

东昆仑东段原特提斯洋的俯冲时限:来自瓦勒杂 花岗质岩石锆石 U-Pb 年代学及地球化学的约束

郭香敏¹, 丁枫¹, 凡韬², 孙瑶³, 黄仕宗², 蔺吉庆², 霍艳¹

1. 成都理工大学 地球与行星科学学院, 成都 610059;

2. 四川地质矿产勘查开发局 四〇三地质队, 四川 峨眉山 614200;

3. 四川睿途工程管理咨询有限公司, 成都 610051

[摘要] 为探讨东昆仑东段早泥盆世原特提斯洋构造演化, 本文对沟里地区瓦勒杂花岗质岩石进行了岩石学、锆石 U-Pb 年代学、地球化学等方面的研究。研究区花岗质岩石主要为二长花岗岩和花岗闪长岩, 二长花岗岩锆石 U-Pb 年龄为 414.2 ± 2.3 Ma, 花岗闪长岩的锆石 U-Pb 年龄为 416.9 ± 5.3 Ma。二长花岗岩和花岗闪长岩具富硅、富碱、富铝和弱过铝质特征, 二者相对富集轻稀土元素, 亏损重稀土元素, 普遍具弱负钨异常, 成因类型为 I 型花岗岩。研究认为, 瓦勒杂二长花岗岩和花岗闪长岩为下地壳基性岩石部分熔融的产物, 综合区域地质背景认为二者形成于原特提斯洋俯冲消减阶段, 东昆仑地区原特提斯洋在 414 Ma 时尚未完全关闭。

[关键词] 东昆仑造山带; 原特提斯洋; 花岗质岩石; 岩石成因; 构造背景

[分类号] P597

[文献标志码] A

Subduction of the proto-Tethys ocean in the eastern segment of East Kunlun: A response to zircon U-Pb geochronology and geochemistry of Walega granitic rocks

GUO Xiangmin¹, DING Feng¹, FAN Tao², SUN Yao³, HUANG Shizong²,
LIN Jiqing², HUO Yan¹

1. College of Earth and Planetary Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China;

2. 403 Geological Team, Sichuan Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development,
Emeishan 614200, China;

3. Sichuan Ruitu Engineering Management Consulting Co., Ltd., Chengdu 610051, China

Abstract: In this study, we investigated the petrology, zircon U-Pb chronology, and geochemistry of

[收稿日期] 2023-11-15。

[基金项目] 中国地质调查局地质调查项目(DD20160015-06; DD20160026)。

[第一作者] 郭香敏(2001—), 女, 硕士研究生, 研究方向: 矿物学、岩石学、矿床学, E-mail: 1822212473@qq.com。

[通信作者] 丁枫(1973—), 男, 教授, 研究方向: 矿产资源调查、区域地质调查, E-mail: 22847785@qq.com。

[引用格式] 郭香敏, 丁枫, 凡韬, 等, 2024. 东昆仑东段原特提斯洋的俯冲时限: 来自瓦勒杂花岗质岩石锆石 U-Pb 年代学及地球化学的约束[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 51(2): 222-246.

Guo X M, Ding F, Fan T, et al., 2024. Subduction of the proto-Tethys ocean in the eastern segment of East Kunlun: A response to zircon U-Pb geochronology and geochemistry of Walega granitic rocks[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 51(2): 222-246.

Walega granitic rocks in the Gouli area to examine the tectonic evolution of the eastern section of the East Kunlun Mountains in the proto-Tethys ocean in the early Devonian. Monzogranite and granodiorite were the primary granitic rocks in the study area, with zircon U-Pb ages of 414.2 ± 2.3 Ma and 416.9 ± 5.3 Ma, respectively. Both were rich in silicon, alkalis, and aluminum, and were weakly peraluminous. They were also relatively rich in light rare earth elements and depleted in heavy rare earth elements. They generally had weakly negative europium anomalies, and were classified as I-type granite. The results showed that the monzogranite and granodiorite from Walega were products of the partial melting of basic rocks in the lower crust. The comprehensive geological background of the region suggested that they were formed during the subduction of the proto-Tethys ocean, which had not completely closed in the East Kunlun region in 414 Ma.

Key words: East Kunlun orogenic belt; proto-Tethys ocean; granitic rocks; petrogenesis; tectonic setting

中央造山系是中国南北 2 个大陆块群拼合形成的 1 条十分重要的巨型构造带(王国灿等, 1999; 罗照华等, 2002; 许志琴等, 2006), 东昆仑造山带位于中央造山系西部, 是延伸超过 1 000 km 的复合大陆造山带, 作为参与原特提斯洋演化的造山带之一(Chen et al., 2020), 对研究原特提斯洋构造演化有重要意义。东昆仑造山带北部为柴达木地块, 南部与巴颜喀拉地块相连, 西部被北东向阿尔金断裂切割与塔里木地块相邻, 东部为秦岭造山带(图 1-A)。以阿其克库勒湖—昆中蛇绿混杂岩带、木孜塔格—布青山—阿尼玛卿蛇绿混杂岩带和祁漫塔格—香日德蛇绿混杂岩带为界, 东昆仑造山带从南至北可分为北祁漫塔格带, 中昆仑带、南昆仑带(Meng et al., 2015; Dong et al., 2018)(图 1-B)。

东昆仑造山带岩浆岩分布较多, 特别是花岗岩质岩浆活动极其强烈而广泛(袁万明等, 2000; 邓红宾等, 2018)。不同成因的花岗岩及其共生岩石组合能够反映不同的构造环境和地球动力学背景, 并记录洋壳俯冲、陆陆(弧)碰撞和后碰撞构造事件(Hofmann, 1988; Zhou et al., 2002; 莫宣学等, 2007; 高晓峰等, 2010; 刘彬等, 2012; 王晓霞等, 2012; 熊富浩, 2014; Zhou et al., 2016; 邵东等, 2017; Zheng et al., 2018; Wang et al., 2022)。近年来, 众多学者在东昆仑地区识别出大量与原特提斯洋演化有关的花岗岩类, 但是, 关于这些花岗岩类的构造背景及深部演化过程还存在争议, 导致对原特提斯洋的俯冲、闭合时限尚不统一。学者们通过锆石 U-Pb 年代学、元素地球化学以及同位素地球化学等方法对东昆仑万宝沟、智玉、

祁漫塔格、金水口、布青山等地区的花岗岩类进行深入研究, 得到不同结论: 原特提斯洋在志留纪之前闭合(王晓霞等, 2012; Zhou et al., 2016); 洋盆在志留纪早期闭合(高晓峰等, 2010; Wang et al., 2022); 洋盆于志留纪中晚期闭合(刘彬等, 2012; Zheng et al., 2018); 原特提斯洋的俯冲持续到晚志留世—早泥盆世(邵东等, 2017)。目前的研究以后碰撞阶段的花岗岩为主, 相对缺乏俯冲晚期的花岗岩证据, 一定程度上制约了对东昆仑地区原特提斯洋演化过程的认识。本文以东昆仑造山带瓦勒尔花岗岩质岩石作为研究对象, 在野外地质调查的基础上, 对研究区二长花岗岩和花岗闪长岩进行岩石学、锆石 U-Pb 年代学和岩石地球化学分析, 探讨其形成时代、岩石成因和构造背景, 希望为东昆仑地区原特提斯洋构造演化提供依据。

1 地质背景和岩石学特征

东昆仑造山带从元古代到中生代间歇式的火山喷发和岩浆侵入使区域上发育丰富的岩浆岩, 由于新生代地壳隆升和剥蚀作用, 形成了独特的构造岩浆格局(莫宣学等, 2007)。北祁漫塔格带以古元古代高变质岩群为基底, 奥陶纪—泥盆纪岩浆岩在北祁漫塔格带广泛分布, 年龄约为 446~390 Ma(Dong et al., 2018), 二叠纪—三叠纪花岗岩类在该带西部广泛出露。中昆仑带广泛出露前寒武纪金水口群, 零星分布中元古代小庙群(王国灿等, 2004), 该带被新元古代、古生代和三叠纪三期深成岩体广泛侵入(陈能松等, 2006a, 2006b; 孟繁聪等, 2013; He et al., 2016b)。南昆仑带出露大量的蛇绿岩块, 基底主要由古元古代苦海群

高级变质杂岩组成,大量早古生代(555~420 Ma)和二叠纪—三叠纪侵入岩分布在南昆仑带东部,岩性主要为闪长岩、花岗闪长岩和花岗岩,带内还出露中新元古代万宝沟群和早古生代纳赤台群(Dong et al., 2018)。

本文研究的瓦勒尕花岗岩质岩体位于中昆仑带内。研究区紧邻阿其克库勒湖—昆中蛇绿混杂岩带,岩性主要为蛇纹岩、橄榄岩、辉长岩、辉绿岩、玄武岩。南部长石山、清水泉等地也有蛇绿岩分布。区域上出露地层以古元古代金水口岩群的中深度变质岩系为主,受区域上多期次和多阶段构造演化的影响,区内构造形式主要是断裂构造(图 2)。研究区岩浆活动强烈,以中酸性岩浆岩为主,岩性主要为二长花岗岩、花岗闪长岩、斜长花岗岩、石英闪长岩(图 3)。二长花岗岩体和花岗闪长岩体出露面积约占区内面积的 90%,为研究区最主要岩石类型,具有普遍的代表性,因此本文以这两者为研究对象。二长花岗岩在区内呈岩基或岩株广泛出露,未见暗色包体,岩体与围岩之间呈侵入接触或断层接触,二长花岗岩与花岗闪长岩之间呈脉动接触。二长花岗岩体后期侵入到花岗闪长岩体

中,部分二长花岗岩与斜长花岗岩、石英闪长岩呈涌动接触,少数岩体之间呈超动接触关系,接触边明显;花岗闪长岩体以岩基形式产出,未见暗色包体,岩体与围岩之间呈侵入接触,部分岩体与石英闪长岩体呈侵入接触,接触界线较清晰(图 4)。此外,少量的基性岩后期侵入到二长花岗岩体和花岗闪长岩体中,岩性为辉绿岩。

二长花岗岩新鲜面呈灰白色,具中细粒、中粗粒结构,块状构造(图 5-A,B),主要由斜长石、石英、钾长石、黑云母及少量副矿物组成(图 6-A~C)。斜长石(30%~35%):无色、表面浑浊、呈半自形板状,粒径 0.5~3.5 mm,可见黑云母包裹体,发育聚片双晶或卡式双晶,部分发生弱绢云母化和泥化;石英(±30%):无色洁净透明,多呈他形粒状充填于长石颗粒之间,粒径 0.2~0.8 mm,具波状消光;钾长石(20%~25%):呈半自形—自形板状产出,发育格子双晶,粒径 0.5~2 mm;黑云母(8%~10%):棕色—黄褐色,呈鳞片状集合体发育,不均匀分布于斜长石之间,干涉色可达三级黄绿,粒径 0.1~0.4 mm;副矿物主要为磁铁矿,体积分数小于 1%。

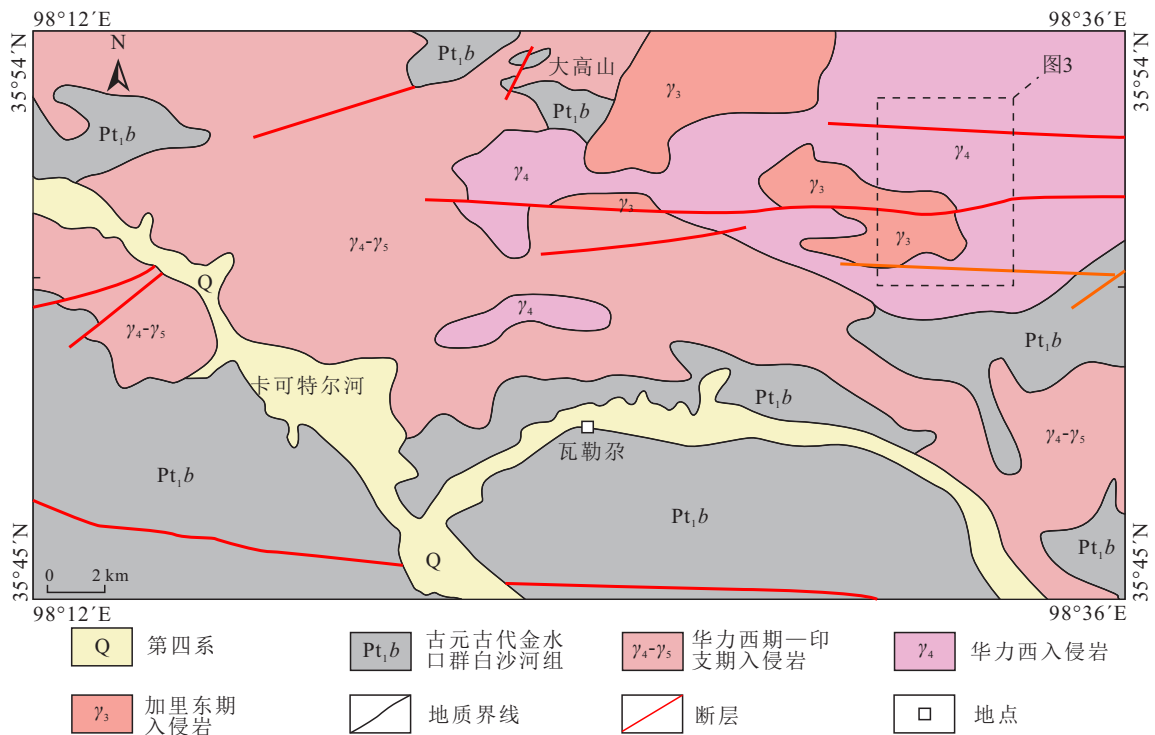


图 2 沟里地区地质简图(据岳维好等, 2017 修改)
Fig. 2 Simplified geological map of the Gouli region

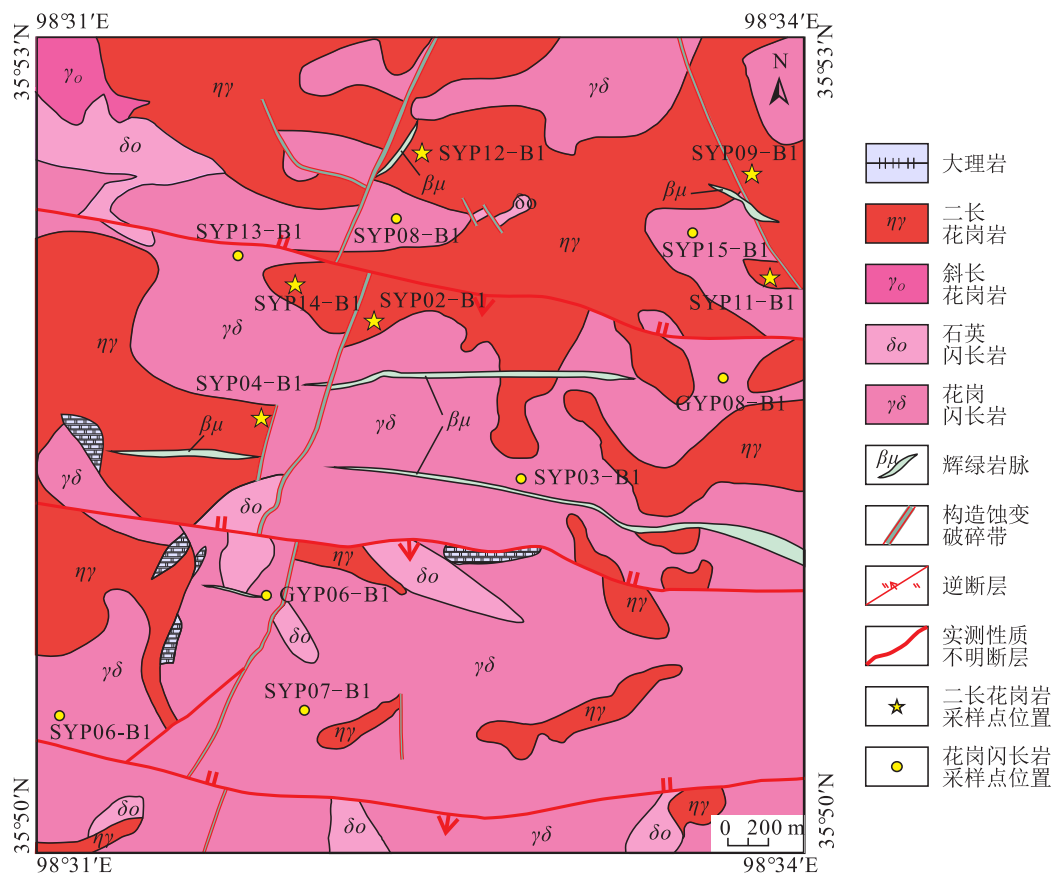


图 3 研究区地质简图(据四川省地质矿产勘查开发局四〇三地质队,2020 修改)

Fig. 3 Simplified geological map of the study area

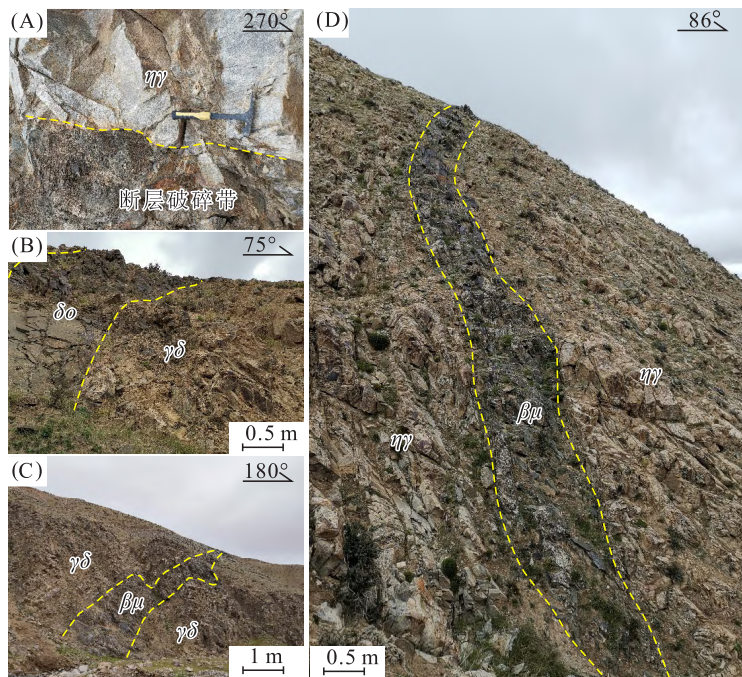


图 4 瓦勒尔花岗质岩体野外露头

Fig. 4 Field outcrop of Walega granite

ηγ. 二长花岗岩; γδ. 花岗闪长岩; δo. 石英闪长岩; βμ. 辉绿岩



图 5 瓦勒尔花岗岩质岩石手标本照片

Fig. 5 Photographs of samples of Walega granitic rocks

(A) 中粗粒二长花岗岩; (B) 中细粒二长花岗岩; (C), (D) 中细粒花岗闪长岩

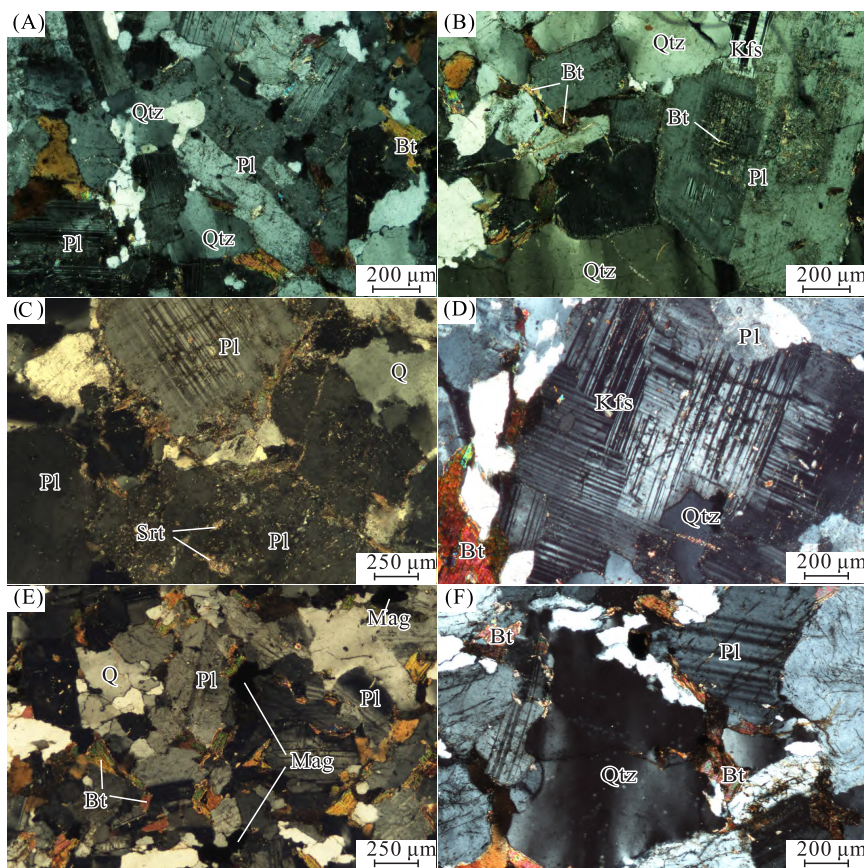


图 6 瓦勒尔花岗岩质岩石显微镜下特征

Fig. 6 Microscopic characteristics of Walega granitic rocks

(A), (B), (C) 二长花岗岩镜下特征; (D), (E), (F) 花岗闪长岩镜下特征;
Bt, 黑云母; Srt, 绢云母; Kfs, 钾长石; Pl, 斜长石; Qtz, 石英; Mag, 磁铁矿

花岗闪长岩新鲜面呈深灰色,具中细粒结构,块状构造(图 5-C,D),主要由斜长石、石英、钾长石、黑云母及少量副矿物组成(图 6-D,E,F)。斜长石(50%~55%):半自形—他形板状,聚片双晶和卡式双晶发育,粒径 0.5~3 mm,内部和边缘偶见绢云母化、白云母化;石英(20%~25%):主要呈填隙状分布在长石间隙,部分呈堆状和溶蚀状聚集分布,具波状消光,粒径较小,一般在 0.2~0.4 mm;钾长石(10%~15%):为半自形板状—他形粒状,呈零散状或填隙状分布,粒径 0.5~2 mm;黑云母(8%~10%):呈叶片状零散分布,粒度一般<1.0 mm,显棕褐色,多色性明显;副矿物主要为磁铁矿,体积分数小于 1%。

2 分析方法

样品的锆石挑选、靶标制备、阴极发光(CL 图像)和透反射显微照相都在北京中科矿研检测技术有限公司完成。分选流程按照标准程序进行,在经过机械粉碎、重磁和电磁分析后,在双目镜下选择晶型完好并且纯净透明的锆石制靶。锆石样品制靶完成后,通过透射光、反射光和阴极发光对锆石进行拍照,以选择测试点。通过 LA-ICP-MS 法测定锆石 U-Pb 年龄,激光剥蚀系统为 ESI NWR 193 nm,ICP-MS 是 Analytikjena PlasmaQuant MS Elite ICP-MS。对锆石 U-Pb 同位素组成分析采用 91500 国际标准锆石(Wiedenbeck et al., 2004)作为外部,微量元素质量分数测定采用 SRM610 作为外标,²⁹Si 作为内标。详细的仪器参数与流程分析参见 Liu et al. (2010)。分析数据的离线处理(包括对样品和空白信号的选择、仪器灵敏度漂移校正、元素含量、U/Th/Pb 同位素比值和年龄计算)用 ICPMSDataCal 软件完成(侯可军等, 2009; Liu et al., 2010)。加权平均年龄计算及谐和图的绘制运用 Ludwig (2003) 编制的 Isoplot 3.0 软件完成。单个数据点的误差均是 1 σ ,平均年龄值的误差是 2 σ 。

主、微量元素的分析测试均在北京中科矿研检测技术有限公司完成,测试的环境条件为:温度 21 $^{\circ}$ C,湿度 58%。采用熔片 X 荧光光谱法(XRF)测定主量元素,所用仪器为岛津 XRF-1800,分析误差优于 5%;使用 Analytikjena PQMS elite ICP-MS 溶样法进行地球化学分析。用于 ICP-

MS 分析的样品分析过程和流程同文献(Qi et al., 2000)。

3 分析结果

3.1 锆石 U-Pb 定年

本次对瓦勒尔二长花岗岩样品(SYP02-B1)和花岗闪长岩样品(SYP07-B1)进行锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年,分析结果见表 1。

二长花岗岩(SYP02-B1, E98 $^{\circ}$ 32'41", N35 $^{\circ}$ 52'58")的锆石晶体呈浅黄至无色的自形—半自形板状、长柱状,粒径为 100~250 μ m,长宽比为 2:1~3:1,具有清晰的岩浆振荡环带,显示岩浆锆石特征(图 7);Th/U 值在 0.04~0.91,绝大多数大于 0.1,平均为 0.38,表明其为岩浆锆石(Belousova et al., 2002; Rubatto, 2002)。该样品共测试了 36 个点,测点 10~18 的 Th, U 含量极高,可能影响测年的准确性;测点 21~25, 27, 34, 36 年龄较小,且存在铅丢失;测点 9, 26, 31, 33, 35 年龄较大,应是继承锆石或捕虏锆石,且也存在铅丢失;剩余 14 个测点的²⁰⁶Pb/²³⁸U 和²⁰⁷Pb/²³⁵U 谐和性较好,²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄相对集中,所有测点都集中在谐和线上或附近,得到的²⁰⁶Pb/²³⁸U 加权平均年龄为 414.2 \pm 2.3 Ma (MSWD=0.46, 图 7),代表了二长花岗岩的结晶年龄。

花岗闪长岩(SYP07-B1; E98 $^{\circ}$ 32'17", N35 $^{\circ}$ 50'48")样品所分选的锆石晶形清晰、无色透明,多呈棱柱状或椭圆状,粒径相对较小,多在 100~150 μ m 之间,长宽比约为 2:1,锆石内部有明显的岩浆结晶环带,显示岩浆锆石特征(Belousova et al., 2002; Rubatto, 2002)(图 7)。该样品共测试了 31 个点,峰值年龄为 419 Ma,多数测点的年龄较老,存在铅丢失,应是继承锆石或捕虏锆石,²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄主要在 548.5 \pm 16.2~1 631.2 \pm 16.4 Ma,还有一个测点具有更老的²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄,为 2 167.5 \pm 22.0 Ma;其余 5 个测点的年龄较年轻,²⁰⁶Pb/²³⁸U 和²⁰⁷Pb/²³⁵U 谐和性较好,²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄相对集中,²⁰⁶Pb/²³⁸U 加权平均年龄是 416.9 \pm 5.3 Ma (MSWD=0.18, 图 7),代表了花岗闪长岩的结晶年龄。此外,罗明非(2015)从邻区确加花岗闪长岩中获得 417.5 \pm 1.5 Ma 的相近年龄。因此,本文认为瓦勒尔花岗闪长岩形成年龄约为 419~417 Ma。

表 1 瓦勒奈花岗岩锆石 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素测年结果
Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Pb isotopic dating of Walega granitic rocks

分析点	Th/ 10 ⁻⁶	U/ 10 ⁻⁶	Th/U	同位素比值				年龄/Ma				谱和度/ %				
				²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U		1σ			
1	202.28	348.15	0.58	0.0537	0.0014	0.4926	0.0137	0.0665	0.0006	366.7	61.1	406.7	9.3	414.9	3.7	98
2	182.11	555.93	0.33	0.0534	0.0008	0.4859	0.0093	0.0659	0.0009	346.4	39.8	402.1	6.4	411.6	5.2	97
3	87.13	191.84	0.45	0.0563	0.0016	0.5091	0.0154	0.0657	0.0011	464.9	28.7	417.9	10.4	410.2	6.4	98
4	59.71	210.16	0.28	0.0581	0.0017	0.5334	0.0160	0.0665	0.0005	531.5	64.8	434.1	10.6	415.1	3.3	95
5	151.33	414.47	0.37	0.0546	0.0012	0.5120	0.0157	0.0676	0.0011	398.2	54.6	419.8	10.5	421.7	6.5	99
6	211.54	503.58	0.42	0.0565	0.0013	0.5175	0.0138	0.0663	0.0010	472.3	50.0	423.5	9.2	414.0	6.2	97
7	136.91	394.39	0.35	0.0556	0.0012	0.5160	0.0128	0.0672	0.0007	435.2	48.1	422.5	8.5	419.1	4.0	99
8	95.24	305.65	0.31	0.0561	0.0015	0.5091	0.0146	0.0659	0.0007	457.5	61.1	417.9	9.9	411.2	4.3	98
9	341.41	448.37	0.76	0.0811	0.0009	1.7194	0.0355	0.1535	0.0026	1233.3	-5.6	1015.8	13.3	920.4	14.6	90
10	109702.37	198779.08	0.55	0.0589	0.0015	0.5355	0.0169	0.0662	0.0009	564.9	55.5	435.5	11.2	413.1	5.6	94
11	91680.43	226759.04	0.40	0.0552	0.0014	0.5034	0.0131	0.0662	0.0005	416.7	54.6	414.0	8.8	413.4	3.3	99
12	49078.88	213274.83	0.23	0.0583	0.0019	0.5297	0.0165	0.0661	0.0011	542.6	67.6	431.6	11.0	412.6	6.6	95
13	74933.95	212736.25	0.35	0.0734	0.0012	1.4117	0.0246	0.1394	0.0013	1025.0	32.6	893.9	10.4	841.3	7.6	93
14	21697.90	556554.57	0.04	0.0569	0.0014	0.5128	0.0134	0.0653	0.0009	487.1	55.6	420.4	9.0	407.9	5.4	96
15	115981.43	216426.08	0.54	0.0582	0.0015	0.4859	0.0141	0.0605	0.0007	600.0	59.3	402.1	9.6	378.9	4.0	94
16	63453.12	196803.80	0.32	0.0658	0.0029	0.5938	0.0244	0.0658	0.0014	1200.0	99.1	473.3	15.6	411.0	8.2	85
17	116899.31	488054.17	0.25	0.0623	0.0015	0.5745	0.0129	0.0668	0.0007	683.3	56.5	460.9	8.3	417.0	4.1	89
18	189048.49	489764.53	0.39	0.0614	0.0013	0.5589	0.0119	0.0659	0.0005	653.7	46.3	450.8	7.8	411.6	3.1	90
19	94.69	338.15	0.28	0.0556	0.0013	0.5071	0.0133	0.0660	0.0008	438.9	58.3	416.5	9.0	412.0	5.1	98
20	204.56	511.08	0.40	0.0549	0.0010	0.5009	0.0104	0.0659	0.0006	405.6	42.6	412.3	7.0	411.5	3.5	99
21	215.52	305.25	0.71	0.0553	0.0013	0.4675	0.0128	0.0611	0.0009	433.4	51.8	389.4	8.9	382.5	5.8	98
22	164.59	475.41	0.35	0.0554	0.0010	0.4711	0.0109	0.0614	0.0009	427.8	45.4	391.9	7.5	384.1	4.9	97
23	225.00	321.09	0.70	0.0554	0.0012	0.4725	0.0118	0.0617	0.0009	431.5	43.5	392.9	8.1	385.7	5.3	98
24	117.46	235.94	0.50	0.0581	0.0013	0.4750	0.0115	0.0593	0.0008	531.5	52.8	394.6	7.9	371.1	4.6	93
25	100.32	244.59	0.41	0.0567	0.0015	0.4804	0.0136	0.0615	0.0009	479.7	89.8	398.4	9.3	384.6	5.6	96
26	37.53	291.33	0.13	0.0678	0.0011	1.1368	0.0383	0.1200	0.0029	864.8	34.4	771.0	18.2	730.8	17.0	94
27	107.98	277.47	0.39	0.0551	0.0016	0.4596	0.0126	0.0606	0.0006	416.7	64.8	384.0	8.8	379.1	3.5	98
28	174.09	450.36	0.39	0.0549	0.0010	0.5022	0.0086	0.0662	0.0005	409.3	43.5	413.2	5.8	413.4	3.1	99
29	100.10	336.79	0.30	0.0558	0.0014	0.5170	0.0133	0.0672	0.0009	455.6	53.7	423.1	8.9	419.5	5.3	99
30	129.25	293.92	0.44	0.0556	0.0016	0.4961	0.0158	0.0659	0.0019	435.2	64.8	409.0	10.7	411.1	11.7	99
31	42.33	610.75	0.07	0.0669	0.0008	1.1063	0.0299	0.1191	0.0025	835.2	25.9	756.4	14.4	725.3	14.4	95
32	48.82	283.35	0.17	0.0533	0.0014	0.4856	0.0130	0.0663	0.0008	338.9	59.3	401.9	8.9	413.7	4.9	97
33	227.70	250.54	0.91	0.0604	0.0012	0.7412	0.0151	0.0891	0.0009	616.7	44.4	563.1	8.8	550.0	5.4	97
34	119.22	352.35	0.34	0.0553	0.0012	0.4669	0.0108	0.0613	0.0007	433.4	48.1	389.1	7.5	383.3	4.3	98
35	167.62	459.45	0.36	0.0622	0.0010	0.7268	0.0200	0.0842	0.0016	683.3	30.6	554.7	11.8	520.9	9.3	93
36	173.82	390.64	0.44	0.0568	0.0012	0.4667	0.0107	0.0596	0.0008	487.1	46.3	388.9	7.4	373.3	4.7	95

二长花岗岩 SYP02-B1

续表 1

分析点	Th/ 10 ⁻⁶	U/ 10 ⁻⁶	Th/U	同位素比值						年龄/Ma						谐和度/ %				
				207Pb/206Pb		207Pb/235U		206Pb/238U		1σ		207Pb/206Pb		207Pb/235U			206Pb/238U		1σ	
				1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ		1σ	1σ	1σ	
1	137.86	169.53	0.81	0.0817	0.0017	2.2242	0.0636	0.1979	0.0044	1238.9	41.8	1188.7	20.0	1163.8	23.7	97				
2	58.46	429.93	0.14	0.0930	0.0031	1.6716	0.0600	0.1302	0.0017	1488.6	58.5	997.8	22.8	788.9	9.7	76				
3	294.29	613.12	0.48	0.0760	0.0018	1.7354	0.0625	0.1647	0.0028	1094.4	43.5	1021.7	23.2	983.1	15.5	96				
4	140.29	492.95	0.33	0.0913	0.0018	2.4017	0.0497	0.1906	0.0022	1453.7	36.0	1243.1	14.8	1124.7	11.9	90				
5	137.05	242.29	0.57	0.0884	0.0022	2.9092	0.0734	0.2385	0.0031	1392.3	47.4	1384.3	19.1	1379.1	16.1	99				
6	98.28	422.65	0.23	0.0695	0.0019	1.3040	0.0350	0.1360	0.0018	922.2	55.6	847.5	15.4	822.2	10.3	96				
7	307.26	288.14	1.07	0.0810	0.0017	2.1556	0.0604	0.1928	0.0039	1220.4	36.6	1166.8	19.4	1136.7	21.1	97				
8	78.79	658.59	0.12	0.0706	0.0014	1.4662	0.0304	0.1504	0.0015	946.3	39.4	916.6	12.5	903.1	8.4	98				
9	120.82	185.18	0.65	0.1097	0.0024	4.3676	0.1026	0.2879	0.0033	1794.8	40.3	1706.2	19.4	1631.2	16.4	95				
10	95.20	131.94	0.72	0.0811	0.0028	2.3145	0.0759	0.2071	0.0026	1233.3	73.1	1216.7	23.2	1213.4	14.1	99				
11	35.84	434.94	0.08	0.0679	0.0015	1.8745	0.0388	0.1462	0.0027	864.8	44.4	878.1	16.6	879.6	15.1	99				
12	25.04	358.97	0.07	0.0958	0.0027	1.9231	0.0737	0.1446	0.0023	1544.1	49.1	1089.1	25.6	870.7	13.2	77				
13	284.24	567.01	0.50	0.0903	0.0021	2.2521	0.0545	0.1803	0.0021	1431.5	44.4	1197.4	17.0	1068.9	11.2	88				
14	402.57	530.01	0.76	0.0556	0.0014	0.5170	0.0147	0.0670	0.0008	435.2	55.6	423.1	9.9	418.3	4.6	98				
15	66.74	509.31	0.13	0.0615	0.0016	0.7573	0.0213	0.0890	0.0009	657.4	49.1	572.5	12.3	549.4	5.2	95				
16	67.66	456.61	0.15	0.0740	0.0022	1.0981	0.0398	0.1072	0.0023	1042.6	60.3	752.4	19.3	656.3	13.6	86				
17	155.45	631.43	0.25	0.0618	0.0019	0.7702	0.0415	0.0888	0.0027	664.8	65.6	579.9	23.8	548.5	16.2	94				
18	78.71	320.59	0.25	0.0813	0.0025	1.3503	0.0569	0.1198	0.0024	1229.3	59.4	867.7	24.6	729.3	13.8	82				
19	132.74	320.76	0.41	0.0554	0.0018	0.5121	0.0175	0.0670	0.0010	431.5	74.1	419.9	11.8	417.9	5.8	99				
20	179.99	556.92	0.32	0.0715	0.0021	1.1823	0.0371	0.1198	0.0023	972.2	61.1	792.4	17.3	729.1	13.2	91				
21	29.73	646.67	0.05	0.0687	0.0014	1.3690	0.0360	0.1439	0.0022	888.6	38.0	875.8	15.4	866.5	12.6	98				
22	24.46	385.59	0.06	0.0659	0.0014	0.9802	0.0219	0.1075	0.0012	805.6	43.4	693.7	11.2	658.1	7.1	94				
23	140.40	157.19	0.89	0.0899	0.0022	3.2702	0.0866	0.2638	0.0039	1433.3	78.7	1474.0	20.6	1509.1	20.0	97				
24	13.42	621.26	0.02	0.0586	0.0014	0.5463	0.0193	0.0672	0.0012	553.7	53.7	442.5	12.7	419.0	7.5	94				
25	3.52	469.63	0.01	0.0551	0.0019	0.5085	0.0195	0.0667	0.0011	416.7	75.0	417.5	13.1	416.3	6.7	99				
26	3.97	696.74	0.01	0.0575	0.0035	0.5247	0.0277	0.0661	0.0010	509.3	133.3	428.3	18.5	412.5	6.2	96				
27	250.64	286.56	0.87	0.1545	0.0029	8.5513	0.1900	0.3997	0.0048	2396.0	31.6	2291.4	20.2	2167.5	22.0	94				
28	125.94	354.90	0.35	0.0598	0.0022	0.8072	0.0302	0.0976	0.0012	594.5	75.0	600.9	17.0	600.3	6.8	99				
29	55.41	401.18	0.14	0.0699	0.0016	1.4428	0.0362	0.1496	0.0023	925.6	48.2	906.9	15.1	899.0	12.6	99				
30	95.35	357.84	0.27	0.1487	0.0030	5.5074	0.2369	0.2641	0.0090	2331.2	34.6	1901.8	37.0	1510.8	46.0	77				
31	309.15	344.46	0.90	0.0775	0.0022	1.4888	0.0443	0.1389	0.0018	1144.5	57.4	925.8	18.1	838.2	10.0	90				

花崗閃長岩 SYP07-B1

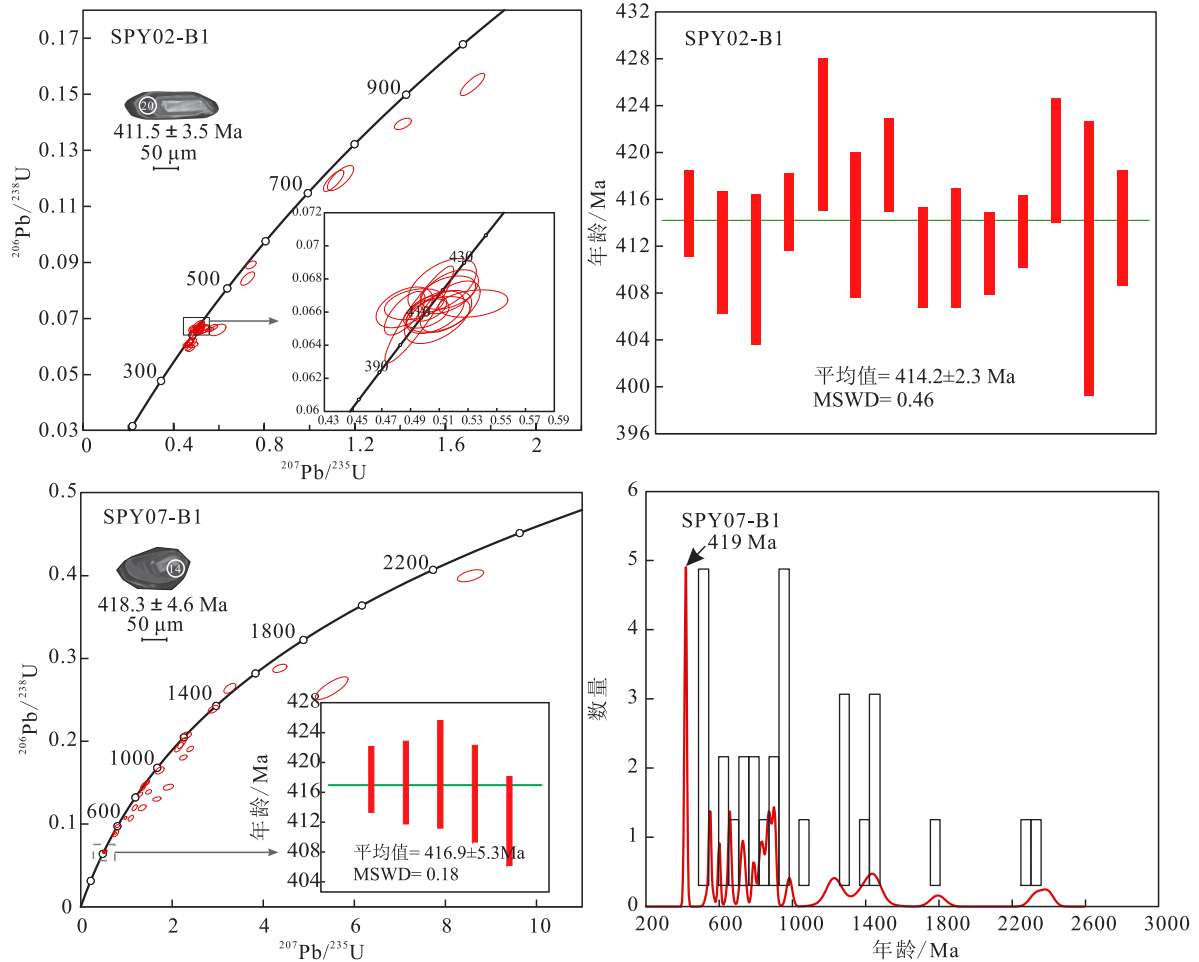


图 7 瓦勒尔花岗岩质岩石岩锆石 U-Pb 谐和曲线图和加权平均年龄图

Fig. 7 Curves of zircon U-Pb concordance and map of the weighted average age of Walega granitic rocks

3.2 主量元素

瓦勒尔二长花岗岩和花岗闪长岩样品的主量元素测试结果和特征值见表 2。

二长花岗岩样品中 SiO_2 质量分数为 69.34wt.%~72.16wt.%, K_2O 和 Na_2O 质量分数分别为 0.85wt.%~1.54wt.%、4.40wt.%~5.74wt.%, $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ 值为 5.94wt.%~6.70wt.%, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 值为 0.15~0.35; CaO 质量分数为 2.45wt.%~3.23wt.%, TFeO 质量分数为 1.43wt.%~2.28wt.%, MgO 质量分数为 0.63wt.%~1.18wt.%; 固结指数 (SI) 均值为 9.67, 分异指数 (DI) 均值为 81.56, 烧失量变化范围为 0.57wt.%~1.36wt.%。在 TAS 图解中 (图 8-A), 样品点落入花岗岩和花岗闪长岩交界范围内; 在 SiO_2 - K_2O 图解中 (图 8-B), 样品点落入低钾系列与钙碱性系列之间; Al_2O_3 质量分数为 15.45wt.%~16.77wt.%, 铝饱和指数 ($A/$

CNK) 介于 1.05~1.06, 在 A/CNK - A/NK 图解中 (图 8-C), 样品点均位于弱过铝质范围内; 里特曼指数 (σ) 变化范围为 1.28~1.58, 小于 3.3, 主要表现为钙碱性。因此瓦勒尔二长花岗岩属于低钾-钙碱性系列弱过铝质岩石。

花岗闪长岩样品 SiO_2 质量分数为 63.33wt.%~68.65wt.%, K_2O 质量分数为 1.98wt.%~3.50wt.%, Na_2O 质量分数为 3.06wt.%~4.40wt.%, $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ 值为 5.17wt.%~6.56wt.%, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 值为 0.45~1.14; CaO 质量分数为 3.00wt.%~5.11wt.%, TFeO 质量分数为 3.66wt.%~5.70wt.%, MgO 质量分数为 1.14wt.%~2.19wt.%; 固结指数 (SI) 均值为 11.38, 分异指数 (DI) 均值为 75.00。在 TAS 图解中 (图 8-A), 样品点落入花岗闪长岩范围内; 在 SiO_2 - K_2O 图解中 (图 8-B), 样品点落入钙碱性系列与高钾钙碱性系列之间; Al_2O_3 质

量分数为 14.92wt. %~16.99wt. %, 铝饱和指数 (A/CNK) 介于 1.02~1.11, 在 A/CNK-A/NK 图解中(图 8-C)花岗岩样品绝大部分落入弱过铝质区域, 除 SYP07 样品 A/CNK = 1.11, 大于

1.1, 其余样品 A/CNK 值均小于 1.1, 显示弱过铝质特征; 里特曼指数(σ)变化范围为 1.27~1.92, 表现为钙碱性。所以瓦勒尔花岗岩闪长岩属于钙碱性与高钾钙碱性系列弱过铝质岩石。

表 2 瓦勒尔花岗岩岩石主量元素质量分数(wt. %)及相关参数

Table 2 Contents of major elements (wt. %) and related parameters of granitic rocks in Walega

样号	二长花岗岩						花岗闪长岩								
	SYP02-B1	SYP04-B1	SYP11-B1	SYP12-B1	SYP14-B1	SYP15-B1	GYP06-B1	SYP13-B1	SYP03-B1	SYP06-B1	SYP07-B1	SYP08-B1	GYP08-B1	GYP09-B1	
SiO ₂	70.53	70.61	69.75	70.38	72.16	69.34	63.82	66.69	66.68	63.33	68.65	68.64	67.92	68.57	
Al ₂ O ₃	16.20	16.47	16.62	15.45	15.55	16.77	16.25	14.99	14.92	16.99	15.14	15.25	15.39	15.06	
Fe ₂ O ₃	0.36	0.65	0.94	0.99	0.84	0.86	3.98	1.58	1.23	1.04	1.00	1.58	2.54	2.54	
FeO	1.09	1.15	1.08	1.36	0.79	1.22	2.01	3.59	3.65	4.14	2.70	2.51	1.44	1.44	
MgO	0.87	0.83	0.87	1.18	0.63	0.98	1.19	1.40	1.32	2.19	1.19	1.14	1.23	1.19	
CaO	2.74	3.05	3.23	3.15	2.45	3.22	3.58	3.00	3.14	5.11	3.11	3.44	3.47	3.46	
Na ₂ O	5.74	5.42	5.35	4.40	5.22	5.26	4.40	3.14	3.06	3.18	3.09	3.25	3.23	3.14	
K ₂ O	0.85	1.14	0.97	1.54	1.48	1.21	1.98	3.05	3.50	1.99	2.64	2.56	2.60	2.72	
TiO ₂	0.22	0.21	0.22	0.27	0.18	0.37	0.56	0.75	0.71	0.89	0.50	0.49	0.55	0.53	
MnO	0.01	0.02	0.02	0.03	0.02	0.03	0.13	0.07	0.07	0.08	0.05	0.05	0.05	0.05	
P ₂ O ₅	0.07	0.07	0.08	0.09	0.05	0.08	0.26	0.26	0.27	0.25	0.16	0.16	0.17	0.16	
烧失量	0.98	0.57	0.87	1.17	0.77	0.76	1.31	1.12	1.11	0.76	1.36	0.76	1.33	1.30	
总量	99.66	100.19	100.00	100.01	100.14	100.10	99.47	99.64	99.66	99.95	99.59	99.83	99.92	100.16	
A/CNK	1.05	1.05	1.06	1.05	1.06	1.06	1.02	1.08	1.03	1.02	1.11	1.06	1.06	1.04	
AR	2.07	2.01	1.93	1.94	2.19	1.96	1.95	2.05	2.14	1.61	1.92	1.90	1.89	1.93	
SI	9.76	9.03	9.45	12.46	7.03	10.28	8.78	10.97	10.34	17.46	11.21	10.33	11.14	10.79	
TFeO	1.43	1.74	1.94	2.28	1.56	2.01	5.70	5.09	4.83	5.12	3.66	3.97	3.78	3.77	
σ	1.57	1.56	1.49	1.28	1.53	1.58	1.92	1.60	1.80	1.30	1.27	1.31	1.35	1.33	
石英	27.04	27.10	27.11	30.99	30.24	26.20	21.52	28.63	26.77	22.51	32.66	31.42	30.78	31.44	
钙长石	12.97	14.37	15.30	14.93	11.57	15.23	16.43	13.39	13.96	24.13	14.53	16.04	16.21	16.16	
钠长石	50.51	47.31	47.06	38.93	45.53	46.22	40.12	28.43	27.56	28.84	27.83	29.00	28.99	28.06	
正长石	5.35	7.11	6.10	9.74	9.23	7.60	12.90	19.74	22.54	12.90	16.99	16.33	16.68	17.37	
刚玉	0.70	0.64	0.74	0.71	0.7	0.78	0.70	1.19	0.73	0.64	1.35	0.88	0.95	0.72	
紫苏辉石	2.78	2.61	2.67	3.52	1.94	2.77	5.35	6.02	6.15	8.65	4.98	4.26	4.27	4.18	
钛铁矿	0.24	0.23	0.24	0.30	0.19	0.40	0.63	0.84	0.79	1.00	0.56	0.54	0.61	0.59	
磁铁矿	0.27	0.49	0.62	0.71	0.51	0.64	1.83	1.23	0.96	0.81	0.78	1.22	1.17	1.17	
磷灰石	0.14	0.14	0.16	0.18	0.10	0.16	0.53	0.53	0.55	0.51	0.32	0.32	0.34	0.32	
合计	100.00	100.00	100.00	100.01	100.01	100.00	100.00	100.00	100.01	100.00	100.00	100.00	100.00	100.01	
分异指数	82.90	81.52	80.27	79.66	85.00	80.02	74.54	76.80	76.87	64.25	77.48	76.75	76.45	76.87	

3.3 微量元素及稀土元素

所有样品的微量元素特征值见表 3, 稀土元素特征值见表 4。

在球粒陨石标准化稀土元素配分图解中(图 9-A), 样品均表现出 LREE 富集、HREE 亏损的配分模式特征, LREE/HREE 稀土元素比值为 6.01~22.85, La_N/Yb_N 比值为 6.93~46.51。样品绝大多数具弱负 Eu 异常($\delta Eu = 0.61 \sim 1.87$,

平均值为 0.86)。二长花岗岩样品稀土元素总量(ΣREE)较低, 变化范围在 $(23.19 \sim 68.89) \times 10^{-6}$, 花岗闪长岩稀土总量(ΣREE)较高, 变化范围在 $(149.54 \sim 344.65) \times 10^{-6}$ 。虽然各岩石样品稀土总量稍有差别, 但配分曲线整体趋势相同, 暗示其具有相似的岩浆来源。在原始地幔标准化蛛网图中(图 9-B), 二者相对富集 Rb, Th, K, Pb, Sr 等元素, 相对亏损 Ba, Nb, Ce, Pr, P, Ti 等元素。

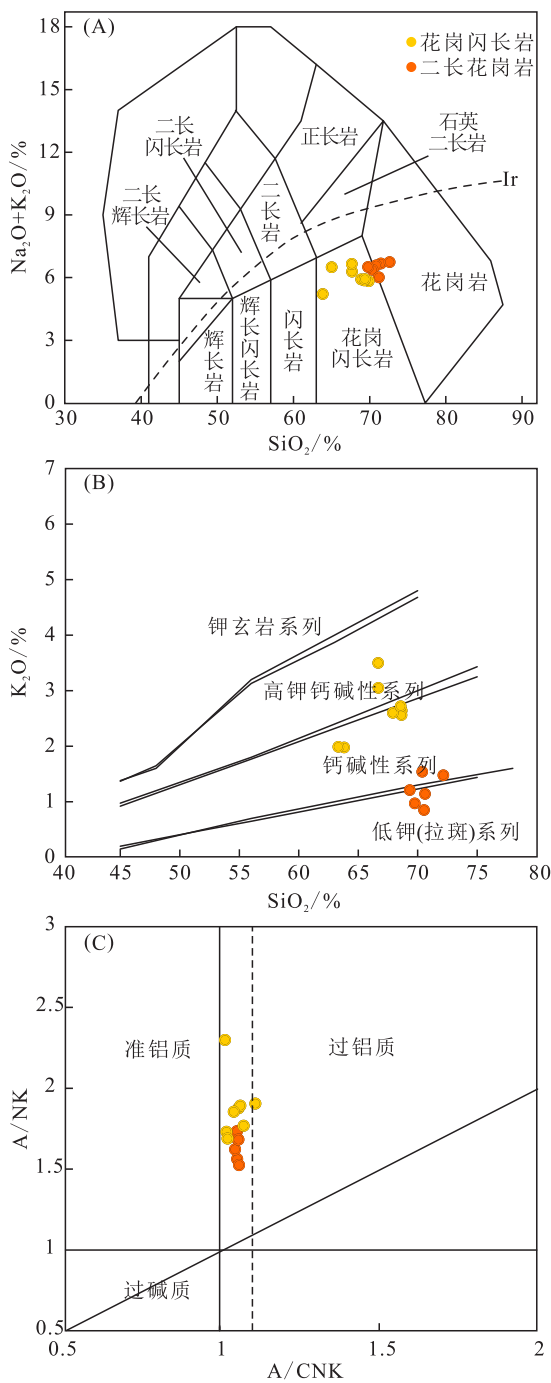


图 8 主量元素图解

Fig. 8 Major elements

(A)底图据 Middlemost, 1994;

(B)底图据 Frost et al., 2001;

(C)底图据 Mania and Piccoli, 1989

4 讨论

4.1 形成时代

结合前人研究,本文对东昆仑地区的早古生

代花岗岩质岩石的锆石 U-Pb 年龄数据进行统计并作图(图 9),可以看出东昆仑造山带存在大规模的花岗质岩浆活动,直方图中明显有一个峰值,年龄范围在 410~420 Ma,说明早泥盆世早期东昆仑造山带的花岗质岩浆活动达到了高峰。这与东昆仑造山带存在大量早泥盆世的岩浆分布是相吻合的。在东昆仑造山带东段,早泥盆世侵入岩面积约占整个早古生代侵入岩面积的 60%(刘彬等, 2012),西段地区同样出露大量早泥盆世的侵入岩(湛宏伟等, 2006)。

本次工作对瓦勒尕二长花岗岩和花岗闪长岩进行了锆石 U-Pb 测年,获得二长花岗岩的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄是 414.2 ± 2.3 Ma,花岗闪长岩的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄是 416.9 ± 5.3 Ma,与邻区确加花岗闪长岩(417.5 ± 1.5 Ma, 罗明非, 2015)、都兰—沟里龙漠卡岩体中花岗闪长岩(409 ± 2 Ma, 王鑫等, 2018)、沟里正长花岗岩(403 ± 2 Ma, Chen et al., 2020)的锆石 U-Pb 年龄基本一致,说明瓦勒尕二长花岗岩和花岗闪长岩形成时代应为早泥盆世,此时东昆仑造山带正处于花岗质岩浆活动的高峰期。

4.2 岩石成因

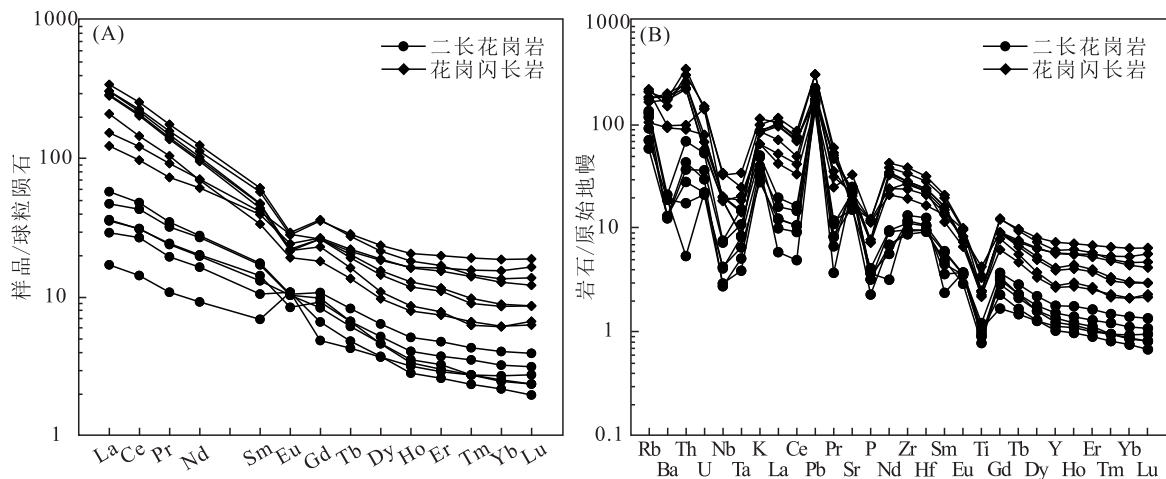
瓦勒尕二长花岗岩和花岗闪长岩主要矿物组成为石英、斜长石、钾长石、黑云母,副矿物以磁铁矿为主,不含堇青石或碱性暗色矿物,符合 I 型花岗岩矿物组合特征(Chappell and White, 1974, 2001)。实验岩石学研究表明,在弱过铝质及准铝质熔体中磷灰石质量分数很低,并且 P_2O_5 与 SiO_2 质量分数之间为负相关关系,在过铝质熔体中 P_2O_5 与 SiO_2 质量分数之间为正相关关系,以此可以区别 I 型花岗岩和 S 型花岗岩(Wolf and London, 1994)。在 SiO_2 — P_2O_5 图解中(图 11-A),样品 SiO_2 与 P_2O_5 质量分数之间总体显示负相关关系,在 SiO_2 —Y 图解中(图 11-B),样品点均落入 I 型花岗岩区域。此外,研究区花岗质岩石样品的 CIPW 标准矿物计算中绝大部分样品刚玉质量分数小于 1%,这也与 S 型花岗岩特征不符(Chappell and White, 1974, 2001)。与同时代的夏日哈木 I 型花岗岩(郭峰等, 2020)相比,它们均具有富硅、富碱、弱过铝质的地球化学特征。综合上述条件,我们认为,瓦勒尕二长花岗岩和花岗闪长岩属于 I 型花岗岩。

表 3 瓦勒杂花岗质岩石微量元素质量分数(10^{-6})及相关参数
Table 3 Trace element content of granitic rocks in Walega (10^{-6}) and related parameters

样号	二长花岗岩						花岗闪长岩							
	SYP02-B1	SYP04-B1	SYP11-B1	SYP12-B1	SYP14-B1	SYP15-B1	GYP06-B1	SYP13-B1	SYP03-B1	SYP06-B1	SYP07-B1	SYP08-B1	GYP08-B1	GYP09-B1
Ba	92.25	91.99	133.17	148.83	87.84	133.51	662.00	1259.18	1074.12	693.00	1321.00	1236.32	1294.00	1424.00
Co	2.54	2.82	3.40	4.51	2.20	3.44	5.11	8.07	7.74	9.86	5.06	5.12	5.47	5.51
Cr	11.90	9.32	13.55	22.28	8.53	13.08	2.28	19.27	17.30	19.95	12.41	16.04	17.7	13.80
Cs	2.81	4.56	2.66	6.55	3.88	6.56	4.52	4.49	4.22	9.59	4.65	3.21	4.63	4.74
Cu	0.85	0.83	0.68	1.51	0.48	1.64	2.73	13.17	6.43	2.96	1.27	2.00	1.21	2.73
Ga	17.45	15.29	16.18	15.37	16.96	16.46	21.17	24.46	23.93	23.20	19.70	21.13	21.10	21.30
Hf	2.99	2.98	3.33	3.28	2.88	3.92	6.57	9.94	8.87	5.18	7.25	7.07	7.50	7.55
Nb	3.04	1.97	2.10	5.45	5.21	2.93	14.30	24.64	23.50	13.17	13.34	13.26	14.60	14.40
Ni	4.66	4.10	6.92	12.68	4.59	5.32	0.25	7.28	6.06	8.52	2.13	3.00	3.96	2.17
Pb	12.36	11.44	9.77	12.30	16.30	11.96	14.42	22.00	22.20	10.70	13.70	14.90	12.70	12.70
Rb	37.89	59.40	45.56	87.52	76.41	82.98	68.00	134.06	142.00	136.00	118.00	106.93	120.00	114.00
Sr	508.73	467.59	525.67	321.54	343.60	535.03	466.93	402.61	338.00	703.00	435.00	480.07	483.00	503.00
Ta	0.27	0.21	0.16	0.63	0.45	0.34	0.77	1.03	1.42	0.85	0.36	0.36	0.61	0.59
Th	2.41	3.73	1.50	5.96	3.17	0.46	7.77	29.89	26.20	8.56	19.60	19.04	21.80	21.60
U	0.47	0.63	0.45	1.13	0.77	0.47	1.70	3.01	3.22	3.06	1.17	1.24	1.45	1.70
V	16.30	15.39	19.36	24.52	12.74	18.18	5.90	56.61	54.00	72.88	43.33	42.40	47.10	46.00
Y	6.18	5.61	4.66	8.15	6.93	5.14	26.32	27.99	33.60	26.10	12.20	12.69	17.90	18.90
Zr	106.04	109.28	133.72	126.39	98.61	150.41	270.00	435.87	382.00	219.00	309.00	299.62	321.00	320.00
Ti	1208.22	1165.99	1296.37	1577.34	1009.70	1389.21	3239.47	4587.09	4329.37	5558.58	2956.98	2846.93	3252.21	3143.61

表 4 瓦勒杂花岗质岩石稀土元素质量分数(10^{-6})及相关参数
Table 4 REE content of granitic rocks in Walega (10^{-6}) and related parameters

样号	二长花岗岩						花岗闪长岩							
	SYP02-B1	SYP04-B1	SYP11-B1	SYP12-B1	SYP14-B1	SYP15-B1	GYP06-B1	SYP13-B1	SYP03-B1	SYP06-B1	SYP07-B1	SYP08-B1	GYP08-B1	GYP09-B1
La	8.43	11.20	6.93	13.70	8.58	4.06	36.42	81.20	72.79	29.30	49.80	67.44	72.53	68.56
Ce	19.13	26.42	16.45	29.44	18.99	8.78	74.80	156.34	138.87	59.70	89.10	125.00	134.00	128.00
Pr	2.28	3.05	1.86	3.31	2.32	1.03	8.76	16.80	14.99	6.95	9.93	13.10	14.15	13.45
Nd	9.24	12.60	7.69	13.00	9.45	4.32	33.16	58.40	52.70	28.70	32.60	44.70	47.90	46.00
Sm	2.01	2.62	1.61	2.69	2.19	1.06	6.33	9.40	8.82	6.04	5.16	6.73	7.29	7.20
Eu	0.60	0.60	0.63	0.61	0.49	0.63	1.65	1.70	1.63	1.41	1.12	1.26	1.25	1.29
Gd	1.72	2.02	1.36	2.22	1.90	1.00	5.39	7.45	7.30	5.50	3.73	4.75	5.40	5.40
Tb	0.23	0.25	0.18	0.31	0.25	0.16	0.80	1.03	1.07	0.83	0.51	0.61	0.72	0.76
Dy	1.18	1.17	0.95	1.63	1.32	0.94	4.69	5.47	6.01	4.79	2.48	2.78	3.68	3.95
Ho	0.20	0.19	0.16	0.29	0.23	0.18	0.93	1.03	1.17	0.92	0.45	0.49	0.67	0.73
Er	0.54	0.50	0.43	0.79	0.62	0.48	2.69	2.80	3.30	2.55	1.23	1.30	1.83	1.93
Tm	0.07	0.07	0.06	0.11	0.09	0.07	0.40	0.37	0.49	0.36	0.17	0.16	0.23	0.25
Yb	0.46	0.43	0.37	0.69	0.55	0.42	2.64	2.31	3.18	2.18	1.05	1.04	1.46	1.51
Lu	0.07	0.06	0.05	0.10	0.08	0.06	0.42	0.35	0.48	0.31	0.16	0.17	0.22	0.22
Y	6.18	5.61	4.66	8.15	6.93	5.14	26.32	27.99	33.60	26.10	12.20	12.69	17.90	18.90
ΣREE	46.16	61.18	38.73	68.89	47.06	23.19	179.08	344.65	312.80	149.54	197.49	269.53	291.33	279.25
LREE/HREE	9.33	12.04	9.88	10.22	8.34	6.01	8.97	15.56	12.60	7.57	19.19	22.85	19.50	17.93
La _N /Yb _N	13.15	18.68	13.43	14.24	11.19	6.93	9.90	25.21	16.42	9.64	34.02	46.51	35.63	32.57
δEu	0.99	0.80	1.30	0.76	0.73	1.87	0.86	0.62	0.62	0.75	0.78	0.68	0.61	0.63



(A) 瓦勒奈花岗岩质岩石球粒陨石标准化稀土元素配分模式图

(B) 原始地幔标准化微量元素蛛网图

图 9 稀土、微量元素蛛网图

Fig. 9 Spider map of rare earth and trace elements

原始地幔及球粒陨石标准化数据 (Sun and McDonough, 1989)

表 5 东昆仑造山带早古生代花岗岩质岩石锆石 U-Pb 年龄统计结果

Table 5 Zircon U-Pb ages of Early Paleozoic granitic rocks in East Kunlun Orogenic Belt

地点	岩性	年龄/Ma	引自	地点	岩性	年龄/Ma	引自
智玉	二长花岗岩	447±1.6	Zhou et al., 2016	野马泉	二长花岗岩	393±2	高永宝等, 2014
智玉	黑云母花岗岩	448±2.5	Zhou et al., 2016	那棱郭勒	黑云母二长花岗岩	420.6±2.6	郝娜娜等, 2014
布青山	花岗闪长岩	487±11	Li et al., 2017	乌兰乌珠尔	钾长花岗岩	421.2±1.9	郝娜娜等, 2014
布青山	花岗闪长岩	479±2	Li et al., 2017	祁漫塔格	花岗岩	461.7±8.4	Li et al., 2013
金水口	石榴堇青石花岗岩	411±17	龙晓平等, 2006	祁漫塔格	花岗岩	428.6±4.4	Li et al., 2013
金水口	黑云母花岗闪长岩	396±18	龙晓平等, 2006	白干湖	正长花岗岩	413.6±2.4	周建厚等, 2015
金水口	花岗质岩石	402±6	张建新等, 2003	祁漫塔格	二长花岗岩	394±13	谌宏伟等, 2006
三通沟	斑状花岗闪长岩	432±2	Zhang et al., 2014	噶顺达乌	黑云母二长花岗岩	393±1.6	张得鑫等, 2016
三通沟	花岗闪长岩	432±2	Zhang et al., 2014	克其克孜苏	花岗岩	442.3±4.4	刘卫东等, 2022
猴头沟	二长花岗岩	419±1.9	严威等, 2016	万宝沟	黑云母二长花岗岩	441±5	王晓霞等, 2021
五龙沟	正长花岗岩	416.9±1.3	李希等, 2014	五龙沟	钾长花岗岩	425.5±2.6	Xin et al., 2018
五龙沟	花岗岩	420±3	王艺龙等, 2018	五龙沟	钾长花岗岩	424.2±1.5	Xin et al., 2018
五龙沟	碱长花岗岩	410.5±1.8	张亮等, 2021	五龙沟	钾长花岗岩	423.5±1.8	Xin et al., 2018

续表 5

地点	岩性	年龄/Ma	引自	地点	岩性	年龄/Ma	引自
黄龙沟	二长花岗岩	417.7±2	陆露等, 2013	阿确墩	二长花岗岩	405.2±3.6	李婷等, 2018
黄龙沟	二长花岗岩	419.7±2.3	陆露等, 2013	乌兰乌珠尔	片麻状花岗岩	475.3±2	许庆林, 2014
深水潭	二长花岗岩	419.9±2	陆露等, 2013	得力斯坦	花岗闪长岩	414.3±1.8	邵东等, 2017
红旗沟	二长花岗岩	419±2	陆露等, 2013	确加	花岗闪长岩	417.5±1.5	罗明非, 2015
乌兰乌珠尔	黑云母花岗岩	457.5±2.3	韩志辉等, 2021	都兰一沟里	花岗闪长岩	409±2	王鑫等, 2018
乌兰乌珠尔	二长花岗岩	422.5±1.6	韩志辉等, 2021	淡水沟	花岗岩	418±3	陈加杰, 2018
大灶火沟	石榴石正长花岗岩	409±2	祁生胜, 2015	黑海	二长花岗岩	414.1±2.0	Lu et al., 2022
小灶火沟	花岗闪长岩	406±2	祁生胜, 2015	黑海	花岗闪长岩	417.8±2.0Ma	Lu et al., 2022
十字沟	花岗闪长岩	419±2	祁生胜, 2015	五龙沟	花岗岩	418±3	Chen et al., 2020
夏日哈木	正长花岗岩	391.1±1.4	王冠等, 2013	沟里	正长花岗岩	403±2	Chen et al., 2020
拉陵灶火	二长花岗岩	396.2±2	陈静等, 2013	跃进山	花岗闪长岩	407±3	刘彬等, 2012
野马泉	花岗闪长岩	386±1	高永宝等, 2014				

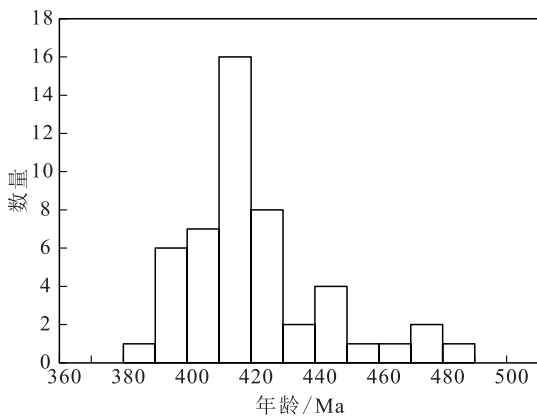


图 10 东昆仑造山带早古生代花岗质岩石锆石 U-Pb 年龄统计直方图

Fig. 10 Zircon U-Pb ages of early Paleozoic granitic rocks in the East Kunlun orogenic belt
数据来源见表 5

研究表明, I 型花岗岩的成因主要有 3 种: 幔源玄武质岩浆的强烈分离结晶 (Beard and Lofgren, 1991); 幔源岩浆底侵使地壳物质部分熔融 (Richards, 2011); 幔源岩浆底侵与长英质岩浆混合发生分离结晶 (邱检生等, 2008)。La-La/Sm

图解 (图 11-C) 和 La-La/Yb (图 11-D) 表明岩石主要为部分熔融形成。前人研究认为, 幔源岩浆直接分异产生高质量分数 SiO₂ 的花岗质岩浆的可能性非常小 (Defant and Drummond, 1990), 而瓦勒尕花岗质岩石 SiO₂ 质量分数高达 63.33%~72.16%, 并且在瓦勒尕花岗质岩石周围并不存在同期玄武质岩石密切共生, 因此, 认为其不可能由幔源岩浆结晶分异形成 (Turner et al., 1992; Frost and Frost, 2011; Namur et al., 2011)。野外工作中未发现研究区花岗质岩石含暗色包体, 表明其不是壳幔混合成因 (Yang et al., 2006)。岩石样品的 Ce/Pb 值 (0.73~10.55)、Nb/U 值 [(3.13~11.40) × 10⁻⁶, 平均值为 7.21 × 10⁻⁶]、Nd/Th 值 [(1.66~9.39) × 10⁻⁶, 平均值为 3.34 × 10⁻⁶], 均与地壳值相近, 与地幔值显著不同 (地壳: Ce/Pb < 15, Nb/U = 8.93, Nd/Th ≈ 3; 地幔: Ce/Pb ≈ 25, Nb/U = 33.59, Nd/Th > 15) (Hofmann et al., 1986; Taylor and McLennan, 1995; Bea et al., 2001)。同时, 区域上同时代花岗岩类普遍具有负的 εNd(t) 值 (图 12-A), 指示岩浆源

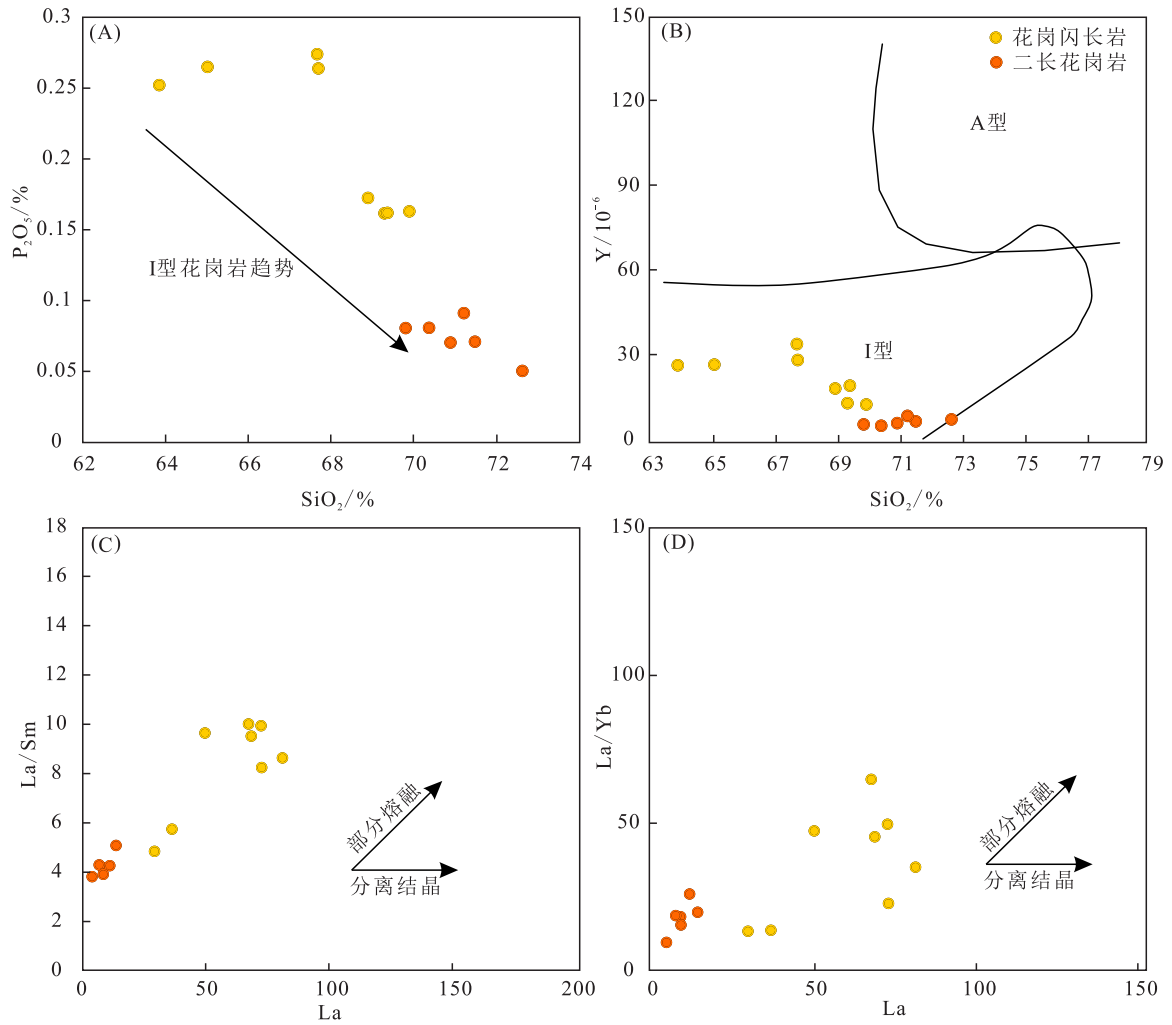


图 11 $\text{SiO}_2\text{-P}_2\text{O}_5$ 、 $\text{SiO}_2\text{-Y}$ 、 La-La/Sm 和 La-La/Yb 图解

Fig. 11 Diagrams of $\text{SiO}_2\text{-P}_2\text{O}_5$, $\text{SiO}_2\text{-Y}$, La-La/Sm , and La-La/Yb

(B)底图据 Collins et al., 1982; (C)底图据 Pearce et al., 1984; (D)底图据 Zhou et al., 2016

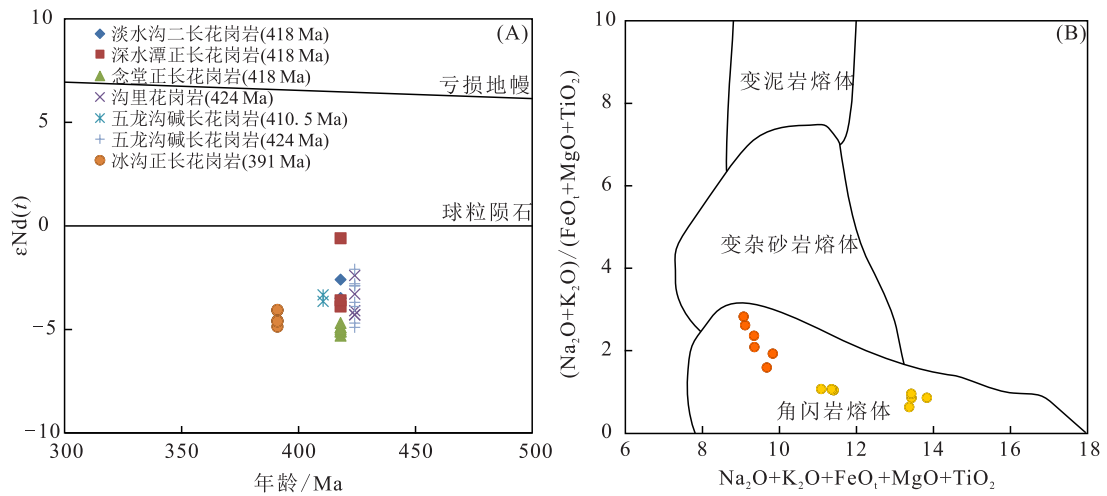


图 12 $\epsilon\text{Nd}(t)\text{-}t$ 和 $(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}+\text{TFeO}+\text{MgO}+\text{TiO}_2)\text{-}(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})/(\text{TFeO}+\text{MgO}+\text{TiO}_2)$ 图解

Fig. 12 Diagrams of $\epsilon\text{Nd}(t)\text{-}t$ and $(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}+\text{TFeO}+\text{MgO}+\text{TiO}_2)\text{-}(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})/(\text{TFeO}+\text{MgO}+\text{TiO}_2)$

(B)底图据 Kaygusuz et al., 2010

区应以地壳物质为主 (Bowring and Housh, 1995)。实验岩石学表明,地壳中基性岩类部分熔融形成的岩石为偏基性的准铝质花岗岩类,斜长角闪岩的脱水熔融可能产生长英质熔体中的钙碱性岩石组合 (Rushmer, 1991; Rapp and Watson, 1995),如花岗闪长岩和闪长岩;在 $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} + \text{TFeO} + \text{MgO} + \text{TiO}_2) - (\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}) / (\text{TFeO} + \text{MgO} + \text{TiO}_2)$ 图解中 (图 12-B),样品点均落在角闪岩熔体区域,结合较为平坦的重稀土元素分布模式特征,认为研究区花岗质岩石应源于下地壳基性岩石部分熔融。

4.3 构造背景

在 $\text{CaO} - (\text{TFeO} + \text{MgO})$ 图解中 (图 13),样品点位于岛弧花岗岩类、大陆弧花岗岩类和大陆碰撞花岗岩类中;在构造背景判别图中 (图 14-A),

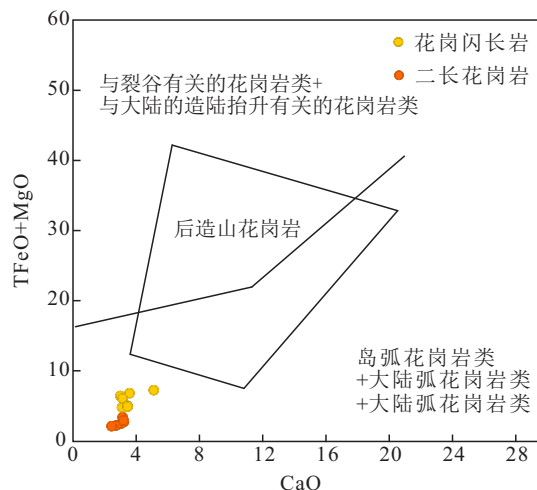


图 13 $\text{CaO} - (\text{TFeO} + \text{MgO})$ 图解
Fig. 13 Diagram of $\text{CaO} - (\text{TFeO} + \text{MgO})$
底图据 Maniar and Piccoli, 1989

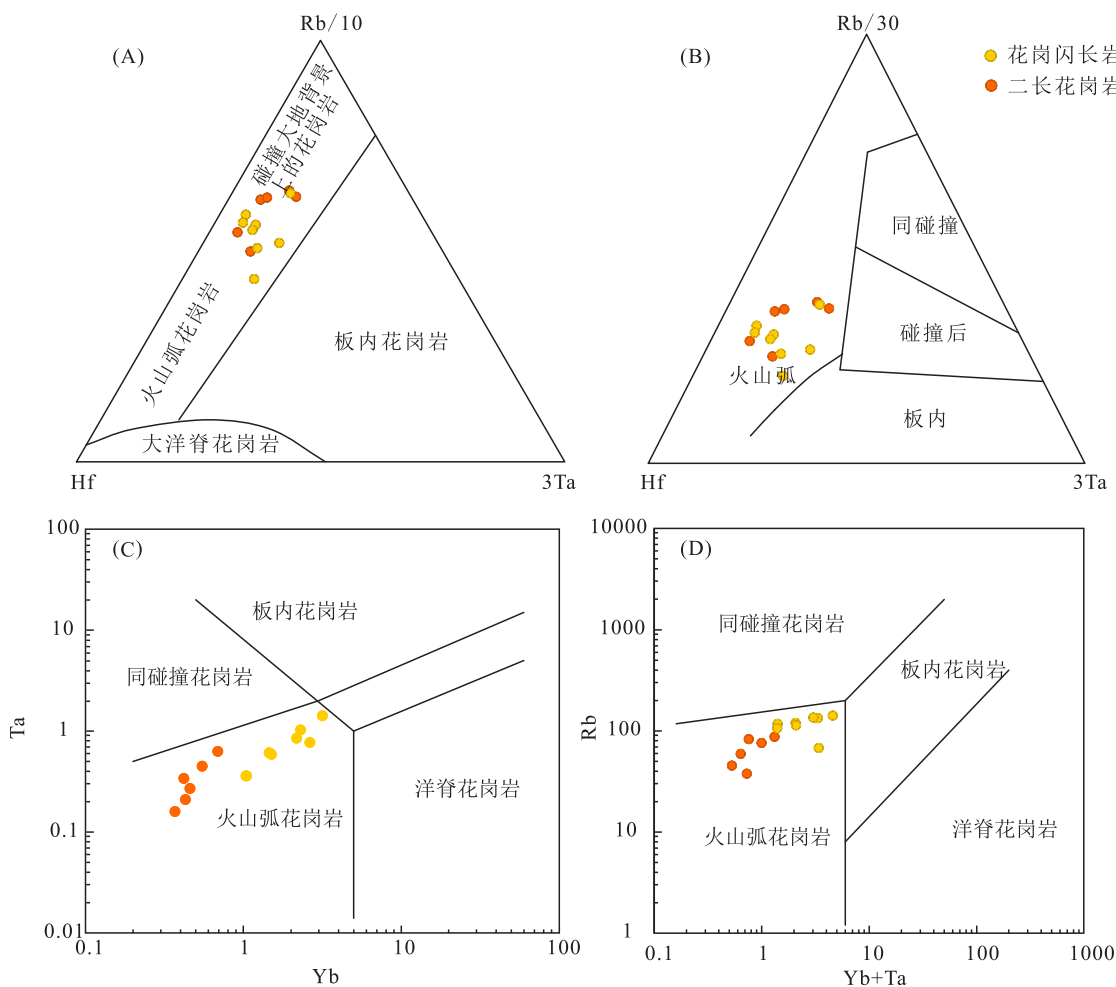


图 14 构造背景判别图
Fig. 14 Tectonic discrimination diagrams
(A), (B)底图据 Harris et al., 1986; (C), (D)底图据 Pearce et al., 1984

样品点主要落入火山弧花岗岩与碰撞大陆背景上的花岗岩之间;在其余构造判别图中(图 14-B,C,D),样品点均分布于火山弧花岗岩区。同碰撞构造环境花岗岩一般具强过铝质特征,而研究区样品铝饱和指数绝大多数小于 1.1,样品明显亏损 Nb,P,Ti 元素,显示出弧岩浆系列特征(闫慧慧等,2020;董涛等,2021),暗示了研究区花岗质岩石形成于岛弧环境。

前人对东昆仑造山带清水泉蛇绿岩的研究表明,原特提斯洋打开和扩张在早寒武世之前(Yang et al.,1996;陆松年等,2002)。早寒武世末期,原特提斯洋进入俯冲阶段,随后产生大量的弧岩浆作用和变质事件(陈能松等,2000;李怀坤等,2006;任军虎等,2009;冯建赟等,2010;张亚峰等,2010;刘彬等,2013;许庆林,2014;祁晓鹏等,2016)。但是关于原特提斯洋的俯冲消减作用持续到何时、原特提斯洋的闭合时限,目前尚有争议。东昆仑造山带南部发育的赛什腾组为一套边缘前陆盆地碎屑沉积,是东昆仑地区原特提斯洋俯冲消减到碰撞闭合的填满沉积记录(Dickinson and Suczek,1979;Bhatia,1983),对研究东昆仑地区原特提斯洋的构造演化有重要意义。靳立杰等(2015)对赛什腾组上段进行碎屑锆石年代学研究,得到赛什腾组中最年轻且可靠碎屑锆石年龄为 421 ± 7 Ma,据此将原特提斯洋的闭合时间限制在晚于 421 Ma。东昆仑诺木洪地区 419 ± 5 Ma 玄武岩岩片的发现(朱云海等,2005),也说明早泥盆世东昆仑地区仍存在残留洋盆。此外,边千韬等(2007)在布青山地区发现形成于洋壳俯冲晚期的埃达克岩(402 ± 24 Ma),也进一步印证了瓦勒尔花岗质岩石形成于洋壳俯冲阶段的可能性。结合研究区花岗质岩石的成因和形成时代,本文认为原特提斯洋俯冲消减作用可持续至 414 Ma,间接表明原特提斯洋在 414 Ma 尚未完全关闭。

5 结论

a. 瓦勒尔二长花岗岩和花岗闪长岩的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄分别为 414.2 ± 2.3 Ma 和 416.9 ± 5.3 Ma,显示其成岩时代为早泥盆世。

b. 岩石地球化学分析结果表明,二长花岗岩属于低钾与钙碱性系列弱过铝质岩石,花岗闪长岩属于钙碱性与高钾钙碱性系列弱过铝质岩石,二者岩石成因类型都属于 I 型花岗岩,是下地壳

基性物质熔融形成。

c. 瓦勒尔二长花岗岩和花岗闪长岩形成于岛弧环境,暗示东昆仑地区原特提斯洋俯冲消减作用可持续至 414 Ma。

致谢:感谢四川地质矿产开发局四〇三地质队科创项目基金支持和审稿专家在论文评审过程中给本文提出的宝贵意见。

[参 考 文 献]

- 边千韬,Pospelov I I,李惠民,等,2007. 青海省布青山早古生代末期埃达克岩的发现及其构造意义[J]. 岩石学报,23(5):925-934.
- Bian Q T,Pospelov I I,Li H M,*et al.*,2007. Discovery of the end-Early Paleozoic adakite in the Buqingshan area,Qinghai Province,and its tectonic implications[J]. Acta Petrologica Sinica,23(5):925-934. (in Chinese)
- 陈加杰,2018. 东昆仑造山带东端沟里地区构造岩浆演化与金成矿[D]. 武汉:中国地质大学档案馆.
- Chen J J,2018. Paleozoic-Mesozoic Tectono-magmatic Evolution and Gold Mineralization in Gouli Area,East End of East Kunlun Orogen[D]. Wuhan:The Archive of China University of Geosciences. (in Chinese)
- 陈静,谢智勇,李彬,等,2013. 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,33(2):26-34.
- Chen J,Xie Z Y,Li B,*et al.*,2013. Petrogenesis of Devonian intrusive rock in Lalingzaohuo area,Eastern Kunlun,and its geological significance [J]. Mineral Rock,33(2):26-34. (in Chinese)
- 陈能松,李晓彦,王新宇,等,2006a. 柴达木地块南缘昆北单元变质新元古代花岗岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄[J]. 地质通报,(11):1311-1314.
- Chen N S,Li X Y,Wang X Y,*et al.*,2006a. Zircon SHRIMP U-Pb age of Neoproterozoic metagranite in the North Kunlun unit on the southern margin of the Qaidam block in China[J]. Geological Bulletin of China,(11):1311-1314. (in Chinese)
- 陈能松,李晓彦,张克信,等,2006b. 东昆仑山香日德南部白沙河岩组的岩石组合特征和形成年代的锆石 Pb-Pb 定年启示[J]. 地质科技情报,(6):1-7.
- Chen N S,Li X Y,Zhang K X,*et al.*,2006b. Lithological characteristics of the Baishahe Formation to the south of Xiangride town,Eastern Kunlun Mountains and its age constrained from Zircon Pb-Pb dating[J]. Bulletin of Geological Science and Technology,(6):1-7. (in

- Chinese)
- 陈能松, 孙敏, 张克信, 等, 2000. 东昆仑变闪长岩体的 ^{40}Ar - ^{39}Ar 和 U-Pb 年龄: 角闪石过剩 Ar 和东昆仑早古生代岩浆岩带证据 [J]. 科学通报, 45 (21): 2337-2342.
- Chen N S, Sun M, Zhang K X, *et al.*, 2000. ^{40}Ar - ^{39}Ar and U-Pb ages of the East Kunlun metadiorite body: Evidence for excess Ar in hornblende and the early Paleozoic igneous rock belt in the East Kunlun [J]. Chinese Science Bulletin, 45 (21): 2337-2342. (in Chinese)
- 湛宏伟, 罗照华, 莫宣学, 等, 2006. 东昆仑喀雅克登塔格杂岩体的 SHRIMP 年龄及其地质意义 [J]. 岩石矿物学杂志, (1): 25-32.
- Chen H W, Luo Z H, Mo X X, *et al.*, 2006. SHRIMP ages of Kayakedengtage complex in the East Kunlun Mountains and their geological implications [J]. Acta Petrologica et Mineralogica, (1): 25-32. (in Chinese)
- 邓红宾, 谢启兴, 魏华财, 等, 2018. 东昆仑造山带大水沟中酸性侵入岩的形成时代及岩石地球化学特征 [J]. 中国地质调查, 5 (1): 51-59.
- Deng H B, Xie Q X, Wei H C, *et al.*, 2018. Formation age and petrological geochemical characteristics of intermediate-acid intrusive rocks in Dashuigou of East Kunlun organic belt [J]. Geological Survey of China, 5 (1): 51-59. (in Chinese)
- 董涛, 江小均, 李超, 等, 2021. 滇西北中甸地区普上含矿斑岩锆石 U-Pb 年代学和地球化学特征及其地质意义 [J]. 矿物岩石地球化学通报, 40 (4): 871-888.
- Dong T, Jiang X J, Li C, *et al.*, 2021. Geochronological and geochemical characteristics of the Pushang ore-bearing porphyry in the Zhongdian area of the northwestern Yunnan and its geological significances [J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 40 (4): 871-888. (in Chinese)
- 冯建赞, 裴先治, 于书伦, 等, 2010. 东昆仑都兰可可沙地区镁铁-超镁铁质杂岩的发现及其 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄 [J]. 中国地质, 37 (1): 28-38.
- Feng J Y, Pei X Z, Yu S L, *et al.*, 2010. The discovery of the mafic-ultramafic melange in Kekesha area of Dulan County, East Kunlun region, and its LA-ICP-MS zircon U-Pb age [J]. Geology in China, 37 (1): 28-38. (in Chinese)
- 高晓峰, 校培喜, 谢从瑞, 等, 2010. 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, 29 (7): 1001-1008.
- Gao X F, Xiao P X, Xie C R, *et al.*, 2010. Zircon LA-ICP-MS U-Pb dating and geological significance of Bashierxi granite in the Eastern Kunlun area, China [J]. Geological Bulletin of China, 29 (7): 1001-1008. (in Chinese)
- 高永宝, 李文渊, 钱兵, 等, 2014. 东昆仑野马泉铁矿相关花岗质岩体年代学、地球化学及 Hf 同位素特征 [J]. 岩石学报, 30 (6): 1647-1665.
- Gao Y B, Li W Y, Qian B, *et al.*, 2014. Geochronology, geochemistry and Hf isotopic compositions of the granitic rocks related with iron mineralization in Yemaquan deposit, East Kunlun, NW China [J]. Acta Petrologica Sinica, 30 (6): 1647-1665. (in Chinese)
- 郭峰, 王盘喜, 卞孝东, 等, 2020. 东昆仑夏日哈木地区二长花岗岩年代学、地球化学特征及地质意义 [J]. 中国地质调查, 7 (6): 51-60.
- Guo F, Wang P X, Bian X D, *et al.*, 2020. Geochronological and geochemical characteristics and geological significance of the monzogranite in Xiarihamu area of East Kunlun [J]. Geological Survey of China, 2020, 7 (6): 51-60. (in Chinese)
- 韩志辉, 孙丰月, 田楠, 等, 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 [J]. 地球科学, 46 (1): 13-30.
- Han Z H, Sun F Y, Tian N, *et al.*, 2021. Zircon U-Pb geochronology, geochemistry and geological implications of the early Paleozoic Wulanwuzhuer granites in the Qimantag, East Kunlun, China [J]. Earth Science, 46 (1): 13-30. (in Chinese)
- 郝杰, 刘小汉, 桑海清, 2003. 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, 19 (3): 517-522.
- Hao J, Liu X H, Sang H Q, 2003. Geochemical characteristics and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age of the Ayak adamellite and its tectonic significance in the East Kunlun, Xinjiang [J]. Acta Petrologica Sinica, 19 (3): 517-522. (in Chinese)
- 郝娜娜, 袁万明, 张爱奎, 等, 2014. 东昆仑祁漫塔格晚志留世一早泥盆世花岗岩: 年代学、地球化学及形成环境 [J]. 地质论评, 60 (1): 201-215.
- Hao N N, Yuan W M, Zhang A K, *et al.*, 2014. Late Silurian to early Devonian granitoids in the Qimantage area, East Kunlun Mountains: LA-ICP-MS zircon U-Pb ages, geochemical features and geological setting [J]. Geological Review, 60 (1): 201-215. (in Chinese)
- 侯可军, 李延河, 田有荣, 2009. LA-MC-ICP-MS 锆石原位 U-Pb 定年技术 [J]. 矿床地质, 28 (4):

- 481—492.
- Hou K J, Li Y H, Tian Y R, 2009. In situ U-Pb zircon dating using laser ablation-multi ion counting-ICP-MS [J]. *Mineral Deposits*, 28(4): 481—492. (in Chinese)
- 贾丽辉, 孟繁聪, 冯惠彬, 2014. 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*, 30(8): 2339—2350.
- Jia L H, Meng F C, Feng H B, 2014. Fluid activity during eclogite-facies peak metamorphism: Evidence from a quartz vein in eclogite in the East Kunlun, NW China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 30(8): 2339—2350. (in Chinese)
- 靳立杰, 周汉文, 朱云海, 等, 2015. 东昆仑地区赛什腾组碎屑锆石 U-Pb 年代学: 对其物质来源及地层时代的约束 [J]. *大地构造与成矿学*, 39(4): 691—703.
- Jin L J, Zhou H W, Zhu Y H, *et al.*, 2015. U-Pb age of the detrital zircon from the Serteng Formation in East Kunlun: Constraints on its provenance and formation time [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 39(4): 691—703. (in Chinese)
- 李怀坤, 陆松年, 相振群, 等, 2006. 东昆仑中部缝合带清水泉麻粒岩锆石 SHRIMP U-Pb 年代学研究 [J]. *地质前缘*, 13(6): 311—321.
- Li H K, Lu S N, Xiang Z Q, *et al.*, 2006. SHRIMP U-Pb zircon age of the granulite from the Qingshuiquan area, Central Eastern Kunlun Suture Zone [J]. *Earth Science Frontiers*, 13(6): 311—321. (in Chinese)
- 李婷, 李猛, 胡朝斌, 等, 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 [J]. *地球科学*, 43(12): 4350—4363.
- Li T, Li M, Hu C B, *et al.*, 2018. Zircon U-Pb geochronology, geochemistry and its geological implications of intrusions in Aquedun area from Qimantag, East Kunlun, China [J]. *Earth Science*, 43(12): 4350—4363. (in Chinese)
- 李希, 袁万明, 郝娜娜, 等, 2014. 东昆仑五龙沟花岗岩特征及其构造背景 [J]. *世界地质*, 33(2): 275—288.
- Li X, Yuan W M, Hao N N, *et al.*, 2014. Characteristics and tectonic setting of granite in Wulonggou area, East Kunlun Mountains [J]. *Global Geology*, 33(2): 275—288. (in Chinese)
- 刘彬, 马昌前, 蒋红安, 等, 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 [J]. *岩石学报*, 29(6): 2093—2106.
- Liu B, Ma C Q, Jiang H A, *et al.*, 2013. Early Paleozoic tectonic transition from ocean subduction to collisional orogeny in the Eastern Kunlun region: Evidence from Huxiaoqin mafic rocks [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 29(6): 2093—2106. (in Chinese)
- 刘彬, 马昌前, 张金阳, 等, 2012. 东昆仑造山带东段早泥盆世侵入岩的成因及其对早古生代造山作用的指示 [J]. *岩石学报*, 28(6): 1785—1807.
- Liu B, Ma C Q, Zhang J Y, *et al.*, 2012. Petrogenesis of early Devonian intrusive rocks in the east part of Eastern Kunlun Orogen and implication for early Paleozoic orogenic processes [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 28(6): 1785—1807. (in Chinese)
- 刘卫东, 平艳丽, 刘杰, 等, 2022. 东昆仑造山带西段早古生代花岗岩锆石 LA-ICP-MS 年龄、岩石地球化学特征及地质意义 [J]. *地质论评*, 68(2): 469—487.
- Liu W D, Ping Y L, Liu J, *et al.*, 2022. Zircon LA-ICP-MS ages, petrogeochemical characteristics and geological significance of early Paleozoic granites in the western segment of the East Kunlun orogenic belt [J]. *Geological Review*, 68(2): 469—487. (in Chinese)
- 刘战庆, 裴先治, 李瑞保, 等, 2011. 东昆仑南缘阿尼玛卿构造带布青山地区二期蛇绿岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年及其构造意义 [J]. *地质学报*, 85(2): 185—194.
- Liu Z Q, Pei X Z, Li R B, *et al.*, 2011. LA-ICP-MS zircon U-Pb geochronology of the two suites of ophiolites at the Buqingshan area of the A'nyemaqen Orogenic Belt in the southern margin of East Kunlun and its tectonic implication [J]. *Acta Geologica Sinica*, 85(2): 185—194. (in Chinese)
- 刘忠媛, 闫东东, 赵涵, 等, 2022. 东昆仑沟里地区早古生代花岗岩的岩石成因与地质意义: 来自 U-Pb 年代学和岩石地球化学的约束 [J]. *矿物岩石*, 42(3): 7—19.
- Liu Z Y, Yan D D, Zhao H, *et al.*, 2022. Petrogenesis and geological implications of early Paleozoic Gouli granite in East Kunlun: Constraints from U-Pb geochronology and petrogeochemistry [J]. *Mineralogy and Petrology*, 42(3): 7—19. (in Chinese)
- 龙晓平, 金巍, 葛文春, 等, 2006. 东昆仑金水口花岗岩体锆石 U-Pb 年代学及其地质意义 [J]. *地球化学*, 35(4): 367—376.
- Long X P, Jin W, Ge W C, *et al.*, 2006. Zircon U-Pb geochronology and geological implications of the granitoids in Jinshuikou, East Kunlun, NW China [J]. *Geochimica*, 35(4): 367—376. (in Chinese)
- 陆露, 胡道功, 张永清, 等, 2010. 昆中断裂带同构造花岗岩斑岩锆石 U-Pb 年龄及其构造意义 [J]. *地质力学学报*, 16(1): 36—43.
- Lu L, Hu D G, Zhang Y Q, *et al.*, 2010. Zircon U-Pb ages

- from syntectonic granitic porphyry in the middle Kunlun fault belt and its tectonic significance[J]. *Journal of Geomechanics*, 16(1): 36—43. (in Chinese)
- 陆露, 张延林, 吴珍汉, 等, 2013. 东昆仑早古生代花岗岩锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. *地球学报*, 34(4): 447—454.
- Lu L, Zhang Y L, Wu Z H, *et al.*, 2013. Zircon U-Pb dating of early Paleozoic granites from the East Kunlun Mountains and its geological significance[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 34(4): 447—454. (in Chinese)
- 陆松年, 于海峰, 赵风清, 等, 2002. 青藏高原北部前寒武纪地质初探[M]. 北京: 地质出版社.
- Lu S N, Yu H F, Zhao F Q, *et al.*, 2002. Preliminary Exploration of the Precambrian Geology in the Northern Qinghai Tibet Plateau[M]. Beijing: Geological Publishing House. (in Chinese)
- 罗明非, 2015. 东昆仑东段早古生代—早中生代花岗岩类时空格架及构造意义[D]. 北京: 中国地质大学档案馆.
- Luo M F, 2015. Spatial-temporal Patter and Geological Implications of Early Paleozoic-early Mesozoic Granitoids in the East Kunlun Orogenic Belt (Eastern Segment) [D]. Beijing: The Archive of China University of Geosciences. (in Chinese)
- 罗照华, 柯珊, 曹永清, 等, 2002. 东昆仑印支晚期幔源岩浆活动[J]. *地质通报*, 21(6): 292—297.
- Luo Z H, Ke S, Cao Y Q, *et al.*, 2002. Late Indosinian mantle derived magma activity in the East Kunlun Mountains[J]. *Geological Bulletin of China*, 21(6): 292—297. (in Chinese)
- 孟繁聪, 崔美慧, 吴祥珂, 等, 2013. 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*, 29(6): 2107—2122.
- Meng F C, Cui M H, Wu X K, *et al.*, 2013. Magmatic and metamorphic events recorded in granitic gneisses from the Qimantag, East Kunlun Mountains, Northwest China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 29(6): 2107—2122. (in Chinese)
- 莫宣学, 罗照华, 邓晋福, 等, 2007. 东昆仑造山带花岗岩及地壳生长[J]. *高校地质学报*, 13(3): 403—414.
- Mo X X, Luo Z H, Deng J F, *et al.*, 2007. Granitoids and crustal growth in the East-Kunlun Orogenic Belt[J]. *Geological Journal of China Universities*, 13(3): 403—414. (in Chinese)
- 祁生胜, 2015. 青海省东昆仑造山带火成岩岩石构造组合与构造演化[D]. 北京: 中国地质大学档案馆.
- Qi S S, 2015. *Petrotectonic Assemblages and Tectonic Evolution of the East Kunlun Orogenic Belt in Qinghai Province*[D]. Beijing: The Archive of China University of Geosciences. (in Chinese)
- 祁生胜, 宋述光, 史连昌, 等, 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[J]. *岩石学报*, 30(11): 3345—3356.
- Qi S S, Song S G, Shi L C, *et al.*, 2014. Discovery and its geological significance of early Paleozoic eclogite in Xiarhamu-Suhaitu area, western part of the East Kunlun [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 30(11): 3345—3356. (in Chinese)
- 祁晓鹏, 杨杰, 范显刚, 等, 2016. 东昆仑东段东昆中构造混杂岩带长石山蛇绿岩年代学、地球化学特征及其构造意义[J]. *中国地质*, 43(3): 797—816.
- Qi X P, Yang J, Fan X G, *et al.*, 2016. Age, geochemical characteristics and tectonic significance of Changshishan ophiolite in central East Kunlun tectonic mélange belt along the east section of East Kunlun Mountains [J]. *Geology in China*, 43(3): 797—816. (in Chinese)
- 邱检生, 肖娥, 胡建, 等, 2008. 福建北东沿海高分异 I 型花岗岩的成因: 锆石 U-Pb 年代学、地球化学和 Nd-Hf 同位素制约[J]. *岩石学报*, 24(11): 2468—2484.
- Qiu J S, Xiao E, Hu J, *et al.*, 2008. Petrogenesis of highly fractionated I-type granites in the coastal area of northeastern Fujian Province: Constraints from zircon U-Pb geochronology, geochemistry and Nd-Hf isotopes [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 24(11): 2468—2484. (in Chinese)
- 任军虎, 柳益群, 冯乔, 等, 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[J]. *岩石学报*, 25(5): 1135—1145.
- Ren J H, Liu Y Q, Feng Q, *et al.*, 2009. LA-ICP-MS U-Pb zircon dating and geochemical characteristics of diabase-dykes from the Qingshuiquan area, Eastern Kunlun orogenic belt [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(5): 1135—1145. (in Chinese)
- 邵东, 计文化, 李荣社, 等, 2017. 东昆仑南缘布青山地区得力斯坦花岗闪长岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. *地质通报*, 2017, 36(9): 1562—1568.
- Shao D, Ji W H, Li R S, *et al.*, 2017. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating of granodiorite from Delisitan of the Buqingshan area, southern margin of East Kunlun Mountains, and its geological implications [J]. *Geological Bulletin of China*, 36(9): 1562—1568. (in Chinese)
- 四川省地质矿产勘查开发局四〇三地质队, 2020. 瓦勒杂

- 1: 2000 详查报告[R].
- 403 Geological Team of Sichuan Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development, 2020. Walega 1: 2000 Detailed Investigation Report [R]. (in Chinese)
- 王冠,孙丰月,李碧乐,等,2013. 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, 37(4): 685—697.
- Wang G, Sun F Y, Li B L, *et al.*, 2013. Zircon U-Pb geochronology and geochemistry of the early Devonian syenogranite in the Xiarihamu ore district from East Kunlun, with implications for the geodynamic setting [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 37(4): 685—697. (in Chinese)
- 王国灿,王青海,简平,等,2004. 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, 11(4): 481—490.
- Wang G C, Wang Q H, Jian P, *et al.*, 2004. Zircon SHRIMP ages of Precambrian metamorphic basement rocks and their tectonic significance in the Eastern Kunlun Mountains, Qinghai Province, China [J]. *Earth Science Frontiers*, 11(4): 481—490. (in Chinese)
- 王国灿,张天平,梁斌,等,1999. 东昆仑造山带东段昆中复合蛇绿混杂岩带及“东昆中断裂带”地质涵义[J]. 地球科学, 24(2): 129—133.
- Wang G C, Zhang T P, Liang B, *et al.*, 1999. The geological significance of the middle Kunlun composite ophiolitic melange belt and the "East Kunlun fault zone" in the eastern section of the East Kunlun orogenic belt [J]. *Earth Science*, 24(2): 129—133. (in Chinese)
- 王晓霞,胡能高,王涛,等,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 [J]. 岩石学报, 28(9): 2950—2962.
- Wang X X, Hu N G, Wang T, *et al.*, 2012. Late Ordovician Wanbaogou granitoid pluton from the southern margin of the Qaidam basin: Zircon SHRIMP U-Pb age, Hf isotope and geochemistry [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 28(9): 2950—2962. (in Chinese)
- 王鑫,董国臣,董亮琼,2018. 东昆仑东段早泥盆世花岗岩成因: 来自龙漠卡岩体的证据[J]. 地球科学与环境学报, 40(4): 414—427.
- Wang X, Dong G C, Dong L Q, 2018. Genesis of early Devonian granitoid in east segment of East Kunlun: Evidence from Longmoka pluton [J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 40(4): 414—427. (in Chinese)
- 王艺龙,李艳军,魏俊浩,等,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 [J]. 地球科学, 43(4): 1219—1236.
- Wang Y L, Li Y J, Wei J H, *et al.*, 2018. Origin of late Silurian A-type granite in Wulonggou area, East Kunlun Orogen: Zircon U-Pb age, geochemistry, Nd and Hf isotopic constraints [J]. *Earth Science*, 43(4): 1219—1236. (in Chinese)
- 熊富浩,2014. 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: 中国地质大学档案馆.
- Xiong F H, 2014. Spatial-temporal Pattern, Petrogenesis and Geological Implications of Paleo-Tethyan Granitoids in the East Kunlun Orogenic Belt (Eastern Segment) [D]. Wuhan: The Archive of China University of Geosciences. (in Chinese)
- 许庆林,2014. 青海东昆仑造山带斑岩型矿床成矿作用研究[D]. 吉林: 吉林大学档案馆.
- Xu Q L, 2014. Study on Metallogenesis of Porphyry Deposits in Eastern Kunlun Orogenic Belt, Qinghai Province [D]. Jilin: The Archive of Jilin University. (in Chinese)
- 许志琴,杨经绥,李海兵,等,2006. 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, 80(12): 1793—1806.
- Xu Z Q, Yang J S, Li H B, *et al.*, 2006. The early Palaeozoic terrane framework and the formation of the High-Pressure (HP) and Ultra-High Pressure (UHP) metamorphic belts at the Central Orogenic Belt (COB) [J]. *Acta Geologica Sinica*, 80(12): 1793—1806. (in Chinese)
- 闫慧慧,朱光有,陈志勇,等,2020. 塔里木板块东北缘 I 型花岗岩年代学与地球化学研究 [J]. 岩石学报, 36(11): 3414—3426.
- Yan H H, Zhu G Y, Chen Z Y, *et al.*, 2020. Geochronology and geochemistry of I-type granites in the north-eastern margin of Tarim Plate [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 36(11): 3414—3426. (in Chinese)
- 严威,邱殿明,丁清峰,等,2016. 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), 46(2): 443—460.
- Yan W, Qiu D M, Ding Q F, *et al.*, 2016. Geochronology, petrogenesis, source and its structural significance of

- Houtougou monzogranite of Wulonggou area in Eastern Kunlun Orogen [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 46(2): 443—460. (in Chinese)
- 袁万明, 莫宣学, 喻学惠, 等, 2000. 东昆仑印支期区域构造背景的花岗岩记录 [J]. *地质论评*, 46(2): 203—211.
- Yuan W M, Mo X X, Yu X H, *et al.*, 2000. Granite records of the Indosinian regional tectonic background in the East Kunlun Mountains [J]. *Geological Review*, 46(2): 203—211. (in Chinese)
- 岳维好, 周家喜, 高建国, 等, 2017. 青海都兰县色德日辉绿岩地球化学特征、锆石 U-Pb 年龄及其地质意义 [J]. *矿物岩石地球化学通报*, 36(2): 270—278.
- Yue W H, Zhou J X, Gao J G, *et al.*, 2017. Geochemistry, zircon U-Pb chronology and geological implications of Sederi diabase, Dulan county, Qinghai Province [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 36(2): 270—278. (in Chinese)
- 张得鑫, 魏小林, 曾小平, 等, 2016. 东昆仑西段噶顺达乌地区中泥盆世酸性侵入岩地球化学特征及构造环境分析 [J]. *矿产勘查*, 7(4): 612—623.
- Zhang D X, Wei X L, Zeng X P, *et al.*, 2016. Geochemical characteristics and tectonic setting analysis of middle Devonian intermediate-acid intrusive rock in the Gashundawu area, Eastern Kunlun belt [J]. *Mineral Exploration*, 7(4): 612—623. (in Chinese)
- 张建新, 孟繁聪, 万渝生, 等, 2003. 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*, 22(6): 397—404.
- Zhang J X, Meng F C, Wan Y S, *et al.*, 2003. Early Paleozoic tectonothermal events of the Jinshuikou Group in the southern margin of the Qaidam Basin: Zircon U-Pb SHRIMP age evidence [J]. *Geological Bulletin of China*, 22(6): 397—404. (in Chinese)
- 张亮, 李碧乐, 刘磊, 等, 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 [J]. *岩石学报*, 37(7): 2007—2028.
- Zhang L, Li B L, Liu L, *et al.*, 2021. Chronology, geochemistry and geological significance of the early Devonian bimodal intrusive rock in Wulonggou area, East Kunlun Orogen [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 37(7): 2007—2028. (in Chinese)
- 张亚峰, 裴先治, 丁仁平, 等, 2010. 东昆仑都兰县可可沙地区加里东期石英闪长岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄及其意义 [J]. *地质通报*, 29(1): 79—85.
- Zhang Y F, Pei X Z, Ding S P, *et al.*, 2010. LA-ICP-MS zircon U-Pb age of quartz diorite at the Kekesha area of Dulan County, eastern section of the East Kunlun orogenic belt, China and its significance [J]. *Geological Bulletin of China*, 29(1): 79—85. (in Chinese)
- 周建厚, 丰成友, 李大新, 等, 2015. 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*, 31(8): 2277—2293.
- Zhou J H, Feng C Y, Li D X, *et al.*, 2015. Petrology, geochronology and geochemistry of metallogenetic granite in Baiganhu W-Sn deposit, East Kunlun [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 31(8): 2277—2293. (in Chinese)
- 朱云海, 林启祥, 贾春兴, 等, 2005. 东昆仑造山带早古生代火山岩锆石 SHRIMP 年龄及其地质意义 [J]. *中国科学(D辑: 地球科学)*, 35(12): 1112—1119.
- Zhu Y H, Lin Q X, Jia C X, *et al.*, 2005. Zircon SHRIMP ages of early Paleozoic volcanic rocks in the East Kunlun orogenic belt and their geological implications [J]. *Science in China (Series D)*, 35(12): 1112—1119. (in Chinese)
- Bea F, Arzamastsev A, Montero P, *et al.*, 2001. Anomalous alkaline rocks of Soustov, Kola: Evidence of mantle derived metasomatic fluids affecting crustal materials [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 140(5): 554—566.
- Beard J S, Lofgren G E, 1991. Dehydration melting and water-saturated melting of basaltic and andesitic greenstones and amphibolites at 1, 3, and 6. 9 kb [J]. *Journal of Petrology*, 32(2): 365—401.
- Belousova E A, Griffin W L, O'Reilly S Y, 2002. Igneous zircon: trace element composition as an indicator of source rock type [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 143(5): 602—622.
- Bhatia M R, 1983. Plate tectonics and geochemical composition of sandstones [J]. *Journal of Geology*, 91(6): 611—627.
- Bowring S A, Housh T, 1995. The earth's early evolution [J]. *Science*, 269: 1535—1540.
- Chappell B W, White A J R, 1974. Two contrasting granite types [J]. *Pacific Geology*, 8: 173—174.
- Chappell B W, White A J R, 2001. Two contrasting granite types: 25 years later [J]. *Australian Journal of Earth Sciences*, 48(4): 489—499.
- Chen J J, Fu L B, Wei J H, *et al.*, 2020. Proto-Tethys magmatic evolution along northern Gondwana: Insights from late Silurian-middle Devonian A-type magmatism, East Kunlun Orogen, Northern Tibetan Plateau, China [J]. *Lithos*, 356/357: 105304.

- Collins W J, Beams S D, White A J R, *et al.*, 1982. Nature and origin of A-type granites with particular reference to southeastern Australia[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 80(2):189–200.
- Defant M J, Drummond M S, 1990. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere[J]. *Nature*, 347(6294):662–665.
- Dickinson W R, Suczek C A, 1979. Plate tectonics and sandstone compositions[J]. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 63(12):2164–2182.
- Dong Y P, He D F, Sun S S, *et al.*, 2018. Subduction and accretionary tectonics of the East Kunlun orogen, western segment of the Central China Orogenic System[J]. *Earth Science Reviews*, 186(1):231–261.
- Frost B R, Barnes C G, Collins W J, *et al.*, 2001. A geochemical classification for granitic rocks[J]. *Journal of Petrology*, 42(11):2033–2048.
- Frost C D, Frost B R, 2011. On ferroan (A-type) granitoids: Their compositional variability and modes of origin[J]. *Journal of Petrology*, 52(1):39–53.
- Harris N B W, Pearce J A, Tindle A G, 1986. *Geochemical characteristics of collision-zone magmatism*[J]. Geological Society, London, Special Publications, 19(1):67–81.
- He D F, Dong Y P, Liu X M, *et al.*, 2016a. Tectonothermal events in East Kunlun, Northern Tibetan Plateau: Evidence from zircon U-Pb geochronology[J]. *Gondwana Research*, 30:179–190.
- He D F, Dong Y P, Zhang F F, *et al.*, 2016b. The 1.0 Ga S-type granite in the East Kunlun Orogen, Northern Tibetan Plateau: Implications for the Meso- to Neoproterozoic tectonic evolution[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 130:46–59.
- Hofmann A W, 1988. Chemical differentiation of the Earth: The relationship between mantle, continental crust, and oceanic crust[J]. *Earth & Planetary Science Letters*, 90(3):297–314.
- Hofmann A W, Jochum K P, Seufert M, *et al.*, 1986. Nb and Pb in oceanic basalts: New constraints on mantle evolution[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 79(1–2):33–45.
- Kaygusuz A, Siebel W, Ilbeyli N, *et al.*, 2010. Insight into magma genesis at convergent plate margins: A case study from the Eastern Pontides (NE Turkey) [J]. *Journal of Mineralogy and Geochemistry*, 2010, 187(3):265–287.
- Li W, Neubauer F, Liu Y J, *et al.*, 2013. Paleozoic evolution of the Qimantagh magmatic arcs, Eastern Kunlun Mountains: Constraints from zircon dating of granitoids and modern river sands[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 77:183–202.
- Li Z C, Pei X Z, Li R B, *et al.*, 2017. Early Ordovician island-arc-type manite granodiorite pluton from the Buqingshan tectonic mélange belt in the southern margin of the East Kunlun Orogen: Constraints on subduction of the Proto-Tethyan Ocean[J]. *Geological Journal*, 52(3):510–528.
- Liu Y S, Gao S, Hu Z C, *et al.*, 2010. Continental and oceanic crust recycling induce 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*, 51(1–2):537–571.
- Lu H F, Pan T, Jiao H, *et al.*, 2022. Geochronology, geochemistry, and Hf isotopic compositions of the early Devonian Heihaibei granite in the East Kunlun Orogen, Northwest China[J]. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 59(9):566–579.
- Maniar P D, Piccoli P M, 1989. Tectonic discrimination of granitoids[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 101(5):635–643.
- Meng F C, Cui M H, Wu X K, *et al.*, 2015. Heishan mafic-ultramafic rocks in the Qimantag area of Eastern Kunlun, NW China: Remnants of an early Paleozoic incipient island arc[J]. *Gondwana Research*, 27(2):745–759.
- Meng F C, Zhang J, Cui M, 2013. Discovery of early paleozoic eclogite from the East Kunlun, Western China and its tectonic significance[J]. *Gondwana Research*, 23(2):825–836.
- Middlemost E A K, 1994. Naming materials in the magma/igneous rock system[J]. *Earth-Science Reviews*, 37(3–4):215–224.
- Namur O, Charlier B, Toplis M J, *et al.*, 2011. Differentiation of tholeiitic basalt to A-type granite in the Sept Îles layered intrusion, Canada[J]. *Journal of Petrology*, 52(3):487–539.
- Pearce J A, Harris N B W, Tindle A G, 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks[J]. *Journal of Petrology*, 25(4):956–983.
- Qi L, Hu J, Gregoire D C, 2000. Determination of trace elements in granites by inductively coupled plasma mass spectrometry[J]. *Talanta*, 51(3):507–513.

- Rapp R P, Watson E B, 1995. Dehydration melting of metabasalt at 8-32 kbar: Implications for continental growth and crust-mantle recycling[J]. *Journal of Petrology*, 36(4): 891-931.
- Richards J P, 2011. Magmatic to hydrothermal metal fluxes in convergent and collided margins[J]. *Ore Geology Reviews*, 40(1): 1-26.
- Rubatto D, 2002. Zircon trace element geochemistry partitioning with garnet and the link between U-Pb ages and metamorphism[J]. *Chemical Geology*, 184(1): 123-138.
- Rushmer T, 1991. Partial melting of two amphibolites: Contrasting experimental results under fluid-absent conditions[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 107(1): 41-59.
- Sun S S, McDonough W F, 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes [J]. *Geological Society, London, Special Publication*, 42(1): 313-345.
- Taylor S R, McLennan S M, 1995. The geochemical evolution of the continental crust[J]. *Reviews of Geophysics*, 33(2): 241-265.
- Turner S P, Foden J D, Morrison R S, 1992. Derivation of some A-type magmas by fractionation of basaltic magma: An example from the Padthaway Ridge, South Australia[J]. *Lithos*, 28(2): 151-179.
- Wang F C, Li J Y, Shen Y J, *et al.*, 2022. The early-middle Silurian Delite monzogranite and quartz syenite, East Kunlun Orogenic Belt, NW China: Petrogenesis and implications for tectonic evolution of the Proto-Tethys[J]. *Australian Journal of Earth Sciences*, 70(1): 113-125.
- Wiedenbeck M, Hanchar J M, Peck W H, *et al.*, 2004. Further characterisation of the 91500 zircon crystal [J]. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 28(1): 9-39.
- Wolf M B, London D, 1994. Apatite dissolution into peraluminous haplogranitic melts: An experimental study of solubilities and mechanisms [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 58(19): 4127-4145.
- Xin W, Sun F Y, Li L, *et al.*, 2018. The Wulonggou meta-luminous 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*, 312: 108-127.
- Yang J H, Wu F Y, Chung S L, *et al.*, 2006. A hybrid origin for the Qianshan A-type granite, northeast China: Geochemical and Sr-Nd-Hf isotopic evidence [J]. *Lithos*, 89(1-2): 89-106.
- Yang J S, Robinson P T, Jiang C F, *et al.*, 1996. Ophiolites of the Kunlun Mountains, China and their tectonic implications [J]. *Tectonophysics*, 258(1-4): 215-231.
- Zhang J Y, Ma C Q, Xiong F H, *et al.*, 2014. Early Paleozoic high-Mg diorite-granodiorite in the Eastern Kunlun Orogen, western China: Response to continental collision and slab break-off [J]. *Lithos*, 210: 129-146.
- Zheng Z, Chen Y J, Deng X H, *et al.*, 2018. Origin of the Bashierxi monzogranite, Qiman Tagh, East Kunlun Orogen, NW China: A magmatic response to the evolution of the Proto-Tethys Ocean [J]. *Lithos*, 296: 181-194.
- Zhou B, Dong Y P, Zhang F F, *et al.*, 2016. Geochemistry and zircon U-Pb geochronology of granitoids in the East Kunlun Orogenic Belt, northern Tibetan Plateau: Origin and tectonic implications [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 130: 265-281.
- Zhou X H, Sun M, Zhang G H, *et al.*, 2002. Continental crust and lithospheric mantle interaction beneath North China: Isotopic evidence from granulite xenoliths in Hannuoba, Sino-Korean craton [J]. *Lithos*, 62(3-4): 111-124.

(责任编辑:魏 威)

(上接第 221 页)

- Veizer J, Ala D, Azmy K, *et al.*, 1999. ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr, δ^{13} C and δ^{18} O evolution of Phanerozoic seawater[J]. *Chemical Geology*, 161(1-3): 59-88.
- Veizer J, 1983. Chemical diagenesis of carbonates: Theory and application of trace element technique[J]. *Stable Isotopes in Sedimentary Geology*, 10(3): 1-100.

- Zhang P Y, Wang Y L, Zhang X J, *et al.*, 2022. Carbon, oxygen and strontium isotopic and elemental characteristics of the Cambrian Longwangmiao Formation in South China: Paleoenvironmental significance and implications for carbon isotope excursions[J]. *Gondwana Research*, 106: 174-190.

(责任编辑:魏 威)