γRS_2 —Middle Silurian rapakivi granite; $\gamma\delta S_2$ —Middle Silurian granodiorite; ψS_2 —Middle Silurian hornblende—gabbro; $\gamma\delta O_3$ —Late Ordovician granodiorite

则状。根据野外露头特征可将环斑花岗岩分类两种类型:一种为灰红色椭圆状—卵状钾长石被 1~4 mm 的深灰色斜长石环带所包围(图 3a),另一种为灰白色椭圆状钾长石被 2~3 mm 的灰色斜长石环带所包围(图 3b),两种环斑花岗岩之间无明显的界线。围岩主要为古元古界金水口岩群、晚奥陶世花岗岩、中—晚三叠世花岗岩,以侵入接触为主,局部呈断层接触。侵入界线呈波状弯曲,岩石外接触带可见烘烤现象,内接触带形成几厘米不等的细粒边。

环斑花岗岩,灰红色、灰白色,环形似斑状结构、基质具花岗结构,块状构造。岩石由环形似斑晶(约 43%)和基质(约 57%)组成。似斑晶成分为钾长石,呈粒状,粒径 2.05~15 mm,部分颗粒边缘斜长石环形分布,两者接触边缘呈曲线凹凸不平,界限清晰。基质由钾长石、斜长石、石英、角闪石、黑云母及副矿物磷灰石、锆石、不透明矿物组成。钾长石他形粒状,粒径 0.75~1.51 mm,显条纹结构、格子双晶。斜长石半自形板状、粒状,粒径 0.73~1.71 mm,显钠长石聚片双晶,An 值不易测定,零星绢云

母化,轻微黏土化蚀变,部分分布在钾长石周围形成环斑。石英他形粒状,形态受空隙制约,粒径 0.35~1.15 mm。角闪石呈柱状、粒状,色泽为绿色,见角闪石式解理,粒径 0.38~1.85 mm。黑云母片状,常形成片状集合体,色泽为褐色,具绿泥石化蚀变现象。磷灰石、锆石及不透明矿物零星分布。

2.2 喀雅克登塔格角闪辉长岩

喀雅克登塔格岩体以岩株形式产出,平面形态呈不规则状,出露面积约 2.8 km²,岩性为灰绿色角闪辉长岩。岩体东侧被晚三叠世斑状二长花岗岩侵入,二者界线清楚,界面呈波状、锯齿状弯曲不平,倾向于角闪辉长岩一侧,倾角在 30°~60°间。北西侧与早泥盆世花岗岩呈侵入接触,南侧呈断层接触,断层向北倾,倾角 50°左右。

角闪辉长岩,深灰绿色,辉长结构,块状构造。主要矿物以斜长石、角闪石、辉石为主。斜长石含量 30%~45%,自形—半自形晶,中细粒柱状,粒径 0.3~3 mm,聚片双晶发育。角闪石含量 15%~25%,具多色性,呈柱状、粒状,粒径 0.71~1.45 mm,可见简

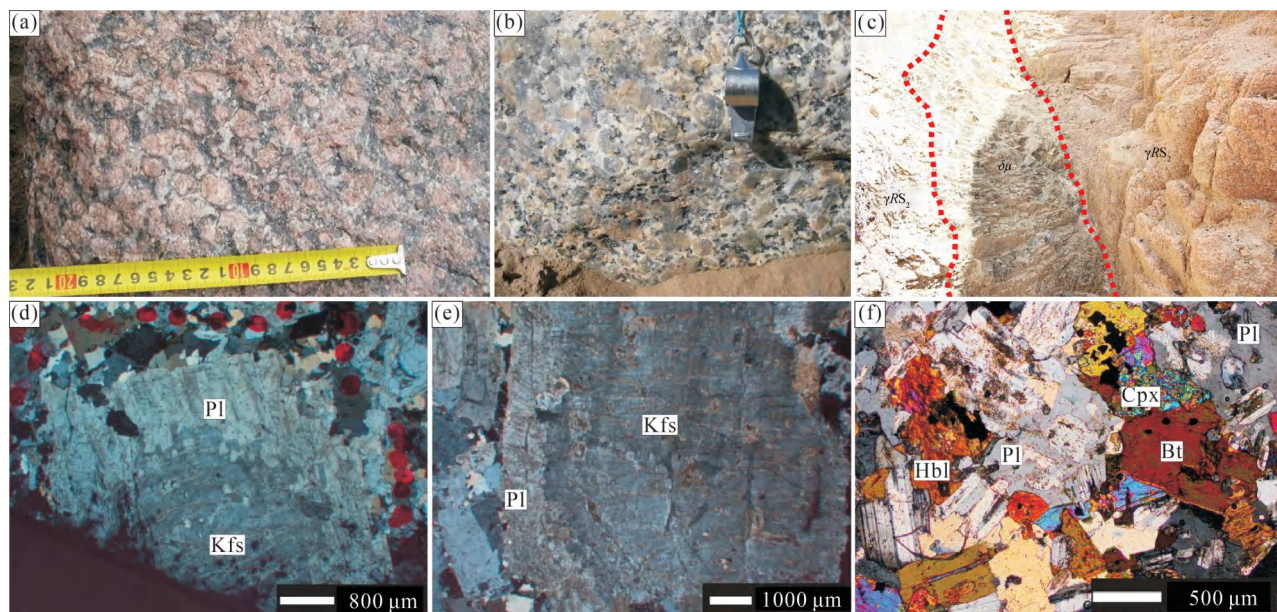


图3 东昆仑造山带夏拉尕诺环斑花岗岩和喀雅克登塔格角闪辉长岩野外特征及镜下照片:(a)、(b)环斑花岗岩野外特征;(c)斑状二长花岗岩体中发育闪长玢岩脉;(d)、(e)钾长石核与斜长石环边(正交偏光);(f)角闪辉长岩镜下照片(正交偏光)

Fig. 3 Field characteristics and microscopic photographs of Xialaganuo rapakivi granites and Kayakedengtage hornblende-gabbros in Eastern Kunlun orogenic belt: (a) and (b) field characteristics of rapakivi granites; (c) development of diorite porphyrite dykes in porphyritic monzogranite body; (d) and (e) potassium feldspar core and plagioclase rim (cross-polarized light); (f) microscopic photo of amphibole gabbro (cross-polarized light)

γR —环斑花岗岩; δu —闪长玢岩;Pl—斜长石;Kfs—钾长石;Hbl—角闪石;Bt—黑云母;Cpx—单斜辉石

γR — rapakivi granite; δu — diorite porphyrite; Pl — plagioclase; Kfs — potassium feldspar; Hbl — amphibole;

Bt — biotite; Cpx — clinopyroxene

单双晶,解理发育。辉石含量 20%~30%,呈短柱状、粒状,大小与角闪石相当,杂乱分布,解理发育,两组解理近于直交,表面有裂纹。黑云母片状,色泽为褐色,具绿泥石化蚀变现象。磁铁矿等不透明矿物零星分布。

2.3 样品

本文环斑花岗岩和角闪辉长岩样品分别采自夏拉尕诺和喀雅克登塔格地区地表露头,岩石新鲜。环斑花岗岩中采集了锆石 U-Pb 测年的样品 1 件,地理坐标为 $E91^{\circ}37'53.70''$, $N36^{\circ}29'59.70''$,同时采集了主、微量元素样品 4 套, Sr—Nd—Pb 同位素样品 3 件;角闪辉长岩中采集了锆石 U-Pb 测年的样品 1 件,地理坐标为 $E91^{\circ}42'52.88''$, $N36^{\circ}54'34.72''$,同时采集了主、微量元素样品 4 套, Sr—Nd—Pb 同位素样品 2 件,具体位置见图 2。

3 分析方法

锆石 U-Pb 同位素测年在天津地质矿产研究所

实验室完成。首先将岩石样品粉碎至 $100\ \mu\text{m}$ 左右,利用重液和电磁法分选,然后在双目镜下选择透明、无包裹体具有代表性的锆石颗粒,将待测的锆石颗粒制成环氧树脂样品靶,打磨抛光并使其露出中心部位,进行 CL 显微结构观察,在此基础上选择合适的锆石颗粒进行 U-Pb 年龄测定,利用激光烧蚀多接收器等离子体质谱仪(LA-MC-ICP-MS)进行了微区原位 U-Pb 同位素测定,采用的激光束斑直径为 $25\ \mu\text{m}$ 。激光剥蚀过程中采用氦气作载气、氩气为补偿气以调节灵敏度,二者在进入 ICP 之前通过一个匀化混合器混合。每个样品点分辨包括大约 20~30 s 的空白信号和 50 s 的样品信号。U-Pb 同位素定年中采用锆石标准 91500 和 Plesovice 作为外标进行同位素分馏校正。锆石微量元素含量利用 SRM610 作为多外标、Si 作内标的方法进行定量计算。数据处理及作图采用 ICPMSDataCal 和 ISOPLLOT 程序。详细测试流程见李怀坤等(2009)。岩石化学分析在武汉岩矿测试中心完成。主元素分

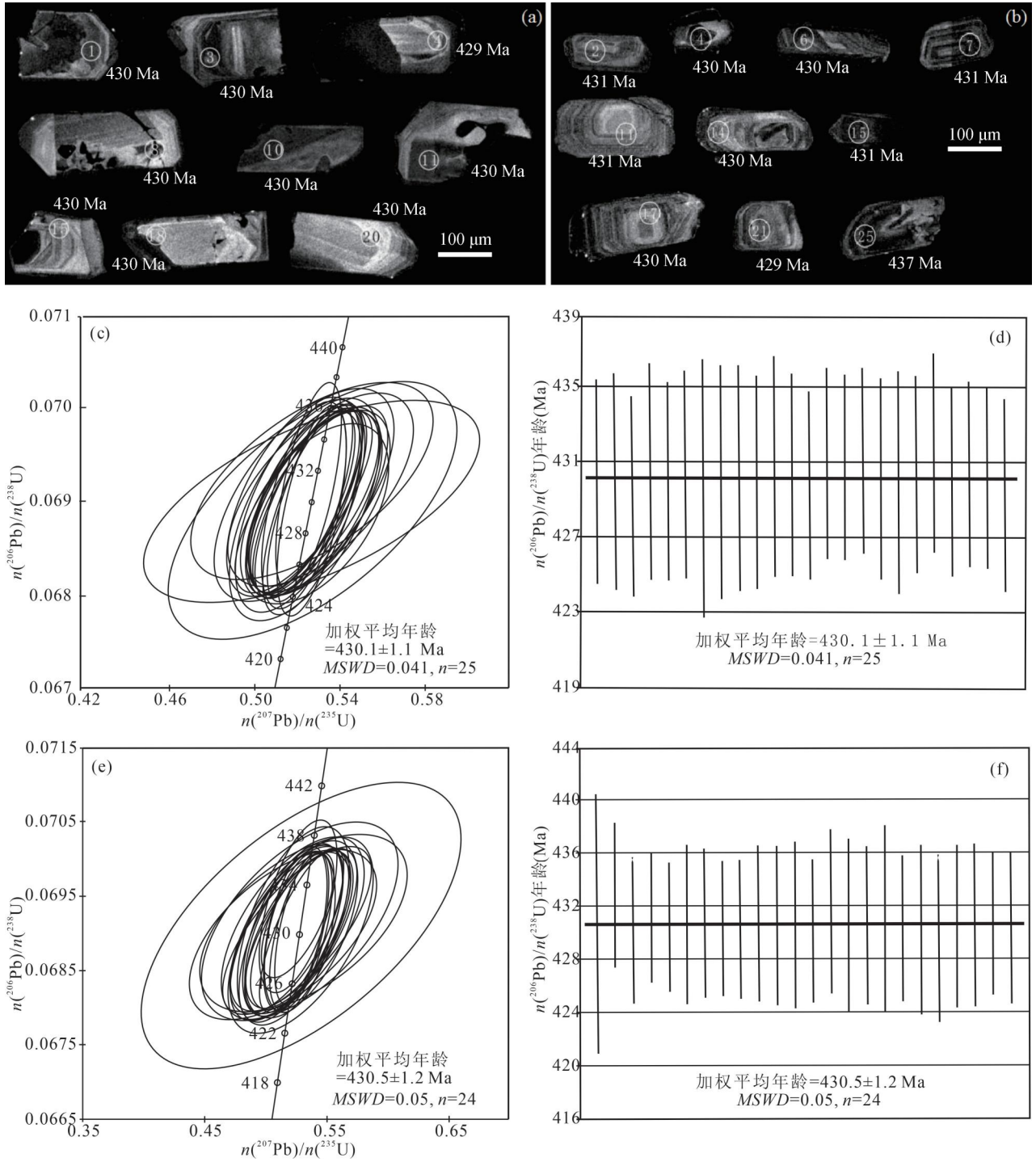


图 4 东昆仑造山带夏拉尕诺环斑花岗岩(a,c,d)和喀雅克登塔格角闪辉长岩(b,e,f)锆石阴极发光图像及年龄谐和图
 Fig. 4 Zircon CL images and concordia diagrams of Xialaganuo rapakivi granite(a,c,d) and Kayakedengtage hornblende—gabbro(b,e,f) in Eastern Kunlun orogenic belt

析采用 X-射线荧光光谱法(XRF), 相对误差小于 5%, 其中 Fe_2O_3 的计算公式为 $Fe_2O_3 = Fe_2O_3^T - FeO \times 1.11134$ 。用于稀土、微量元素分析的样品采用酸溶法制备, 然后采用原子发射光谱法(ICP-AES)和电感耦合等离子质谱法(ICP-MS)完成稀土、微量元素

分析, 相对误差小于 5%~10%。
 全岩 Sr—Nd—Pb 同位素测试使用 Thermo Fisher Scientific 公司多接收电感耦合等离子体质谱仪 Neptune Plus MC-ICP-MS 分别测定 $n(^{87}Sr)/n(^{86}Sr)$ 值和 $n(^{143}Nd)/n(^{144}Nd)$ 值, 用 $n(^{88}Sr)/n(^{86}Sr)$

表 1 东昆仑造山带夏拉诺环斑花岗岩和喀雅克登塔格角闪辉长岩 LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年结果
 Table 1 LA-MC-ICP-MS U-Pb dating results of the zircons from Xialaganuo rapakivi granite and Kayakedengtage hornblende—gabbro in Eastern Kunlun orogenic belt

测点号	元素含量 ($\times 10^{-6}$)			Th/U	同位素比值						同位素年龄 (Ma)						谐和度 (%)
	Pb	U	Th		$n(^{207}\text{Pb})/n(^{235}\text{U})$		$n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$		$n(^{207}\text{Pb})/n(^{206}\text{Pb})$		$n(^{207}\text{Pb})/n(^{235}\text{U})$		$n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$		$n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$		
					测值	1 σ	测值	1 σ	测值	1 σ	测值	1 σ	测值	1 σ	测值	1 σ	
环斑花岗岩 (JD011)																	
1	60.0	800	564	0.71	0.0554	0.0007	0.5268	0.0066	0.0690	0.0004	428	5	430	5	430	2	100.0
2	24.0	312	216	0.69	0.0555	0.0010	0.5274	0.0101	0.0690	0.0005	431	8	430	8	430	3	100.0
3	28.0	375	185	0.49	0.0788	0.0016	0.7493	0.0184	0.0690	0.0005	1167	24	568	14	430	3	132.1
4	26.0	346	247	0.71	0.0554	0.0010	0.5257	0.0096	0.0688	0.0004	428	8	429	8	429	2	100.0
5	12.0	160	94.0	0.59	0.0554	0.0019	0.5274	0.0189	0.0691	0.0005	428	15	430	15	430	3	100.0
6	25.0	343	207	0.60	0.0554	0.0009	0.5265	0.0085	0.0690	0.0004	427	7	429	7	430	2	99.8
7	21.0	277	203	0.73	0.0553	0.0011	0.5266	0.0107	0.0690	0.0004	426	8	430	9	430	2	100.0
8	11.0	169	38.0	0.22	0.0555	0.0029	0.5271	0.0281	0.0689	0.0006	431	23	430	23	430	4	100.0
9	14.0	188	157	0.84	0.0554	0.0017	0.5267	0.0165	0.0690	0.0005	428	13	430	13	430	3	100.0
10	22.0	295	204	0.69	0.0554	0.0010	0.5269	0.0102	0.0690	0.0005	428	8	430	8	430	3	100.0
11	35.0	464	404	0.87	0.0555	0.0008	0.5278	0.0074	0.0689	0.0005	433	6	430	6	430	3	100.0
12	48.0	677	319	0.47	0.0553	0.0006	0.5270	0.0063	0.0691	0.0005	425	5	430	5	431	3	99.8
13	12.0	162	132	0.81	0.0554	0.0015	0.5271	0.0149	0.0690	0.0004	428	12	430	12	430	2	100.0
14	22.0	314	191	0.61	0.0555	0.0012	0.5275	0.0112	0.0689	0.0004	433	9	430	9	430	2	100.0
15	23.0	328	171	0.52	0.0552	0.0009	0.5264	0.0088	0.0691	0.0004	422	7	429	7	431	2	99.5
16	43.0	613	409	0.67	0.0554	0.0010	0.5280	0.0095	0.0691	0.0004	430	8	431	8	431	2	100.0
17	36.0	503	301	0.60	0.0553	0.0008	0.5270	0.0074	0.0691	0.0004	424	6	430	6	431	2	99.8
18	16.0	214	150	0.70	0.0555	0.0034	0.5274	0.0326	0.0690	0.0004	431	26	430	27	430	2	100.0
19	26.0	408	25.0	0.06	0.0555	0.0007	0.5276	0.0072	0.0689	0.0005	433	5	430	6	430	3	100.0
20	15.0	206	132	0.64	0.0553	0.0017	0.5267	0.0167	0.0690	0.0004	426	13	430	14	430	2	100.0
21	15.0	195	161	0.83	0.0552	0.0024	0.5272	0.0233	0.0692	0.0004	422	18	430	19	431	2	99.8
22	19.0	250	201	0.80	0.0557	0.0014	0.5291	0.0132	0.0689	0.0004	439	11	431	11	430	2	100.2
23	35.0	485	310	0.64	0.0555	0.0007	0.5276	0.0070	0.0690	0.0004	431	5	430	6	430	2	100.0
24	42.0	586	308	0.53	0.0555	0.0008	0.5276	0.0075	0.0690	0.0004	431	6	430	6	430	2	100.0
25	30.0	414	248	0.60	0.0554	0.0015	0.5259	0.0143	0.0688	0.0004	429	12	429	12	429	2	100.0
角闪辉长岩 (JD023)																	
1	40.0	498	149	0.30	0.0619	0.0010	0.6661	0.0115	0.0780	0.0006	671	11	518	9	484	4	107.0
2	8.00	97.0	73.0	0.76	0.0554	0.0053	0.5277	0.0539	0.0691	0.0008	428	41	430	44	431	5	99.8
3	39.0	454	390	0.86	0.0550	0.0013	0.5266	0.0127	0.0694	0.0004	412	10	430	10	433	2	99.3

测点号	元素含量($\times 10^{-6}$)			Th/U	同位素比值						同位素年龄(Ma)						谐和度 (%)
	Pb	U	Th		$n(^{207}\text{Pb})/n(^{206}\text{Pb})$		$n(^{207}\text{Pb})/n(^{235}\text{U})$		$n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$		$n(^{207}\text{Pb})/n(^{206}\text{Pb})$		$n(^{207}\text{Pb})/n(^{235}\text{U})$		$n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$		
					测值	1 σ	测值	1 σ	测值	1 σ	测值	1 σ	测值	1 σ	测值	1 σ	
4	11.0	139	82.0	0.59	0.0555	0.0027	0.5278	0.0259	0.0690	0.0004	432	21	430	21	430	2	100.0
5	29.0	336	326	0.97	0.0553	0.0013	0.5277	0.0126	0.0692	0.0004	426	10	430	10	431	2	99.8
6	39.0	539	236	0.44	0.0556	0.0009	0.5294	0.0084	0.0690	0.0004	437	7	431	7	430	2	100.2
7	45.0	529	471	0.89	0.0554	0.0011	0.5274	0.0127	0.0691	0.0005	428	8	430	10	431	3	99.8
8	13.0	159	165	1.04	0.0553	0.0023	0.5265	0.0220	0.0691	0.0005	423	18	430	18	431	3	99.8
9	40.0	465	530	1.14	0.0555	0.0009	0.5277	0.0090	0.0690	0.0004	431	7	430	7	430	2	100.0
10	25.0	296	341	1.15	0.0556	0.0012	0.5294	0.0115	0.0690	0.0004	438	9	431	9	430	2	100.2
11	16.0	233	74.0	0.32	0.0554	0.0015	0.5273	0.0156	0.0691	0.0005	427	12	430	13	431	3	99.8
12	27.0	327	326	1.00	0.0556	0.0018	0.5295	0.0184	0.0691	0.0005	437	14	431	15	430	3	100.2
13	11.0	137	126	0.92	0.0554	0.0027	0.5275	0.0265	0.0691	0.0005	428	21	430	22	430	3	100.0
14	27.0	297	480	1.62	0.0556	0.0012	0.5292	0.0118	0.0690	0.0004	438	9	431	10	430	2	100.2
15	15.0	177	193	1.09	0.0550	0.0018	0.5252	0.0174	0.0692	0.0005	413	14	429	14	431	3	99.5
16	5.00	74.0	37.0	0.51	0.0553	0.0037	0.5265	0.0358	0.0691	0.0005	424	28	429	29	430	3	99.8
17	7.00	109	30.0	0.27	0.0554	0.0026	0.5272	0.0254	0.0690	0.0005	427	20	430	21	430	3	100.0
18	5.00	65.0	35.0	0.54	0.0555	0.0033	0.5289	0.0318	0.0691	0.0006	431	26	431	26	431	4	100.0
19	26.0	410	25.0	0.06	0.0556	0.0009	0.5287	0.0087	0.0690	0.0004	435	7	431	7	430	2	100.2
20	10.0	128	157	1.23	0.0554	0.0021	0.5273	0.0200	0.0690	0.0005	430	16	430	16	430	3	100.0
21	7.00	97.0	103	1.06	0.0555	0.0024	0.5274	0.0235	0.0689	0.0005	433	19	430	19	429	3	100.2
22	8.00	124	60.0	0.49	0.0554	0.0023	0.5271	0.0218	0.0690	0.0005	428	18	430	18	430	3	100.0
23	8.00	100	112	1.12	0.0554	0.0027	0.5273	0.0257	0.0690	0.0005	428	21	430	21	430	3	100.0
24	23.0	303	366	1.21	0.0555	0.0011	0.5288	0.0104	0.0691	0.0004	434	9	431	8	430	2	100.2
25	28.0	410	214	0.52	0.0556	0.0009	0.5290	0.0090	0.0690	0.0005	436	7	431	7	430	3	100.2

$n(^{86}\text{Sr})$ 值 (8.373209) 和 $n(^{143}\text{Nd})/n(^{144}\text{Nd})$ 值 (0.7218) 对测定的 $n(^{87}\text{Sr})/n(^{86}\text{Sr})$ 值和 $n(^{143}\text{Nd})/n(^{144}\text{Nd})$ 值进行校正, $n(^{87}\text{Sr})/n(^{86}\text{Sr})$ 值和 $n(^{143}\text{Nd})/n(^{144}\text{Nd})$ 值的不确定度为 2σ 。详细的方法流程见李潮峰等(2011)。

4 分析结果

4.1 锆石 U-Pb 年龄

锆石颗粒在透射光下均为无色或浅黄褐色,大部分为自形晶,主要为短柱状—长柱状,长 120~310 μm ,长短轴比位于 1.2~2.8 之间。大部分锆石阴极发光图像显示具有很好的振荡环带结构(图 4),为典型的岩浆结晶锆石。环斑花岗岩和角闪辉长岩的 U-Pb 同位素分析结果见表 1。

环斑花岗岩(JD011)中 25 颗锆石的 Th/U 值变化于 0.06~0.87 之间, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄介于 431~429 Ma 之间,加权平均年龄为 430.1 ± 1.1 Ma ($MSWD = 0.041$),代表酸性岩浆结晶年龄。角闪辉长岩(JD023)中 24 颗锆石的 Th/U 值变化于 0.06~1.62 之间, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄介于 433~429 之间(除 1 颗锆石为捕虏晶,表面年龄谐和度较低外),加权平均年龄为 430.5 ± 1.2 Ma ($MSWD = 0.05$),代表基性岩浆结晶年龄。

4.2 主、微量元素

环斑花岗岩和角闪辉长岩主、微量元素分析结果见表 2。夏拉尕诺环斑花岗岩 SiO_2 含量介于 65.70%~70.08% 之间,平均值为 68.17%; Na_2O 含量变化于 2.55%~3.08% 之间,平均值为 2.74%; K_2O 含量介于 5.09%~6.04% 之间,平均值

表2 夏拉杂诺环斑花岗岩和喀雅克登塔格角闪辉长岩主量元素(%)及微量元素($\times 10^{-6}$)分析结果

Table 2 Analytical results of major (%) and trace elements($\times 10^{-6}$) of Xialaganuo rapakivi granites and Kayakedengtage hornblende-gabbros

样号	GS011-1	GS4116	GS011-2	GS4208	GS023-1	GS023-2	PM301GS1	GS3146
岩性	环斑花岗岩				角闪辉长岩			
SiO ₂	70.08	70.05	66.84	65.70	51.23	51.04	50.08	49.79
TiO ₂	0.46	0.53	0.64	0.74	0.50	0.22	0.34	0.48
Al ₂ O ₃	13.36	13.77	14.07	14.86	17.91	22.51	15.67	18.04
Fe ₂ O ₃	0.49	1.28	1.36	1.41	0.70	0.40	1.05	1.09
FeO	2.93	3.00	4.13	4.30	4.83	3.47	5.00	4.60
TFeO	3.37	4.15	5.35	5.57	5.46	3.83	5.94	5.58
MnO	0.05	0.06	0.08	0.09	0.10	0.07	0.12	0.11
MgO	0.57	0.43	0.55	0.69	7.75	5.46	10.68	8.48
CaO	1.63	1.62	2.43	2.51	12.06	11.94	11.74	12.60
Na ₂ O	2.66	2.55	3.08	2.65	2.26	2.57	1.64	2.09
K ₂ O	6.04	5.09	5.43	5.53	0.27	0.40	0.50	0.40
P ₂ O ₅	0.13	0.12	0.19	0.20	0.03	0.03	0.02	0.04
A/NK	1.22	1.42	1.29	1.44	4.47	4.83	4.84	4.66
A/CNK	0.96	1.09	0.92	1.00	0.69	0.85	0.64	0.67
La	75.5	114	76.6	72.4	2.18	3.99	4.39	4.46
Ce	156	232	172	150	7.13	9.85	10.1	10.7
Pr	20.2	28.2	21.8	18.4	0.960	1.09	1.43	1.47
Nd	80.6	99.9	87.9	68.7	4.54	4.06	6.31	7.23
Sm	15.4	19.4	18.7	13.4	1.67	1.07	1.81	2.06
Eu	2.15	1.98	2.89	2.74	0.858	0.651	0.710	0.900
Gd	13.7	17.1	16.1	12.3	1.99	1.14	2.23	2.56
Tb	1.90	2.68	2.42	1.88	0.389	0.200	0.360	0.430
Dy	10.4	14.9	14.0	10.2	2.50	1.17	2.22	2.59
Ho	2.02	2.87	2.67	1.95	0.512	0.228	0.480	0.550
Er	5.61	7.87	6.97	5.43	1.36	0.641	1.34	1.45
Tm	0.806	1.18	1.00	0.813	0.206	0.101	0.200	0.230
Yb	5.14	7.25	6.59	5.08	1.21	0.631	1.21	1.42
Lu	0.762	1.10	0.971	0.809	0.168	0.0900	0.180	0.220
ΣREE	390.19	550.43	430.61	364.10	25.67	24.91	33.05	36.29
LREE/HREE	8.67	9.02	7.49	8.47	2.08	4.93	3.02	2.84
δEu	0.44	0.33	0.50	0.64	1.44	1.79	1.08	1.20
(La/Yb) _N	9.90	10.60	7.84	9.61	1.21	4.26	2.45	2.12
Sr	180	115	133	153	689	325	456	422
Rb	157	197	164	157	67	61.5	54.1	58.8
Ba	885	617	988	1007	54.0	96.6	106	81.0
Th	26.3	40.0	32.6	19.0	6.88	4.19	3.84	3.20
Ta	1.78	2.20	2.32	3.19	0.310	0.160	0.480	0.220
Nb	25.5	32.4	32.9	33.3	2.60	2.59	3.60	1.62
Zr	615	571	806	675	38.8	32.1	34.6	38.3
Hf	16.0	22.8	21.3	23.5	0.910	0.560	1.00	1.00
Y	52.5	73.1	66.0	51.0	13.0	6.30	12.2	14.4
Zn	103	114	96.6	115	40.7	116	60.7	52.3
Rb/Sr	0.87	1.71	1.23	1.03	0.10	0.19	0.12	0.14
lnD _{Zr}	6.6927	6.7669	6.4222	6.5996				
t _{Zr} (°C)	904	913	918	910				

注:A/CNK、A/NK 计算公式见邓晋福等,2015。t_{Zr} 计算据 Watson and Harrison,1983;参见王楠等,2017;熊双才等,2019。

5.52%,属钾玄岩系列(图5b),K₂O/Na₂O 值平均值为2.03。Al₂O₃ 含量为13.36%~14.86%,平均值14.02%,铝饱和指数 A/CNK 介于0.92~1.09 之间,为准铝质—弱过铝质花岗岩。喀雅克登塔格角闪辉长岩 SiO₂ 含量介于49.79%~51.23%之间,平均值为50.54%,在 TAS 图解中位于辉长岩区(图5a);MgO 含量介于5.46%~10.68% 之间,平均值为8.09%;Al₂O₃ 含量为15.67%~22.51%,平均值为18.53%;K₂O+Na₂O 含量为2.14%~2.97%;在 K₂O—SiO₂ 图解上落入低钾(拉斑)系列(图5b)。夏拉杂诺与喀雅克登塔格岩体 SiO₂ 含量在51.23%~65.70%之间出现明显的间断,区域上未发现同时期的中性岩浆岩,显示出双峰式侵入岩特征。

环斑花岗岩稀土总量高,为 $364.10 \times 10^{-6} \sim 550.43 \times 10^{-6}$,平均值为 433.83×10^{-6} ;轻重稀土比值(LREE/HREE)为7.49~9.02,(La/Yb)_N = 7.84~10.60,δEu = 0.33~0.64。在球粒陨石标准化配分图解上(图6a),环斑花岗岩显示右倾的轻稀土富集型配分曲线,其中轻稀土元素曲线向右倾斜,重稀土元素曲线平缓,具有明显的负Eu 异常。各曲线近于平行,反映出同源岩浆演化的特点。在微量元素原始地幔标准化蛛网图上(图6b),环斑花岗岩相对富集 Rb、Th、K 等大离子亲石元素,而亏损 Nb、Ta、Sr、P、Ti 等元素。Eu、Sr 的负异常可能由于部分熔融过程

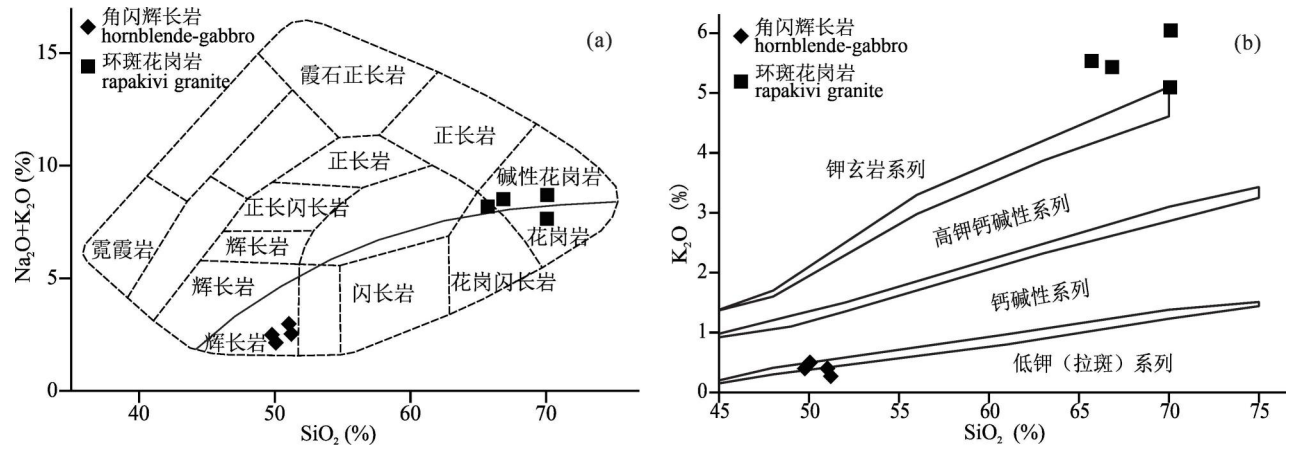


图 5 夏拉杂诺环斑花岗岩和喀雅克登塔格角闪辉长岩 TAS 图解(a) (据 Middlemost, 1994)、
K₂O—SiO₂ 图解(b) (据 Rickwood, 1989)

Fig. 5 TAS diagram (a) (after Middlemost, 1994) and K₂O—SiO₂ diagram(b) (after Rickwood, 1989) of
Xialaganuo rapakivi granites and Kayakedengtage hornblende-gabbros

中源区残余斜长石或母岩浆演化过程中分异出斜长石所引起(何成, 2018)。

角闪辉长岩稀土总量低, 为 $24.91 \times 10^{-6} \sim 36.29 \times 10^{-6}$, 平均值为 29.98×10^{-6} ; 轻重稀土比值(LREE/HREE)为 2.08~4.93, $(La/Yb)_N = 1.21 \sim 4.26$, $\delta Eu = 1.08 \sim 1.79$ 。稀土配分曲线较平缓(图 6a), 具弱正 Eu 异常。在微量元素原始地幔标准化蛛网图上(图 6b), 角闪辉长岩相对富集 Rb、Th、K、Sr 等大离子亲石元素, 而亏损 Nb、P、Ti 等高场强元素。

4.3 全岩 Sr—Nd—Pb 同位素

本文对 3 件环斑花岗岩和 2 件角闪辉长岩样品进行了全岩 Sr—Nd—Pb 同位素分析, 测试结果见表 3、表 4。环斑花岗岩 $n(^{143}Nd)/n(^{144}Nd)$ 为

0.512176 ~ 0.512207, $[n(^{87}Sr)/n(^{86}Sr)]_i$ 为 0.712932~0.724711, $\epsilon_{Nd}(t) = -4.60 \sim -5.61$, $f_{Sm/Nd}$ 为 -0.26 ~ -0.38, 二阶段模式年龄 T_{DM2} 为 1622 ~ 1540 Ma。角闪辉长岩 $n(^{143}Nd)/n(^{144}Nd)$ 为 0.512291 ~ 0.512353, $[n(^{87}Sr)/n(^{86}Sr)]_i$ 为 0.709000~0.723957, $\epsilon_{Nd}(t) = -4.82 \sim -5.89$, $f_{Sm/Nd}$ 为 -0.18 ~ 0.03, 二阶段模式年龄 T_{DM2} 为 1646 ~ 1559 Ma。

环斑花岗岩和角闪辉长岩 Pb 同位素组成见表 4。环斑花岗岩的 $n(^{206}Pb)/n(^{204}Pb)$ 为 18.7238 ~ 19.3154, $n(^{207}Pb)/n(^{204}Pb)$ 为 15.5976 ~ 15.6316, $n(^{208}Pb)/n(^{204}Pb)$ 为 38.8387~39.0242。角闪辉长岩的 $n(^{206}Pb)/n(^{204}Pb)$ 为 18.4121 ~ 18.5137,

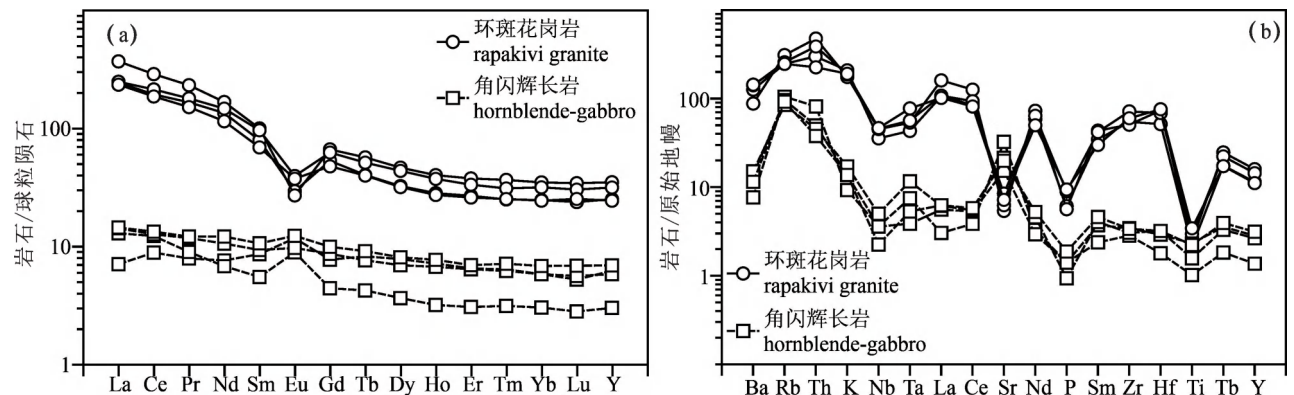


图 6 夏拉杂诺环斑花岗岩和喀雅克登塔格角闪辉长岩稀土(a)、微量(b)元素配分曲线(据 Sun and McDonough, 1989)
Fig. 6 Chondrite-normalized REE and primitive mantle-normalized trace element diagrams of Xialaganuo rapakivi granites
and Kayakedengtage hornblende-gabbros (after Sun and McDonough, 1989)

$n(^{207}\text{Pb})/n(^{204}\text{Pb})$ 为 15.6500~15.6667, $n(^{208}\text{Pb})/n(^{204}\text{Pb})$ 为 38.1351~38.4344。

5 讨论

5.1 环斑花岗岩成因及源区

芬兰地质学家 Sederholm 根据芬兰维堡岩体在一百多年前首次提出环斑花岗岩的概念,该岩体是最典型的环斑花岗岩。环斑结构是环斑花岗岩的典型特征, Vormaa (1976) 认为环斑结构中具有斜长石外壳的碱性长石巨晶应是卵球状的,碱性长石和石英具两个世代,这是单纯岩相学定义;而 Rämö 和 Haapala (1995) 认为凡是碱性长石巨晶具斜长石外壳者均为环斑结构,环斑花岗岩不仅具有广义环斑结构还在地球化学上具有 A 型花岗岩特征、岩石组合上具有双峰式特征、产于非造山带的拉张环境中。然而近年来随着环斑花岗岩研究取得了一些重要进展,发现环斑花岗岩可以产在造山带中,例如,乌拉尔及巴西与岛弧有关的环斑花岗岩产于造山带,我国秦岭—昆仑造山带中也发现了环斑花岗岩(卢欣祥等,2007)。

从表 2 中可以看出,夏拉杂诺环斑花岗岩具有较高的 $\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$ 含量(7.64%~8.70%,平均值为 8.26%)、 TFeO/MgO 值(5.91~9.73,平均值为

8.34) 以及较低的 MgO 含量(0.43%~0.69%,平均值为 0.56%) 和 CaO 含量(1.62%~2.51%,平均值为 2.05%),这些特征与 A 型花岗岩特征(徐夕生和邱检生,2010) 十分相符。环斑花岗岩具有较高的 Zr ($571 \times 10^{-6} \sim 806 \times 10^{-6}$)、 Nb ($25.5 \times 10^{-6} \sim 33.3 \times 10^{-6}$)、 Y ($51 \times 10^{-6} \sim 73.1 \times 10^{-6}$)、 Ce ($150 \times 10^{-6} \sim 232 \times 10^{-6}$)、 Zn ($96 \times 10^{-6} \sim 115 \times 10^{-6}$) 含量,这与典型的 A 型花岗岩特征(Whalen et al., 1987) 也相同。在 Eby (1992) 和 Whalen (1987) 的判别图解(图 7) 上,样品落入 A 型花岗岩区。通过计算得到环斑花岗岩的锆石饱和温度较高,为 904~918°C,平均 911°C,这符合 A 型花岗岩本质是高温花岗岩的特征(结晶温度一般在 800°C 以上, King et al., 1997; 刘昌实等, 2003)。总体来看环斑花岗岩与 A 型花岗岩的特征一致。由此可见,夏拉杂诺环斑花岗岩具有典型环斑花岗岩的岩相学和地球化学特征。

夏拉杂诺环斑花岗岩 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 值(1.76~2.27) 大于 1,与陆壳沉积物熔融形成的花岗岩特征(路凤香和桑隆康,2002) 一致; Rb/Sr 值为 0.87~1.71,与壳源岩浆特征相吻合(壳源岩浆大于 0.5, Taylor and McLennan, 1985); 具有较高的 $[n(^{87}\text{Sr})/n(^{86}\text{Sr})]_i$ 值(0.712932~0.724711) 和负的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值(-4.60~-5.61),这些特征均表明岩浆来源于地

表 3 夏拉杂诺环斑花岗岩和喀雅克登塔格角闪辉长岩 Sr—Nd 同位素组成

Table 3 Sr—Nd isotopic composition of Xialaganuo rapakivi granites and Kayakedengtage hornblende-gabbros

样品号	$\frac{n(^{87}\text{Rb})}{n(^{86}\text{Sr})}$	$\frac{n(^{87}\text{Sr})}{n(^{86}\text{Sr})} \pm 2\sigma$	$\left[\frac{n(^{87}\text{Sr})}{n(^{86}\text{Sr})}\right]_i$	$\frac{n(^{147}\text{Sm})}{n(^{144}\text{Nd})}$	$\frac{n(^{143}\text{Nd})}{n(^{144}\text{Nd})} \pm 2\sigma$	$\left[\frac{n(^{143}\text{Nd})}{n(^{144}\text{Nd})}\right]_i$	T_{DM2} (Ma)	$\epsilon_{\text{Nd}}(t)$	$f_{\text{Sm}/\text{Nd}}$	t (Ma)
GS011-1	2.491	0.739974±0.000003	0.724711	0.1449	0.512205±0.000002	0.511797	1622	-5.61	-0.26	430.1
GS011-2	3.378	0.737669±0.000002	0.716973	0.1219	0.512176±0.000004	0.511833	1566	-4.91	-0.38	430.1
GS4116	7.072	0.756258±0.000003	0.712932	0.1273	0.512207±0.000001	0.511848	1540	-4.60	-0.35	430.1
GS023-1	0.1221	0.709749±0.000002	0.709000	0.2026	0.512353±0.000003	0.511782	1646	-5.89	0.03	430.5
GS023-2	0.09060	0.724513±0.000004	0.723957	0.1612	0.512291±0.000006	0.511837	1559	-4.82	-0.18	430.5

注: $\lambda_{\text{Rb}} = 1.42 \times 10^{-11}/\text{a}$, $\lambda_{\text{Sm}} = 6.54 \times 10^{-12}/\text{a}$; $[n(^{143}\text{Nd})/n(^{144}\text{Nd})]_{\text{CHUR}} = 0.512638$, $[n(^{147}\text{Sm})/n(^{144}\text{Nd})]_{\text{CHUR}} = 0.1967$, $[n(^{143}\text{Nd})/n(^{144}\text{Nd})]_{\text{DM}} = 0.51315$, $[n(^{147}\text{Sm})/n(^{144}\text{Nd})]_{\text{DM}} = 0.2137$ 。

表 4 夏拉杂诺环斑花岗岩和喀雅克登塔格角闪辉长岩 Pb 同位素组成

Table 4 Pb isotopic composition of Xialaganuo rapakivi granites and Kayakedengtage hornblende—gabbros

样品号	U	Th	Pb	$\frac{n(^{206}\text{Pb})}{n(^{204}\text{Pb})}$	$\frac{n(^{207}\text{Pb})}{n(^{204}\text{Pb})}$	$\frac{n(^{208}\text{Pb})}{n(^{204}\text{Pb})}$	$\left[\frac{n(^{206}\text{Pb})}{n(^{204}\text{Pb})}\right]_i$	$\left[\frac{n(^{207}\text{Pb})}{n(^{204}\text{Pb})}\right]_i$	$\left[\frac{n(^{208}\text{Pb})}{n(^{204}\text{Pb})}\right]_i$	t (Ma)
	$(\times 10^{-6})$									
GS011-1	6.10	26.3	33.2	18.8528	15.5989	39.0242	18.0368	15.5547	37.8909	430.1
GS011-2	5.00	32.6	32.6	18.7238	15.5976	38.8387	18.0456	15.5610	37.4143	430.1
GS4116	0.190	2.26	3.05	19.3154	15.6316	38.8627	19.0375	15.6166	37.7979	430.1
GS023-1	0.650	6.88	15.9	18.5137	15.6500	38.4344	18.3341	15.6403	37.8221	430.5
GS023-2	0.650	4.19	23.0	18.4121	15.6667	38.1351	18.2886	15.6600	37.8787	430.5

注: $\lambda^{238}\text{U} = 1.55125 \times 10^{-10}/\text{a}$, $\lambda^{235}\text{U} = 9.8485 \times 10^{-10}/\text{a}$, $\lambda^{232}\text{Th} = 4.9475 \times 10^{-11}/\text{a}$ 。

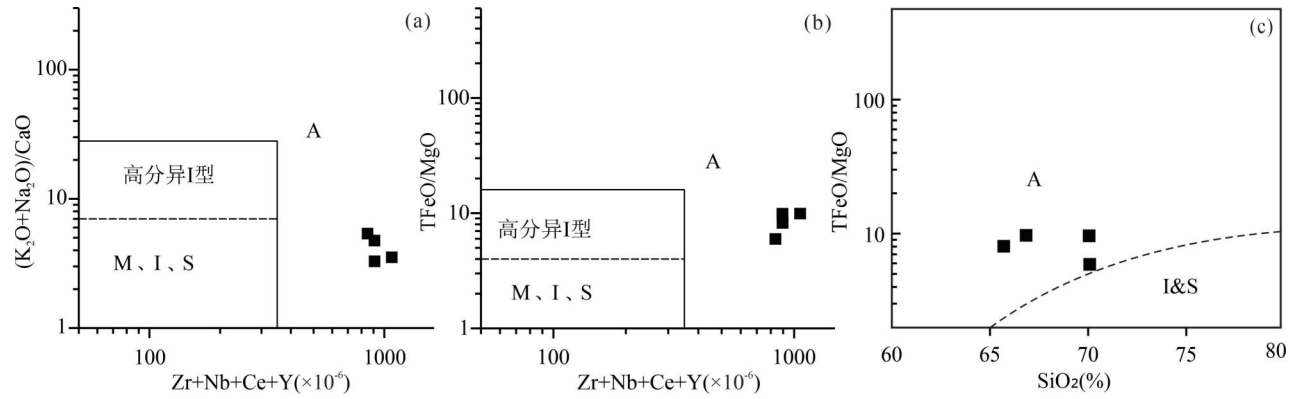


图 7 夏拉杂诺环斑花岗岩判别图解 [(a)(b) 据 Whalen et al., 1987; (c) 据徐夕生和邱检生, 2010]
 Fig. 7 Discrimination diagrams of Xialaganuo rapakivi granites [(a) (b) after Whalen et al., 1987; (c) after Xu Xisheng and Qiu Jiansheng, 2010]

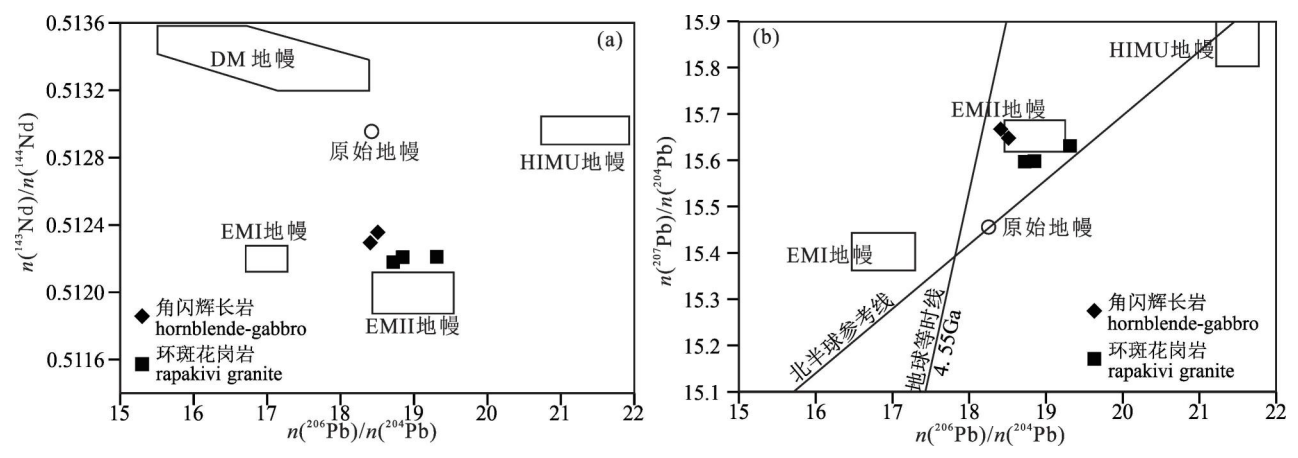


图 8 夏拉杂诺环斑花岗岩和喀雅克登塔格角闪辉长岩 Nd—Pb 同位素图解 (a) 和 Pb 同位素图解 (b)
 (EMI、EMII、HIMU、原始地幔、地球等时线、北半球参考线据 Zindler and Hart, 1986)

Fig. 8 Nd—Pb isotopic diagram (a) and Pb isotopic diagram (b) of Xialaganuo rapakivi granites and Kayakedengtage hornblende-gabbros (EMI, EMI, HIMU and Primitive Mantle after Zindler and Hart, 1986)

壳;Nd/Th 值 (2.50 ~ 3.62, 平均值 2.97) 与上地壳平均值 (≈ 3) 接近; Nb/Ta 值 (10.44 ~ 14.73, 平均值 13.42) 与上地壳平均值 (≈ 13.4) 接近; La/Yb 值 (11.62 ~ 15.72, 平均值 14.07) 与上地壳平均值 (≈ 15.4) 接近 (Collins *et al.*, 1982; 徐夕生和邱检生, 2010); 因此, 夏拉杂诺环斑花岗岩的源区可能来自上地壳。Douce (1997) 熔融实验表明, 长英质地壳物质在熔融过程中, 压力对熔体的影响与源区物质同等重要, 同一源岩组分更容易在相对低压的情况下产生准铝—弱过铝质、铁质 A 型花岗岩, 在相对高压的条件下形成强过铝质熔体 (张亮等, 2021)。夏拉杂诺环斑花岗岩属 A 型花岗岩, 具准铝质—弱过铝质 (A/CNK 值为 0.92 ~ 1.09) 和铁质 (TFeO/(TFeO+MgO) 值为 0.86 ~ 0.91) 特征, 说明其形成的

压力较低, 可能形成于地壳浅部, 其锆石饱和温度为 904 ~ 918°C, 平均 911°C, 表明深部应存在高的热异常使浅部的长英质地壳发生高温熔融 (吴福元等, 2007), 可能与幔源岩浆的底侵有关。环斑花岗岩具有 Sr 和 Eu 的负异常, 暗示源区残留相中可能有斜长石残留。此外, 夏拉杂诺环斑花岗岩亏损地幔模式年龄 T_{DM2} 为 1540 ~ 1622 Ma, 表明源区物质形成于古元古代。

综上所述, 夏拉杂诺环斑花岗岩岩浆主要为古元古代低压、高温条件下长英质上地壳部分熔融的产物, 热源为基性岩浆底侵供热。

5.2 角闪辉长岩成因及源区

喀雅克登塔格角闪辉长岩相对富集 Rb、Th、K、Sr 等大离子亲石元素, 相对亏损 Nb、P、Ti 等高场强

元素,显示俯冲带的岩浆特征(Ionov and Hofmann, 1995);同时具有较高的 $[n(^{87}\text{Sr})/n(^{86}\text{Sr})]_i$ 值(0.709000~0.723957)和负的 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值(-4.82~-5.89), T_{DM2} (1559~1646 Ma)远大于其结晶年龄,在Nd—Pb同位素图解(图8a)和Pb同位素图解(图8b)中样品落于EMII型富集地幔附近,显示富集地幔特征。 Th/Yb 值(2.25~6.64)相对较高,在 Th/Yb — Nb/Yb 图解中(图9a)样品点均明显偏离MORB—OIB演化线,显示与火山弧相近的特征,暗示其形成受到俯冲作用的影响(Pearce and Peate, 1995)。由此推测,岩浆源区应该是位于俯冲板片之上的地幔楔,该地幔楔曾受到俯冲流体交代的影响,流体可能来自于俯冲原特提斯洋壳及其沉积物的部分熔融。

喀拉克登塔格角闪辉长岩体,不发育明显的层状和条带状构造,同时矿物分带、填隙结构等岩相学特征不发育,因此不具有明显的堆晶特征。角闪辉长岩具有相对低的 Ce/Y 值(0.55~1.56,平均值为0.92),指示其可能来自于60~80km深处的尖晶石—石榴子石相稳定区域(Mckenzie and Bickle, 1988);角闪辉长岩显示低 $(\text{Tb}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 值(1.31~1.42,平均值为1.37)特点,在源区判别图解(图9b)中样品均落入尖晶石稳定区,进一步证实该岩石应源自含尖晶石橄榄岩的部分熔融(Wang et al., 2002)。

幔源岩浆在侵位过程中,通常会受到围岩不同程度的同化混染作用。通常认为 $\text{La}/\text{Sm}>4.5$ 表明地壳物质的混染较强,当 $\text{La}/\text{Sm}<2$ 时则极少受到

地壳物质混染(Lassiter and DePaolo, 1997),喀拉克登塔格角闪辉长岩 La/Sm 为1.31~3.73,平均值2.41,指示遭受一定程度的同化混染作用。锆石U—Pb测年结果显示(表1),角闪辉长岩捕获了一颗早奥陶世形成的锆石,同时在野外观察中发现角闪辉长岩中捕虏体不发育,表明角闪辉长岩遭受了少量地壳物质混染。

综上,笔者认为喀拉克登塔格角闪辉长岩起源于俯冲板片之上的地幔楔,在上升侵位过程中受到了少量地壳物质的同化混染。

5.3 地球动力学意义

东昆仑造山带是中央造山带的重要组成部分(许志琴等,2006),原特提斯洋俯冲和古特提斯洋俯冲是该区最重要的两次构造运动,为东昆仑地区如今的构造格局奠定了基础(王艺龙等,2018)。因此该地区古生代构造演化过程对研究原特提斯洋在我国西部的构造演化具有重要意义(张亮等,2021)。

在昆中缝合带中发现的清水泉等早寒武世蛇绿岩残片(518~522 Ma, Yang Jingsui et al., 1996)表明始特提斯洋盆在早寒武世已经存在。此后,随着洋壳俯冲,区域上形成一系列具俯冲特征的弧岩浆岩,如鸭子泉闪长岩(480±3 Ma, 崔美慧等,2011)、乌兰乌珠尔黑云母花岗岩(457.5±2.3 Ma; 韩志辉等,2021)、阿确墩石英闪长岩(448.8±3.9 Ma, 李婷等,2018)、胡晓钦镁铁质岩(438±2 Ma, 刘彬等,2013)、清水泉辉绿岩(436.4±1.2 Ma, 任军虎等,2009)等。

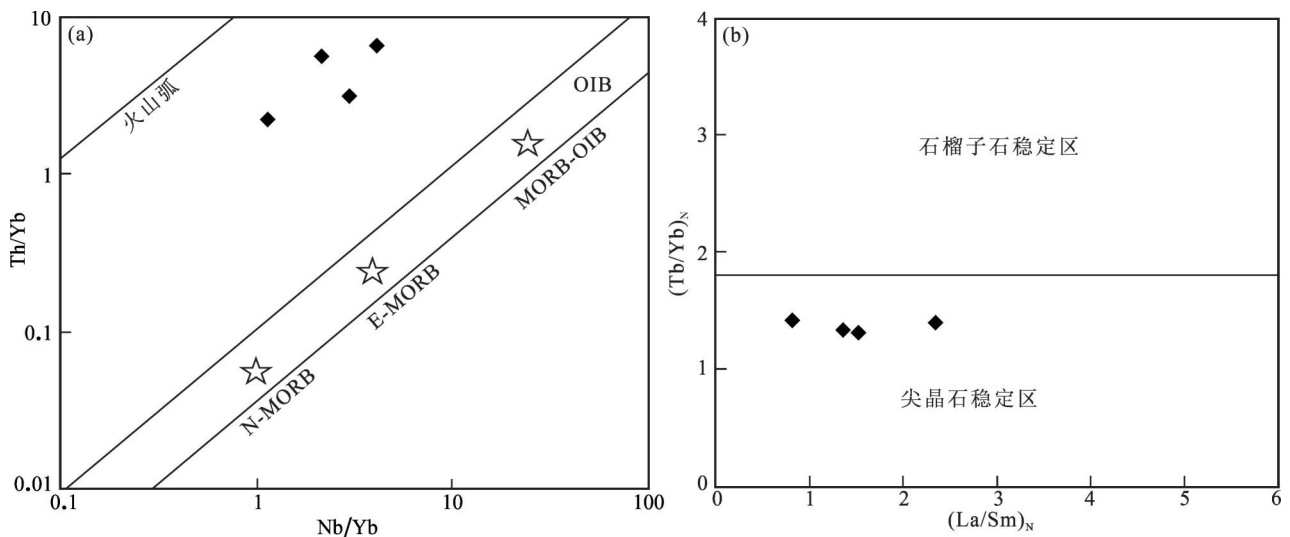


图9 喀拉克登塔格角闪辉长岩 Th/Yb — Nb/Yb 图解(a) (据 Pearce, 2008) 和源区判别图解(b) (据 Wang et al., 2002)

Fig. 9 Th/Yb — Nb/Yb diagram (a) (after Pearce, 2008) and source discrimination diagram (b)

(after Wang et al., 2002) of Kayakedengtage hornblende-gabbros

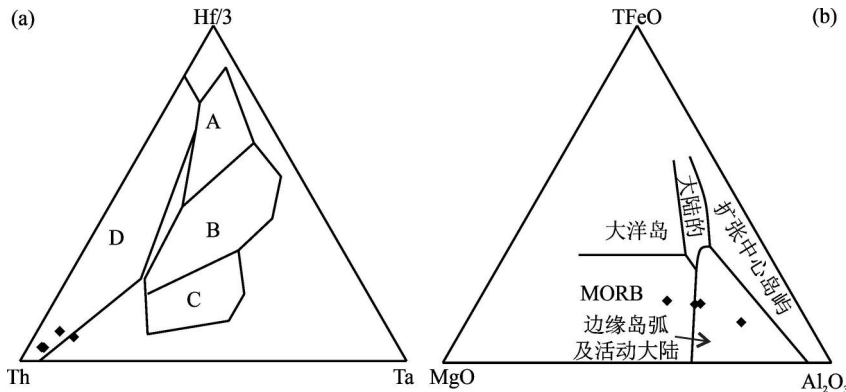


图 10 喀雅克登塔格角闪辉长岩 Hf/3—Th—Ta 图解(a) (据 Wood, 1980) 和 TFeO—MgO—Al₂O₃ 图解(b) (据 Pearce et al., 1977)

Fig. 10 Hf/3—Th—Ta diagram (a) (after Wood, 1980) and TFeO—MgO—Al₂O₃ diagram (b) (after Pearce et al., 1977) of Kayakedengtage hornblende—diorite

A—N 型洋中脊玄武岩; B—E 型洋中脊玄武岩和板内拉斑玄武岩; C—碱性板内玄武岩; D—火山弧玄武岩

A—N—MORB; B—E—MORB and intraplate tholeiite; C—alkali basalt; D—volcanic arc basalt

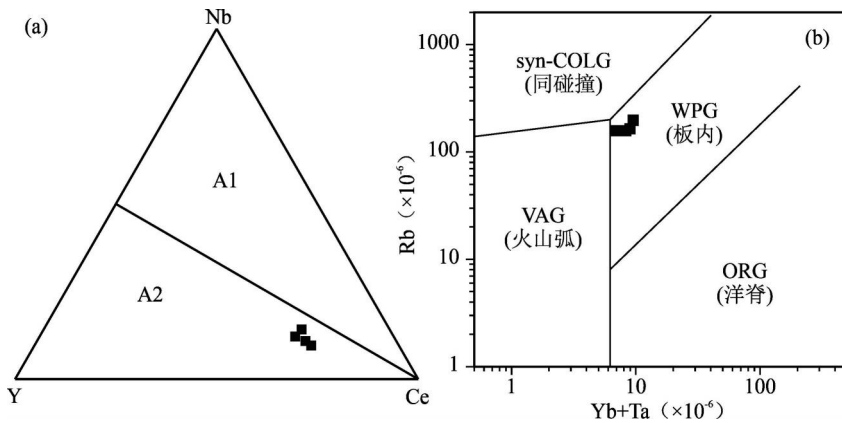


图 11 夏拉尕诺环斑花岗岩 Nb—Y—Ce 图解(a) (据 Eby, 1992) 和构造环境判别图解(b) (据 Pearce et al., 1984)

Fig. 11 Nb—Y—Ce diagram(a) (after Eby, 1992) and tectonic setting discrimination diagram (b) (after Pearce et al., 1984) of Xialaganuo rapakivi granites

花岗岩,形成于陆—陆碰撞环境,锆石 U-Pb 年龄为 420.5~424 Ma。表明,436~420 Ma,东昆仑地区处于碰撞造山阶段。陆露等(2010)在水泥厂地区牦牛山组底部磨拉石建造的流纹岩夹层中获得了 423~406 Ma 的锆石 U-Pb 年龄,表明该时期东昆仑地区主体已进入隆起阶段。

岩石中富集大离子亲石元素(LILE),亏损高场强元素(HFSE)通常被认为具有俯冲(消减)带的特征(Ionov and Hofmann, 1995)。喀雅克登塔格角闪辉长岩相对富集大离子亲石元素,相对亏损高场强元素,显示俯冲带的岩浆特征。在 Hf/3—Th—Ta 图解(图 10a)和 TFeO—MgO—Al₂O₃ 图解(图 10b)中角闪辉长岩样品主要落于火山弧玄武岩区域。

有学者指出 A 型花岗岩并不仅形成于板内环境,也可形成于汇聚型板块边缘,但都与拉张背景有关(Whalen et al., 1987; 吴福元等, 2007),A 型花岗岩是拉张背景的重要岩石学标志。夏拉尕诺环斑花岗岩(430.1 Ma)和白干湖 A 型花岗岩(430~429 Ma,高永宝等, 2011)的发现,表明该地区处于伸展环境。在 Nb—Y—Ce 判别图解(图 11a)中全部落入 A2 区,在构造环境判别图解(图 11b)中主要落于板内区域。

综上所述,笔者推测在寒武纪中期,原特提斯洋在俯冲过程中发生脱水并交代上覆地幔楔,形成了具有俯冲组分特征的富集岩石圈地幔;原特提斯洋俯冲作用可能持续到 430 Ma 以后;428~423 Ma 东昆仑地区总体处于碰撞造山阶段,423~406 Ma 东昆仑地区进入隆起阶段。在 430 Ma 左右,可能存在俯冲板片回撤,伸展作用下引发俯冲板片之上的地幔楔部分熔融形成基性岩浆,基性岩浆上涌一方面形成喀雅克登塔格角闪辉长岩,另一方面提供热源使浅部的长英质地壳发生高温熔融,产生 A 型花岗质岩浆,形成夏拉尕诺环斑花岗岩。

昆中缝合带出露的胡晓钦镁铁质岩和清水泉辉绿岩可能代表了早古生代原特提斯洋俯冲的岩浆记录(刘彬等,2013)。温泉高压榴辉岩峰期变质年龄为 428 Ma(Meng Fanchong et al., 2013),含柯石英包裹体的克合特云母片岩变质年龄为 427 Ma(Bi Hengzhe et al., 2020),表明该时期发生过大陆碰撞与陆壳深俯冲。王秉璋等(2023)在昆仑河一带发现了形成于陆—陆碰撞环境的高锆低钇中酸性(Adakitic)侵入岩,锆石 U-Pb 年龄为 425~427 Ma。施彬等(2016)在黑海一带发现过铝质—强过铝质

6 结论

(1) 夏拉尕诺环斑花岗岩和喀雅克登塔格角闪辉长岩的 U-Pb 年龄分别为 430.1 ± 1.1 Ma 和 430.5 ± 1.2 , 为同期岩浆活动的产物。

(2) 喀雅克登塔格角闪辉长岩相对富集大离子亲石元素, 相对亏损高场强元素, 具有较高的 $[n(^{87}\text{Sr})/n(^{86}\text{Sr})]_i$ 值和负的 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值, 岩浆起源于俯冲板片之上的地幔楔, 在上升侵位过程中受到了少量地壳物质的同化混染; 夏拉尕诺花岗岩属准铝—弱过铝质、铁质 A2 型花岗岩, 相对富集轻稀土元素和大离子亲石元素, 明显亏损高场强元素, 具有较高的 $[n(^{87}\text{Sr})/n(^{86}\text{Sr})]_i$ 值和负的 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值, 为低压、高温条件下长英质上地壳部分熔融的产物。

(3) 原特提斯洋俯冲作用可能持续到 430 Ma 以后, 在 430 Ma 左右, 东昆仑地区处于俯冲—回撤的伸展构造背景。

致谢: 感谢审稿专家的宝贵意见和建议!

参 考 文 献 / References

(The literature whose publishing year followed by a “&” is in Chinese with English abstract; The literature whose publishing year followed by a “#” is in Chinese without English abstract)

- 陈加杰, 付乐兵, 魏俊浩, 田宁, 熊乐, 赵玉京, 张玉洁, 祁月清. 2016. 东昆仑沟里地区晚奥陶世花岗岩闪长岩地球化学特征及其对原特提斯洋演化的制约. 地球科学, 41(11): 1863~1882.
- 崔美慧, 孟繁聪, 吴祥珂. 2011. 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. 岩石学报, 27(11): 3365~3379.
- 邓晋福, 刘翠, 冯艳芳, 肖庆辉, 狄永军, 苏尚国, 赵国春, 段培新, 戴蒙. 2015. 关于火成岩常用图解的正确使用: 讨论与建议. 地质论评, 61(4): 717~734.
- 高永宝, 李文渊. 2011. 东昆仑造山带祁漫塔格地区白干湖含锡锡矿花岗岩: 岩石学, 年代学, 地球化学及岩石成因. 地球化学, 40(4): 324~336.
- 韩志辉, 孙丰月, 田楠, 高宏昶, 李良, 赵拓飞. 2021. 东昆仑祁漫塔格地区乌兰乌珠尔早古生代花岗岩锆石 U-Pb 年代学、地球化学及其地质意义. 地球科学, 46(1): 13~30.
- 郝娜娜, 袁万明, 张爱奎, 曹建辉, 陈小宁, 冯云磊, 李希. 2014. 东昆仑祁漫塔格晚志留世—早泥盆世花岗岩: 年代学、地球化学及形成环境. 地质论评, 60(1): 201~215.
- 何成, 王力圆, 田立明, 徐净. 2018. 东昆仑哈拉森地区花岗岩类岩石成因及地质意义. 地球科学, 43(4): 1207~1218.
- 李潮峰, 李献华, 郭敬辉, 李向辉, 李怀坤, 周红英, 李国占. 2011. 微量岩石样品中 Rb-Sr 和 Pb 一步分离及高精度热电离质谱测试. 地球化学, 40(5): 399~406.
- 李怀坤, 耿建珍, 郝爽, 张永清, 李惠民. 2009. 用激光烧蚀多接收器等离子体质谱仪(LA-MC-ICPMS)测定锆石 U-Pb 同位素年龄的研究. 矿物学报, 29(Z1): 600~601.
- 李婷, 李猛, 胡朝斌, 李瑶, 孟杰, 高晓峰, 查显锋. 2018. 东昆仑祁漫塔格阿确墩地区侵入岩 U-Pb 年代学、地球化学及其地质

意义. 地球科学, 43(12): 4350~4363.

- 刘彬, 马昌前, 蒋红安, 郭盼, 张金阳, 熊富浩. 2013. 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. 岩石学报, 29(6): 2093~2106.
- 刘彬, 伍炼华, 马昌前, 徐雨, 李福林, 湛君明, 黄坚, 孙洋. 2023. 东昆仑造山带东段志留纪—泥盆纪中性岩的成因及其构造意义. 地球科学, 48(6): 2398~2414.
- 刘昌实, 陈小明, 陈培荣, 王汝成, 胡欢. 2003. A 型岩套的分类、判别标志和成因. 高校地质学报, 9(4): 573~591.
- 刘成东, 莫宣学, 罗照华, 喻学惠, 湛宏伟, 李述为, 赵欣. 2004. 东昆仑壳—幔岩浆混合作用: 来自锆石 SHRIMP 年代学的证据. 科学通报, 49(6): 506~602.
- 陆露, 吴珍汉, 胡道功, Barosh PJ, 郝爽, 周春景. 2010. 东昆仑牦牛山组流纹岩锆石 U-Pb 年龄及构造意义. 岩石学报, 26(4): 1150~1158.
- 罗照华, 柯珊, 曹永清, 邓晋福, 湛宏伟. 2002. 东昆仑印支晚期幔源岩浆活动. 地质通报, 21(6): 292~297.
- 路凤香, 桑隆康. 2002. 岩石学. 北京: 地质出版社.
- 卢欣祥, 王晓霞, 肖庆辉, 邢作云. 2007. 秦岭—昆仑造山型环斑花岗岩与世界典型环斑花岗岩的对比. 地质科技情, 26(1): 1~10.
- 莫宣学, 罗照华, 邓晋福, 喻学惠, 刘成东, 湛宏伟, 袁万明, 刘云华. 2007. 东昆仑造山带花岗岩及地壳生长. 高校地质学报, 13(3): 403~414.
- 祁生胜, 宋述光, 史连昌, 才航加, 胡继春. 2014. 东昆仑西段夏日哈木—苏海图早古生代榴辉岩的发现及意义. 岩石学报 30(11): 3345~3356.
- 任军虎, 柳益群, 冯乔, 韩文中, 高辉, 周鼎武. 2009. 东昆仑清水泉辉绿岩脉地球化学及 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年. 岩石学报, 25(5): 1135~1145.
- 施彬, 朱云海, 钟增球, 菅坤坤. 2016. 东昆仑黑海地区加里东期过铝质花岗岩岩石学、地球化学特征及地质意义. 地球科学, 41(1): 35~5.
- 王秉璋, 张金明, 李五福, 王泰山, 金婷婷, 付长奎. 2023. 昆仑河早古生代两期埃达克质侵入岩的发现及其对东昆仑碰撞造山过程的启示. 岩石学报, 39(3): 763~784.
- 王冠, 孙丰月, 李碧乐, 李世金, 赵俊伟, 杨启安. 2014. 东昆仑夏日哈木矿区闪长岩锆石 U-Pb 年代学、地球化学及其地质意义. 吉林大学学报(地球科学版), 44(3): 876~891.
- 王楠, 吴才来, 秦海鹏. 2017. 川西义敦岛弧中生代典型花岗岩体矿物学、地球化学特征及岩浆来源探讨. 地质论评, 63(4): 981~1000.
- 王晓霞, 胡能高, 王涛, 孙延贵, 巨生成, 卢欣祥, 李舫, 齐秋菊. 2012. 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. 岩石学报, 28(9): 2950~2962.
- 王艺龙, 李艳军, 魏俊浩, 李欢, 韩玉, 周红智, 黄啸坤, 柯坤家. 2018. 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. 地球科学, 43(4): 1219~1236.
- 吴福元, 李献华, 杨进辉, 等. 2007. 花岗岩成因研究的若干问题. 岩石学报, 23(6): 1217~1238.
- 吴少锋, 陈礼标, 任文恺, 张海青, 王少华, 丁成旺. 2012. 祁漫塔格地区更长环斑花岗岩的发现及其地质意义. 青海大学学报: 自然科学版, (5): 49~54.
- 熊双才, 张征峰, 李广, 刘润泽, 华叙登, 赵富庄, 周鹏飞, 李关禄. 2019. 东准噶尔老爷庙地区碱性花岗岩锆石 U-Pb 定年、地球化学及其地质意义. 地质论评, 65(1): 221~231.
- 徐夕生, 邱检生. 2010. 火成岩岩石学. 北京: 科学出版社, 215~

220.

- 许志琴, 杨经绥, 李海兵, 姚建新. 2006. 中央造山带早古生代地体构造与高压/超高压变质带的形成. *地质学报*, 80(12): 1793~1806.
- 许志琴, 杨经绥, 李文昌, 李化启, 蔡志慧, 闫臻, 马昌前. 2013. 青藏高原中的古特提斯体制与增生造山作用. *岩石学报*, 29(6): 1847~1860.
- 张亮, 李碧乐, 刘磊, 王盘喜, 李良. 2021. 东昆仑五龙沟地区早泥盆世双峰式侵入岩年代学、地球化学及其地质意义. *岩石学报*, 37(7): 2007~2028.
- Bi Hengzhe, Song Shuguang, Yang Liming, Allen Mark B, Qi Shengsheng, Su Li. 2020. UHP metamorphism recorded by coesite bearing metapelite in the East Kunlun Orogen (NW China). *Geological Magazine*, 157(2): 160~172.
- Chen Jiajie, Fu Lebing, Wei Junhao, Tian Ning, Xiong Le, Zhao Yujing, Zhang Yujie, Qi Yueqing. 2016&. Geochemical characteristics of Late Ordovician granodiorite in Gouli area, eastern Kunlun orogenic belt, Qinghai Province; Implications on the evolution of Proto-Tethys ocean. *Earth Science*, 41(11): 1863~1882.
- Collins W J, Beams S D, White A J R, Chappell B W. 1982. Nature and origin of A-type granites with particular reference to southeastern Australia. *Contributions to Mineralogy & Petrology*, 80(2): 189~200.
- Cui Meihui, Meng Fancong, Wu Xiangke. 2011&. Early Ordovician island arc of Qimantag, eastern Kunlun; Evidences from geochemistry, Sm-Nd isotope and geochronology of intermediate—basic igneous rocks. *Acta Petrologica Sinica*, 27(11): 3365~3379.
- Deng Jinfu, Liu Cui, Feng Yanfang, Xiao Qinghui, Di Yongjun, Su Shangguo, Zhao Guochun, Duan Peixin, Dai Meng. 2015&. On the correct application of common igneous petrological diagrams: Discussion and suggestions. *Geological Review*, 61(4): 717~734.
- Douce A E P. 1997. Generation of metaluminous A-type granites by low-pressure melting of calc—alkaline granitoids. *Geology*, 25(8): 743~746.
- Eby G N. 1992. Chemical subdivision of the A-type granitoids; Petrogenetic and tectonic implications. *Geology*, 20(7): 641~644.
- Gao Yongbao, Li Wenyuan. 2011&. Petrogenesis of tungsten—tin-bearing granites in the Baiganhu deposit, Qimantag, eastern Kunlun orogenic belt; Constraints from petrology, chronology, and geochemistry. *Geochimica*, 40(4): 324~336.
- Han Zhihui, Sun Fengyue, Tian Nan, Gao Hongchang, Li Liang, Zhao Tuofei. 2021&. Zircon U-Pb geochronology, geochemistry, and geological implications of Early Paleozoic Wulanwuzhuer granites in the Qimantag area, eastern Kunlun. *Earth Science*, 46(1): 13~30.
- Hao Nana, Yuan Wanming, Zhang Aikui, Cao Jianhui, Chen Xiaoning, Feng Yunlei, Li Xi. 2014&. Late Silurian—Early Devonian granitoids in the Qimantag area, eastern Kunlun Mountains; Chronology, geochemistry, and formation environment. *Geological Review*, 60(1): 201~215.
- He Cheng, Wang Liyuan, Tian Liming, Xu Jing. 2018&. Petrogenesis and geological implications of granitoids from the Halasen area, eastern Kunlun. *Earth Science*, 43(4): 1207~1218.
- Ionov D A, Hofmann A W. 1995. Nb Ta-rich mantle amphiboles and micas; Implications for subduction-related metasomatic trace element fractionations. *Earth and Planetary Science Letters*, 131(3~4): 341~356.
- King P L, White A J R, Chappell B W. 1997. Characterization and origin of aluminous A-type granites from the Lachlan fold belt, Southeastern Australia. *Journal of Petrology*, 38(3): 371~391.
- Lassiter J C, DePaolo D J. 1997. Plume /lithosphere interaction in the generation of continental and oceanic flood basalts: Chemical and isotopic constraints. In: Mahoney JJ and Coffin MF (eds.). *Large Igneous Provinces: Continental, Oceanic, and Planetary Flood Volcanism*. American Geophysical Union, 100: 335~355.
- Li Chaofeng, Li Xianhua, Guo Jinghui, Li Xianguai, Li Huaikun, Zhou Hongying, Li Guozhan. 2011&. Single-step separation of Rb-Sr and Pb from minor rock samples and high precision determination using thermal ionization mass spectrometry. *Geochimica*, 40(5): 399~406.
- Li Huaikun, Gen Jianzhen, Hao Shuang, Zhang Yongqing, Li Huimin. 2009#. Study on zircon U-Pb dating by LA-ICP MS. *Acta Mineralogica Sinica*, 29(S1): 600~601.
- Li Ting, Li Meng, Hu Zhaobin, Li Yao, Meng Jie, Gao Xiaofeng, Zha Xianfeng. 2018&. Zircon U-Pb geochronology, geochemistry, and geological implications of intrusions in the Aquedun area, Qimantag, eastern Kunlun. *Earth Science*, 43(12): 4350~4363.
- Liu Bin, Ma Changqian, Jiang Hong'an, Guo Pan, Zhang Jinyang, Xiong Fuhao. 2013&. Transition from Early Paleozoic oceanic crust subduction to collisional orogeny in the eastern Kunlun; Evidence from the Huxiaoqin mafic rocks. *Acta Petrologica Sinica*, 29(6): 2093~2106.
- Liu Bin, Wu Lianhua, Ma Changqian, Xu Yu, Li Fulin, Zhan Junming, Huang Jian, Sun Yang. 2023&. Petrogenesis and tectonic implications of Silurian—Devonian intermediate rocks in the eastern segment of the East Kunlun orogenic belt. *Earth Science*, 48(6): 2398~2414.
- Liu Changshi, Chen Xiaoming, Chen Peirong, Wang Rucheng, Hu Huan. 2003&. Subdivision, discrimination criteria and genesis for A-type rock suites. *Geological Journal of China Universities*, 9(4): 573~591.
- Liu Chengdong, Mo Xuanxue, Luo Zhaohua, Yu Xuehui, Chen Hongwei, Li Shuwei, Zhao Xin. 2004#. Mixing events between the crust and mantle-derived magmas in eastern Kunlun; Evidence from zircon SHRIMP II chronology. *Chinese Science Bulletin*, 49(6): 506~602.
- Lu Lu, Wu Zhenhan, Hu Daogong, Barosh P J, Hao Shuang, Zhou Chunjing. 2010&. Zircon U-Pb age for rhyolite of the Maoniushan Formation and its tectonic significance in the East Kunlun Mountains. *Acta Petrologica Sinica*, 26(4): 1150~1158.
- Luo Zhaohua, Ke Shan, Cao Yongqing, Deng Jinfu, Chen Hongwei. 2002&. Late indosinian mantle-derived magmatism in the East Kunlun. *Geological Bulletin of China*, 21(6): 292~297.
- Lu Fengxiang, Sang Longkang. 2002. *Petrology*. Beijing: Geological Publishing House.
- Lu Xinxiang, Wang Xiaoxia, Xiao Qinghui, Xing Zuoyun. 2007&. Comparison of Qinling—Kunlun orogenic-type rapakivi granite with world typical rapakivi granite. *Geological Science and Technology Information*, 26(1): 1~10.
- McKenzie D P and Bickle M J. 1988. The volume and composition of melt generated by extension of the lithosphere. *Journal of Petrology*, 29(3): 625~679.
- Meng Fancong, Zhang Junxing, Cui Meihui. 2013. Discovery of Early Paleozoic eclogite from the East Kunlun, western China and its tectonic significance. *Gondwana Research*, 23(2): 825~836.
- Middlemost E A K. Naming materials in the magma/igneous rock system. *Earth-Science Reviews*, 1994, 37(3~4): 215~224.
- Mo Xuanxue, Luo Zhaohua, Deng Jinfu, Yu Xuehui, Liu Chengdong,

- Chen Hongwei, Yuan Wanming, Liu Yunhua. 2007&. Granitoids and crustal growth in the East Kunlun orogenic belt. *Geological Journal of China Universities*, 13 (3): 403~414.
- Pearce J A, Harris N B W, Tindle A G. 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *Journal of Petrology*, 25: 956~983.
- Pearce J A and Peate D W. 1995. Tectonic implications of the composition of volcanic arc magmas. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 23(1): 251~286.
- Pearce J A. 2008. Geochemical fingerprinting of oceanic basalts with applications to ophiolite classification and the search for Archean oceanic crust. *Lithos*, 100(1~4): 14~48.
- Pearce T H, Gorman B E and Birkett T C. 1977. The relationship between major element chemistry and tectonic environment of basic and intermediate volcanic rocks. *Earth and Planetary Science Letters*, 36: 121~132.
- Qi Shengsheng, Song Shuguang, Shi Lianchang, Cai Hangjia, Hu Jichun. 2014&. Discovery and geological significance of Early Paleozoic eclogite in the Xiarihamu—Suhaitu area, western part of the East Kunlun. *Acta Petrologica Sinica*, 30(11): 3345~3356.
- Ren Junhu, Liu Yiqun, Feng Qiao, Han Wenzhong, Gao Hui, Zhou Dingwu. 2009&. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating and geochemical characteristics of diabase dikes from the Qingshuiquan area, eastern Kunlun orogenic belt. *Acta Petrologica Sinica*, 25(5): 1135~1145.
- Shi Bin, Zhu Yunhai, Zhong Zengqiu, Jian Kunkun. 2016&. Petrological and geochemical characteristics and geological significance of the Caledonian peraluminous granites in the Heihai Region, Eastern Kunlun. *Earth Science*, 41(1): 35~54.
- Rämö OT, Haapala I. 1995. One hundred years of rapakivi granite. *Mineralogy and Petrology*, 52: 129~185.
- Rickwood P C. 1989. Boundary lines within petrologic diagrams which use oxides of major and minor elements. *Lithos*, 22: 247~263.
- Sun S S, McDonough W F. 1989. Chemical and isotope systematics of oceanic basalts; Implications for mantle composition and processes. In: Saunders A D and Norry MJ. eds. *Magmatism in Ocean Basins*. Spec. Publ. Geol. Soc. Lond., 42: 313~345.
- Taylor S R, McLennan S M. 1985. *The continental crust; its composition and evolution; an examination of the geochemical record preserved in sedimentary rocks*. Boston; Blackwell Scientific Publication, 209~230.
- Vorma A. 1976. On the petrochemistry of rapakivi granites with special reference to Laitila massif, Southwestern Finland. *Geolog. Sur. Finland Bull.*, 285: 98.
- Wang Bingzhang, Zhang Jinming, Li Wufu, Wang Taishan, Jin Tingting, Fu Changlei. 2023&. Discovery of two stages of Early Paleozoic adakitic intrusive rocks in the Kunlun River area, East Kunlun; Implications for collisional orogenic processes. *Acta Petrologica Sinica*, 39(3): 763~784.
- Wang Guan, Sun Fengyue, Li Bile, Li Shijin, Zhao Junwei, Yang Qi'an. 2014&. Zircon U-Pb geochronology and geochemistry of diorite in Xiarihamu ore district from East Kunlun and its geological significance. *Journal of Jilin University: Earth Science Edition*, 44(3): 876~891.
- Wang K, Plank T, Walker J D, Smith E I. 2002. A mantle melting profile across the Basin and Range, SW USA. *Journal of Geophysical Research (Solid Earth)*, 107(B1): ECV5-1~ECV5-21.
- Wang Nan, Wu Cailai, Qin Haipeng. 2017&. Mineralogical, geochemical features of typical Mesozoic granites in the Yidun Arc, western Sichuan and a discussion on the magma origin. *Geological Review*, 63(4): 981~1000.
- Wang Xiaoxia, Hu Nenggao, Wang Tao, Sun Yangui, Ju Shengcheng, Lu Xinxiang, Li Shan, Qi Qiuju. 2012&. Late Ordovician Wanbaogou granitoid pluton from the southern margin of the basin: Zircon SHRIMP U-Pb ages, Hf isotopes, and geochemistry. *Acta Petrologica Sinica*, 28(9): 2950~2962.
- Wang Yilong, Li Yanjun, Wei Junhao, Li Huan, Han Yu, Zhou Hongzhi, Huang Xiaokun, Ke Kunjia. 2018&. Origin of Late Silurian A-type granite in the Wulonggou area, East Kunlun Orogen: Zircon U-Pb ages, geochemistry, and Nd—Hf isotopic constraints. *Earth Science*, 43(4): 1219~1236.
- Watson E B, Harrison T M. 1983. Zircon saturation revisited: temperature and composition effects in a variety of crustal magmatypes. *Earth and Planetary Science Letters*, 64(2): 295~304.
- Whalen J B, Currie K L, Chappell B W, 1987. A-type granites: Geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 95(4): 407~419.
- Wood D A. 1980. The application of a Th—Hf—Ta diagram to problems of tectonomagmatic classification and to establishing the nature of crustal contamination of basaltic lavas of the British Tertiary volcanic province. *Earth and Planetary Science Letters*, 50(1): 11~30.
- Wu Fuyuan, Li Xianhua, Yang Jinhui, Zheng Yongfei. 2007&. Discussions on the petrogenesis of granites. *Acta Petrologica Sinica*, 23(6): 1217~1238.
- Wu Shaofeng, Chen Libiao, Ren Wenkai, et al. 2012&. Discovery of rapakivi granite and its geological implications in Qimantag. *Journal of Qinghai University (Nature Science Edition)*, 30(5): 49~54.
- Xiong Shuangcai, Zhang Zhengfeng, Li Guang, Liu Runze, Hua Xudeng, Zhao Fuzhuang, Zhou Pengfei, Li Guanlu. 2019&. Zircon U-Pb dating, geochemical characteristics of alkali-granites in Laoyemiao area, eastern Junggar, and geological significance. *Geological Review*, 65(1): 221~231.
- Xu Xisheng, Qiu Jiansheng. 2010#. *Igneous Petrology*. Beijing: Science Press, 215~220.
- Xu Zhiqin, Yang Jingsui, Li Wenchang, Li Qihua, Cai Zhihui, Yan hen, Ma Changqian. 2018&. Paleo-Tethys system and accretionary orogen in the Tibet Plateau. *Acta Petrologica Sinica*, 29(6): 1847~1860.
- Xu Zhiqin, Yang Jingsui, Li Haibing, Yao Jianxin. 2006&. The Early Paleozoic terrane framework and the formation of high-pressure (HP) and ultrahigh-pressure (UHP) metamorphic belts in the Central Orogenic Belt (COB). *Acta Geologica Sinica*, 80(12): 1793~1806.
- Yang Jingsui, Robinson P T, Jiang Chaofeng, Xu Zhiqin. 1996. Ophiolites of the Kunlun Mountains, China and their tectonic implications. *Tectonophysics*, 258(1~4): 215~231.
- Zhang Jinyang, Ma Changqian, Xiong Fuhao, Liu Bin, Li Jianwei, Pan Yuanming. 2014. Early Paleozoic high-Mg diorite—granodiorite in the eastern Kunlun Orogen, western China: Response to continental collision and slab break-off. *Lithos*, 210~211: 129~146.
- Zhang Liang, Li Bile, Liu Lei, Wang Panxi, Li Liang. 2021. Geochronology, geochemistry, and geological significance of Early Devonian bimodal intrusive rocks in the Wulonggou area, East Kunlun Orogen. *Acta Petrologica Sinica*, 37(7): 2007~2028.
- Zindler A, Hart S R. 1986. Chemical geodynamics. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 14: 493~571.

Discovery and tectonic significance of Mid-Silurian rapakivi granites and hornblende-gabbros in the Qimantage area, East Kunlun Orogen

XU Bo^{1,2)}, TONG Haiku^{2,3)}, Liu Bei¹⁾, LIU Lishuang^{4,5)}

1) PowerChina Qinghai Electric Power Design Institute Co., Ltd, Xining, 810000;

2) Key Laboratory of the Northern Qinghai—Tibet Plateau Geological Processes and Mineral Resources, Xining, 810012;

3) Qinghai Geological Survey Bureau, Xining, 810000;

4) Joint International Research Laboratory of Catastrophe Simulation and Systemic Risk Governance of Ministry of Education, Beijing Normal University, Zhuhai, Guangdong, 519087;

5) School of National Safety and Emergency Management, Beijing Normal University, Zhuhai, Guangdong, 519087

Abstract: The Proto-Tethys Ocean in the Eastern Kunlun region underwent an Early Paleozoic subduction— orogenic evolution. However, significant controversy remains regarding key geological processes such as subduction and collisional orogeny. A suite of Middle Silurian rapakivi granite and hornblende gabbro assemblages was discovered in the Qimantage area of the Eastern Kunlun. This study presents petrological, whole-rock geochemical, LA-MC-ICP-MS zircon U-Pb geochronological, and Sr—Nd—Pb isotopic analyses of these rocks. The zircon U-Pb ages of the rapakivi granite and hornblende gabbro are 430.1 ± 1.1 Ma and 430.5 ± 1.2 Ma, respectively. Whole-rock geochemical analyses show that the rapakivi granite has high $K_2O + Na_2O$ content and TFeO/MgO ratios, but low MgO and CaO contents. It belongs to the metaluminous to weakly peraluminous granite series and the shoshonitic series. It is relatively enriched in light rare earth elements (LREEs) and large-ion lithophile elements (LILEs), but significantly depleted in high-field-strength elements (HFSEs), and exhibits a negative Eu anomaly. It has relatively high $[n(^{87}Sr)/n(^{86}Sr)]_i$ values (0.709000~0.723957) and negative $\varepsilon_{Nd}(t)$ values ($-4.82 \sim -5.89$). The depleted mantle model age T_{DM2} ranges from 1559 to 1646 Ma. These characteristics classify it as A-type granite. The hornblende gabbro belongs to the low-K (tholeiitic) series. It is enriched in LILEs but depleted in HFSEs. It also exhibits high $[n(^{87}Sr)/n(^{86}Sr)]_i$ values (0.709000~0.723957), negative $\varepsilon_{Nd}(t)$ values ($-4.82 \sim -5.89$), and T_{DM2} ages of 1646~1559 Ma. The rapakivi granite and hornblende gabbro originated from distinct magma sources. The rapakivi granite primarily formed by partial melting of Paleoproterozoic felsic crust under low-pressure and high-temperature conditions. The magma source for the hornblende gabbro was the mantle wedge above the subducting slab, which had been metasomatized by subduction-derived fluids. Consequently, it is inferred that northward subduction of the Proto-Tethys Ocean initiated in the mid-Cambrian and persisted beyond 430 Ma. The Eastern Kunlun region was predominantly in a collisional orogenic stage from 428 Ma to 423 Ma, transitioning to an uplift stage from 423 Ma to 406 Ma. Around 430 Ma, the Eastern Kunlun region was in an extensional tectonic setting associated with subduction—rollback.

Keywords: Eastern Kunlun; Middle Silurian; rapakivi granite; zircon U-Pb age; Sr—Nd—Pb isotopes

Acknowledgements: This paper is a result of the research project “Key Technologies for Integrated Air—Ground—Space Rapid Assessment and Precise Loss Assessment of Multiple Disasters (No. : 2022YFC3004404)” funded by the National Key Research and Development Program of China. We Thank reviewers for their valuable comments and suggestions

First author: XU Bo, male, born in 1988, master degree graduate, senior engineer, major of geological engineering; Email: 857243227@qq.com

Manuscript received on: 2025-05-06; Accepted on: 2025-07-05; Published online on: 2025-07-20

Doi: 10.16509/j.georeview.2025.07.065

Edited by: ZHANG Yuxu