

西南天山托云中新生代火山岩盆地响岩的 岩石成因研究

李永^{1,2}, 程志国¹, 郎明德¹, 郝金华¹, 孔德鑫¹

(1. 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 北京 100083; 2. 新疆维吾尔自治区有色地质勘查局地质矿产勘查研究院, 新疆 乌鲁木齐 830000)

摘要: 响岩代表了陆内火山岩省钠质碱性岩浆最终端的演化产物, 揭示其成因机制对认识陆内火山岩省的岩浆演化过程具有重要意义。文章对出露在我国境内西南天山托云中新生代火山岩盆地的响岩开展了系统的矿物学、岩石学和地球化学研究, 以揭示托云火山岩岩浆系列特征和岩浆演化过程。托云响岩以发育碱性长石、单斜辉石、铁橄榄石和角闪石斑晶为特征, 在基质中可见霞石。在地球化学组成上, 托云响岩以高的 Na_2O 含量 (7.9%~8.6%) 和 K_2O 含量 (5.2%~6.3%) 为特征, ΣREE 变化范围为 408×10^{-6} ~ 470×10^{-6} , 稀土元素配分曲线具有明显的 Eu 异常, 在原始地幔标准化的微量元素蛛网图上, 样品显示出 Ba、Sr、P、Ti 的负异常和 Nb、Ta、Zr、Hf 的正异常特征。亏损的 Nd 同位素组成表明其成因与共生的碧玄岩有紧密的成因联系, 经 MELTS 热力学模拟, 响岩可由碧玄岩经碱性长石 (36%)、单斜辉石 (21%)、尖晶石 (10%)、铁橄榄石 (6%) 和角闪石 (5%) 的分离结晶作用形成, 进一步的 EC-AFC 模拟表明, 响岩在形成过程中受到一定程度 (10%) 的地壳混染。研究表明, 托云火山岩总体属于过碱性岩石系列 (碧玄岩-响岩质粗面岩-响岩), 响岩代表了该岩石系列的终端演化产物。

关键词: 西南天山; 托云盆地; 响岩; 铁橄榄石; 岩浆演化; AFC 过程

中图分类号: P588.15

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2023)01-0013-16

Petrogenesis of the phonolite in the Tuoyun Mesozoic-Cenozoic volcanic basin, Southwestern Tianshan Mountains

LI Yong^{1,2}, CHENG Zhi-guo¹, LANG Ming-de¹, HAO Jin-hua¹ and KONG De-xin¹

(1. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;
2. Geological and Mineral Prospecting Research Institute of Nonferrous Geological Prospecting Bureau of Xinjiang Uygur Autonomous Region, Urumqi 830000, China)

Abstract: Phonolite represents the final evolution product of the sodic alkaline magma in the continental volcanic province, and revealing its genetic mechanism is of great significance for understanding the magmatic evolution process of the continental volcanic province. A systematic mineralogical, petrological and geochemical study of the phonolite exposed in the Tuoyun Mesozoic-Cenozoic volcanic basin in the Southwestern Tianshan Mountains, China, has been carried out to reveal the magma series and magmatic evolution process of Tuoyun volcanic rocks. Tuoyun phonolite is characterized by the presence of alkali feldspar, clinopyroxene, fayalite and amphibole phenocrysts, and nepheline can be seen in the groundmass. In terms of geochemical composition, Tuoyun phonolite is characterized by high Na_2O (7.9%~8.6%) and K_2O (5.2%~6.3%). The total rare earth element ranges from 408×10^{-6} to 470×10^{-6} , and the chondrite-normalized REE patterns have obvious Eu anomaly. In the primitive mantle-normalized

收稿日期: 2022-06-03; 接受日期: 2022-11-14; 编辑: 曲丽莉

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42072067); 中央高校基本科研业务费项目 (376202105)

作者简介: 李永 (1982-), 男, 硕士, 高级工程师, 矿产普查与勘探专业, E-mail: 61572273@qq.com; 通讯作者: 程志国 (1987-), 男, 博士, 副教授, 主要从事岩浆作用与成矿的研究, E-mail: zgcheng@cugb.edu.cn.

trace element spider diagram, the samples show negative anomalies of Ba, Sr, P, Ti and positive anomalies of Nb, Ta, Zr and Hf. The depleted Nd isotopic composition shows that phonolite is genetically related to the associated basanite. Based on the MELTS thermodynamic simulation, the phonolite could be produced by the basanite through fractional crystallization of alkali feldspar (36%), clinopyroxene (21%), spinel (10%), fayalite (6%) and amphibole (5%). Further EC-AFC modeling exhibits that the phonolites has suffered crust contamination to some degrees (10%) during the evolution. The study shows that the Tuoyun volcanic rocks belong to the peralkaline series of basanite-phonotephrite-phonolite, and the phonolite represents the final evolution product of the peralkaline rock series in Tuoyun volcanic basin.

Keywords: Southwestern Tianshan; Tuoyun basin; phonolite; fayalite; magma evolution; AFC process

Fund support: National Natural Science Foundation of China (42072067); Fundamental Research Funds for the Central Universities (376202105)

相对于其他类型的火山岩,响岩在地球上并不多见,其主要出露在板内的火山岩省和洋岛环境中,并多以火山穹隆或破火山口形式产出 (Kim *et al.*, 1999; Wiesmaier *et al.*, 2012; Brenna *et al.*, 2014), 研究程度较高的实例如 Canary 岛 (Johansen *et al.*, 2005)、东非裂谷 (Price *et al.*, 1985)、维苏威火山 (Signorelli *et al.*, 1999) 和长白山 (Wei *et al.*, 2007) 等。由于时空和地球化学指标的关联性,响岩的形成往往和碧玄岩、霞石岩和碳酸岩等碱性-过碱性岩石联系在一起,但其成因依然存在着广泛的争议,可能的成因机制包括地幔部分熔融、分离结晶和液态不混溶作用等 (Kogarko, 1997; Harmer and Gittins, 1998; Kaszuba and Wendlandt, 2000; Cousens *et al.*, 2003; Legendre *et al.*, 2005; Grant *et al.*, 2013; Laporte *et al.*, 2014)。作为板内火山岩省岩浆演化终端的硅质岩浆,准确揭示响岩的岩石成因对认识板内火山岩省中各岩石系列关系和岩浆演化过程具有重要意义。

中亚造山带西段吉尔吉斯斯坦和我国境内西南天山不连续分布有 $1.8 \times 10^5 \text{ km}^2$ 的中新生代大陆溢流玄武岩,岩性以碱性玄武岩为主,构成典型的大陆中新生代碱性火山岩省 (Sobel and Arnaud, 2000; 徐学义等, 2003; 季建清等, 2006; Simonov *et al.*, 2015; 曹俊等, 2019)。作为中亚中新生代碱性玄武岩的重要组成部分,我国西南天山托云盆地中新生代碱性玄武岩具有出露面积大 (长约 40 km, 宽 15~20 km)、时间跨度长 (早白垩世—古近纪) 等特点 (韩宝福等, 1998; 王彦斌等, 2000; 徐学义等, 2003; Huang *et al.*, 2005; Zheng *et al.*, 2006a, 2006b; Han *et al.*, 2008)。其岩石类型复杂,不仅出露碱性玄武岩,还发育有一定规模的碧玄岩、响岩

等。前人的研究表明,托云盆地各岩石单元之间在源区组成、部分熔融机制、岩浆分异过程等方面可能存在潜在的成因关联 (季建清等, 2006; Cheng *et al.*, 2022), 这为研究响岩的成因机制及探讨各岩石类型之间的关系提供了良好契机。鉴于此,本次研究拟以托云盆地响岩为研究对象,对其开展系统的矿物学、岩石学和同位素地球化学研究,以揭示其成因机制及地质意义。

1 地质背景

中亚中新生代玄武岩不连续分布于中亚造山带西段吉尔吉斯斯坦境内天山部分和我国西南天山托云、皮羌盆地,分布面积可达 $1.8 \times 10^5 \text{ km}^2$, 常呈溢流状和岩席状产出在白垩纪—古新世地层中,或呈岩脉和岩株状侵入于古生代地层中 (Sobel and Arnaud, 2000; 徐学义等, 2003; Simonov *et al.*, 2008, 2015)。中亚中新生代玄武岩以碱性玄武岩为主,主要包括橄榄玄武岩、碧玄岩、碱玄岩、响岩质碱玄岩和粗面玄武岩等,在吉尔吉斯斯坦 Uchkuduk 地区存在霞石岩和苦橄质岩石 (Simonov *et al.*, 2008, 2015), 在托云盆地有响岩的报道 (季建清等, 2006)。前人大量的 Ar-Ar 和 K-Ar 年龄揭示吉尔吉斯斯坦境内大陆溢流玄武岩的喷发年龄为 84~58 Ma (Sobel and Arnaud, 2000; Huang *et al.*, 2005; Simonov *et al.*, 2008, 2015; 曹俊等, 2019)。皮羌盆地玄武岩的 SHRIMP 锆石 U-Pb 测年和全岩 K-Ar 等时线给出较一致的年龄约为 45 Ma (李德东等, 2009)。托云盆地玄武岩的 K-Ar 和 Ar-Ar 年龄跨度较大,这些年龄相对集中在 115~113 Ma 和 72~54 Ma 2 个年龄段内 (Sobel and Arnaud, 2000; Gilder

et al., 2003; Huang *et al.*, 2005; 季建清等, 2006; Lhuillier *et al.*, 2016; Meng *et al.*, 2020), 分别归属为早白垩世和晚白垩世—古近纪, 前人结合火山岩在地层柱状图中的相对位置, 将托云盆地玄武岩划分成下玄武岩和上玄武岩(王彦斌等, 2000; Sobel and

Arnaud, 2000; 徐学义等, 2003; 季建清等, 2006)。托云盆地出露的地层主要有侏罗系杂色厚层状复成分砾岩, 下白垩统红色砂岩、砾岩、泥岩, 上白垩统紫红色泥岩、硅质砾岩和古近系灰色、棕灰色泥岩、粉砂岩等(图1)。其中, 侏罗纪地层呈不整合状覆盖

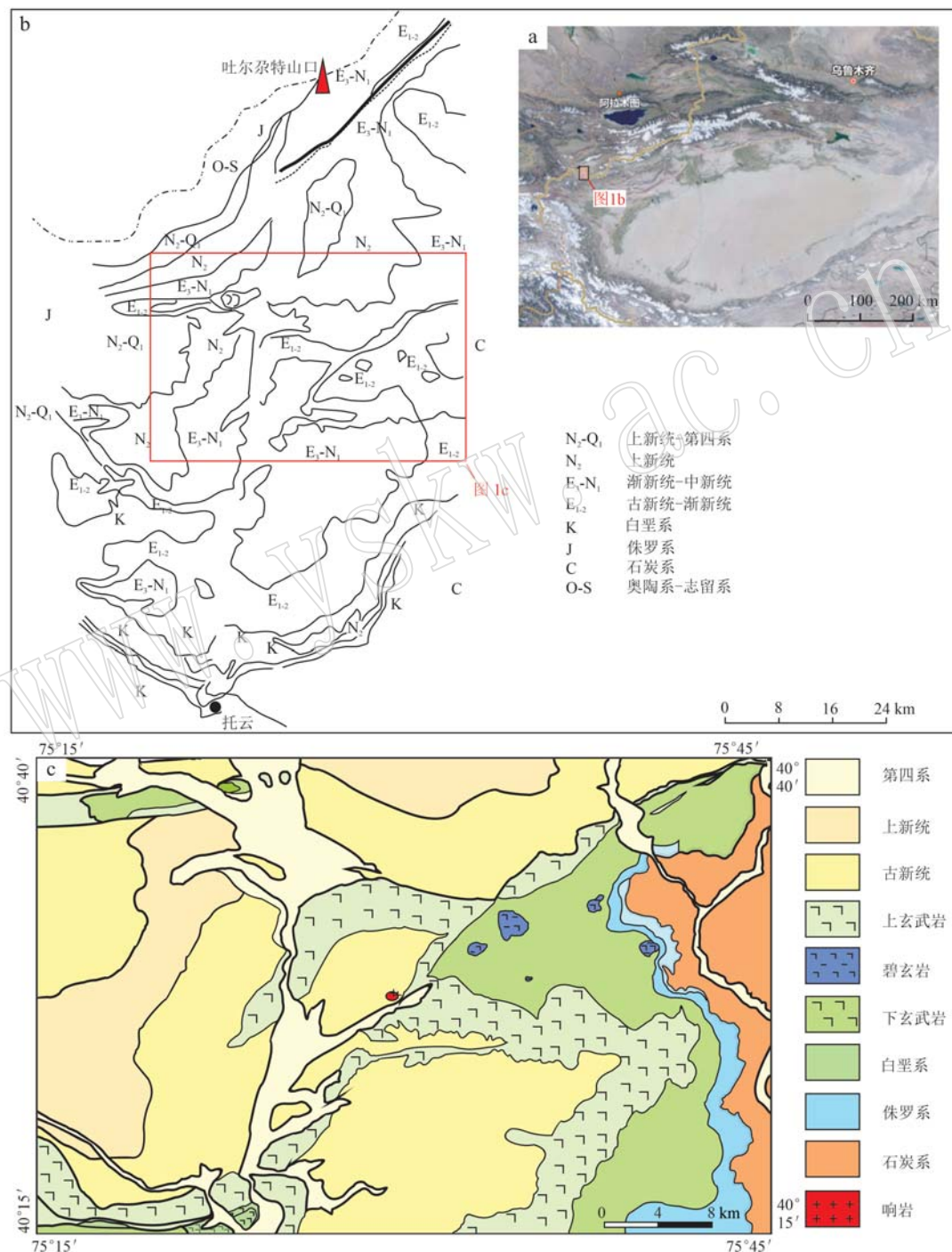


图1 托云盆地地理位置图(a, 据百度地图、卫星地图修改)、地质简图(b, 据季建清等, 2006)和新生代火山岩分布简图(c)

Fig. 1 The location (a, modified from Baidu map and satellite map), geological map (b, Ji Jianqing *et al.*, 2006) and the geological map showing the distribution of the volcanic rocks (c) of Tuoyun basin

在古生界之上,后被下白垩统和古近系不整合覆盖。下玄武岩主要呈夹层状出露在早白垩世地层中,呈北西向展布在托云盆地南部位置。野外可识别超过20层的玄武岩层,每层厚度变化在1~7.5 m之间。上玄武岩是托云盆地主要的火山岩类型,主要呈夹层状产出在上白垩统和古近系中,野外可识别超过50层的玄武岩层,每层厚度变化从1.3 m至12.4 m不等。本次研究的响岩主要呈火山穹隆状产出在盆地的北东部古近系砂岩中(图1、图2a),出露面积约

2 km²。距穹隆南部500 m处分布有上玄武岩层,穹隆北东方向2 km处分布有若干个以碧玄武岩为主要岩性的火山颈(图1c)。需要指出的是,季建清等(2006)曾对托云响岩开展过Ar-Ar年代学研究,其透长石斑晶年龄为72~54 Ma,而基质年龄为122~117 Ma,较为矛盾。鉴于与响岩共生的碱性玄武岩的Ar-Ar年龄为54 Ma,且其产出位置离下玄武岩位置较远,本次研究认为托云响岩应归为上玄武岩系列为宜。

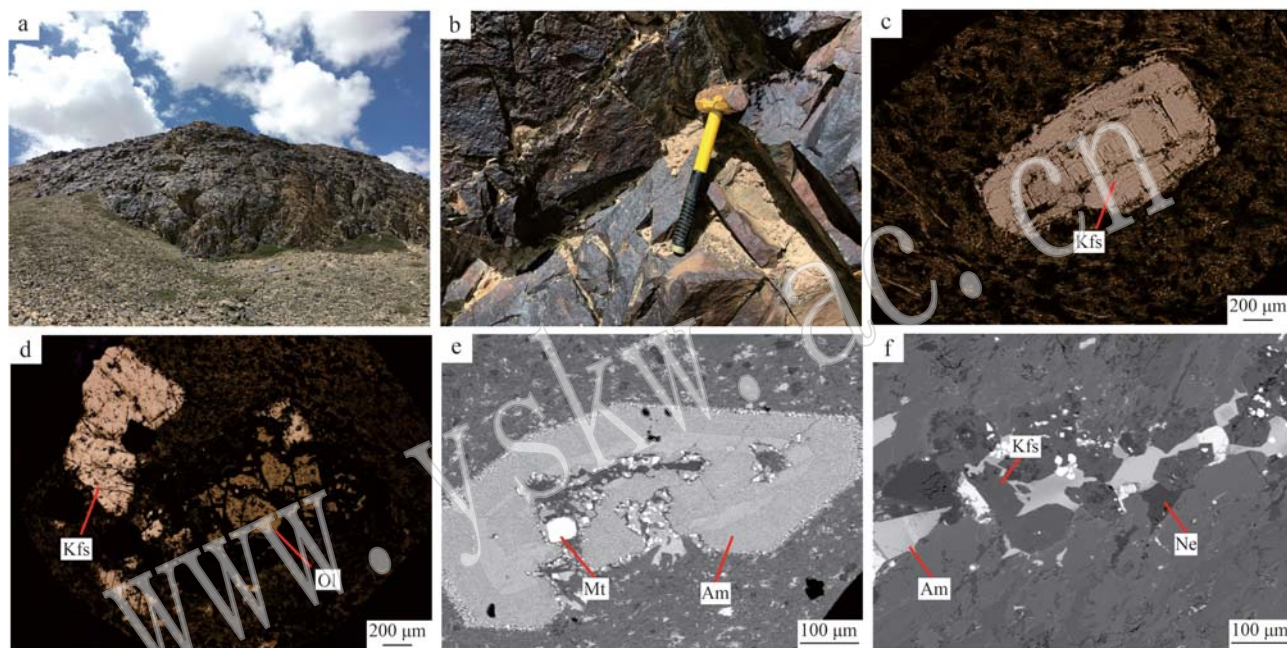


图2 西南天山托云中新世代火山岩盆地响岩的野外和镜下照片

Fig. 2 Field photos and photomicrographs of the phonolite in the Tuoyun Meso-Cenozoic volcanic basin

a—托云响岩野外呈岩浆穹隆状产出; b—响岩手标本呈黑色,具斑状结构; c—单偏光下碱性长石斑晶; d—单偏光下铁橄榄石斑晶; e—角闪石背散射图片; f—响岩基质中角闪石、碱性长石和霞石形成的矿物集合体; Kfs—钾长石; Ol—橄榄石; Mt—磁铁矿;

Am—角闪石; Ne—霞石

a—phonolite is occurring as dome in the field; b—phonolite is black in hand specimen, and exhibits porphyritic texture; c—photomicrograph of alkali feldspar under plane-polarized light; d—photomicrograph of fayalite under plane-polarized light; e—BSE image of the amphibole; f—mineral assemblage consisting of amphibole, alkali feldspar and nepheline; Kfs—alkali feldspar; Ol—olivine; Mt—magnetite; Am—amphibole; Ne—nepheline

2 岩石学特征

托云响岩手标本呈黑色,具斑状结构(图2b)。斑晶矿物约占5%~10%,主要由碱性长石、角闪石、单斜辉石和橄榄石组成。碱性长石约占斑晶总量的85%~95%,主要呈长板状,自形至半自形(图2c),粒度变化范围0.4 mm×0.6 mm~0.4 mm×1.4 mm,发育卡斯巴双晶和环带结构。单斜辉石约占1%~

3%,呈自形-半自形短柱状,粒径为0.2~0.6 mm。橄榄石约占2%~5%,粒状,单偏光下呈黄棕色,为铁橄榄石,粒度变化范围(0.2~0.4) mm×1 mm,发育黑色熔蚀边,部分颗粒存在不同程度的蛇纹石化(图2d)。角闪石占斑晶总量的2%~5%,发育暗化边,粒度较大,可达0.8 mm×2 mm(图2e)。响岩基质具显微晶质结构,主要由碱性长石、磁铁矿等矿物的微晶组成。值得指出的是,托云响岩斑晶矿物中缺少霞石、石榴石等特征矿物,但在一些样品的基质中,

偶见碱性长石、角闪石和霞石共生形成矿物集合体(图2f)。

3 分析方法

3.1 电子探针

矿物化学分析在中国地质大学(北京)电子探针实验室完成。使用的仪器为具备多谱衍射功能的JXA-1720电子显微镜,相关分析在镀碳的探针片上完成。对于硅酸盐矿物,仪器运行条件为电压15 kV,电流10 nA,束斑1~2 μm 。测试结果通过与自然矿物或国家标准人工合成氧化物来校正,如橄榄石校正Si和Mg,金红石校正Ti,石榴子石校正Fe,蔷薇辉石校正Mn,透辉石校正Ca,镍黄铁矿校正Ni,铬铁矿校正Cr和Al,硅锌矿校正Zn。测试数据使用ZAF方法进行校正。测试精度对于氧化物优于1%。

3.2 主量、微量元素

全岩的主量、微量元素分析在中国地质大学(北京)地质过程与矿产资源国家重点实验室完成。样品中主量元素的测定仪器为美国利曼公司(LEEMAN LABS. INC)Prodigy型等离子发射光谱仪(ICP-OES)。每个样品称取50 mg的200目粉末,采用碱溶法将样品全部溶解后,再将碱溶溶液用纯净硝酸稀释液提取定容后待测。实验过程中使用的标样为AGV-2、GSR-1和GSR-5。烧失量以LOI表示,首先称取100 mg样品,在马弗炉内980℃条件下恒温60 min后,干燥皿保存降温至室温后称量计算获得。微量元素使用美国安捷伦公司生产Agilent 7500 a型等离子质谱仪完成。在超净实验室内使用电子天平称取40 mg样品,采用两酸($\text{HNO}_3 + \text{HF}$)高压反应釜溶样方法进行样品的化学预处理。分析过程中用美国标准局Equipment实验室制备的标准溶液Std-1、Std-2、Std-4为检测外部标样,定值加入Rh以检测内部标准进行含量标定,使用美国地质调查局标准样品AGV2、BHVO-2、W-2以及中国地质测试中心标样GSR-1和GSR-3进行分析质量监控。

3.3 Sr-Nd 同位素

全岩Sr和Nd同位素测试在中国地质大学(北京)地质过程与矿产资源国家重点实验室使用MC-ICP-MS完成。将约1~5 mg的样品溶解在 $\text{HF-HNO}_3\text{-HCl}$ 中,随后,Sr和Nd在HCl的环境下被AG50-X12树脂和LN树脂纯化。测得的同位素分别

采用 $^{86}\text{Sr}/^{88}\text{Sr} = 0.1194$ 和 $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.7219$ 校正。实验室的NIST SRM 987长期测定值为 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.710267 \pm 10$ (2σ , $N=38$)。来自中国钢铁研究院的超纯元素标准(Alfa Nd)被作为实验室标准而长期测定,其值为 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.512419 \pm 6$ (2σ , $N=38$)。

4 分析结果

4.1 矿物化学

长石的电子探针分析结果列于表1。结果显示,长石的成分变化范围为 $\text{Ab}_{46.81 \sim 67.28} \text{An}_{0 \sim 18.62} \text{Or}_{14.36 \sim 52.46}$,主要是含钠透长石和歪长石,少数颗粒落入斜长石范围内(图3a)。本次选取2个碱性长石颗粒(HSP-26和HSP-28)进行了电子探针剖面分析,其中,样品HSP-26的Or组分呈现出震荡环带的特征(图3b),同时An和Ab组分分别呈现出降低和缓慢升高的趋势(图3c、3d);而样品HSP-28的Or组分在边部明显降低(图3b),同时An和Ab组分明显升高(图3c、3d),呈现出反环带特征。橄榄石、辉石和角闪石的电子探针成分列于表2。响岩中的橄榄石主要为铁橄榄石,Fa组分变化范围为55.49~76.29。辉石的 Na_2O 含量为2.80%,Ac组分高达10.71%,其他端员组成为 $\text{Wo}_{37.02} \text{En}_{22.37} \text{Fs}_{29.91}$,为铁辉石(图4a)。角闪石的 TiO_2 含量变化范围为4.09%~4.67%,FeO含量变化范围为22.21%~23.89%,为铁钛闪石(图4b)。

4.2 主量、微量元素

响岩的主量、微量元素列于表3。结果显示,分析的样品较为新鲜,LOI变化范围为2.1%~2.6%。样品的成分较为均一, SiO_2 含量变化范围为56.9%~60.6%, Al_2O_3 含量为17.8%~19.8%, TFeO 含量为4.0%~4.4%,CaO含量为0.9%~1.2%,MgO含量为0.1%~0.6%, TiO_2 含量为0.1%, Na_2O 含量为7.9%~8.6%, K_2O 含量为5.2%~6.3%。在 $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ 图中样品投在了响岩范围内(图5),在 $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ 图解中落在了钾玄岩范围内(图6a)。A/CNK指数变化范围为0.86~0.90,A/NK指数变化范围为0.95~0.98,绝大多数样品属于准铝质过碱性岩石(图6b)。

响岩的 ΣREE 变化范围为 $408 \times 10^{-6} \sim 470 \times 10^{-6}$,在球粒陨石标准化配分曲线上显示出轻稀土元素略富集、重稀土元素平坦的特征(图7a), $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 比值

表 1 托云盆地响岩中长石斑晶的电子探针分析结果

Table 1 The major elements of feldspar in the Tuoyun phonolite analyzed by EPMA

样品	HSP-16-Q1	HSP-16C	HSP-16R	HSP-16-Q3	HSP-23-Q4	HSP-23-Q2	HSP-23-Q1-1	HSP-23-Q1-2	HSP-26-Q2	HSP-22-Q2	HSP-22-Q3	HSP-20-Q1	HSP-20-Q2	HSP-20-Q3	HSP-20-Q4	HSP-20-Q6	w _B /%
SiO ₂	64.03	64.55	64.23	67.69	67.06	66.90	68.18	67.94	64.83	67.61	66.02	66.22	66.66	67.60	65.61	67.75	
TiO ₂	0.04	0.12	0.03	0.00	0.04	0.01	0.02	0.01	0.04	0.00	0.07	0.05	0.04	0.00	0.00	0.04	
Al ₂ O ₃	21.66	21.45	19.98	17.79	17.31	17.37	17.49	17.72	21.06	17.91	18.03	18.00	17.74	17.81	19.43	17.38	
FeO	0.36	0.15	0.16	0.18	0.08	0.15	0.14	0.14	0.10	0.14	0.17	0.17	0.12	0.11	0.13	0.21	
MgO	0.01	0.01	0.03	0.00	0.02	0.02	0.02	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.02	0.02	0.01	0.02	
MnO	0.08	0.00	0.01	0.00	0.05	0.02	0.03	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.00	0.04	
CaO	3.99	3.70	2.62	0.23	0.00	0.03	0.10	0.05	3.84	0.10	0.64	0.11	0.03	0.09	1.31	0.00	
Na ₂ O	7.93	7.97	7.14	5.52	6.18	6.02	6.90	6.44	7.92	5.63	5.96	6.40	6.30	6.40	7.61	6.93	
K ₂ O	2.58	2.80	4.64	9.24	8.28	8.40	7.56	8.03	2.62	9.22	8.04	7.99	7.87	7.93	4.88	7.62	
P ₂ O ₅	0.03	0.02	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.03	0.03	0.04	0.00	0.02	
Total	100.73	100.84	98.88	100.66	99.07	98.95	100.44	100.33	100.5	100.63	98.93	99.02	98.92	100.09	99.00	100.0	
以 8 个氧原子为基准																	
Si	2.84	2.86	2.91	3.03	3.04	3.04	3.05	3.04	2.87	3.03	3.00	3.01	3.03	3.03	2.96	3.04	
Al	1.13	1.12	1.07	0.94	0.93	0.93	0.92	0.93	1.10	0.95	0.97	0.96	0.95	0.94	1.03	0.92	
Ca	0.19	0.18	0.13	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.18	0.00	0.03	0.01	0.00	0.00	0.06	0.00	
Na	0.68	0.68	0.63	0.48	0.54	0.53	0.60	0.56	0.68	0.49	0.53	0.56	0.56	0.56	0.66	0.60	
K	0.15	0.16	0.27	0.53	0.48	0.49	0.43	0.46	0.15	0.53	0.47	0.46	0.46	0.45	0.28	0.44	
Ti	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
Fe	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	
Mg	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
Mn	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
P	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
An	18.62	17.25	12.42	1.07	0.00	0.12	0.47	0.22	18.05	0.48	3.07	0.52	0.15	0.44	6.27	0.00	
Or	14.36	15.53	26.25	51.85	46.83	47.81	41.67	44.96	14.67	51.62	45.56	44.84	45.05	44.69	27.83	41.97	
Ab	67.02	67.22	61.33	47.08	53.16	52.07	57.86	54.82	67.28	47.90	51.37	54.64	54.80	54.86	65.90	58.03	

样品中最后的字母 C 表示核部, R 表示边部。

续表 1-1
Continued Table 1-1

样品	HSP-26-1	HSP-26-2	HSP-26-3	HSP-26-4	HSP-26-5	HSP-26-6	HSP-26-7	HSP-26-8	HSP-26-9	HSP-26-10	HSP-26-11	HSP-26-12	HSP-26-13	HSP-26-14	HSP-26-15
SiO ₂	66.75	66.71	66.18	66.39	66.95	66.66	66.66	66.74	67.23	68.22	66.29	67.29	67.27	67.77	67.46
TiO ₂	0.02	0.00	0.00	0.07	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.01	0.12	0.03	0.03	0.00	0.03
Al ₂ O ₃	18.73	18.84	18.48	18.56	18.93	18.36	18.67	18.38	18.20	17.43	17.73	18.05	18.35	18.28	18.47
FeO	0.13	0.13	0.08	0.11	0.08	0.11	0.14	0.12	0.18	0.16	0.12	0.08	0.18	0.10	0.09
MgO	0.01	0.02	0.03	0.00	0.01	0.02	0.01	0.05	0.00	0.08	0.05	0.02	0.00	0.01	0.02
MnO	0.00	0.00	0.04	0.00	0.04	0.03	0.00	0.07	0.01	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02
CaO	1.07	0.85	0.57	0.55	0.98	0.36	0.52	0.32	0.05	0.18	0.05	0.06	0.10	0.07	0.06
Na ₂ O	6.66	6.80	5.97	6.13	7.04	6.29	6.31	6.29	6.12	6.30	6.18	6.19	6.65	6.90	6.96
K ₂ O	6.74	7.08	8.20	8.23	6.59	8.18	7.94	8.21	8.60	7.99	8.20	7.91	7.56	7.53	7.33
P ₂ O ₅	0.00	0.02	0.00	0.02	0.04	0.06	0.04	0.01	0.03	0.04	0.03	0.00	0.01	0.00	0.03
Total	100.20	100.54	99.66	100.09	100.80	100.08	100.34	100.26	100.55	100.64	98.90	99.62	100.16	100.66	100.55
以 8 个氧原子为基准															
Si	2.99	2.98	2.99	2.99	2.98	3.00	2.99	3.00	3.02	3.05	3.02	3.03	3.01	3.02	3.01
Al	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.97	0.99	0.97	0.96	0.92	0.95	0.96	0.97	0.96	0.97
Ca	0.05	0.04	0.03	0.03	0.05	0.02	0.03	0.02	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Na	0.58	0.59	0.52	0.54	0.61	0.55	0.55	0.55	0.53	0.55	0.55	0.54	0.58	0.60	0.60
K	0.38	0.40	0.47	0.47	0.37	0.47	0.45	0.47	0.49	0.46	0.48	0.45	0.43	0.43	0.42
Ti	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Fe	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00
Mg	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Mn	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
P	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
An	5.06	3.93	2.68	2.58	4.54	1.69	2.44	1.50	0.22	0.83	0.25	0.27	0.47	0.33	0.26
Or	37.96	39.04	46.21	45.70	36.38	45.32	44.18	45.51	47.94	45.13	46.49	45.58	42.58	41.67	40.82
Ab	56.99	57.02	51.11	51.72	59.08	52.99	53.38	52.99	51.84	54.04	53.26	54.14	56.94	58.00	58.92

续表 1-2
Continued Table 1-2

样品	HSP-28-1	HSP-28-2	HSP-28-3	HSP-28-4	HSP-28-5	HSP-28-6	HSP-28-7	HSP-28-8	HSP-28-9	HSP-28-10	HSP-28-11	HSP-28-12	HSP-28-13	HSP-28-14	HSP-28-15
SiO ₂	68.00	68.05	67.37	67.84	67.53	68.02	67.01	67.25	67.68	67.20	66.14	66.50	66.99	65.72	67.71
TiO ₂	0.00	0.00	0.07	0.00	0.03	0.00	0.00	0.05	0.00	0.00	0.00	0.03	0.07	0.03	0.03
Al ₂ O ₃	17.11	17.24	17.41	17.60	17.64	17.42	17.43	17.66	17.54	17.43	18.14	18.11	18.17	18.33	18.35
FeO	0.13	0.16	0.08	0.13	0.04	0.17	0.19	0.09	0.15	0.20	0.10	0.13	0.20	0.19	0.19
MgO	0.03	0.00	0.00	0.00	0.02	0.01	0.00	0.01	0.03	0.00	0.00	0.03	0.01	0.00	0.01
MnO	0.01	0.00	0.00	0.04	0.00	0.00	0.01	0.00	0.02	0.00	0.01	0.01	0.05	0.03	0.00
CaO	0.08	0.04	0.09	0.00	0.00	0.02	0.08	0.04	0.15	0.26	0.71	0.63	0.70	0.62	0.78
Na ₂ O	5.65	5.86	5.82	5.81	5.84	5.70	5.63	5.73	5.42	5.89	6.08	5.98	6.33	6.28	7.76
K ₂ O	9.28	9.05	8.95	9.01	9.16	9.35	9.15	9.03	9.24	9.05	8.17	8.41	7.71	7.71	5.76
P ₂ O ₅	0.03	0.02	0.01	0.00	0.03	0.00	0.03	0.00	0.00	0.02	0.05	0.00	0.00	0.02	0.00
Total	100.49	100.44	99.80	100.44	100.39	100.74	99.55	99.89	100.26	100.14	99.46	100.11	100.42	98.96	100.60
以 8 个氧原子为基准															
Si	3.06	3.05	3.04	3.04	3.04	3.05	3.04	3.04	3.04	3.03	3.00	3.00	3.01	2.99	3.01
Al	0.91	0.91	0.93	0.93	0.93	0.92	0.93	0.94	0.93	0.93	0.97	0.96	0.96	0.98	0.96
Ca	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.03	0.03	0.03	0.03	0.04
Na	0.49	0.51	0.51	0.51	0.51	0.50	0.50	0.50	0.47	0.52	0.53	0.52	0.55	0.55	0.67
K	0.53	0.52	0.52	0.52	0.53	0.53	0.53	0.52	0.53	0.52	0.47	0.48	0.44	0.45	0.33
Ti	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Fe	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01
Mg	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Mn	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
P	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
An	0.38	0.19	0.41	0.02	0.00	0.11	0.36	0.18	0.73	1.20	3.30	2.91	3.27	2.91	3.59
Or	51.71	50.31	50.09	50.50	50.79	51.86	51.47	50.83	52.46	49.67	45.39	46.68	43.03	43.38	31.64
Ab	47.90	49.51	49.50	49.48	49.21	48.04	48.17	48.99	46.81	49.14	51.31	50.41	53.70	53.71	64.77

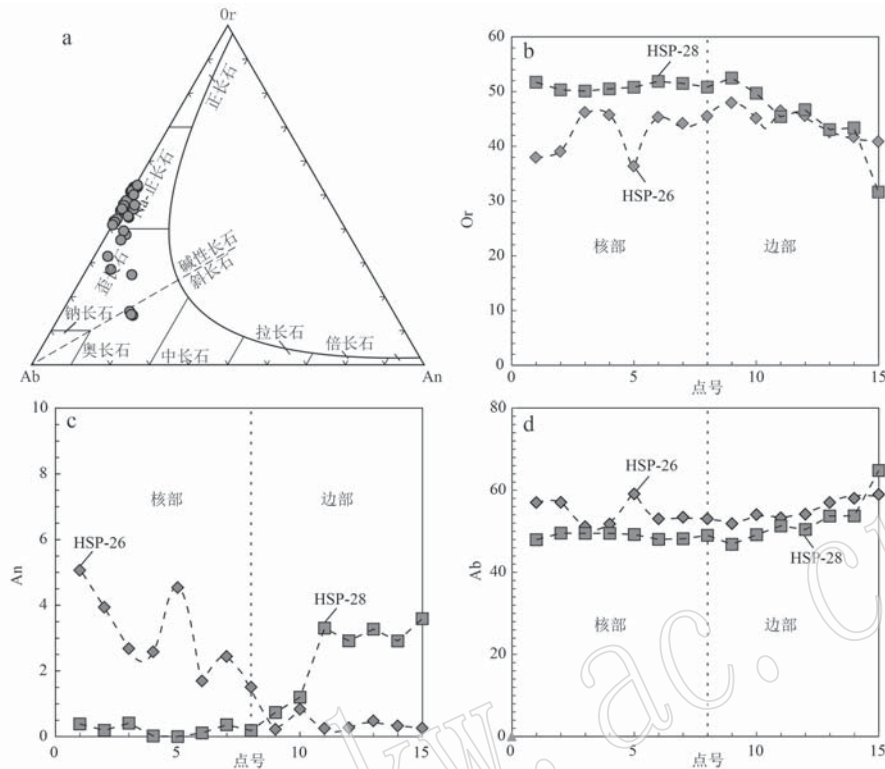


图 3 托云响岩中长石的成分 Or-Ab-An 分类图解(a)和 2 颗碱性长石的电子探针剖面 Or、An、Ab 组分变化图解(b~d)
Fig. 3 Or-Ab-An classification diagram of the feldspar (a) and EPMA profiles of two alkali feldspar grains showing the variation of Or, An and Ab components(b~d)

表 2 托云盆地响岩中角闪石、单斜辉石和铁橄榄石斑晶的电子探针分析结果
Table 2 The major elements of amphibole, clinopyroxene and fayalite in the Tuoyun phonolite analyzed by EPMA

样品	角闪石			样品	单斜辉石	铁橄榄石		
	HSP-23	HSP-26	HSP-26			HSP-22	HSP-22	HSP-20
SiO ₂	39.55	40.42	40.15	SiO ₂	53.21	SiO ₂	34.09	34.54
TiO ₂	4.09	4.67	4.31	TiO ₂	0.37	TiO ₂	0.04	0.05
Al ₂ O ₃	10.20	10.10	10.52	Al ₂ O ₃	0.83	Al ₂ O ₃	—	0.01
FeO	23.89	22.21	22.60	FeO	17.23	FeO	44.92	45.12
MnO	0.52	0.49	0.45	MnO	0.88	MnO	1.13	1.34
MgO	5.53	5.99	6.32	MgO	7.61	MgO	19.57	18.59
CaO	10.4	10.61	10.52	CaO	17.51	CaO	0.33	0.35
K ₂ O	1.73	1.79	1.72	Cr ₂ O ₃	0.07	Cr ₂ O ₃	—	—
Na ₂ O	2.64	2.69	2.34	K ₂ O	0.01	K ₂ O	—	0.01
H ₂ O ⁺	—	—	—	Na ₂ O	2.80	Na ₂ O	0.02	0.05
F	—	—	—	NiO	0.04	NiO	—	0.02
Si _T	6.20	6.25	6.21	Si	2.02	Si	1.00	1.01
Al _T	1.8	1.75	1.79	Al ^{IV}	-0.02	Ti	0	0
Al _C	0.08	0.09	0.13	Total	2.00	Fe	1.10	1.11
Fe _C ³⁺	0.05	0.13	0.15	Al ^{VI}	0.06	Mn	0.03	0.03
Ti _C	0.48	0.54	0.5	Ti	0.01	Mg	0.86	0.81
Mg _C	1.29	1.38	1.46	Fe ³⁺	0.10	Ca	0.01	0.01
Fe _C ²⁺	3.08	2.74	2.77	Mg	0.43	Na	0	0
Mn _C	0.01	0.06	0	Fe ²⁺	0.45	K	0	0
Fe _B ²⁺	0	0	0.01	Mn	0.03	Al	0	0
Mn _B	0.06	0	0.06	Ca	0.71	Ni	0	0
Ca _B	1.75	1.76	1.74	Na	0.21	Fo	43.1	41.63
Na _B	0.2	0.24	0.19	En	22.37	Fa	55.49	56.67
Ca _A	0	0	0	Fs	29.91			
Na _A	0.61	0.56	0.51	Wo	37.02			
K _A	0.35	0.35	0.34	Ac	10.71			

—表示未检出。

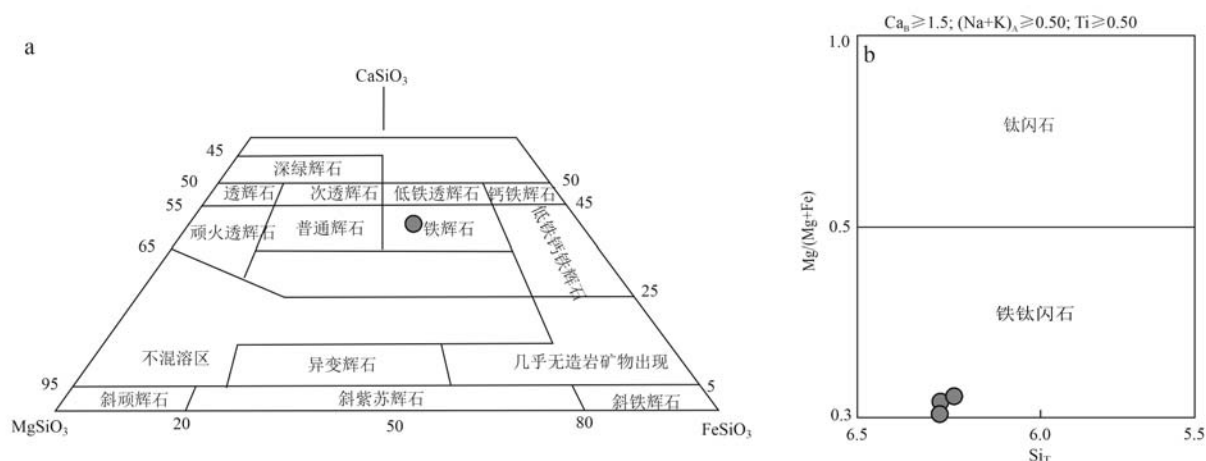


图 4 托云响岩中辉石的成分 Wo-En-Fs 分类图解(a) 和角闪石分类图解(b)

Fig. 4 Wo-En-Fs classification diagram of the pyroxene (a) and classification diagram of the amphibole (b) in Tuoyun phonolite

为 11.5~14.5, 指示一定程度的轻重稀土元素分异, 具有明显的 Eu 负异常, Eu^* 值变化范围为 0.18~0.19。在原始地幔标准化的微量元素蛛网图上, 样品具有 Ba、Sr、P、Ti 负异常和 Nb、Ta、Zr、Hf 正异常的特征(图 7b)。

4.3 Sr-Nd 同位素

响岩的 Sr-Nd 同位素组成列于表 4 中, 其中 Sr-Nd 同位素按 60 Ma 进行校正。分析结果显示, 响岩的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 变化范围为 0.708 53~0.712 19, $\epsilon\text{Nd}(t)$ 值变化范围为 4.34~4.68。富集的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 和亏损的 Nd 同位素呈现出解耦的现象, 这可能是由于样品具有较高的 $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 值(7.284 41~8.299 41) 抑或时间积累不够造成的。研究表明, $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 值如果接近或超过 10, $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 就会变得不可靠(Wu *et al.*, 2000; Moghazi *et al.*, 2015), 故后文主要基于岩石的 Nd 同位素组成进行讨论。

5 讨论

镜下观察表明托云盆地响岩较为新鲜, LOI 值也相对较低(2.1%~2.6%), 说明后期次生蚀变对其地球化学组成的影响较弱。托云响岩具有亏损的 Nd 同位素组成 [$\epsilon\text{Nd}(t) = 4.34 \sim 4.68$], 显示出幔源的地球化学特征。根据前人的研究成果, 响岩可通过以下 3 种方式形成: ① 地幔部分熔融直接形成(Grant *et al.*, 2013; Laporte *et al.*, 2014); ② 岩浆液态不混溶作用形成(Kogarko, 1997; Harmer and

Gittins, 1998); ③ 碱性的基性岩石如碧玄岩、碱性玄武岩或霞石岩经高程度分离结晶作用形成(Kaszuba and Wendlandt, 2000; Cousens *et al.*, 2003; Legendre *et al.*, 2005), 该过程可能伴随着不同程度的地壳混染作用(Freundt and Schmincke, 1995; Wolff *et al.*, 2000; Ackerman *et al.*, 2015)。实验岩石学的研究表明, 在压力 1.3 GPa 和温度 1 150~1 200℃ 条件下, 富集地幔橄榄岩的低程度部分熔融可以产生一系列的碱性岩浆, 如粗面安山岩、粗面质响岩和响岩(Laporte *et al.*, 2014)。然而, 地幔岩石熔出的响岩质熔体以高的 $Mg^{\#}$ 值为特征(>60), 与托云响岩的低 $Mg^{\#}$ 值(<20) 特征明显不同, 表明托云响岩不是通过地幔岩石低程度熔融直接形成。鉴于自然界中碱性-过碱性岩石常常与火成碳酸岩共生, 如东非裂谷 Oldoinyo Lengai 火山黄长岩-霞石岩-响岩-钠质碳酸岩岩石组合, 液态不混溶作用被认为是响岩形成的重要机制(Kogarko, 1997; Harmer and Gittins, 1998)。然而, 托云响岩并未发现共生的碳酸岩, 使得液态不混溶机制缺少关键的地质证据。另外, 在微量元素蛛网图和稀土元素配分曲线上, 托云响岩与不混溶产生的过碱性岩石差异较大, 比如前者呈现出 Ba、Sr、Eu 等元素的负异常和 Ta 的正异常, 并相对富集 HREE, 而后者具有显著的 Ba、Sr 正异常和 Ta 的负异常, 缺失 Eu 的负异常(图 7), 并具有更高的 $(La/Yb)_N$ 值(34.6~39.3; Klaudius and Keller, 2006)。而 Eu 的负异常表明岩浆发生过长石的分离结晶, 暗示着分离结晶作用对响岩的成因

表 3 托云响岩全岩主量($w_B/\%$)和微量($w_B/10^{-6}$)元素成分Table 3 Major ($w_B/\%$) and trace ($w_B/10^{-6}$) element compositions of Tuoyun phonolite

样品	HSP-16	HSP-17	HSP-19	HSP-20	HSP-22	HSP-23	HSP-26	HSP-28	HSP-30
SiO ₂	56.9	57.6	58.0	58.7	57.5	58.3	57.4	56.9	60.6
TiO ₂	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
Al ₂ O ₃	19.8	19.5	19.1	18.9	19.3	19.0	19.4	19.5	17.8
MnO	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
MgO	0.1	0.3	0.3	0.2	0.6	0.2	0.1	0.3	0.2
CaO	1.0	1.0	1.0	1.0	1.2	1.0	0.9	1.1	0.9
Na ₂ O	8.2	8.4	8.4	8.3	8.5	8.5	8.6	8.4	7.9
K ₂ O	6.2	5.8	5.6	5.6	5.6	5.5	5.9	6.3	5.2
P ₂ O ₅	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
TFeO	4.3	4.2	4.2	4.1	4.2	4.1	4.4	4.4	4.0
FeO	1.9	1.7	1.4	1.3	1.7	1.7	1.2	1.5	1.8
LOI	2.6	2.3	2.6	2.3	2.3	2.5	2.4	2.1	2.3
Total	99.4	99.4	99.5	99.4	99.5	99.4	99.4	99.3	99.2
Li	54.4	66.7	34.8	35.4	30.1	42.4	43.5	51.6	57.9
P	154.9	164.9	153.5	161.7	147.1	133.8	165.2	219.6	172.5
K	58 220.0	59 140.0	61 340.0	58 580.0	53 720.0	53 640.0	55 460.0	59 160.0	55 400.0
Sc	2.0	2.0	2.1	2.1	2.0	2.0	1.8	1.9	2.0
Ti	616.6	632.0	681.2	669.8	604.6	612.2	670.8	716.2	693.2
V	1.3	1.2	0.8	1.8	1.2	1.9	2.3	2.5	1.2
Cr	2.0	1.4	2.6	1.7	0.9	2.0	3.0	2.2	5.5
Mn	1 351.6	1 338.0	1 392.2	1 310.6	1 212.2	1 303.6	1 307.6	1 357.8	1 329.8
Co	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.6	0.6
Ni	0.9	0.6	0.6	1.0	3.3	0.7	1.0	0.9	1.9
Cu	7.4	7.8	8.2	8.0	7.7	7.3	7.3	8.0	7.6
Zn	143.5	151.1	149.5	143.2	137.2	140.1	136.0	133.0	133.4
Ga	46.8	47.0	49.9	47.8	45.3	44.4	43.7	44.1	45.0
Rb	145.5	147.3	159.0	152.9	139.5	139.6	142.4	136.0	142.9
Sr	77.5	58.6	60.3	55.4	48.7	67.9	33.4	37.3	63.2
Y	60.5	59.8	65.8	61.0	57.7	59.2	54.2	48.4	57.9
Zr	1 283.2	1 277.1	1 401.0	1 289.3	1 253.8	1 229.6	1 128.6	1 186.2	1 170.6
Nb	205.2	203.6	221.2	205.4	201.8	194.9	192.0	197.2	196.4
Cs	4.0	4.2	4.3	4.2	3.9	4.1	3.2	3.7	4.1
Ba	15.5	19.7	19.5	19.6	17.8	16.1	22.5	19.1	21.7
La	114.0	116.6	124.6	116.6	111.2	108.8	107.9	107.4	110.6
Ce	194.6	195.3	211.8	195.8	189.6	187.0	183.2	186.9	188.1
Pr	17.4	17.5	18.6	17.8	16.9	16.9	16.6	16.7	17.0
Nd	57.0	57.2	61.6	59.3	55.5	55.5	54.6	55.2	56.2
Sm	10.0	10.0	10.8	10.2	9.7	9.7	9.5	9.6	9.8
Eu	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
Gd	9.7	9.6	10.2	9.9	9.3	9.4	9.0	8.8	9.4
Tb	1.5	1.6	1.6	1.6	1.5	1.5	1.4	1.3	1.5
Dy	10.3	10.6	11.1	10.6	10.0	10.0	9.6	8.8	9.8
Ho	2.1	2.2	2.3	2.2	2.0	2.1	1.9	1.7	2.0
Er	6.7	6.9	7.2	6.9	6.4	6.6	6.0	5.3	6.3
Tm	1.0	1.1	1.1	1.1	1.0	1.0	0.9	0.8	1.0
Yb	6.9	7.0	7.4	7.3	6.6	6.6	5.9	5.3	6.3
Lu	1.0	1.0	1.1	1.1	1.0	1.0	0.9	0.8	0.9
Hf	25.0	25.7	26.9	25.6	24.0	24.0	22.6	23.2	23.0
Ta	11.8	12.1	12.7	12.0	11.4	11.3	10.9	10.9	11.0
Pb	20.4	20.9	21.5	20.5	19.1	19.4	18.3	16.9	18.3
Th	31.4	32.7	33.4	32.1	29.7	29.8	25.9	20.4	28.3
U	14.0	5.6	7.2	7.0	7.2	10.7	3.6	1.0	4.5

表 4 托云盆地响岩 Sr-Nd 同位素组成
Table 4 Sr-Nd isotopic compositions of Tuoyun phonolite

样品	$w_B/10^{-6}$		$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$	$w_B/10^{-6}$		$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	$(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_t$	$\varepsilon\text{Nd}(t)$
	Rb	Sr				Sm	Nd				
HSP-17	147.3	58.6	7.284 41	0.715 88	0.709 67	10.02	33.78	0.179 27	0.512 85	0.512 78	4.34
HSP-20	152.9	55.4	7.991 93	0.715 34	0.708 53	10.24	59.26	0.104 51	0.512 84	0.512 80	4.68
HSP-22	139.5	48.7	8.299 41	0.719 26	0.712 19	9.69	55.46	0.105 66	0.512 84	0.512 80	4.67
HSP-23	139.6	67.9	5.953 83	0.713 88	0.708 81	9.73	55.54	0.105 92	0.512 83	0.512 79	4.53

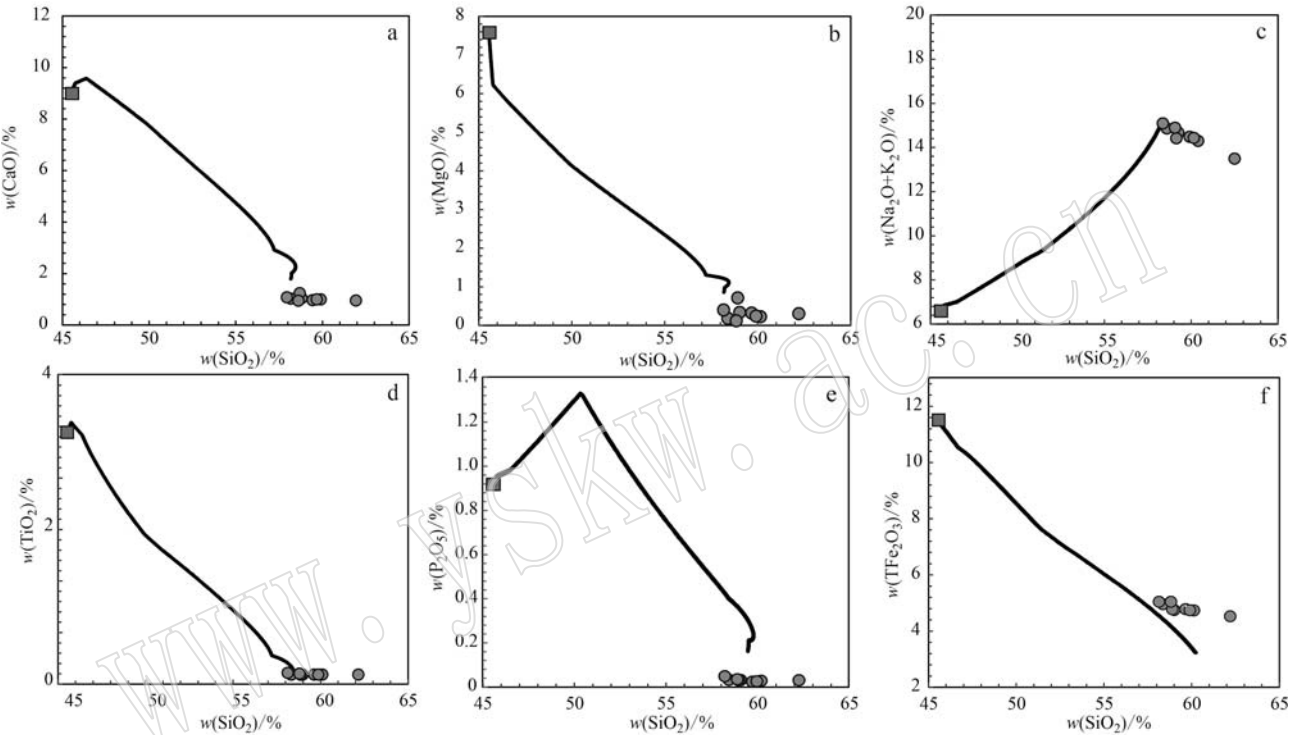


图 8 托云响岩 MELTS 热力学模拟结果示意图
Fig. 8 MELTS thermodynamics modeling results of the Tuoyun phonolite

结果与托云响岩的主要矿物相和熔体成分基本一致，说明响岩可能是由碧玄岩经分离结晶作用形成的。

值得指出的是,虽然响岩具有幔源的地球化学组成,但是相较于共生的碧玄岩和碱性玄武岩的 Nd 同位素组成[$\varepsilon\text{Nd}(t)=4.3\sim6.0$; 季建清等, 2006)],响岩的 $\varepsilon\text{Nd}(t)$ 值(4.34~4.68)明显偏低,暗示着岩浆在演化过程中可能发生了一定程度的地壳混染作用。为揭示地壳混染的潜在影响,本次研究选取碧玄岩为初始岩浆,塔里木克拉通基底作为混染物,使用 Spera 和 Bohrsen (2001) 提出的 EC-AFC 模型进行了模拟。由于碧玄岩的 Nd 含量和 Nd 同位素(季建清等, 2006)在一定范围内变化,本次研究也因此使用了不同的 Nd 含量和 Nd 同位素组成分别进行模拟(图 9)。模拟假定岩浆初始温度为 1 300℃,

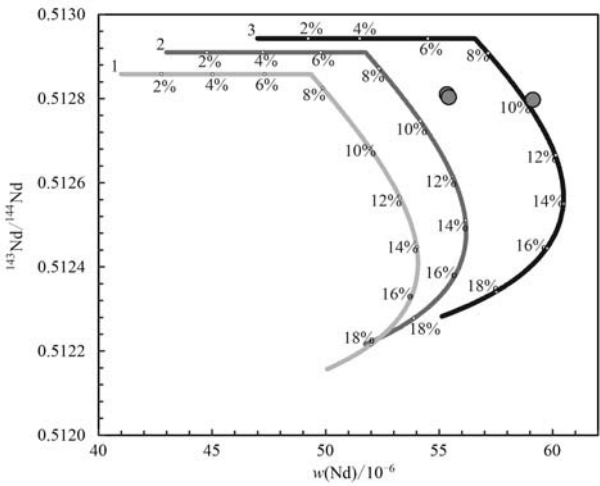


图 9 托云响岩 EC-AFC 过程模拟结果示意图
Fig. 9 EC-AFC modeling result of the Tuoyun phonolite

混染物初始温度为 600℃,液相线温度为 1 150℃,固相线温度为 800℃,平衡温度为 1 001℃,混染物初始 Nd 含量为 20×10^{-6} ,混染物同位素比值 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 为 0.510 6,结晶热容量为 $3.96 \times 10^5 \text{ J/kg}$,熔化焓为 $2.7 \times 10^5 \text{ J/kg}$,岩浆等压比热为 $1 484 \text{ J} \cdot \text{K/kg}$,同化物等压比热为 $1 370 \text{ J} \cdot \text{K/kg}$ 。图中数字 1、2、3 代表作为母岩浆的不同成分的碧玄岩的模拟曲线,其中碧玄岩 1 的 Nd 初始含量为 43×10^{-6} , $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 值为 0.512 91;碧玄岩 2 的 Nd 初始含量为 47×10^{-6} , $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 值为 0.512 94;碧玄岩 3 的 Nd 初始含量为 41×10^{-6} , $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 值为 0.512 86。岩浆分配系数为 0.3,混染物分配系数为 0.5。模拟结果显示响岩的 Nd 同位素组成可以通过碧玄岩岩浆经 10% 的地壳物质混合而成(图 9),指示响岩的形成经历了一定程度的地壳混染作用。

6 结论

本次研究以我国西南天山托云盆地出露的响岩为研究对象,对其开展了详细的矿物学、岩石学和元素、同位素地球化学研究。研究表明,托云响岩以发育碱性长石、单斜辉石、铁橄榄石和角闪石等矿物斑晶为特征。地球化学组成上,托云响岩属于准铝质过碱性岩石。在微量元素蛛网图和稀土元素配分曲线上显示出 Nb、Ta、Zr、Hf 的正异常和 Eu 的负异常,与岩浆液态不混溶作用产生的响岩质熔体明显不同。另外,托云响岩具有显著亏损的 Nd 同位素组成,说明其与共生的碧玄岩具有紧密的成因关联。经 MELTS 和 EC-AFC 热力学模拟,认为响岩可由碧玄岩经斜长石、单斜辉石、尖晶石、铁橄榄石和角闪石的分离结晶作用并受到一定程度的地壳混染形成。总体上,托云盆地火山岩属过碱性岩石演化系列,由碧玄岩经响岩质粗面岩向响岩演化。响岩代表了过碱性岩石系列岩浆演化的终端产物。

References

- Ackerman L, Ulrych J, Randa Z, *et al.* 2015. Geochemical characteristics and petrogenesis of phonolites and trachytic rocks from the Ceske Stedohof Volcanic Complex, the Ohe Rift, Bohemian Massif[J]. *Lithos*, 224~225: 256~271.
- Brenna M, Price R, Cronin S J, *et al.* 2014. Final magma storage depth modulation of explosivity and trachyte-phonolite genesis at an intra-plate volcano: A case study from Ulleung Island, South Korea[J]. *Journal of Petrology*, 55(4): 709~749.
- Cao Jun, Wang Xuan, Tao Jihua, *et al.* 2019. Petrogenesis and deep dynamics processes of the Late Cretaceous-Paleogene small-scale flood basalts in the Kyrgyz Tianshanorogenic belt[J]. *Acta Geologica Sinica*, 93(12): 3 061~3 081(in Chinese with English abstract).
- Cheng Z G, Zhang Z C, Wang Z C, *et al.* 2022. Petrogenesis of continental intraplate alkaline basalts in the Tuoyun Basin, Western Central Asian Orogenic Belt: Implications for deep carbon recycling[J]. *Journal of Petrology*, 63(9): egac088.
- Cousens B L, Clague D A and Sharp W D. 2003. Chronology, chemistry and origin of trachytes from Hualalai volcano, Hawaii[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 4(9): 1 078.
- Freundt A and Schmincke H U. 1995. Petrogenesis of rhyolite-trachyte-basalt composite ignimbrite P1, Gran Canaria, Canary Islands[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmosphere*, 100: 455~474.
- Gilder S A, Chen Y, Cogné J P, *et al.* 2003. Paleomagnetism of Upper Jurassic to Lower Cretaceous volcanic and sedimentary rocks from the western Tarim Basin and implications for inclination shallowing and absolute dating of the M-0 (ISEA?) chron[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 206(3~4): 587~600.
- Grant T B, Milke R, Pandey S, *et al.* 2013. The Heldburg phonolite, central Germany: Reactions between phonolite and xenocrysts from the upper mantle and lower crust[J]. *Lithos*, 182: 86~101.
- Han B F, Liu J B and Zhang L. 2008. A noncognate relationship between megacrysts and host basalts from the Tuoyun Basin, Chinese Tianshan[J]. *Journal of Geology*, 116: 499~509.
- Han Baofu, Wang Xuechao, He Guoqi, *et al.* 1998. Mantle and lower crust xenoliths were found in the early Cretaceous volcanic rocks of the Southwest Tianshan Mountains[J]. *Chinese Science Bulletin*, 43(3): 2 544~2 547(in Chinese with English abstract).
- Harmer R E and Gittins J. 1998. The case for primary, mantle-derived carbonatite magma[J]. *Journal of Petrology*, 39: 1 895~1 904.
- Huang B, Piper J D A, Wang Y, *et al.* 2005. Paleomagnetic and geochronological constraints on the post-collisional northward convergence of the southwest Tian Shan, NW China[J]. *Tectonophysics*, 409: 107~124.
- Ji Jianqing, Han Baofu, Zhu Meifei, *et al.* 2006. Cretaceous-Paleogene alkaline magmatism in Tuoyun basin, southwest Tianshan Mountains: Geochronology, petrology and geochemistry[J]. *Acta Petrologica*

- Simica, 22(5): 1 324~1 340(in Chinese with English abstract).
- Johansen T S, Hauff F, Hoernle K, *et al.* 2005. Basanite to phonolite differentiation within 1550-1750 yr: U-Th-Ra isotopic evidence from the A. D. 1585 eruption on La Palma, Canary Islands[J]. *Geology*, 33: 897~900.
- Kaszuba J P and Wendlandt R F. 2000. Effect of carbon dioxide on dehydration melting reactions and melt compositions in the lower crust and the origin of alkaline rocks[J]. *Journal of Petrology*, 41: 363~386.
- Kim K H, Tanaka T, Nagao K, *et al.* 1999. Nd and Sr isotopes and K-Ar ages of the Ulreungdo alkali volcanic rocks in the East Sea, South Korea[J]. *Geochemical Journal*, 33: 317~341.
- Klaudius J and Keller J. 2006. Peralkaline silicate lavas at Oldoinyo Lengai, Tanzania[J]. *Lithos*, 91: 173~190.
- Kogarko L N. 1997. Role of CO₂ on differentiation of ultramafic alkaline series: Liquid immiscibility in carbonate-bearing phonolitic dykes (Polar Siberia) [J]. *Mineralogical Magazine*, 61 (4): 549~556.
- Laporte D, Lambart S, Schiano P, *et al.* 2014. Experimental derivation of nephelinesyenite and phonolite liquids by partial melting of upper mantle peridotites[J]. *Earth Planetary Science Letter*, 404: 319~331.
- Legendre C, Maury R C, Caroff M, *et al.* 2005. Origin of exceptionally abundant phonolites on Ua Pou Island (Marquesas, French Polynesia): Partial melting of basanites followed by crustal contamination [J]. *Journal of Petrology*, 46: 1 925~1 962.
- Lhuillier F, Gilder S A, Wack M, *et al.* 2016. More stable yet bimodal geodynamo during the Cretaceous superchron? [J]. *Geophysical Research Letters*, 43: 6 170~6 177.
- Li Dedong, Luo Zhaohua, Huang Jinxiang, *et al.* 2009. The chronological and geological implications of the Cenozoic basic magmatic activities in Piqiang Basin, Xinjiang, China[J]. *Earth Science Frontiers*, 16(3): 270~281(in Chinese with English abstract).
- Maniar P D and Piccoli P M. 1989. Tectonic discrimination of granitoids [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 101: 635~643.
- McDonough W F and Sun S S. 1995. The composition of the Earth[J]. *Chemical Geology*, 120: 2 523~2 553.
- Meng J, Lhuillier F, Wang C, *et al.* 2020. Paleomagnetism of Paleocene-Maastrichtian (60~70 Ma) lava flows from Tian Shan (Central Asia): Directional analysis and paleointensities[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 125: e2019JB018631.
- Moghazi A K M, Iaccheri L M, Bakhsh R A, *et al.* 2015. Sources of rare metal-bearing A-type granites from Jabel Sayed complex, Northern Arabian Shield, Saudi Arabia[J]. *Journal of Asian Earth Science*, 107: 244~258.
- Peccerillo A and Taylor S R. 1976. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, northern Turkey[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 58: 63~81.
- Price R C, Johnson R W, Gray C M, *et al.* 1985. Geochemistry of phonolites and trachytes from the summit region of Mt. Kenya[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 89: 394~409.
- Signorelli S, Vaggelli G and Romano C. 1999. Pre-eruptive volatile (H₂O, F, Cl and S) contents of phonolitic magmas feeding the 3 550-year old Avellino eruption from Vesuvius, southern Italy[J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 93: 237~256.
- Simonov V A, Mikolaichuk A V, Rasskazov S V, *et al.* 2008. Cretaceous-Paleocene within-plate magmatism in Central Asia: Data from the Tien Shan basalts[J]. *Russian Geology and Geophysics*, 49: 520~533.
- Simonov V A, Mikolaichuk A V, Safonova I Y, *et al.* 2015. Late Paleozoic-Cenozoic intra-plate continental basaltic magmatism of the Tianshan-Junggar region in the SW Central Asian Orogenic Belt [J]. *Gondwana Research*, 27(4): 1 646~1 666.
- Sobel E R and Arnaud N. 2000. Cretaceous-Paleogene basaltic rocks of the Tuyon basin, NW China and Kyrgyz Tian Shan: The trace of a small plume[J]. *Lithos*, 50: 191~215.
- Spera F J and Bohron W A. 2001. Energy-constrained open-system magmatic processes I: General model and energy-constrained assimilation and fractional crystallization (EC-AFC) formulation[J]. *Journal of Petrology*, 42: 999~1 018.
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematic of oceanic basalts: Implications for mantle composition and process [C]// Saunders A D and Norry M J. *Magmatism in ocean basins*. London: Geological Society of London, Special Publication, 42: 313~345.
- Wang Yanbin, Wang Yong, Liu Xun, *et al.* 2000. Geochemical characteristics and genesis of Late Cretaceous to Paleocene basalts in Tuyon Basin, South Tianshan Mountain [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 19(2): 131~173(in Chinese with English abstract).
- Wei H, Wang Y, Jin J, *et al.* 2007. Timescale and evolution of the intra-continental Tianchi volcanic shield and ignimbrite-forming eruption, Changbaishan, Northeast China[J]. *Lithos*, 96: 315~324.
- Wiesmaier S, Troll V R, Carracedo J C, *et al.* 2012. Bimodality of lavas in the Teide-Pico Viejo succession in Tenerife: the role of crustal melting in the origin of recent phonolites[J]. *Journal of Petrology*,

53; 2 465~2 495.

- Wolff J A, Grandy J S and Larson P B. 2000. Interaction of mantle-derived magma with island crust? Trace element and oxygen isotope data from the Diego Hernandez Formation, Las Caadas[J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 103: 343~366.
- Wu F Y, Jahn B M, Wilde S, *et al.* 2000. Phanerozoic crustal growth: U-Pb and Sr-Nd isotopic evidence from the granites in northeastern China[J]. *Tectonophysics*, 328: 89~113.
- Xu Xueyi, Xia Linqi, Xia Zuchun, *et al.* 2003. Geochemistry and genesis of Cretaceous-Paleogene basalts from the Tuoyun Basin, Southwest Tian-shan Mountains[J]. *Geochimica*, 32(6): 551~560 (in Chinese with English abstract).
- Zheng J P, Griffin W L, O'Reilly S Y, *et al.* 2006a. Granulite xenoliths and their zircons, Tuoyun, NW China: Insights into southwestern Tianshan lower crust[J]. *Precambrian Research*, 145: 159~181.
- Zheng J P, Griffin W L, O'Reilly S Y, *et al.* 2006b. Lithospheric mantle beneath the Tianshan area, NW China[J]. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, 151: 457.

附中文参考文献

- 曹俊, 王旋, 陶继华, 等. 2019. 吉尔吉斯天山造山带晚白垩世-古新世小规模大陆溢流玄武岩的成因及深部地球动力学过程[J]. *地质学报*, 93(12): 3 061~3 081.
- 韩宝福, 王学潮, 何国琦, 等. 1998. 西南天山早白垩世火山岩中发现地幔和下地壳捕虏体[J]. *科学通报*, 43(3): 2 544~2 547.
- 李建清, 韩宝福, 朱美妃, 等. 2006. 西天山托云盆地及周边中生代岩浆活动的岩石学、地球化学与年代学研究[J]. *岩石学报*, 22(5): 1 324~1 340.
- 李德东, 罗照华, 黄金香, 等. 2009. 皮羌盆地新生代基性岩浆活动的年代学及其他地质意义[J]. *地学前缘*, 16(3): 270~281.
- 王彦斌, 王永, 刘训, 等. 2000. 南天山托云盆地晚白垩世-早第三纪玄武岩的地球化学特征及成因初探[J]. *岩石矿物学杂志*, 19(2): 131~173.
- 徐学义, 夏林圻, 夏祖春, 等. 2003. 西南天山托云地区白垩纪-早第三纪玄武岩地球化学及其成因机制[J]. *地球化学*, 32(6): 551~560.