

DOI: 10.12401/j.nwg.2022043

# 东昆仑东段沟里地区战红山过铝质流纹斑岩年代学、 岩石成因及构造意义

吴树宽<sup>1,2</sup>, 陈国超<sup>2,3,4,5,6,\*</sup>, 李积清<sup>5</sup>, 陈孝珍<sup>2,4,5</sup>, 李瑞保<sup>2</sup>, 魏均启<sup>6</sup>

(1. 青海省第五地质勘查院, 青海 西宁 810003; 2. 长安大学西部矿产资源与地质工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710054; 3. 自然资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 北京 100037; 4. 南阳理工学院土木工程学院, 河南 南阳 473000; 5. 青海省地质调查院, 青海 西宁 810001; 6. 资源与生态环境地质湖北省重点实验室, 湖北省地质局, 湖北 武汉 430034)

**摘要:** 东昆仑三叠纪花岗质岩石的研究主要集中于具 I 型花岗岩特征的大型花岗岩基, 而对少量出露的过铝质花岗岩研究较少。东昆仑造山带东段沟里地区战红山花岗斑岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素定年结果显示, 战红山流纹斑岩的结晶年龄为 (245±1) Ma。战红山流纹斑岩具有高 Si (SiO<sub>2</sub>=74.50%~75.59%)、富 Na (Na<sub>2</sub>O=4.04%~4.06%), 高 Na<sub>2</sub>O/K<sub>2</sub>O 值 (1.26~1.76) 和铝饱和指数 (A/CNK=1.07~1.14), 呈弱过铝质-过铝质中钾-高钾钙碱性系列。岩石稀土含量较低, 轻、重稀土元素分馏明显, Eu 具轻微的负异常和正异常 ( $\delta\text{Eu}=0.80\sim 1.06$ ); 富集 Ba、Rb、Th、K、U 等大离子亲石元素, 亏损 Nb、Ta、Nd、P、Ti 等高场强元素,  $\epsilon\text{Hf}(t)$  同位素主体呈富集特征 ( $\epsilon\text{Hf}(t)=-4.7\sim +0.9$ )。战红山过铝质流纹斑岩具 I 型花岗岩特征, 为早期俯冲洋壳经过幔源岩浆的底侵和外来流体的加入部分熔融的结果。战红山流纹斑岩具弧岩岩浆地球化学特征, 结合东昆仑造山带东段岩浆岩分布以及沉积地层特征显示, 早三叠世东昆仑地区处于古特提斯洋的俯冲阶段。

**关键词:** 东昆仑; 过铝质花岗岩; 岩石成因; 地球化学; 早三叠世

中图分类号: P59; P584

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2023)02-0092-17

## Geochronology, Petrogenesis and Tectonic Significance of Zhanhongshan Peraluminous Rhyolite Porphyry in Gouli Area, Eastern Section of East Kunlun

WU Shukuan<sup>1,2</sup>, CHEN Guochao<sup>2,3,4,5,6,\*</sup>, LI Jiqing<sup>5</sup>, CHEN Xiaozhen<sup>2,4,5</sup>, LI Ruibao<sup>2</sup>, WEI Junqi<sup>6</sup>

(1. No. 5 Geology Exploration of Qinghai Province, Xining 810003, Qinghai, China; 2. Key Laboratory of Western China's Mineral Resources and Geological Engineering of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 3. Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Ministry of Natural Resources, Beijing 100037, China; 4. School of Civil Engineering, Nanyang Institute of Technology, Nanyang 473000, Henan, China; 5. Geology Survey Institute of Qinghai Province, Xining 810001, Qinghai, China; 6. Hubei Key Laboratory of Resources and Eco-Environment Geology, Hubei Geological Bureau, Wuhan 430034, Hubei, China)

收稿日期: 2021-10-15; 修回日期: 2022-06-07; 责任编辑: 吕鹏瑞

**基金项目:** 青海省省级财政资金地质勘查项目 (2017042034jc015), 中国地质调查局项目 (12120114079701), 自然资源部成矿作用与资源评价重点实验室开放基金项目 (ZS006), 长安大学西部矿产资源与地质工程教育部重点实验室开发基金项目 (300102261505), 河南省科技攻关河南省重点研发与推广专项 (212102310030), 资源与生态环境地质湖北省重点实验室开放基金项目 (KJ2022-35) 和南阳理工学院交叉科学研究项目联合资助成果。

**作者简介:** 吴树宽 (1986-), 男, 硕士, 高级工程师, 构造地质学专业, 主要从事区域矿产调查研究。E-mail: wushukuan@126.com。

\* **通讯作者:** 陈国超 (1979-), 男, 博士, 副教授, 构造地质学专业, 主要从事造山带构造岩浆作用研究。E-mail: chaoschen@126.com。

**Abstract:** The study of Triassic granitic rocks in East Kunlun mainly focuses on the large granite batholith with the characteristics of I-type granite, while the study of a small amount of peraluminous granite is less. The LA-ICP-MS zircon U-Pb dating of The Zhanhongshan rhyolite porphyry shows that the crystallization age of the Zhanhongshan rhyolite porphyry is  $245 \pm 1$  Ma. The Zhanhongshan rhyolite porphyry is characterized by high silica ( $\text{SiO}_2=74.50\% \sim 75.59\%$ ), rich Na ( $\text{Na}_2\text{O}=4.04\% \sim 4.06\%$ ), high  $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$  ratio (1.26~1.76), and aluminum saturation index ( $A/\text{CNK}=1.07 \sim 1.14$ ), which indicate weak peraluminous medium potassium and high potassium calc-alkaline series. The rocks is characterized by low REE content with obvious fractionation of LREE and HREE, slight negative and positive Eu anomalies ( $\delta\text{Eu}=0.80 \sim 1.06$ ), also enrichment of LILE and depletion of HFSE. They have enriched Hf isotopic compositions with  $\varepsilon\text{Hf}(t)$  isotope values of  $-4.7 \sim +0.9$ . It is concluded that the peraluminous Zhanhongshan rhyolite porphyry has the characteristics of I-type granite, which is the result of the underplating of the subducted oceanic crust through mantle-derived magma and partial melting with the addition of foreign fluid, and has arc magmatic geochemical characteristics. Combined with the previous data, the study shows that the East Kunlun area was in the subduction stage of the Paleo-Tethys ocean in the Early Triassic.

**Keywords:** Eastern Kunlun; peraluminous granite; petrogenesis; geochemistry; early Triassic.

花岗岩是大陆地壳的主要组成部分(Rudnick et al., 2003),因此,花岗岩的研究对于理解大陆地壳的形成和演化具有重要意义(Hawkesworth et al., 2006; Lee et al., 2015; Castro, 2021)。过铝质花岗岩由于具有较高的 $\text{SiO}_2$ 含量和铝饱和指数(A/CNK),一般被认为是S型花岗岩,来自于沉积岩类的部分熔融,可以作为陆陆碰撞的证据(Chappell et al., 1987)。但最新研究显示,部分经演化的I型花岗岩和A型花岗岩也可以具有过铝质花岗岩的特征(Chappell et al., 2012; 吴福元等, 2017)。因此,过铝质花岗岩的成因还存在较大的争议。

东昆仑造山带位于中央造山系西段,是中央造山带的重要组成部分,具有早古生代晚期和晚古生代早期为主要造山期的大陆复合造山带(殷鸿福等, 1997; 裴先治等, 2015; Xin et al., 2019; Yu et al., 2020)。经过复杂的构造运动,东昆仑造山带岩浆活动剧烈,以出露巨量的花岗岩类为特征,是一条可以与冈底斯花岗岩带相媲美的巨型岩浆岩带,因此,也有东昆仑花岗岩带之称(罗照华等, 2002; 莫宣学等, 2007; 陈国超等, 2019, 2020; 张照伟等, 2020)。这些岩浆活动以早三叠世最为剧烈,因此早三叠世花岗质岩石的研究对于东昆仑古特提斯洋的构造岩浆演化具有重要意义。近年来,东昆仑三叠纪花岗质岩石的研究主要集中于具I型花岗岩特征的大型花岗岩基(马昌前等, 2015; Xiong et al., 2014, 2019; Zhou et al., 2020; Li et al., 2022),对少量出露的过铝质花岗岩研究较少,一般认为这些过铝质花岗岩具S型花岗岩特征,是东昆仑造

山带陆陆碰撞的产物(邓文兵等, 2016)。

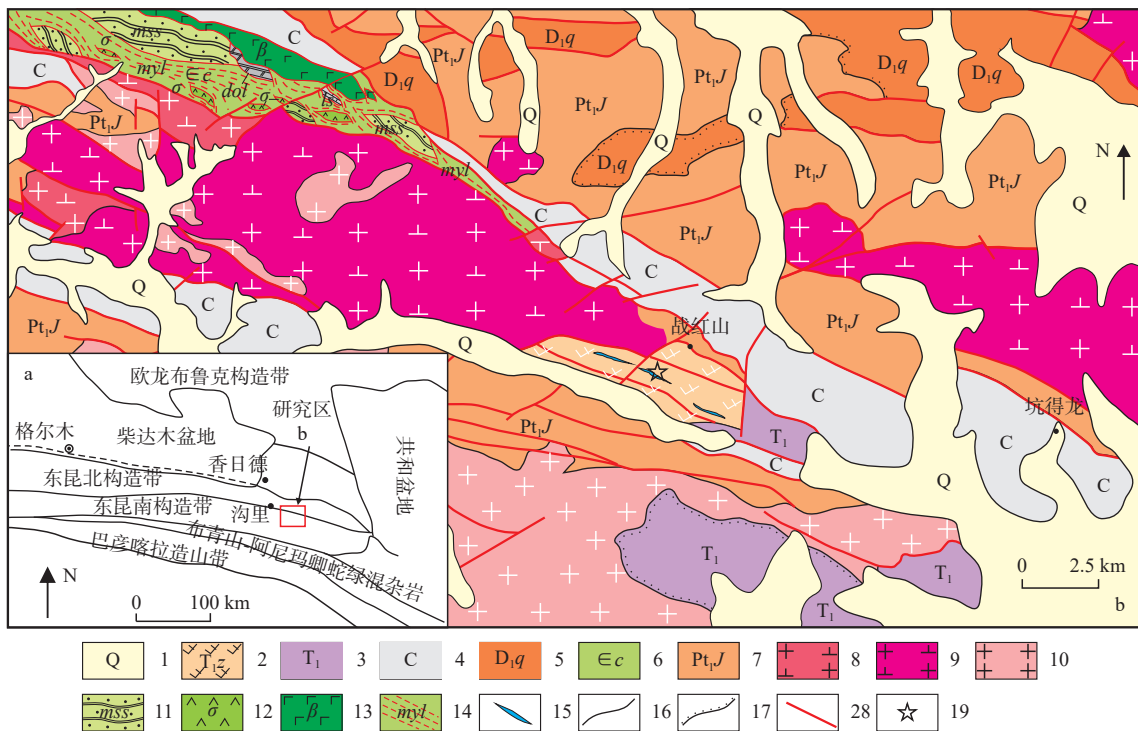
战红山流纹斑岩是在东昆仑战红山地区新识别出一套侵位于早三叠世火山岩具过铝质特征的次火山岩。张新远等(2020)和李积清等(2021)分别对战红山地区的火山岩和花岗斑岩开展了初步年代学和地球化学研究,但是对流纹斑岩的形成时代、源区特征和岩石成因还未有深入研究。基于以上,笔者对战红山流纹斑岩开展锆石U-Pb年代学、岩石地球化学和同位素地球化学方面的研究,查明战红山流纹斑岩的源区特征和岩石成因,进而为东昆仑在晚古生代构造演化提供一定佐证。

## 1 地质背景

东昆仑造山带位于青藏高原东北部,是中央造山带的重要组成部分,由北向南可以划分为东昆北构造带、东昆中构造带和东昆南构造带(于森等, 2017; Dong et al., 2018; 裴先治等, 2018)。研究区位于东昆中构造带与东昆南构造带结合部位(图1a),二者以东昆中构造混杂带为分界。东昆中构造混杂岩带是一条多旋回复合型碰撞缝合带,具有复杂的物质组成和构造变形,由岛弧型岩块、陆缘沉积岩岩块和强变形基质组成,为昆中弧后小洋盆拉伸-俯冲消减的产物(Li et al., 2020a, 2020b)。东昆中构造带以广泛出露古元古界金水口岩群中深变质基底岩系为特征,变质程度可达高绿片岩相-麻粒岩相,局部达榴辉岩相(陈有忻等, 2011; 何凡等, 2020)。早泥盆世契盖苏组磨拉

石建造不整合覆盖在基底岩系之上,在坑得龙一带分布有石炭系哈拉郭勒组碳酸盐岩夹碎屑岩建造。东昆南构造带发育大面积三叠纪沉积地层,包括洪水川组、闹仓坚沟组及希里可特组海相和海陆交互沉积地层(李瑞保等, 2015; 陈国超等, 2019)。研究区岩浆活动丰富,岩浆岩岩性变化较大,从英云闪长岩、花岗闪长岩、二长花岗岩和正长花岗岩皆有出露,但以花岗闪长岩和二长花岗岩为主,大部分花岗岩含有暗色微粒包体,为岩浆混合作用的产物(李瑞保等, 2018; Zhao et al., 2020)。

战红山流纹斑岩位于东昆仑造山带东段都兰县沟里乡东部(图 1a), 侵位于早三叠世火山岩中, 与围岩呈侵入接触关系, 宽约为 10~230 m, 长轴走向近北西西向。战红山地区早三叠世火山岩岩石类型变化较大, 主要为英安岩和流纹岩, 局部夹流纹质凝灰岩(张新远等, 2020)。火山岩西侧、北侧、东侧分别与早三叠世花岗闪长岩、古元古界金水口岩群、三叠系洪水川组碎屑岩呈断层接触, 南部被第四系覆盖(图 1b)。研究显示, 研究区火山岩的形成时代为早三叠世(244~248 Ma)(付彦文等, 2019; 张新远等, 2020)。



1.第四系; 2.早三叠世火山岩; 3.三叠系; 4.石炭系; 5.下一中泥盆统契盖苏组; 6.寒武纪长石山蛇绿构造混杂岩; 7.古元古界金水口岩群; 8.中三叠世正长花岗岩; 9.早三叠世花岗闪长岩; 10.中奥陶世花岗岩; 11.变砂岩岩块; 12.橄辉岩岩块; 13.玄武岩岩块; 14.糜棱岩; 15.流纹斑岩脉; 16.地质界线; 17.角度不整合界线; 18.断层界线; 19.同位素样品采样点

图 1 东昆仑造山带构造位置图(a)和战红山地区地质简图(b)

Fig. 1 (a) Tectonic location map of East Kunlun orogenic belt and (b) sketch geological map of the Zhanhongshan area

## 2 岩相学特征

战红山流纹斑岩呈浅肉红色(图 2a), 由斑晶(30%)和基质(70%)2部分组成。斑晶主要为石英、斜长石和黑云母, 斑晶长轴主体为 0.40~2.48 mm。石英斑晶呈半自形粒状或熔蚀呈浑圆状, 具熔蚀港湾边, 部分聚在一起呈聚斑状出现。斜长石斑晶呈半自形粒状晶, 具绢云母化。黑云母斑晶被绿泥石及白云母

交代, 析出不透明矿物, 保留片状形态。基质以钾长石纤维和石英纤维组成的长英质球粒为主, 球粒多为 0.06~0.32 mm, 形成球粒结构(图 2b)。

## 3 样品采集及分析方法

### 3.1 样品采集

样品采集于东昆仑造山带东段战红山地区流纹斑岩露头, 共采集锆石 U-Pb 定年样品 1 件, 样品编号

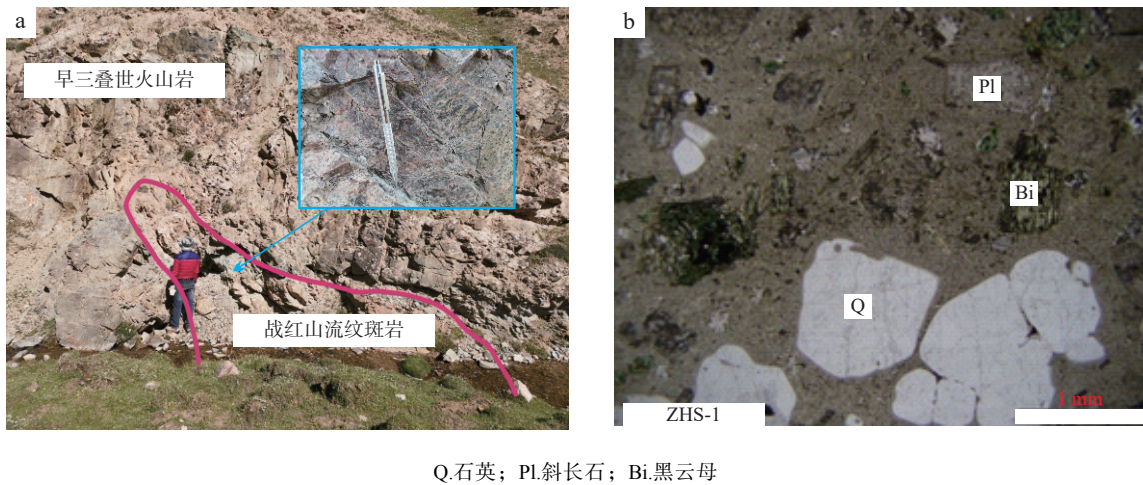


图2 战红山流纹斑岩野外露头(a)和镜下显微照片(b)

Fig. 2 (a) Outcrop photos and (b) photomicrographs of the typical textures for the Zhanhongshan rhyolite porphyry

为ZHS-1, 采样点地理坐标为N 35°33'52", E 98°43'08"; 岩石地球化学样品5件, 样品编号为ZHS-1~ZHS-5。

### 3.2 U-Pb 锆石分析

锆石挑选、制靶、阴极发光照相及锆石LA-ICP-MS测试工作均在西北大学大陆动力学国家重点实验室完成, 锆石定年所用ICP-MS为Agilent 7500a, 激光剥蚀系统为德国MicroLas公司Geolas200M, 该系统由德国Lambda Physik公司的ComPex102 Excimer激光器(物质为ArF, 波长为193 nm)与MicroLas公司的光学系统组成。激光剥蚀直径为32 μm, 剥蚀深度为20~40 μm。实验载气为He, 元素含量采用美国国家标准技术研究所研制的人工合成硅酸盐玻璃标准参考物质NIST SRM610作为外标, 选择<sup>29</sup>Si作为内标元素进行校正。软件采用ICPMSDataCal (Anderson, 2002) V8.3程序进行锆石同位素比值及元素含量计算。并按照Anderson的方法, 用ComPbCorrection进行了普通铅校正。年龄计算及谐和图采用Isoplot3软件完成。所有数据点年龄值的误差均为1σ, 采用<sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U年龄, 其加权平均值具95%的置信度(Ludwig, 2003)。分析结果见表1。

### 3.3 岩石地球化学分析

岩石地球化学测试在西北大学大陆动力学国家重点实验室完成。主量元素采用熔片X荧光光谱法XRF(日本理学RIGAKU 2100型)玻璃熔片法分析, 测试精度优于5%; 首先将200目样品置于105℃烘箱中烘干12 h后, 准确称取粉末样品50 mg置于Teflon溶样弹中, 加入添加剂(1.5 ml高纯HNO<sub>3</sub>和1.0 ml高纯HF), 按照标准测试程序, 反复添加、加热、冷却

后, 最后在离心管中稀释到50 ml; 将所得溶液在电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)上完成测定, 分析精度和准确度优于10%。分析结果见表2。

### 3.4 锆石Lu-Hf同位素分析

本次工作的锆石Hf同位素测试利用西北大学大陆动力学国家重点实验室的LA-MC-ICP-MS完成, 其中LA(激光剥蚀系统)为澳大利亚ASI公司生产的RESOLUTION M-50193 nm准分子激光剥蚀系统, 其包含: 一台193 nm ArF准分子激光器, 一个大双室样品室和电脑控制的高精度X-Y样品台移动、定位系统; 双室样品池能有效避免样品间交叉污染, 较少样品吹扫时间, 同时载装样品能力大大提高, 减少了频繁换样过程中认为因素的影响。MC-ICP-MS(多接收器电感耦合等离子体质谱仪)是荧光果Nu Instrument公司生产的新一代双聚焦多接收等离子体质谱仪Nu Plasma II, 具有16个法拉杯(Faraday Cup)和5个全尺寸不连续打拿级电子倍增器(FTP, 其中2路具有阻滞过滤器RPQ)。详细分析方法与参数同袁洪林等(2003)。分析结果见表3。

## 4 分析结果

### 4.1 锆石U-Pb年代学

本次测试挑选出的锆石均为无色透明状, 锆石晶型较好, 长度为80~170 μm, 宽度为50~80 μm, 长宽比值为1~2。锆石均显示出清晰的韵律环带(图3a), 测点Th/U值为0.23~0.93, 平均为0.47, 具有岩浆锆石的特点(吴元保等, 2004)。本次锆石LA-ICP-MS

表 1 战红山流纹斑岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素分析结果

Tab. 1 LA-ICP-MS zircon U-Pb isotopic data for the Zhanhongshan rhyolite porphyry

测点	含量 ( $10^{-6}$ )			Th/U	同位素比值						年龄 (Ma)						谐和度
	Pb	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 $\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 $\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 $\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 $\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 $\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 $\sigma$	
1	78.34	542.90	1907.85	0.28	0.049 1	0.001 7	0.263 8	0.009 3	0.038 9	0.000 5	154	79	246	3	238	7	96%
2	37.07	383.19	549.67	0.70	0.053 5	0.002 8	0.285 7	0.014 3	0.038 8	0.000 5	350	117	245	3	255	11	96%
3	54.07	388.64	1207.20	0.32	0.052 4	0.002 3	0.282 0	0.012 0	0.039 1	0.000 5	302	102	247	3	252	10	98%
4	43.32	284.07	973.25	0.29	0.052 5	0.002 3	0.281 1	0.012 5	0.038 7	0.000 5	306	128	245	3	251	10	97%
5	80.34	613.89	1766.08	0.35	0.049 1	0.002 0	0.262 6	0.010 3	0.038 8	0.000 4	154	93	245	2	237	8	96%
6	26.34	204.87	601.44	0.34	0.053 7	0.002 7	0.287 7	0.014 8	0.038 7	0.000 5	367	118	245	3	257	12	95%
7	75.59	638.77	1396.56	0.46	0.051 5	0.002 0	0.274 4	0.009 7	0.038 9	0.000 5	265	89	246	3	246	8	99%
8	149.43	1223.27	3122.62	0.39	0.052 8	0.001 8	0.281 2	0.009 4	0.038 7	0.000 5	317	76	245	3	252	7	97%
9	94.39	663.10	2305.14	0.29	0.050 5	0.001 8	0.270 9	0.009 9	0.038 9	0.000 4	217	83	246	3	243	8	99%
10	33.10	226.67	795.31	0.29	0.045 7	0.002 5	0.242 4	0.012 5	0.038 8	0.000 5	-	-	245	3	220	10	89%
11	76.66	640.53	1510.44	0.42	0.053 0	0.001 8	0.282 4	0.008 8	0.038 7	0.000 4	328	78	245	2	253	7	96%
12	77.67	528.41	1679.16	0.31	0.055 1	0.001 6	0.295 3	0.009 1	0.038 8	0.000 5	417	65	246	3	263	7	93%
13	20.49	157.49	473.73	0.33	0.058 8	0.003 1	0.316 7	0.016 6	0.039 0	0.000 7	561	115	246	4	279	13	87%
14	48.60	300.47	1286.35	0.23	0.053 6	0.002 3	0.288 5	0.013 5	0.039 0	0.000 6	354	98	247	4	257	11	95%
15	76.30	570.41	1647.07	0.35	0.049 3	0.001 7	0.263 9	0.008 7	0.038 8	0.000 4	161	80	246	3	238	7	96%
16	42.59	324.98	793.87	0.41	0.057 2	0.003 3	0.306 3	0.016 7	0.038 9	0.000 5	502	132	246	3	271	13	90%
17	318.24	441.11	838.71	0.53	0.057 1	0.002 3	0.306 3	0.012 2	0.038 9	0.000 4	494	61	246	3	271	9	90%
18	595.32	645.40	1419.72	0.45	0.051 8	0.001 7	0.277 0	0.009 3	0.038 7	0.000 5	280	71	245	3	248	7	98%
19	534.47	474.48	804.99	0.59	0.050 7	0.002 2	0.271 1	0.011 7	0.038 8	0.000 4	233	102	245	3	244	9	99%
20	654.52	502.77	556.83	0.90	0.048 7	0.002 3	0.262 1	0.012 2	0.038 9	0.000 4	200	111	246	3	236	10	96%
21	398.32	230.52	498.49	0.46	0.050 8	0.001 9	0.272 3	0.009 9	0.038 8	0.000 5	232	87	245	3	245	8	99%
22	583.59	299.31	654.19	0.46	0.049 8	0.001 9	0.267 3	0.010 1	0.038 9	0.000 5	183	117	246	3	241	8	97%
23	801.29	347.04	603.13	0.58	0.049 6	0.002 0	0.265 9	0.010 4	0.038 7	0.000 4	176	127	245	2	239	8	97%
24	796.78	264.83	402.38	0.66	0.058 9	0.003 6	0.317 4	0.020 2	0.038 6	0.000 5	561	133	244	3	280	16	86%
25	9185.75	156.34	167.38	0.93	0.891 6	0.019 7	28.113 5	0.569 6	0.227 1	0.001 9	-	-	1320	10	3423	20	11%
26	1238.64	991.84	1269.06	0.78	0.070 4	0.002 5	0.380 8	0.014 7	0.038 9	0.000 5	939	73	246	3	328	11	71%
27	222.43	229.62	634.08	0.36	0.051 4	0.002 6	0.275 2	0.013 1	0.038 8	0.000 4	257	115	245	3	247	10	99%
28	321.80	449.12	1212.88	0.37	0.053 8	0.002 0	0.289 2	0.010 8	0.038 8	0.000 5	365	88	246	3	258	8	95%
29	74.12	146.14	388.29	0.38	0.058 0	0.007 8	0.310 5	0.037 3	0.039 6	0.000 6	532	494	250	4	275	29	90%
30	439.00	791.84	1040.54	0.76	0.167 2	0.005 3	1.151 7	0.046 1	0.049 4	0.000 9	2529	54	311	6	778	22	14%

注：-表示无数据。

测年共完成 30 个测试点, 其中 4 个测点(25、26、29、30)谐和度较低, 剩余 26 个测点较为集中的分布在谐和线上, 显示出良好的谐和性(图 3b), 表明锆石在形成其 U-Pb 体系一直保持在封闭状态, 基本没有 Pb 的丢失(Corfu et al., 2003)。 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  加权平均年龄值为 (245 $\pm$ 1) Ma (MSWD=0.05), 代表流纹斑岩的岩浆结晶年龄, 为早三叠世。

#### 4.2 主量元素

战红山流纹斑岩具有高的  $\text{SiO}_2$  含量(74.50%~

75.59%), 平均为 75.36%;  $\text{Na}_2\text{O}$  含量较高(4.04%~4.46%), 平均为 4.31%,  $\text{K}_2\text{O}$  含量较低(2.53%~3.24%), 碱含量偏高( $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$  为 6.92%~7.6%),  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量偏低(12.67%~13.59%), 具有较高的 A/CNK(ASI)值(1.07~1.14), 平均为 1.11, 为过铝质中钾钙碱性系列(图 4a~图 4c); 在 TAS 图中, 战红山流纹斑岩落入到流纹岩区域(图 4d)。样品具有较低的  $\text{FeO}^T$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{CaO}$  和  $\text{TiO}_2$ (图 5), 分别为 1.14%~1.33%、0.41%~0.51%、0.84%~1.03% 和 0.07%~0.88%。

表 2 战红山流纹斑岩主量元素(%)和微量元素(10<sup>-6</sup>)分析结果

Tab. 2 Major (%) and trace element (10<sup>-6</sup>) compositions for the Zhanhongshan rhyolite porphyry

样品	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	MnO	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	LOI	Li	Be	Sc	V	Cr	Co	Ni	Cu
ZHS-1	75.17	13.54	1.26	0.36	0.42	0.93	4.43	2.67	0.04	0.07	0.04	1.32	5.37	1.99	8.51	5.30	2.92	0.59	1.02	2.49
ZHS-2	75.59	12.89	1.25	0.36	0.41	1.03	4.04	3.21	0.04	0.08	0.04	1.31	3.82	1.96	6.45	4.23	1.98	0.70	0.95	3.40
ZHS-3	76.24	12.67	1.26	0.41	0.43	0.95	4.25	2.67	0.05	0.08	0.04	1.26	4.50	1.85	6.62	4.00	2.44	0.62	0.83	2.67
ZHS-4	74.50	13.59	1.33	0.36	0.51	0.84	4.36	3.24	0.04	0.08	0.04	1.33	5.16	1.96	9.42	4.17	4.47	0.59	1.79	2.39
ZHS-5	75.31	13.41	1.14	0.36	0.45	1.01	4.46	2.53	0.04	0.08	0.04	1.43	3.70	1.95	8.75	4.70	1.72	0.82	0.63	2.47
样品	Zn	Ga	Rb	Sr	Zr	Nb	Mo	In	Cs	Ba	Hf	Ta	W	Tl	Pb	Bi	Th	U	Y	La
ZHS-1	22.1	13.8	71.5	66.9	105	13.7	0.74	0.03	2.15	880	3.98	1.18	0.95	0.65	10.2	0.25	9.83	2.20	16.3	19.7
ZHS-2	22.1	13.2	87.8	79.4	111	13.4	0.71	0.03	1.65	893	4.14	1.13	1.34	0.70	13.4	0.15	12.4	2.76	22.8	20.8
ZHS-3	21.3	12.9	75.0	50.0	110	13.3	0.75	0.03	2.33	952	4.05	1.11	1.31	0.61	13.2	0.17	6.83	2.06	16.1	13.8
ZHS-4	20.1	13.6	75.9	47.4	112	13.8	0.66	0.03	1.90	929	4.12	1.14	0.91	0.67	9.86	0.24	6.76	2.00	16.4	16.2
ZHS-5	17.9	13.6	69.3	59.8	96.4	13.0	0.75	0.02	1.98	709	3.65	1.14	1.13	0.53	8.33	0.15	9.11	2.17	17.4	20.4
样品	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Mg <sup>#</sup>	A/CNK	δEu	(La/Yb) <sub>N</sub>	(Gd/Yb) <sub>N</sub>	Nb/Ta	Tzr
ZHS-1	34.0	3.93	13.4	2.73	0.77	2.59	0.47	2.65	0.55	1.89	0.27	1.96	0.32	43.7	1.14	0.87	6.79	1.07	11.57	762
ZHS-2	22.2	4.44	15.3	3.35	0.84	3.06	0.61	3.67	0.79	2.63	0.41	2.88	0.46	43.6	1.07	0.79	4.85	0.86	11.89	762
ZHS-3	16.7	2.79	9.80	2.13	0.73	2.06	0.41	2.56	0.54	1.88	0.28	2.02	0.33	44.3	1.09	1.05	4.59	0.82	12.05	763
ZHS-4	19.6	3.17	10.8	2.34	0.76	2.28	0.44	2.60	0.57	1.83	0.28	1.97	0.33	47.3	1.11	0.99	5.55	0.93	12.10	764
ZHS-5	29.2	4.04	13.7	2.77	0.70	2.61	0.48	2.73	0.59	1.85	0.28	2.01	0.33	47.6	1.13	0.79	6.83	1.05	11.45	754

注: Mg<sup>#</sup> = 100 × [Mg<sup>2+</sup> / (Mg<sup>2+</sup> + Fe<sup>2+</sup>)]; δEu = Eu<sub>N</sub> / (Sm<sub>N</sub> × Gd<sub>N</sub>)<sup>1/2</sup>; Tzr(°C) = 12 900 / [LnDz + 0.85M + 2.95] - 273.15, M = (2Ca + K + Na) / (Si × Al) (Watson et al., 1983)。

表 3 战红山流纹斑岩锆石原位 Hf 同位素组成

Tab. 3 In-situ Hf isotopic compositions of zircon for the Zhanhongshan rhyolite porphyry

样品	<sup>176</sup> Hf/ <sup>177</sup> Hf	1σ	<sup>176</sup> Yb/ <sup>177</sup> Hf	1σ	<sup>176</sup> Lu/ <sup>177</sup> Hf	1σ	εHf(t)	T <sub>DM</sub>	T <sub>2DM</sub>
BQSCN-2-01	0.282 654	0.000 021	0.05	0.00	0.001 750	0.000 003	0.9	864	1 211
BQSCN-2-02	0.282 593	0.000 022	0.04	0.00	0.001 523	0.000 005	-1.2	946	1 345
BQSCN-2-03	0.282 542	0.000 019	0.06	0.00	0.002 058	0.000 019	-3.0	1 033	1 462
BQSCN-2-04	0.282 614	0.000 020	0.06	0.00	0.001 969	0.000 007	-0.5	928	1 304
BQSCN-2-05	0.282 621	0.000 019	0.07	0.00	0.002 233	0.000 009	-0.3	923	1 289
BQSCN-2-06	0.282 599	0.000 021	0.04	0.00	0.001 344	0.000 009	-1.0	933	1 331
BQSCN-2-07	0.282 602	0.000 024	0.07	0.00	0.002 397	0.000 007	-1.0	955	1 333
BQSCN-2-08	0.282 567	0.000 020	0.11	0.00	0.003 283	0.000 044	-2.4	1 032	1 422
BQSCN-2-09	0.282 550	0.000 018	0.06	0.00	0.002 011	0.000 018	-2.8	1 021	1 446
BQSCN-2-10	0.282 525	0.000 020	0.05	0.00	0.001 711	0.000 016	-3.6	1 048	1 498
BQSCN-2-11	0.282 616	0.000 020	0.07	0.00	0.002 157	0.000 010	-0.5	929	1 301
BQSCN-2-12	0.282 523	0.000 019	0.04	0.00	0.001 431	0.000 004	-3.7	1 043	1 501
BQSCN-2-13	0.282 563	0.000 021	0.06	0.00	0.001 894	0.000 010	-2.3	999	1 416
BQSCN-2-14	0.282 495	0.000 020	0.07	0.00	0.002 239	0.000 006	-4.8	1 107	1 570
BQSCN-2-15	0.282 581	0.000 020	0.07	0.00	0.002 238	0.000 010	-1.7	982	1 379

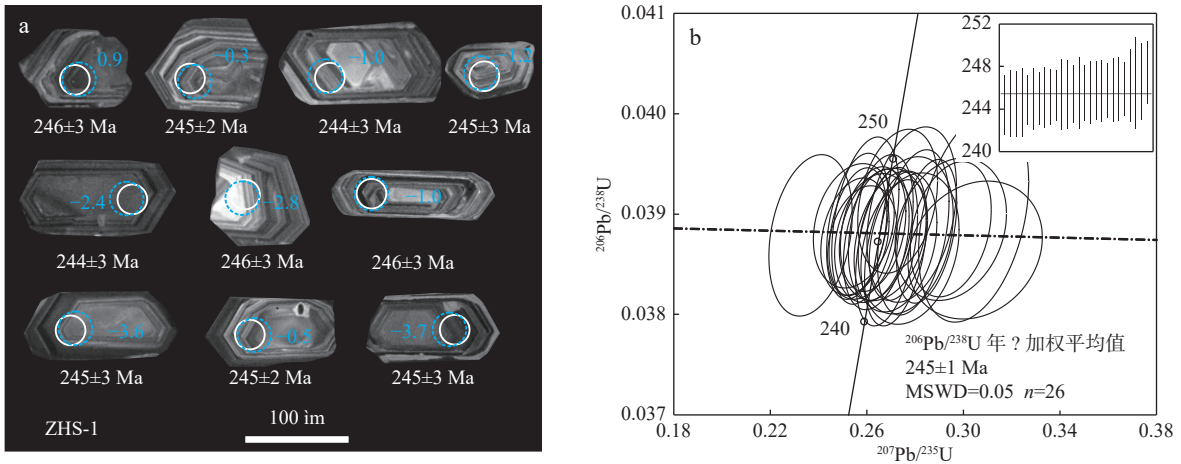
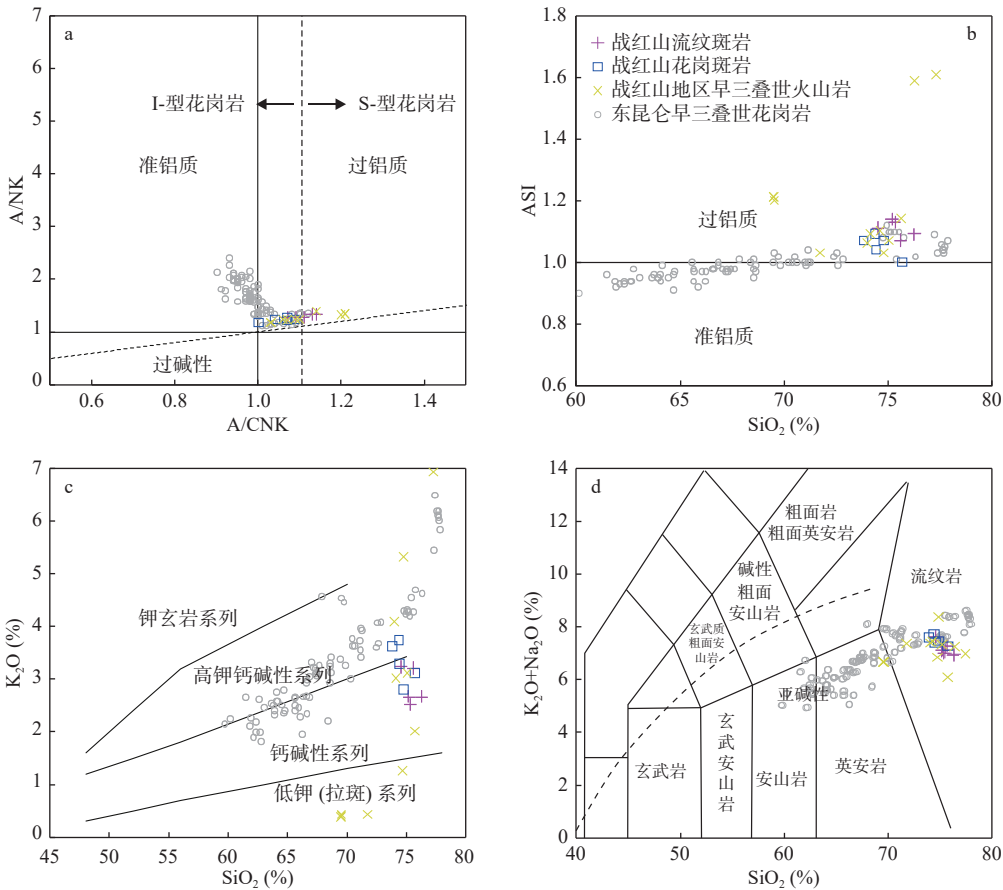


图3 战红山流纹斑岩锆石阴极发光图(CL)、LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄与锆石 Hf 分析结果(蓝色数值)(a)、LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄谐和图与锆石<sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U 加权平均年龄图(b)

Fig. 3 (a) Cathodoluminescence photos (CL) of zircons with marked U-Pb ages and Hf isotopic compositions, and (b) LA-ICP-MS zircon U-Pb concordant age diagram and <sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U weighted mean ages of zircons for the Zhanhongshan rhyolite porphyry



战红山早三叠世火山岩数据源自付彦文等(2019)与张新远等(2020); 战红山花岗斑岩数据源自李积清等(2021); 早三叠世花岗岩数据源自 Xia 等(2015, 2017)、Chen 等(2017)、Shao 等(2017)、李瑞保等(2018)、Song 等(2019)、王珂等(2020)、Guo 等(2020)与 Li 等(2020b)

图4 战红山流纹斑岩 A/CNK-A/NK 图解(a)(据 Maniar et al., 1989)、SiO<sub>2</sub>-ASI 图解(b)(据 Frost et al., 2001)、SiO<sub>2</sub>-K<sub>2</sub>O 图解(c)(据 Rollinson, 1993)和 SiO<sub>2</sub>-ALK 分类命名图解(d)(据 Wilson, 1989)

Fig. 4 (a) A/CNK-A/NK diagrams, (b) SiO<sub>2</sub>-ASI diagrams, (c) SiO<sub>2</sub>-K<sub>2</sub>O diagrams, and (d) SiO<sub>2</sub>-ALK classifying-naming diagrams for the Zhanhongshan rhyolite porphyry

### 4.3 稀土元素

岩石稀土元素总量较低,  $\Sigma\text{REE}$  为  $56.0 \times 10^{-6} \sim 85.2 \times 10^{-6}$ , 平均为  $73.5 \times 10^{-6}$ , 轻稀土元素(LREE)含量为  $45.89 \times 10^{-6} \sim 74.50 \times 10^{-6}$ , 重稀土元素(HREE)含量为  $10.08 \times 10^{-6} \sim 14.52 \times 10^{-6}$ 。轻、重稀土元素含量比值  $\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}$  为  $4.55 \sim 6.97$ ,  $(\text{La}/\text{Yb})_N$  值为  $4.59 \sim 6.83$ ,

轻重稀土元素分馏较强, 富集轻稀土元素, 亏损重稀土元素(图 6a)。Yb 含量为  $1.96 \times 10^{-6} \sim 62.88 \times 10^{-6}$ , Lu 含量为  $0.32 \times 10^{-6} \sim 0.46 \times 10^{-6}$ , Yb/Lu 值为  $6.07 \sim 66.24$ ,  $(\text{Gd}/\text{Yb})_N$  值为  $0.77 \sim 1.01$ , 表现出较为平坦的重稀土元素配分模式。 $\delta\text{Eu}$  值为  $0.80 \sim 1.06$ , 具轻微 Eu 的负异常和正异常。

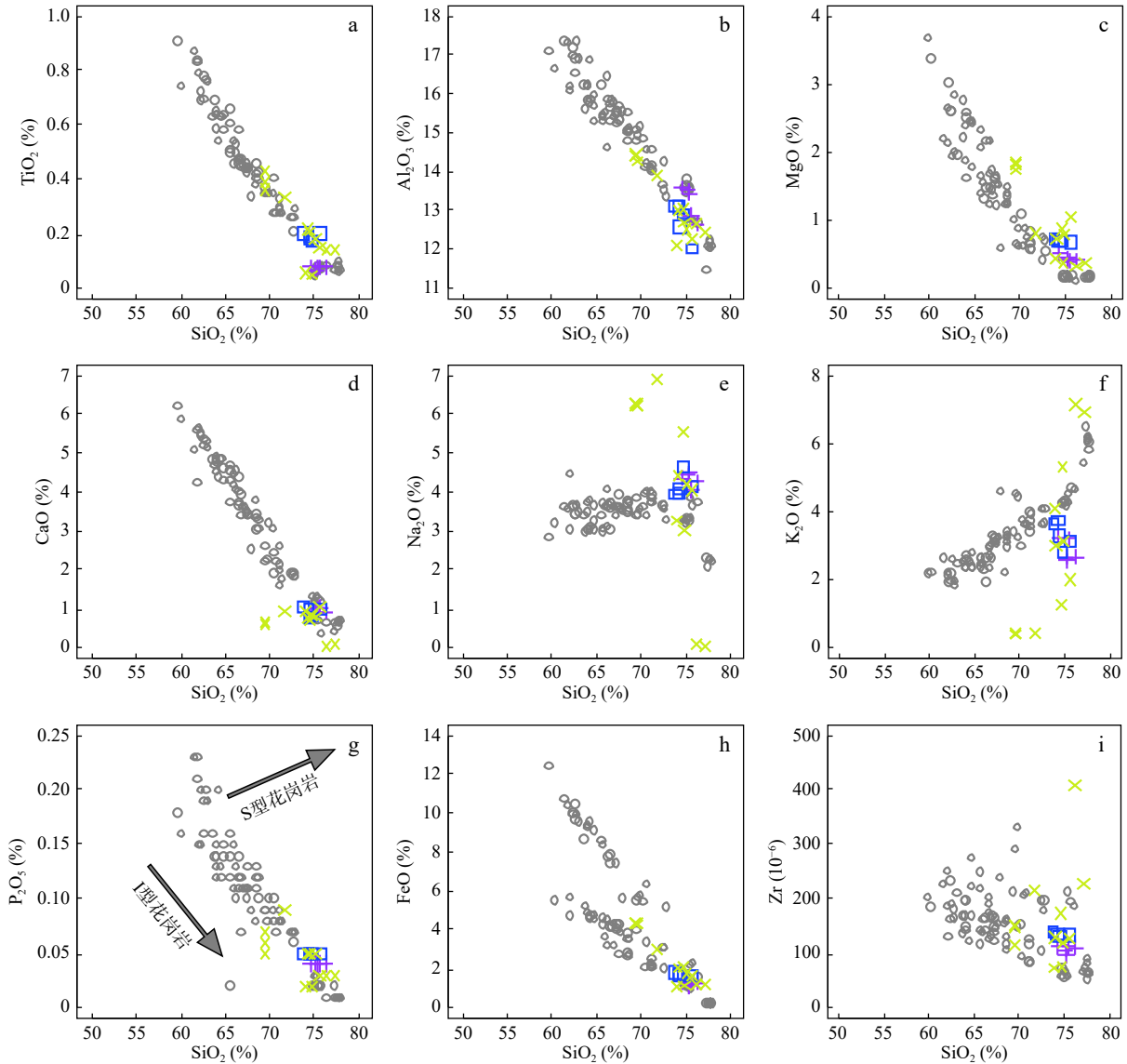


图 5 战红山流纹斑岩 Harker 图解

Fig. 5 Harker diagrams for the Zhanhongshan rhyolite porphyry

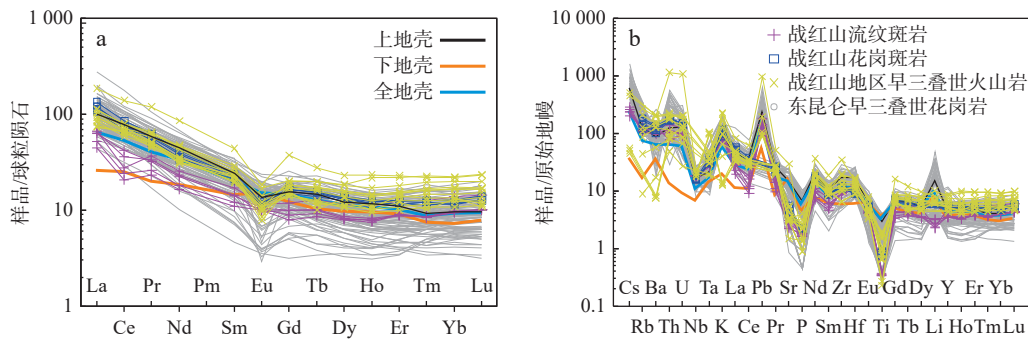
### 4.4 微量元素

在微量元素原始地幔标准化蛛网图上(图 6b), 战红山流纹斑岩富集大离子亲石元素(Ba, Rb, Th, K, U), 具有 Nb, Ta, Nd, P, Ti 等高场强元素亏损的特点, 显示出弧岩浆岩的特征(Thompson et al., 1983; Zheng, 2019)。

### 4.5 锆石 Lu-Hf 同位素

对用于测年的锆石进行了 Lu-Hf 同位素组成测定, 测定结果及计算的相关参数见表 3。样品的  $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$  值为  $0.001344 \sim 0.003283$ , 平均为  $0.002016$ , 表明岩浆锆石在流纹斑岩形成之后的地质演化过程中,  $^{176}\text{Lu}$  经衰变产生的  $^{177}\text{Hf}$  极少, 获取的  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  值





上地壳、下地壳和全地壳数据源自 Rudnick 等(2003)

图6 战红山流纹斑岩球粒陨石标准化稀土元素配分图(a)(标准化值据 Boynton, 1984)和原始地幔标准化蛛网图(b)(标准化值据 Sun et al., 1989)

Fig. 6 (a) Chondrite-normalized REE distribution patterns, and (b) primitive mantle-normalized trace element spider diagrams for the Zhanhongshan rhyolite porphyry

基本代表了成岩时岩浆体系的 Hf 同位素组成,可用于流纹斑岩的成因研究(吴福元等, 2007a)。样品的  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  值比较均一,为 0.282 495~0.282 654,平均为 0.282 575( $n=15$ )。  $\varepsilon\text{Hf}(t)$  值为 -4.8~+0.9(平均为 -1.9),二阶段 Hf 模式年龄( $t_{\text{MD2}}$ )为 1 211 Ma~1 570 Ma。

## 5 讨论

### 5.1 岩石成因类型和源区特征

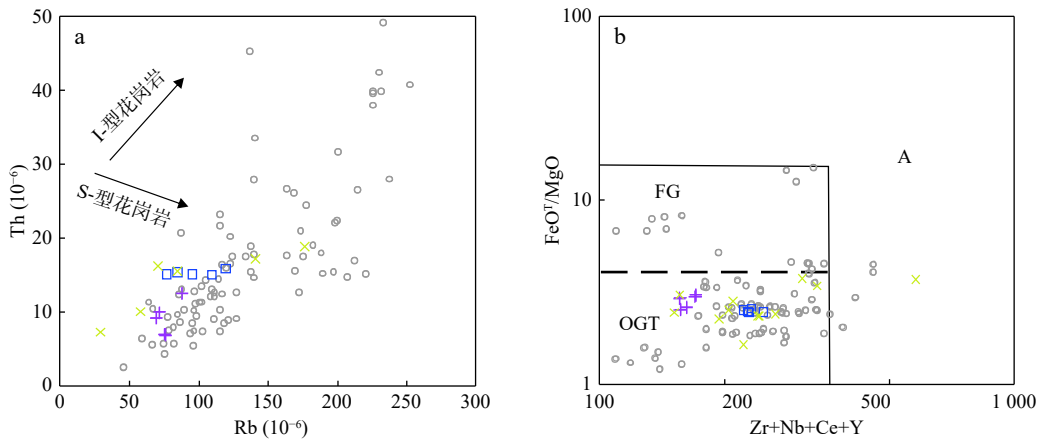
花岗岩一般可以分为 I、S 和 A 型(Whalen et al., 1987; Chappell et al., 1992; 吴福元等, 2007b)。从矿物角度, I 型花岗岩含有角闪石, S 型花岗岩含有堇青石、石榴子石和白云母等过铝矿物, A 型花岗岩以含有碱性暗色矿物为特征(例如, 霓石、辉石霓石和钠闪石等矿物)。然而, 战红山流纹斑岩主要造岩矿物为斜长石、石英、钾长石和黑云母, 未见以上花岗岩分类中的特征矿物。

S 型花岗岩为沉积岩部分熔融的产物, 一般具有较高的 A/CNK 值及  $\text{SiO}_2$  和  $\text{K}_2\text{O}$  含量, 较低的  $\text{Na}_2\text{O}$  含量和  $\varepsilon\text{Hf}(t)$  同位素值(Chappell et al., 2001; Clemens et al., 2011, 2012); 另外, 由于 S 型花岗岩来自于沉积地层的部分熔融, 一般含有源区沉积岩中老的继承锆石(Villaros et al., 2009)。战红山流纹斑岩具有较高的 A/CNK 值和  $\text{SiO}_2$  含量, 具有一定 S 型花岗岩特征。但是, 战红山流纹斑岩的  $\text{Na}_2\text{O}$  含量明显高于  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$  值为 1.26~1.76; 战红山流纹斑岩的锆石 CL 图中, 锆石图像均一, 未见核边结构, 锆石年龄也较为集中, 未见老的残留锆石; 在  $\text{SiO}_2$ - $\text{P}_2\text{O}_5$ (图 5g)和 Rb-Th 图中(图 7a), 不具有 S 型花岗岩特征。最为重

要的战红山流纹斑岩具有较高的  $\varepsilon\text{Hf}(t)$  同位素值, 与东昆仑早寒武纪基底岩系的同位素特征明显不同(图 8)。以上特征显示, 战红山流纹斑岩不属于 S 型花岗岩。

A 型花岗岩由于在贫水的环境中形成, 具有较高的熔融温度( $>800^\circ\text{C}$ ), 富集  $\text{FeO}^T/\text{MgO}$ (平均为 22.84)和碱、REE、Zr、Nb、Ta 等不相容元素, 低 CaO, 贫 Cr、Ni、Sr 等相容元素, 具有较高的  $10\,000\times\text{Ga}/\text{Al}$  比值(平均为 3.75)和 Zr+Nb+Ce+Y 含量(下限为  $350\times 10^{-6}$ )(Collins et al., 1982; Whalen et al., 1987), 并具有显著的负 Eu 异常, 稀土元素配分模式呈海鸥型(Bonin, 2007)。全岩锆饱和温度计算显示, 战红山流纹斑岩的温度平均为  $761^\circ\text{C}$ , 明显低于 A 型花岗岩; 战红山流纹斑岩的  $\text{FeO}^T/\text{MgO}$ (2.56~3.01)、 $10\,000\times\text{Ga}/\text{Al}$ (1.89~1.94)和 Zr+Nb+Ce+Y( $156\times 10^{-6}\sim 170\times 10^{-6}$ )含量也与 A 型花岗岩不同; 在 Zr+Nb+Ce+Y- $\text{FeO}^T/\text{MgO}$  图中(图 7b), 也不具有 A 型花岗岩特征。因此, 战红山流纹斑岩也不是 A 型花岗岩。战红山流纹斑岩具有较高的  $\text{Na}_2\text{O}$  含量以及  $\text{Mg}^\#$  值和 Nb/Ta 值,  $\text{SiO}_2$  与  $\text{P}_2\text{O}_5$  呈负相关, Rb 与 Th 呈正相关, 显示战红山流纹斑岩为 I 型花岗岩(Chappell et al., 1992; Frost et al., 2001; Clemens et al., 2011)。

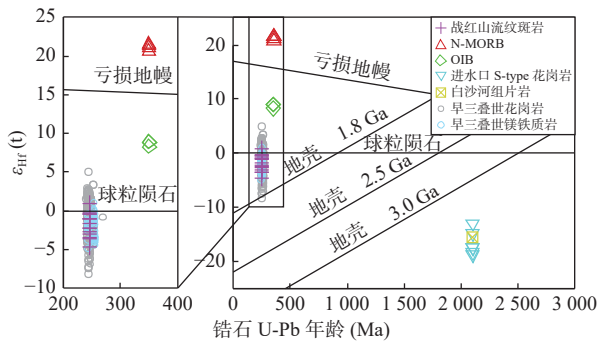
战红山流纹斑岩具有较高的  $\text{SiO}_2$  含量和 A/CNK 值, 较低的  $\text{MgO}$ 、Ni 和 Cr 含量, 富集 Rb、Th、Ba、Cs 等大离子亲石元素(LILE), 亏损 Nb、Ta、Ti 等高场强元素(HFSE), 在球粒陨石标准化稀土元素配分图和微量元素原始地幔标准化蛛网图上, 战红山流纹斑岩的配分模式类似平均地壳(图 6), 说明战红山流纹斑岩来自于地壳的部分熔融(Rudnick et al., 2003)。



FG. M+I+S 型高分异花岗岩; OGT. M+I+S 型未分异花岗岩

图 7 战红山流纹斑岩 Rb-Th 图解 (a) 和 (Zr+Nb+Ce+Y)-FeO<sup>T</sup>/MgO 图解 (b) (据 Whalen et al., 1987)

Fig. 7 (a) Diagrams of Rb-Th and (b) (Zr+Nb+Ce+Y)-FeO<sup>T</sup>/MgO for the Zhanhongshan rhyolite porphyry



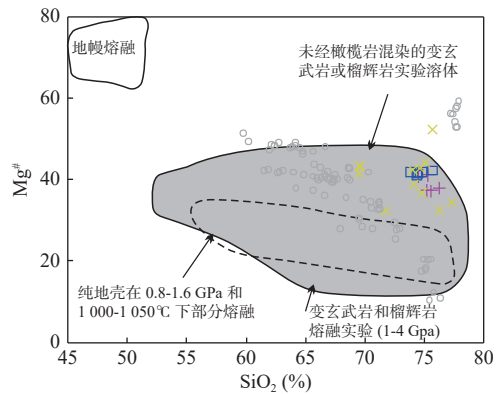
白沙河岩组片岩数据据 Shao 等(2017); 早三叠世花岗岩数据同图 4, 早三叠世镁铁质岩数据据 Xiong 等(2013, 2014), 赵旭等(2018); 图中 N-MORB、OIB 和金水口 S-type 花岗岩  $\epsilon Hf(t)$  值根据公式  $\epsilon Hf(t) = 1.59 \times \epsilon Nd(t) + 1.28$  (Chauvel et al., 2008; Li et al., 2020a); N-MORB 的  $\epsilon Nd(t)$  和 OIB 的  $\epsilon Nd(t)$  数据据郭安林等(2007), 金水口 S-type 花岗岩  $\epsilon Nd(t)$  数据据余能等(2005)

图 8 战红山流纹斑岩锆石  $\epsilon Hf(t)$ -U-Pb 年龄图

Fig. 8 Diagrams of zircons  $\epsilon Hf(t)$ -U-Pb ages for the Zhanhongshan rhyolite porphyry

战红山流纹斑岩具有较高的  $Mg^\#$  值, 适中的 Nb/Ta 和 Rb/Sr 值, 与变杂砂岩和变泥质岩部分熔融形成的熔体明显不同, 与变玄武岩部分熔融的岩石相似 (图 9)。战红山流纹斑岩具有较高的  $\epsilon Hf(t)$  同位素值, 明显的高于东昆仑前寒武纪基底, 与东昆仑三叠纪花岗岩和镁铁质岩近似 (图 8)。这些特征说明战红山流纹斑岩不是变沉积岩部分熔融的结果, 更可能来自于东昆仑古特提斯俯冲阶段早期形成的岩浆岩。

研究显示, 花岗岩的成分与源区物质组成最为密切 (Gao et al., 2016)。陆弧玄武岩来自于受俯冲流体交代的地幔楔部分熔融, 因此具有较高的  $K_2O$  含量,



地幔熔体据 Stern 等(1996); 地壳熔体(变杂砂岩、变泥质岩、变安山岩、变玄武岩)据 Altherr 等(2000); 在 1.0~4.0 GPa 压力下变玄武岩或榴辉岩实验熔体据 Rapp(1995a); 在 0.8~1.6 GPa 压力和 1000~1050 °C 下地壳熔体据 Rapp 等(1995b)

图 9 战红山流纹斑岩  $SiO_2$ - $Mg^\#$  图解

Fig. 9 Diagrams of  $SiO_2$ - $Mg^\#$  for the Zhanhongshan rhyolite porphyry

其部分熔融形成的熔体相对富  $K_2O$  (Sisson et al., 2005)。战红山流纹斑岩是钠质的, 具有较高的  $Na_2O$  含量和  $Na_2O/K_2O$  值。因此, 战红山流纹斑岩应该来自富钠源区。洋壳玄武岩具有较高的  $Na_2O$  含量, 实验岩石学研究表明玄武质岩石在  $H_2O$  饱和条件下发生低程度部分熔融可以形成过铝质、高 Si 的 Na 质花岗岩 (Rapp et al., 1995a, 1995b; Petford et al., 1996)。因此, 战红山流纹斑岩可能来自于洋壳玄武岩的部分熔融。

### 5.2 岩石成因

花岗岩的成因与多种因素相关, 例如: 源区物质

组成、熔融环境和后期岩浆演化等因素(Kemp et al., 2007; Castro, 2013; Collins, 2016; Clemens et al., 2020)。过铝质 I 型花岗岩岩石成因模式主要有以下 4 种: ①准铝质中酸性岩浆岩的结晶分离(Castro, 2013; Lee et al., 2014)。②壳幔岩浆混合(Kemp et al., 2007)。③岩浆与围岩混染(Annen et al., 2006)。④镁铁质岩石的部分熔融(Sisson, 2005; Clemens et al., 2011)。

岩浆的结晶分异是花岗岩多样化的重要因素,特别是近年来提出的大陆地壳岩浆房存储与化学分异过程,强调岩浆房从地壳深部向浅部运移过程中,分异的花岗质岩浆侵位于不同的地壳层位(Cashman et al., 2017; Jackson et al., 2018)。东昆仑早三叠世准铝质低  $\text{SiO}_2$  花岗岩和研究区早三叠世火山岩(战红山流纹斑岩)可能为同源。在 Hark 图解中(图 5),战红山流纹斑岩与东昆仑早三叠世花岗岩和研究区火山岩并没有显示出较好的演化趋势,特别是在主量元素和微量元素分离结晶判别图解中,也没有角闪石、斜长石和黑云母的演化趋势(图 10)。因此,准铝中酸性岩浆岩的结晶分离作用不是形成战红山流纹斑岩的主要因素。

壳幔岩浆混合作用一般可以使混合的岩浆含暗

色微粒包体,并且具有较高的  $\text{MgO}$ 、 $\text{Cr}$  和  $\text{Ni}$  含量(Barbarin, 2005)。但这些特征在战红山流纹斑岩中未有体现。因此,壳幔岩浆混合也不能形成战红山流纹斑岩。中酸性岩浆在上侵演化的过程中,可以同化围岩,使围岩的成分进入中酸性岩浆,特别是沉积岩混入可以增加岩浆的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量,使岩浆的  $\text{A/CNK}$  值增高。这种经过混染的岩浆由于捕获了围岩的成分,一般含有捕获锆石,具有富集的  $\epsilon\text{Hf}(t)$  同位素特征(Clemens et al., 2012)。战红山流纹斑岩锆石  $\text{U-Pb}$  年龄较为集中,未有老的捕获锆石,并且  $\epsilon\text{Hf}(t)$  同位素值与早三叠世花岗岩近似,说明战红山流纹斑岩没有经过围岩的混染。

镁铁质岩石的部分熔融可以形成过铝质 I 型花岗岩。但是,镁铁质岩石的部分熔融受多种因素控制,特别是不同的含水矿物在不同的含水率条件下部分熔融形成的熔体具有不同的特征(Collins et al., 2020)。在 5 kbar 下,白云母发生脱水熔融的温度约为  $700^\circ\text{C}$ ,黑云母约为  $800^\circ\text{C}$ ,角闪石约为  $900^\circ\text{C}$ (Patiño Douce et al., 1998, 1999)。战红山流纹斑岩的全岩锆石饱和温度为  $754\sim 764^\circ\text{C}$ ,介于白云母和黑云母脱水部分熔融的温度之间。初始物质的  $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$  值对实验熔体的

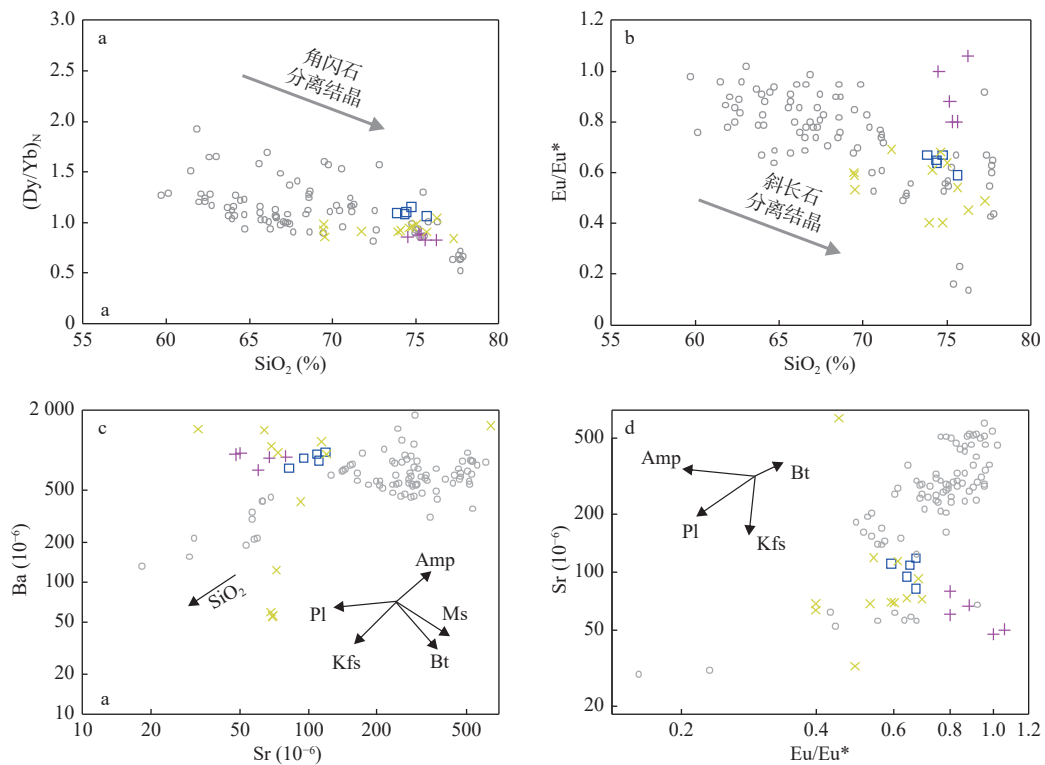


图 10 战红山流纹斑岩  $\text{SiO}_2$ -( $\text{Dy}/\text{Yb}$ )<sub>N</sub> 图(a)、 $\text{SiO}_2$ - $\text{Eu}/\text{Eu}^*$  图(b)、 $\text{Sr}$ - $\text{Ba}$  图(c)和  $\text{Eu}/\text{Eu}^*$ - $\text{Sr}$  图(d)

Fig. 10 (a) Diagrams of whole-rock trace-element  $\text{SiO}_2$ -( $\text{Dy}/\text{Yb}$ )<sub>N</sub>, (b)  $\text{SiO}_2$ - $\text{Eu}/\text{Eu}^*$ , (c)  $\text{Sr}$ - $\text{Ba}$ , and (d)  $\text{Eu}/\text{Eu}^*$ - $\text{Sr}$  for the Zhanhongshan rhyolite porphyry

$K_2O/Na_2O$  值至关重要(Gao et al., 2016)。白云母和黑云母具有较高的  $K_2O$  含量和  $K_2O/Na_2O$  值,因此,其部分熔融形成的熔体也具有这些特征。但战红山流纹斑岩明显不同。角闪石部分熔融形成熔体的成分除受源岩的成分控制外,与部分熔融的温度也密切相关,随着温度的升高,部分熔融形成的熔体的  $K_2O/Na_2O$  值降低(Clemens et al., 2012)。亏损的洋壳玄武岩由于富含  $Na_2O$ ,其部分熔融形成的熔体与战红山流纹斑岩近似。但是,战红山流纹斑岩的全岩锆饱和温度明显低于角闪石部分熔融的温度,要使角闪石部分熔融必须要有额外的因素。幔源岩浆的底侵和外来水的加入可能是较好的解释。幔源岩浆对下地壳的加热或者软流圈地幔的上涌可以使下地壳的温度升高(Chapman et al., 2021),这种模式也是解释俯冲带大规模岩浆活动的典型模型(Zheng, 2019)。另外,水的加入可以降低岩石部分熔融的温度(Collins et al., 2016),例如,在 15 kbar 的压力下,含 4% $H_2O$  的玄武岩熔体比无水熔体低约 100 °C,熔体比例高达 10%~20%(Collins et al., 2020)。早三叠世东昆仑造山带由于幔源岩浆底侵下地壳,含水镁铁质岩浆在冷却过程可以出溶大量水,这些水在上升过程中进入早期形成镁铁质岩石,使其部分熔融,形成了富 Na 过铝质战红山流纹斑岩。

### 5.3 构造背景及其意义

东昆仑造山带早三叠世岩浆活动剧烈,但东昆仑早三叠世构造环境还存在较大争议,主要有俯冲阶段(Xia et al., 2017; Xiong et al., 2019)和同碰撞阶段(Huang et al., 2014)2种不同的观点。研究认为,在早三叠世东昆仑可能为古特提斯的俯冲阶段。

东昆仑造山带早三叠世岩浆活动剧烈,特别是在 250~245 Ma 期间是岩浆活动的峰值(陈国超等,

2019)。这些岩浆岩主体以大型花岗岩基呈东西向带状分部于东昆中构造带(例如,沟里大型花岗岩基)(Zhao et al., 2020),少量分布在东昆仑南构造带(例如,哈拉尕吐花岗岩基)(李瑞保等, 2018),分布在东昆南构造带的岩浆岩形成时代主体稍早于东昆仑中构造带。这些岩浆岩由的极性展布可能与东昆仑古特提斯洋由南向北俯冲相关(于淼等, 2017; Dong et al., 2018)。东昆仑造山带在进入 240 Ma 后,岩浆活动明显减弱,说明东昆仑造山带在这一时期经历陆陆碰撞作用,不利于岩浆的形成,使这一时期岩浆活动减弱(Zhao et al., 2020)。

战红山流纹斑岩和东昆仑其他早三叠世岩浆岩富集 Rb、Th、U、K 等大离子亲石元素,亏损 Nb、Ta、Ti 等高场强元素,具有活动大陆边缘安第斯型弧岩浆岩特征(图 6, 图 11)。这些岩浆岩大部分具 I 型花岗岩特征,主体呈准铝质中钾-高钾钙碱性系列,同科迪勒拉造山带岩浆岩非常相似(Collins et al., 2020)。东昆仑晚三叠世岩浆活动与早三叠世明显不同。晚三叠世岩浆岩岩石类型丰富,岩浆岩的  $K_2O$  富集程度比早三叠世岩浆岩明显,主体为高钾钙碱性-钾玄岩系列(陈国超等, 2019),并且,东昆仑造山带在这一时期大量出露具 A 型花岗岩和具埃达克质特征的岩浆岩,显示东昆仑在这一时期处于拉张背景(陈国超等, 2013; 钱兵等, 2015; 邓红宾等, 2018)。

沉积方面,早中三叠世,东昆南构造带普遍发育一套弧前盆地沉积体系,包括下三叠统洪水川组、中三叠统闹仓竖沟组,为东昆仑古特提斯洋向北俯冲的沉积反映(李瑞保等, 2012, 2015)。东昆仑早三叠世也存在着与洋壳俯冲相关的中压变质作用(陈能松等, 2007)。

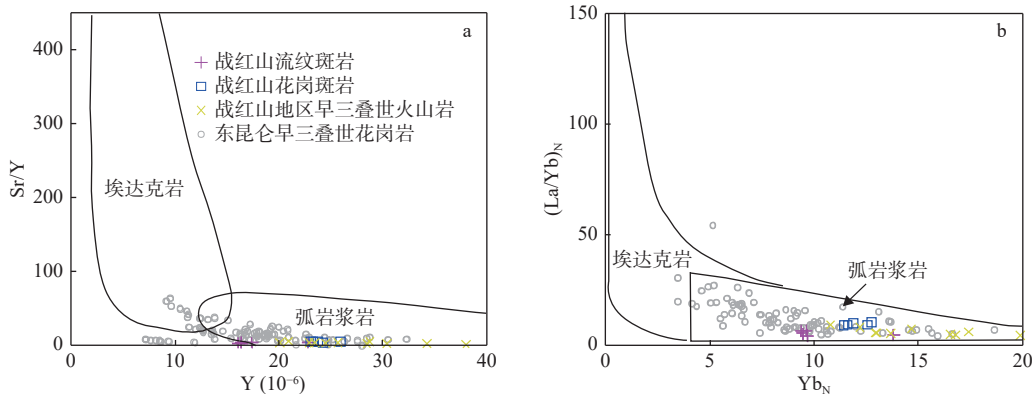


图 11 战红山流纹斑岩  $Y-Sr/Y$  图(a)和  $Yb_N-(La/Yb)_N$  图(b)(底图据 Castillo et al., 2006)

Fig. 11 (a) Diagrams of  $Sr/Y-Y$  and (b)  $(La/Yb)_N-Yb_N$  for the Zhanhongshan rhyolite porphyry

前文显示,东昆仑在早三叠世处于东昆仑古特提斯的俯冲阶段。随着洋壳俯冲深度的增加,洋壳变质脱水形成的流体上升进入地幔楔使其部分熔融形成镁铁质岩浆,这些镁铁质岩浆的底侵作用,使不同成分的地壳部分熔融形成了东昆仑早三叠世花岗质岩浆岩。随着俯冲作用的进行,洋壳俯冲角度的变化或者板片断裂作用可以促使软流圈地幔上涌,导致岩石圈地幔部分熔融程度增高,进而使幔源岩浆底侵地壳的能力增强,使东昆仑造山带在早三叠世晚期处于岩浆活动的峰值。

## 6 结论

(1) 锆石 U-Pb 定年结果显示战红山流纹斑岩的结晶年龄为(245±1)Ma,形成于早三叠世。

(2) 早期俯冲阶段形成洋壳玄武岩经过幔源岩浆的底侵和外来流体的加入部分熔融形成了富 Na 过铝质战红山流纹斑岩。

(3) 战红山流纹斑岩为东昆仑古特提斯俯冲阶段的产物。

## 参考文献(References):

陈国超,裴先治,李瑞保,等.东昆仑洪水川地区科科鄂阿龙岩体锆石 U-Pb 年代学、地球化学及其地质意义[J].*地质学报*,2013,87(2):178-196.

CHEN Guochao, PEI Xianzhi, LI Ruibao, et al. Zircon U-Pb Geochronology Geochemical Characteristics and Geological Significance of Cocoe A'Long Quartz Diorites Body from the Hongshuichuan Area in East Kunlun[J].*Acta Geologica Sinica*,2013,87(2):178-196.

陈国超,裴先治,李瑞保,等.东昆仑古特提斯后碰撞阶段伸展作用:来自晚三叠世岩浆岩的证据[J].*地学前缘*,2019,26(4):191-208.

CHEN Guochao, PEI Xianzhi, LI Ruibao, et al. Lithospheric extension of the post-collision stage of the Paleo-Tethys oceanic system in the East Kunlun Orogenic Belt: insights from Late Triassic plutons[J].*Earth Science Frontiers*,2019,26(4):191-208.

陈国超,裴先治,李瑞保,等.东昆仑造山带东段晚古生代—早中生代构造岩浆演化与成矿作用[J].*地学前缘*,2020,27(4):33-48.

CHEN Guochao, PEI Xianzhi, LI Ruibao, et al. Late Palaeozoic-Early Mesozoic tectonic-magmatic evolution and mineralization in the eastern section of the East Kunlun Orogenic Belt[J].

*Earth Science Frontiers*,2020,27(4):33-48.

陈能松,孙敏,王勤燕,等.东昆仑造山带昆中带的独居石电子探针化学年龄:多期构造变质事件记录[J].*科学通报*,2007,52(11):1297-1306.

CHEN Nengsong, SUN Min, WANG Qinyan, et al. EMP chemical ages of monazites from Central Zone of the eastern Kunlun Orogen: Records of multi-tectonometamorphic events[J].*Chinese Science Bulletin*,2007,52(11):1297-1306.

陈有炳,裴先治,李瑞保,等.东昆仑造山带东段元古界小庙岩组的锆石 U-Pb 年龄[J].*现代地质*,2011,25(3):510-521.

CHEN Youxin, PEI Xianzhi, LI Ruibao, et al. Zircon U-Pb Age of Xiaomiao Formation of Proterozoic in the Eastern Section of the East Kunlun Orogenic Belt[J].*Geoscience*,2011,25(3):510-521.

邓红宾,何龙,姚波,等.东昆仑造山带低山头二长花岗岩形成时代及岩石地球化学特征[J].*西北地质*,2018,51(4):60-69.

DENG Hongbin, HE Long, YAO Bo, et al. Formation Age and Geochemical Characteristics of Dishantou Monzonitic Granite in Eastern Kunlun Orogenic Belt[J].*Northwestern Geology*,2018,51(4):60-69.

邓文兵,裴先治,刘成军,等.东昆仑东段香日德地区察汗陶勒盖正长花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J].*地质通报*,2016,35(5):687-699.

DENG Wenbin, PEI Xianzhi, LIU Chengjun, et al. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating of the Chahantaolegai syenogranites in Xiangride area of East Kunlun and its geological significance[J].*Geological Bulletin of China*,2016,35(5):687-699.

付彦文,薛万文,王涛,等.青海东昆仑南构造带战红山地区中性火山岩的发现及其地质特征[J].*矿物岩石*,2019,39(4):78-85.

FU Yanwen, XUE Wanwen, WANG Tao, et al. Discovery and geological characteristics of Intermediate acid volcanic rocks in the Zhanhongshan area, East Kunlun tectonic belt, Qinghai[J].*Journal Mineralogy Petrology*,2019,39(4):78-85.

郭安林,张国伟,孙延贵,等.阿尼玛卿蛇绿岩带 OIB 和 MORB 的地球化学及空间分布特征:玛积雪山古洋脊热点构造证据[J].*中国科学(D辑)*,2007,50(2):197-208.

GUO Anlin, ZHANG Guowei, SUN Yangui, et al. Geochemistry and spatial distribution of OIB and MORB in A'nyemaqen ophiolite zone: Evidence of Majixueshan ancient ridge-centered hotspot[J].*Science in China(Series D)*,2007,50(2):197-208.

何凡,宋述光.东昆仑金水口地区格林威尔期超高温麻粒岩[J].*岩石学报*,2020,36(4):1030-1040.

HE Fan, SONG Shuguang. The Grenvillian-aged UHT granulite in Jinshuikou region, East Kunlun Orogenic Belt[J].*Acta Petrologica Sinica*,2020,36(4):1030-1040.

- 李积清, 张鑫利, 王涛, 等. 东昆仑战红山地区花岗斑岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年及岩石地球化学特征 [J]. 西北地质, 2021, 54(1): 30–40.
- LI Jiqing, ZHANG Xinli, WANG Tao, et al. Zircon U-Pb Dating and Geochemical Characteristics of Granite Porphyry in Zhanhongshan Area, East Kunlun [J]. *Northwestern Geology*, 2021, 54(1): 30–40.
- 李瑞保, 裴先治, 李佐臣, 等. 东昆仑东段晚古生代—中生代若干不整合面特征及其对重大构造事件的响应 [J]. 地学前缘, 2012, 19(5): 244–254.
- LI Ruibao, PEI Xianzhi, LI Zuochen, et al. Geological characteristics of Late Palaeozoic-Mesozoic unconformities and their response to some significant tectonic events in eastern part of Eastern Kunlun [J]. *Earth Science Frontiers*, 2012, 19(5): 244–254.
- 李瑞保, 裴先治, 李佐臣, 等. 东昆仑东段下三叠统洪水川组沉积序列与盆地构造原型恢复 [J]. *地质通报*, 2015, 34(12): 2302–2314.
- LI Ruibao, PEI Xianzhi, LI Zuochen, et al. The depositional sequence and prototype basin for Lower Triassic Hongshuichuan Formation in the eastern segment of East Kunlun Mountains [J]. *Geological Bulletin of China*, 2015, 34(12): 2302–2314.
- 李瑞保, 裴先治, 李佐臣, 等. 东昆仑东段古特提斯洋俯冲作用—乌妥花岗岩体锆石 U-Pb 年代学和地球化学证据 [J]. 岩石学报, 2018, 62: 212–226.
- LI Ruibao, PEI Xianzhi, PEI Lei, et al. The Early Triassic Andean-type Halagatu granitoids pluton in the East Kunlun orogen, northern Tibet Plateau: Response to the northward subduction of the Paleo-Tethys Ocean [J]. *Gondwana Research*, 2018, 62: 212–226.
- 罗照华, 柯珊, 曹永清, 等. 东昆仑印支晚期幔源岩浆活动 [J]. *地质通报*, 2002, 21(6): 292–297.
- LUO Zhaohua, KE Shan, CAO Yongqing, et al. Indosinian mantle-derived magmatism in the East Kunlun [J]. *Geological Bulletin of China*, 2002, 21(6): 292–297.
- 马昌前, 熊富浩, 尹烁, 等. 造山带岩浆作用的强度和旋回性: 以东昆仑古特提斯花岗岩类岩基为例 [J]. 岩石学报, 2015, 31(12): 3555–3568.
- MA Changqian, XIONG Fuhao, YIN Shuo, et al. Intensity and cyclicity of orogenic magmatism: An example from a Paleo-Tethyan granitoid batholith, Eastern Kunlun, northern Qinghai-Tibetan Plateau [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2015, 31(12): 3555–3568.
- 莫宣学, 罗照华, 邓晋福, 等. 东昆仑造山带花岗岩及地壳生长 [J]. *高校地质学报*, 2007, 13(3): 403–414.
- MO Xuanxue, LUO Zhaohua, DENG Jinfu, et al. Granitoids and Crustal Growth in the East-Kunlun Orogenic Belt [J]. *Geological Journal of China Universities*, 2007, 13(3): 403–414.
- 裴先治, 胡楠, 刘成军, 等. 东昆仑南缘哥日卓托地区马尔组砂岩碎屑组成、地球化学特征与物源构造环境分析 [J]. 地质论评, 2015, 61(2): 307–323.
- PEI Xianzhi, HU Nan, LIU Chengjun, et al. Detrital Composition, Geochemical Characteristics and Provenance Analysis for the Maerzheng Formation Sandstone in Gerizhuotuo Area, Southern Margin of East Kunlun Region [J]. *Geological Review*, 2015, 61(2): 307–323.
- 裴先治, 李瑞保, 李佐臣, 等. 东昆仑南缘布青山复合增生型构造混杂岩带组成特征及其形成演化过程 [J]. 地球科学, 2018, 43(12): 4498–4520.
- PEI Xianzhi, LI Ruibao, LI Zuochen, et al. Composition Feature and Formation Process of Buqingshan Composite Accretionary Mélange Belt in Southern Margin of East Kunlun Orogen [J]. *Earth Science*, 2018, 43(12): 4498–4520.
- 钱兵, 高永宝, 李佩, 等. 新疆东昆仑于沟子地区与铁-稀有多金属成矿有关的碱性花岗岩地球化学、年代学及 Hf 同位素研究 [J]. 岩石学报, 2015, 31(9): 2508–2520.
- QIAN Bing, GAO Yongbao, LI Kan, et al. Zircon- U-Pb-Hf isotopes and whole rock geochemistry constraints on the petrogenesis of iron-rare metal mineralization related alkaline granite intrusive rock in Yugouzi area, eastern Kunlun, Xinjiang [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2015, 31(9): 2508–2520.
- 王珂, 王连训, 马昌前, 等. 东昆仑加鲁河中三叠世含石榴石二云母花岗岩的成因及地质意义 [J]. 地球科学, 2020, 45(2): 400–418.
- WANG Ke, WANG Lianxun, MA Changqian, et al. Petrogenesis and Geological Implications of the Middle Triassic Garnet-Bearing Two-Mica Granite from Jialuhe Region, East Kunlun [J]. *Earth Science*, 2020, 45(2): 400–418.
- 吴福元, 李献华, 郑永飞, 等. Lu-Hf 同位素体系及其岩石学应用 [J]. *岩石学报*, 2007a, 23(2): 185–220.
- WU Fuyuan, LI Xianhua, ZHENG Yongfei, et al. Lu-Hf isotopic systematics and their applications in petrology [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007a, 23(2): 185–220.
- 吴福元, 李献华, 杨进辉, 等. 花岗岩成因研究的若干问题 [J]. *岩石学报*, 2007b, 23(6): 1217–1238.
- WU Fuyuan, LI Xianhua, YANG Jinhui, et al. Discussions on the petrogenesis of granite [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007b, 23(6): 1217–1238.
- 吴福元, 刘小驰, 纪伟强, 等. 高分异花岗岩的识别与研究 [J]. 中国科学:地球科学, 2017, 47(7): 745–765.
- WU Fuyuan, LIU Xiaochi, JI Weiqiang, et al. Highly fractionated granites: Recognition and research [J]. *Science China: Earth Sciences*, 2017, 47(7): 745–765.
- 吴元保, 郑永飞. 锆石成因矿物学研究及其对 U-Pb 年龄解释的制约 [J]. 科学通报, 2004, 49(16): 1589–1604.
- WU Yuanbao, ZHENG Yongfei. Genesis of zircon and its con-

- straints on interpretation of U-Pb age[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2004, 49(16): 1589–1604.
- 殷鸿福, 张克信. 东昆仑造山带的一些特点[J]. *地球科学*, 1997, 22(4): 339–342.
- YIN Hongfu, ZHANG Kexin. Characteristics of the Eastern Kunlun Orogenic belt[J]. *Earth Science*, 1997, 22(4): 339–342.
- 于森, 丰成友, 何书跃, 等. 祁漫塔格造山带——青藏高原北部地壳演化窥探[J]. *地质学报*, 2017, 91(4): 703–723.
- YU Miao, FENG Chengyou, HE Shuyue, et al. The Qimantagh Orogen as A Window to the Crustal Evolution of the Northern Tibetan Plateau[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2017, 91(4): 703–723.
- 余能, 金巍, 葛文春, 等. 东昆仑金水口过铝花岗岩的地球化学研究[J]. *世界地质*, 2005, 24(2): 123–128.
- YU Neng, JIN Wei, GE Wenchun, et al. Geochemical study on peraluminous granite from Jinshuikou in East Kunlun[J]. *Global Geology*, 2005, 24(2): 123–128.
- 袁洪林, 吴福元, 高山, 等. 东北地区新生代侵入体的锆石激光探针 U-Pb 年龄测定与稀土元素成分分析[J]. *科学通报*, 2003, 48(14): 1511–1520.
- YUAN Honglin, WU Fuyuan, GAO Shan, et al. U-Pb age determination of zircon from Cenozoic intrusions in northeast China and analysis of rare earth elements[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2003, 48(14): 1511–1520.
- 张新远, 李五福, 欧阳光文, 等. 东昆仑东段青海战红山地区早三叠世火山岩的发现及其地质意义[J]. *地质通报*, 2020, 39(5): 631–641.
- ZHANG Xinyuan, LI Wufu, OUYANG Guangwen, et al. The discovery of Early Triassic volcanic rocks in Zhanhongshan area of Qinghai Province in the eastern section of East Kunlun Mountain and its geological significance[J]. *Geological Bulletin of China*, 2020, 39(5): 631–641.
- 张照伟, 钱兵, 王亚磊, 等. 东昆仑夏日哈木镍成矿赋矿机理认识与找矿方向指示[J]. *西北地质*, 2020, 53(3): 153–168.
- ZHANG Zhaowei, QIAN Bing, WANG Yalei, et al. Understanding of the Metallogenic Ore-Bearing Mechanism and Its Indication of Prospecting Direction in Xiarihamu Magmatic Ni-Co Sulfide Deposit, East Kunlun Orogenic Belt[J]. *Northwestern China*, 2020, 53(3): 153–168.
- 赵旭, 付乐兵, 魏俊浩, 等. 东昆仑接纳格角闪辉长岩体地球化学特征及其对古特提斯洋演化的制约[J]. *地球科学*, 2018, 43(2): 354–370.
- ZHAO Xu, FU Lebing, WEI Junhao, et al. Geochemical Characteristics of Annage Hornblende Gabbro from East Kunlun Orogenic Belt and Its Constraints on Evolution of Paleo-Tethys Ocean[J]. *Earth Science*, 2018, 43(2): 354–370.
- Altherr F F, Holl A, Hegner E, et al. High-Potassium, Calc-Alkaline I-Type Plutonism in the European Variscides: Northern Vosges (France) and Northern Schwarzwald (Germany)[J]. *Lithos*, 2000, 50: 51–73.
- Anderson T. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report  $^{204}\text{Pb}$ [J]. *Chemical Geology*, 2002, 192(1–2): 59–79.
- Annen C, Blundy J D, Sparks R S J. The genesis of intermediate and silicic magmas in deep crustal hot zones[J]. *Journal of Petrology*, 2006, 47(3): 505–539.
- Barbarin B. Mafic magmatic enclaves and mafic rocks associated with some granitoids of the central Sierra Nevada batholith, California: nature, origin, and relations with the hosts[J]. *Lithos*, 2005, 80: 155–177.
- Bonin B. A-type granites and related rocks: Evolution of a concept, problems and prospects[J]. *Lithos*, 2007, 97: 1–29.
- Boynton W V. Geochemistry of the rare earth elements: meteorite studies. In: Henderson P, ed. Rare earth element geochemistry[J]. Amsterdam Elsevier, 1984: 63–114.
- Cashman K V, Sparks R S J, Blundy J D. Vertically extensive and unstable magmatic systems: a unified view of igneous processes[J]. *Science*, 2017, 355(6331): eaag3055.
- Castillo P R. An overview of adakites petrogenesis[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2006, 51: 257–268.
- Castro A. Tonalite-granodiorite suites as cotectic systems: A review of experimental studies with applications to granitoid petrogenesis[J]. *Earth-Science Reviews*, 2013, 124: 68–95.
- Castro A. A non-basaltic experimental cotectic array for calc-alkaline batholiths[J]. *Lithos*, 2021, 382–383: 105929.
- Chapman J B, Runyon S E, Shields J E, et al. The North American Cordilleran Anatectic Belt[J]. *Earth-Science Reviews*, 2021, 215: 103576.
- Chappell B W, White A J R, Wyborn D. The importance of residual source material (restite) in granite petrogenesis[J]. *Journal of Petrology*, 1987, 28(6): 11–38.
- Chappell B W, White A J R. I- and S-type granites in the Lachland Fold Belt[J]. *Mineralogy Magazine Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth Sciences*, 1992, 83: 1–26.
- Chappell B W, White A J. Two contrasting granite types: 25 years later[J]. *Australian Journal of Earth Sciences*, 2001, 48(4): 489–499.
- Chappell B W, Bryant C J, Wyborn D. Peraluminous I-type granites[J]. *Lithos*, 2012, 153: 142–153.
- Chauvel C, Lewin E, Carpentier M, et al. Role of recycled oceanic basalt and sediment in generating the Hf-Nd mantle array[J]. *Nature Geoscience*, 2008, 1: 64–67.
- Chen J J, Wei J H, Fu L B, et al. Multiple sources of the Early Mesozoic Gouli batholith, Eastern Kunlun Orogenic Belt, northern Tibetan Plateau: Linking continental crustal growth with ocean-

- ic subduction[J]. *Lithos*, 2017, 292–293: 161–178.
- Clemens J D, Stevens G. The enigmatic sources of I-type granites: The peritectic connexion[J]. *Lithos*, 2011, 126: 174–181.
- Clemens J D, Stevens G. What controls chemical variation in granitic magmas?[J]. *Lithos*, 2012, 134–135: 317–329.
- Clemens J D, Stevens G, Bryan S E. Conditions during the formation of granitic magmas by crustal melting—hot or cold; drenched, damp or dry?[J]. *Earth-Science Reviews*, 2020, 200: 102982.
- Collins W J, Beams S D, White A J R, et al. Nature and origin of A-type granites with particular reference to south-eastern Australia[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1982, 80: 189–200.
- Collins W J, Huang H Q, Jiang X Y. Water-fluxed crustal melting produces Cordilleran batholiths[J]. *Geology*, 2016, 44: G37398.1.
- Collins W J, Murphy J B, Johnson T E, et al. Critical role of water in the formation of continental crust[J]. *Nature Geoscience*, 2020, 13: 331–338.
- Corfu F, Hancher J M, Hoskin P W O, et al. Atlas of zircon textures[J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 2003, 53(1): 469–500.
- Dong Y P, He D F, Sun S S, et al. Subduction and Accretionary Tectonics of the East Kunlun Orogen, Western Segment of the Central China Orogenic System[J]. *Earth-Science Reviews*, 2018, 186: 231–261.
- Frost C D, Bell J M, Frost B R, et al. Crustal growth by magmatic underplating: isotopic evidence from the northern Sherman batholith[J]. *Geology*, 2001, 29: 515–518.
- Gao P, Zheng Y F, Zhao Z F. Experimental melts from crustal rocks: a lithochemical constraint on granite petrogenesis[J]. *Lithos*, 2016, 266: 133–157.
- Guo X Z, Jia Q Z, Lv X B, et al. The Permian Sn metallogenic event and its geodynamic setting in East Kunlun, NW China: Evidence from zircon and cassiterite geochronology, geochemistry, and Sr–Nd–Hf isotopes of the Xiaowolong skarn Sn deposit[J]. *Ore Geology Reviews*, 2020, 118: 103370.
- Huang H, Niu Y L, Nowell G, et al. Geochemical constraints on the petrogenesis of granitoids in the East Kunlun Orogenic belt, northern Tibetan Plateau: implications for continental crust growth through syn-collisional felsic magmatism[J]. *Chemical Geology*, 2014, 370: 1–18.
- Hawkesworth C J, Kemp A I S. Evolution of the continental crust[J]. *Nature*, 2006, 443: 811–817.
- Jackson M D, Blundy J, Sparks R S J. Chemical differentiation, cold storage and remobilization of magma in the Earth's crust[J]. *Nature*, 2018, 564: 405–409.
- Kemp A I S, Hawkesworth C J, Foster G L, et al. Magmatic and crustal differentiation history of granitic rocks from Hf–O isotopes in zircon[J]. *Science*, 2007, 315: 980–983.
- Lee C T A, Bachmann O. How important is the role of crystal fractionation in making intermediate magmas? Insights from Zr and P systematics[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2014, 393: 266–274.
- Lee C T A, Morton D M. High silica granites: terminal porosity and crystal settling in shallow magma chambers[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2015, 409: 23–31.
- Li R B, Pei X Z, Li Z C, et al. Late Silurian to Early Devonian volcanics in the East Kunlun orogen, northern Tibetan Plateau: Record of postcollisional magmatism related to the evolution of the Proto-Tethys Ocean[J]. *Journal of Geodynamics*, 2020a, 140: 101780.
- Li Y J, Wei J H, Santosh M, et al. Anisian granodiorites and mafic microgranular enclaves in the eastern Kunlun Orogen, NW China: Insights into closure of the eastern Paleo-Tethys[J]. *Geological Journal*, 2020b, 55(9): 1–21.
- Li Z C, Pei X Z, Bons P D, et al. Petrogenesis and tectonic setting of the early-middle triassic subduction-related granite in the eastern segment of East Kunlun: evidences from petrology, geochemistry, and zircon U–Pb–Hf isotopes[J]. *International Geology Review*, 2022, 22(5): 698–721.
- Ludwig K R. Isoplot 3. 0: A Geochronological toolkit for Microsoft Excel[J]. Berkeley: Berkeley Geochronology Center, 2003: 1–70.
- Maniar P D, Piccoli P M. Tectonic discrimination in of granitoids[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1989, 1: 635–643.
- Patiño Douce A E, Harris N. Experimental constraints on Himalayan anatexis[J]. *Journal of Petrology*, 1998, 39(4): 689–710.
- Patiño Douce A E. What do experiments tell us about the relative contributions of crust and mantle to the origin of the granitic magmas[J]. *Geological Society London Special Publications*, 1999, 168(1): 55–75.
- Petford N, Atherton M. Na-rich partial melts from newly underplated basaltic crust: The Cordillera Blanca batholith, Peru[J]. *Journal of Petrology*, 1996, 37(6): 1491–1521.
- Rapp R P. Amphibole-out phase boundary in partially melted metabasalt, its control over liquid fraction and composition, and source permeability[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1995a, 100(B8): 15601–15610.
- Rapp R P, Watson E B. Dehydration melting of metabasalt an 8–32 kbar: implications for continental growth and crust-mantle recycling[J]. *Journal of Petrology*, 1995b, 36(4): 891–911.
- Rollinson H R. Using geochemical data: evaluation, presentation, interpretation[M]. Longman Group UK Ltd, New York, 1993: 1–352.



- Rudnick R L, Gao S. Composition of the continental crust[M]. In: Treatise on Geochemistry. volume 3. Elsevier, 2003: 1–64.
- Shao F L, Niu Y L, Liu Y, et al. Petrogenesis of Triassic granitoids in the East Kunlun Orogenic Belt, northern Tibetan Plateau and their tectonic implications[J]. *Lithos*, 2017, 282: 33–44.
- Stern C R, Kilian R. Role of the subducted slab, mantle wedge and continental crust in the generation of adakites from the Andean Austral Volcanic Zone[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1996, 123: 263–281.
- Sisson T W, Ratajeski K, Hankins W B, et al. Voluminous granitic magmas from common basaltic sources[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2005, 148: 635–661.
- Song K, Ding Q F, Zhang Q, et al. Zircon U–Pb geochronology, Hf isotopes, and whole - rock geochemistry of Hongshuihe Early to Middle Triassic quartz diorites and granites in the Eastern Kunlun Orogen, NW China: Implication for petrogenesis and geodynamics[J]. *Geological Journal*, 2019, 55(2): 1–22.
- Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes[J]. In: Sunders AD, Norry MJ, Magmatism in the Ocean Basins, Geological Society Special Publication, 1989: 313–345.
- Thompson A B. Fluid-absent metamorphism[J]. *Journal of the Geological Society*, 1983, 140: 533–547.
- Villaras A, Stevens G, Buick I S. Tracking S-type granite from source to emplacement: clues from garnet in the Cape Granite Suite[J]. *Lithos*, 2009, 112: 217–235.
- Watson E B, Harrison T M. Zircon saturation revisited: temperature and composition effects in a variety of crustal magma types[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1983, 64: 295–304.
- Whalen J B, Currie K L, Chappell B W. A-type granites: Geochemical characteristics discrimination and petrogenesis[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1987, 95: 407–419.
- Wilson M. *Igneous Petrogenesis*[M]. London: Springer, 1989: 295–323.
- Xia R, Deng J, Qing M, et al. Zircon U–Pb dating, geochemistry and Sr–Nd–Pb–Hf–O isotopes for the Nan'getan granodiorites and mafic microgranular enclaves in the East Kunlun Orogen: Record of closure of the Paleo-Tethys[J]. *Lithos*, 2015, 234–235: 47–70.
- Xia R, Deng J, Qing M, et al. Petrogenesis of ca 240 Ma intermediate and felsic intrusions in the Nan'getan: Implications for crust–mantle interaction and geodynamic process of the East Kunlun Orogen[J]. *Ore Geology Reviews*, 2017, 90: 1099–1119.
- Xin W, Sun F Y, Zhang Y T, et al. Mafic-intermediate igneous rocks in the East Kunlun Orogenic Belt, northwestern China: Petrogenesis and implications for regional geodynamic evolution during the Triassic[J]. *Lithos*, 2019, 346–347: 105159.
- Xiong F H, Ma C Q, Jiang H G, et al. Petrogenetic and tectonic significance of Permian calcalkaline lamprophyres, East Kunlun orogenic belt, Northern Qinghai-Tibet Plateau[J]. *International Geology Review*, 2013, 55(14): 1817–1834.
- Xiong F H, Ma C Q, Zhang J Y, et al. Reworking of old continental lithosphere: An important crustal evolution mechanism in orogenic belts, as evidenced by Triassic I-type granitoids in the East Kunlun orogen, Northern Tibetan Plateau[J]. *Journal of the Geological Society*, 2014, 171(6): 847–863.
- Xiong F H, Ma C Q, Chen B, et al. Intermediate-mafic dikes in the East Kunlun Orogen, Northern Tibetan Plateau: A window into paleo-arc magma feeding system[J]. *Lithos*, 2019: 340–341: 152–165.
- Yu M, Dick M, Feng C Y, Li B, et al. The tectonic evolution of the East Kunlun Orogen, northern Tibetan Plateau: A critical review with an integrated geodynamic model[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2020, 191(2): 104168.
- Zhao X, Wei J H, Fu L B, et al. Multi-stage crustal melting from Late Permian back-arc extension through Middle Triassic continental collision to Late Triassic post-collisional extension in the East Kunlun Orogen[J]. *Lithos*, 2020, 360–361: 105446.
- Zheng Y F. Subduction zone geochemistry[J]. *Geoscience Frontiers*, 2019, 10: 1223–1254.
- Zhou H Z, Zhang D H, Wei J H, et al. Petrogenesis of Late Triassic mafic enclaves and host granodiorite in the Eastern Kunlun Orogenic Belt, China: Implications for the reworking of juvenile crust by delamination-induced asthenosphere upwelling[J]. *Gondwana Research*, 2020, 84: 52–70.