

doi:10.3969/j.issn.2097-0013.2022.01.012

厄立特里亚中部 Adi Keyh A 型流纹岩成因及地质意义

曾国平, 王建雄, 向文帅, 童喜润, 邵鑫, 胡鹏, 吴发富, 姜军胜, 向鹏

ZENG Guo-Ping, WANG Jian-Xiong*, XIANG Wen-Shuai, TONG Xi-Run, SHAO Xin, Hu Peng,
WU Fa-Fu, JIANG Jun-Sheng, XIANG Peng

中国地质调查局武汉地质调查中心(中南地质科技创新中心), 武汉 43205

Wuhan Center, China Geological Survey (Central South China Innovation Center for Geosciences), Wuhan 43205, Hubei, China

摘要:厄立特里亚位于东非裂谷系统(EARS)北部,区内新生代火山活动明显,但对其研究十分有限。Adi Keyh 流纹岩产于厄立特里亚中部,锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年结果显示其形成时代为 26.1 ± 0.2 Ma,属于渐新世。全岩地球化学分析结果显示,该流纹岩具有高硅($\text{SiO}_2=72.97\% \sim 73.53\%$)、富碱($\text{ALK}=8.94\% \sim 9.12\%$)、富钾($\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}=1.15 \sim 1.18$)的特征,为高钾钙碱性岩石系列;微量元素富集 Th、La、Ce、Nd 和 Zr 而强烈亏损 Ba、Sr、P 和 Ti 等元素,并且 $\text{Zr}+\text{Nb}+\text{Ce}+\text{Y}$ 含量和 $10000 \times \text{Ga}/\text{Al}$ 比值较高;轻稀土元素相对富集, Eu 负异常显著。Hf 和 Sr 同位素组成为: $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)=+12.0 \sim +20.4$; $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i=0.70424 \sim 0.70477$ 。岩石地球化学及 Hf-Sr 同位素组成显示 Adi Keyh 流纹岩为 A_1 型板内流纹岩,可能为新生镁铁质下地壳部分熔融的产物,构造背景为渐新世 EARS 裂谷期阿法(Afar)地幔柱活动引发的岩石圈伸展。

关键词:地球化学; 锆石 U-Pb 年龄; Hf-Sr 同位素; 流纹岩; 厄立特里亚

中图分类号: P581

文献标识码: A

文章编号: 2097-0013(2022)01-0157-17

Zeng G P, Wang J X, Xiang W S, Tong X R, Shao X, Hu P, Wu F F, Jiang J S and Xiang P. 2022. Petrogenesis and Geological Significance of the Adi Keyh A-type Rhyolite in Central Eritrea. *South China Geology*, 38(1): 157-173.

Abstract: Eritrea, located in the northern of the Eastern African Rift System (EARS), is featured with rich Cenozoic volcanic activities that are neglected by geologists. The Adi Keyh rhyolite, developed in central Eritrea, is confirmed to form at 26.07 ± 0.18 Ma during Oligocene by Zircon LA-ICP-MS U-Pb isotope dating. After geochemical analysis, the rhyolite samples are regarded as high-K calc-alkaline series characterized by high SiO_2 (72.97% - 73.53%), high ALK (8.94% - 9.12%), and rich potassium ($\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}=1.15 - 1.18$). They are enriched in Th, La, Ce, Nd and Zr, but depleted in Ba, Sr, P and Ti, with high $\text{Zr}+\text{Nb}+\text{Ce}+\text{Y}$ and $10000 \times \text{Ga}/\text{Al}$ values. They are also rich in LREE with strong negative Eu anomaly. The Hf-Sr isotopic content of rhyolite are high positive $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ (+12.0 - +20.4) and low $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ (0.70424~0.70477). Geochemical features and Hf-Sr isotopic composition indicate that the Adi Keyh rhyolite is categorized as A_1 -type intraplate rhyolite, which may be the product of partial melting of the juvenile mafic lower crust with the tectonic setting of lithosphere extension triggered by the Afar mantle plume during the EARS Rift in Oligocene.

Key words: geochemistry; zircon U-Pb age; Hf-Sr isotope; rhyolite; Eritrea

收稿日期: 2021-12-23; 修回日期: 2022-1-22

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目 (Nos. DD20190443, DD20221802)

第一作者: 曾国平 (1990—), 男, 博士, 矿物学、岩石学、矿床学专业, E-mail: 1204929467@qq.com

通讯作者: 王建雄 (1966—), 男, 教授级高级工程师, 地质学专业, E-mail: 245425463@qq.com

自南而北贯穿在东非高原上的东非裂谷系统(EARS)经历了始新世(~45 Ma)以来长期的地幔柱活动(姚华舟等, 2018),形成了规模与峨眉山(Xu Y G et al., 2008; 夏林圻等, 2012)、西伯利亚(夏林圻等, 2012; Reichow et al., 2005)和德干高原(Peng Z X and Mahoney, 1995; Sheth et al., 2001)相当的埃塞俄比亚大火成岩省(LIP)(Ayalew and Gibson, 2009),包含了地球上最年轻的、出露最好的大洋溢流玄武岩(CFB)-大洋岛弧玄武岩(OIB)-洋中脊玄武岩(MORB)-流纹岩火山岩序列。EARS形成于地幔柱有关的大陆裂解过程(Marty et al., 1996),是一个由地幔柱大陆板内裂谷演变为初始大洋(红海和亚丁湾)的典型范例(姚华舟等, 2018),其构造环境及成因具有全球对比意义。

EARS经历了前-裂谷期(45~32 Ma)、裂谷期(26~12 Ma)和后-裂谷期(5~0 Ma)三个演化阶段(Stewart and Rogers, 1996; 姚华舟等, 2018)。已有研究主要侧重于前-裂谷期基性岩浆活动(Stewart and Rogers, 1996; Pik et al., 1998; George and Rogers, 2002; Kieffer et al., 2004; Meshesha and Shinjo, 2007),以及埃塞俄比亚大裂谷(MER)(Furman et al., 2006a; Caricchi et al., 2006; Rooney et al., 2007)和阿法(Afar)洼地(Barrat et al., 2003)的后-裂谷期火山作用,而对于裂谷期岩浆岩的地球化学研究有限(Kieffer et al., 2004; Furman et al., 2006b)。并且,前人研究也主要集中于埃塞俄比亚大裂谷、阿法洼地及其南部肯尼亚裂谷(KR)(姚华舟等, 2018),对于EARS北部厄立特里亚境内的新生代火山岩研究十分有限(Teklay et al., 2005; Abbate, 2014)。目前的观点普遍认为,大多数火成岩省的岩浆活动主要源自岩石圈地幔和软流圈地幔的部分熔融(Baker et al., 1996; Hawkesworth et al., 1999),双峰式火山岩套中的流纹岩可能有地壳物质贡献的记录,如Paraná-Etendeka(Kirstein et al., 2000)、峨眉山(Xu Y G et al., 2008)和Chon Aike(Riley et al., 2001)。前人针对EARS中新世代基性岩开展较多研究,而对其中的流纹岩研究较为薄弱。

2011年,中国地质调查局武汉地质调查中心(以下简称武汉中心)在对厄立特里亚中南部地区开展地质地球化学调查时,于Adi Keyh地区识别

出一套古近纪-新近纪火山岩。2019年,武汉中心针对区内出露的玄武岩-流纹岩双峰式火山岩组合开展了详细的野外调查和系统的采样工作。本文主要针对厄立特里亚中部Adi Keyh地区流纹岩,通过地球化学、锆石U-Pb年代学及Hf-Sr同位素的研究,分析其成因类型和成岩机制,探讨其构造意义,为该区新生代岩浆作用和构造背景等提供参考。

1 地质背景与岩石学特征

1.1 地质背景

厄立特里亚地处非洲东北部,区内地质特色是出露大面积的新元古代变质岩和新生代火山熔岩,其间断续夹有少量古生代和中生代的沉积物(Abbate et al., 2014)。新元古代变质岩形成于东、西冈瓦纳拼合过程(Johnson et al., 2011; Stern et al., 2011),新生代火山熔岩则与EARS有关。东北非地区的新生代火山熔岩分布极不均匀,超过90%分布于埃塞俄比亚(图1a)。岩性以玄武质熔岩、流纹质熔结凝灰岩和火山碎屑岩为主,玄武质火山碎屑岩和流纹质熔岩较少。流纹岩主要为普里尼式-超普里尼式火山喷发形成(Pik et al., 1998; Ayalew et al., 2002; Ayalew and Gibson, 2009)。现存的火山熔岩面积超过600万平方千米,总量约35万立方千米,据估计其原始体量可达100万立方千米。EARS开始于始新世晚期,最早形成的火山熔岩是45~40 Ma的拉斑玄武岩和~35 Ma的碱性玄武岩,主要分布于埃塞俄比亚南部和西南部。随着渐新世(31~29 Ma)阿法地幔柱的活动,红海南部大陆裂解,短时间内(~1 Ma)喷发了大量玄武熔岩和流纹岩,同时形成拉斑质和碱性火山岩(Ayalew and Gibson, 2009)。大约11 Ma时,随着岩石圈伸展向南迁移,形成埃塞俄比亚主裂谷和图尔卡纳(Turkana)凹陷,伴随大量流纹质和玄武质火山活动,玄武质熔岩为弱碱性,流纹质岩石为过碱性。厄立特里亚位于EARS北侧,受影响相对较弱,新生代火山岩主体分布于其中南部和东部(图1a)。

Adi Keyh位于厄立特里亚中部,北距其首都阿斯马拉(Asmara)约80 km,有公路联通。区内出露地层主要为新元古代Tsuliet岩群,为一套变火

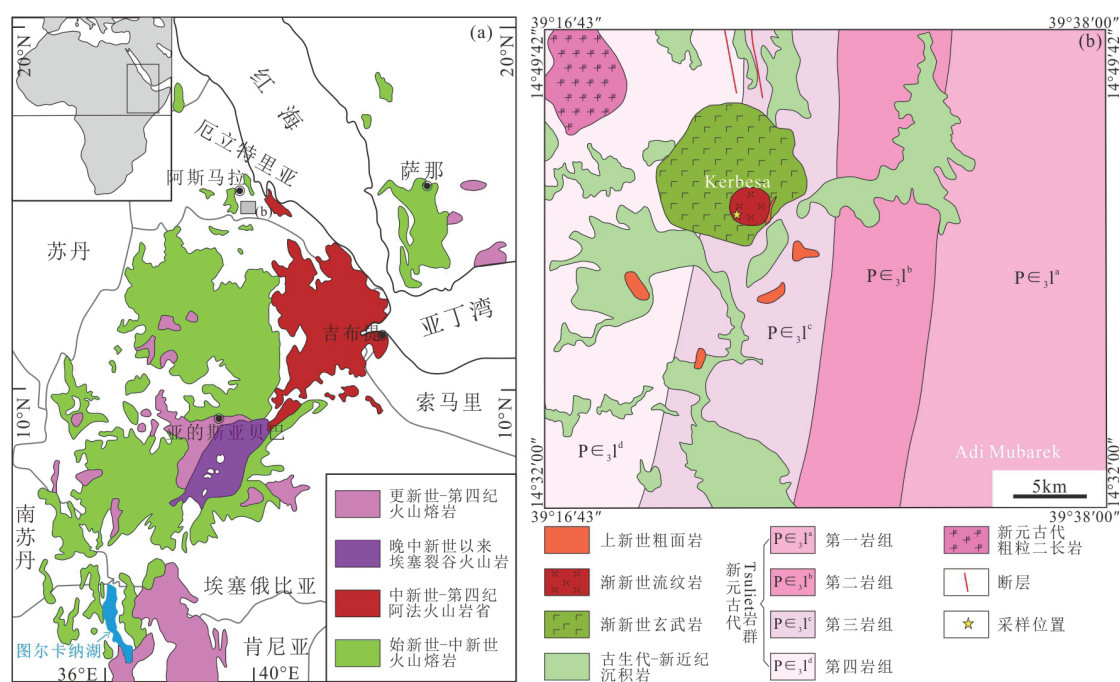


图 1 非洲东北部新生代火山岩(a) (据 Abbate et al., 2014) 和厄立特里亚中部 Adi Keyh 地区(b) (据陈开旭等, 2013) 地质图

Fig. 1 The Cenozoic volcanic rocks in NE African (a) (after Abbate et al., 2014) and geological map of the Adi Keyh in Central Eritrea

(b) (after Chen K X et al., 2013)

山岩、变火山碎屑岩、变沉积岩构成的层状岩石, 岩层走向近南北向, 从东向西按岩性组合可划分为四个组级非正式岩石地层单元。其次为古生代—新近纪沉积地层, 主要由砾岩、砂岩、泥岩以不规则状分布于山体顶部。火山岩主要为一套渐新世陆相火山喷发组合, 主要岩性为溢流玄武岩、火山角砾岩、凝灰岩组合。溢流玄武岩位于底部, 是本区最老的火山喷出物, 被火山碎屑岩嵌入和覆盖, 并被上新世的碱性岩、粗面岩岩颈切割。Adi Keyh 东南部 Kerbesa 村内可见火山角砾岩、流纹岩集中分布于破火山口及其周缘。新元古代粗粒二长花岗岩呈不规则状产出于研究区西北侧, 侵入体长轴近南北向分布。研究区构造发育较少, 仅见北部少量推断断层(图 1b)。

1.2 岩石学特征

Adi Keyh 流纹岩呈浅肉红色, 流纹构造明显(图 2a), 具斑状结构, 局部为霏细结构(图 2b)。斑晶主要是石英(含量 < 1%)、火山玻璃和岩屑。基质部分为隐晶质, 部分为长英质微晶。

石英斑晶无色透明, 它形粒状, 粒径 0.2-0.7 mm, 正低突起, 边部被熔蚀, 且有裂纹和窄的反应边, 与

基质接触边部为细小毛发状长英质颗粒或者隐晶质(图 2b)。火山玻璃为无色透明, 脱玻化明显, 多为纤维状或隐晶质玉髓(图 2c)。岩屑为褐铁矿化长英质岩屑, 内含沸石(图 2d)。

基质主体为隐晶质-微晶长英质矿物, 其中长石主要为斜长石, 局部长英质呈放射状晶簇(图 2b, c, d), 未见碱性长石。薄片中间有少量不透明矿物, 主要呈棕褐色, 可能是褐铁矿, 含量少于 3%。

2 样品与测试方法

本次研究在厄立特里亚中部 Adi Keyh 地区共采集了 5 件流纹岩样品, 样品较新鲜, 且采样位置分布均匀, 具有较好的代表性。5 件样品均开展了全岩主量、微量和稀土元素以及 Sr 同位素分析, 选取其中 1 件样品(KB1901-b04, 采样位置: N14°43'10", E39°25'03") 进行 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 和 Hf 同位素测试, 所有分析均在自然资源部中南矿产资源监督检测中心完成。

全岩地球化学分析需将新鲜流纹岩样品先去除风化面, 再破碎、研磨至 200 目。主量元素分析采

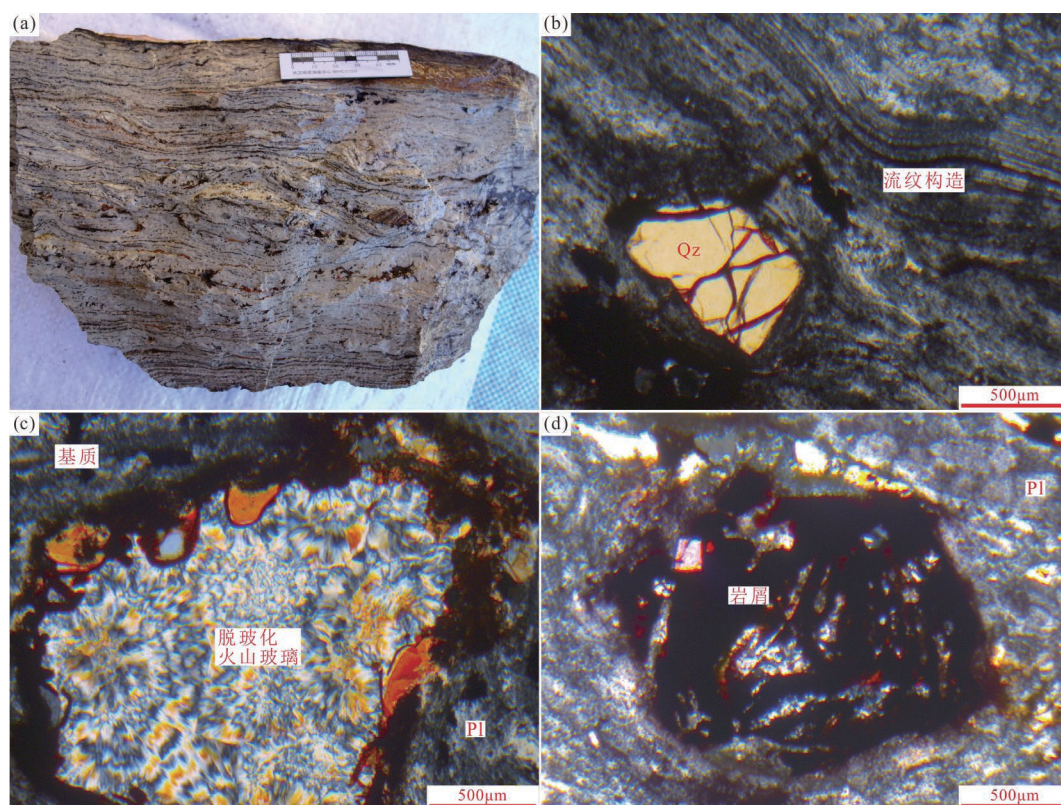


图2 厄立特里亚中部 Adi Keyh 流纹岩岩石学特征

Fig. 2 Hand specimen and micrographs of the Adi Keyh Rhyolite in Central Eritrea

a. 流纹岩手标本; b. 石英斑晶与流纹构造(镜下正交偏光); c. 脱玻化的火山玻璃(镜下正交偏光); d. 长英质岩屑(镜下正交偏光); Qz- 石英, Pl- 斜长石

用帕拉科生产的 AXIOS 型 X- 荧光光谱仪(XRF), 分析精度高于 1%。微量元素分析运用美国热电公司生产的 X II Series 型等离子体质谱仪(ICP-MS), 分析过程中采用与来样岩性相近的国家一级标样控制分析质量。主、微量元素分析具体流程详见赵凯等(2020)、刘超然等(2021)。稀土元素分析流程: 称取 50 mg 样品于塑料坩锅中, 用 H_2SO_4 、 $HClO_4$ 、 HF 和 HNO_3 于控温电热板上加热消解, 蒸干。以(1+1)王水和 H_2O , 加热溶解盐类后定容至 100 mL。以 ^{103}Rh 和 ^{185}Re 作内标元素直接测定稀土各分量。

锆石同位素分析的前期准备主要由广州拓岩检测技术有限公司完成, 首先将岩石样品粉碎淘洗后用电磁选和重液浮选法分选, 镜下选出无明显裂痕且晶形和透明度较好的锆石, 然后均匀粘贴在环氧树脂表面, 打磨抛光并露出近中心部位, 进行反射光、透射光和阴极发光显微照相。在此基础上选

择包体和裂痕少, 环带较好的锆石作为分析对象, 采用 GeoLas 2005(Lambda Physik, 德国)为激光剥蚀系统。锆石 U-Pb 定年的激光束斑为 $32 \mu m$, ICP-MS 为 Agilent 7500a, 详细的仪器操作条件和数据处理方法参见 Liu Y S et al.(2008, 2010a, 2010b)。在锆石 U-Pb 分析的相同点位或附近分析 Hf 同位素, 激光束斑为 $50 \mu m$, MC-ICP-MS 为 Neptune Plus (Thermo Fisher Scientific, 德国), 详细仪器操作条件和分析方法参见 Hu Z C et al.(2012)。采用软件 ICPMSDataCal(Liu Y S et al., 2008, 2010a)离线处理分析数据。锆石 U-Pb 年龄谱和图绘制、年龄权重平均计算以及 Hf 同位素计算等均采用 Iso-plot/Ex_ver3 软件(Ludwig, 2004)进行。

全岩 Sr 同位素组成分析采用热电离子质谱仪 Triton(00682T)完成。整个分析过程用标准物质 NBS987 和 GBW04411 分别对仪器和分析流程进行监控。仪器标样 NBS987 的 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 同位素组成

测定平均值为 $0.71028 \pm 0.00002 (2\sigma)$, 流程标样 GBW04411(钾长石)的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 同位素组成测定平均值为 $0.75999 \pm 0.00020 (2\sigma)$, 全流程 Sr 空白为 $3 \times 10^{-10}\text{g}$ 。

3 分析结果

3.1 锆石 U-Pb 年龄

Adi Keyh 流纹岩的锆石 U-Pb 同位素测试结果见表 1。锆石多呈不规则菱形, 少量为短柱状, 它形-半自形, 锆石粒径为 $60\sim 150\mu\text{m}$ 。锆石表面裂隙较少, 振荡环带清晰且窄细(图 3)。测试点的 Th 含量为 $95.6 \times 10^{-6}\sim 1977 \times 10^{-6}$, U 含量为 $128 \times 10^{-6}\sim 1439 \times 10^{-6}$, Th/U 比值变化范围为 $0.69\sim 1.37$ (均值

1.03), 表明其为岩浆成因。23 个测试点的谐和度均超过 95%, 均位于谐和曲线及附近, 表明锆石未遭受明显的后期热事件影响。 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄范围为 $25.7\sim 27.0\text{Ma}$, 其年龄加权平均值为 $26.1 \pm 0.2\text{Ma}$ (MSWD=0.45), 代表其成岩年龄(图 4a)。

锆石的稀土元素整体显示出重稀土元素富集、轻稀土元素相对亏损的左倾模式, 且具有明显的负 Eu 异常和正 Ce 异常, Y/Ho 比值为 $26.73\sim 27.88$ (均值 27.53), 具有典型岩浆锆石的特征(Hoskin, 2005)。锆石 Ti 含量温度计估算的结晶温度为 $672\sim 859^\circ\text{C}$, 均值为 795°C 。

3.2 全岩地球化学特征

Adi Keyh 流纹岩的全岩地球化学结果及相关参数列于表 2。总体上显示出高硅、富碱、富钾

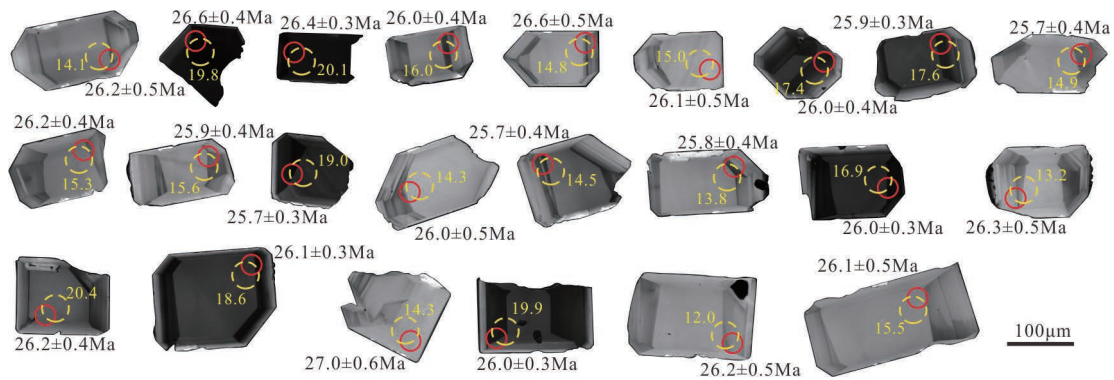


图 3 厄立特里亚中部 Adi Keyh 流纹岩锆石阴极发光照片

Fig. 3 Zircon CL images of the Adi Keyh Rhyolite in Central Eritrea

红圈及黑色数字代表 U-Pb 年龄点位及年龄值, 黄圈及黄色数字表示 Hf 同位素分析点位及 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值

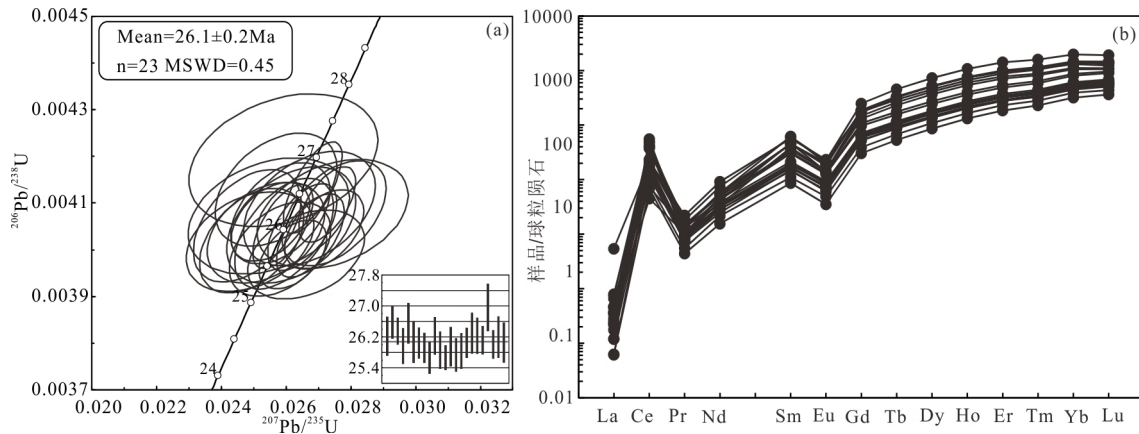


图 4 厄立特里亚中部 Adi Keyh 流纹岩锆石 U-Pb 年龄谐和图(a)和锆石 REE 球粒陨石配分模式图(b)

Fig. 4 Zircon LA-ICP-MS U-Pb isotope Concordiadiagram (a) and chondrite-normalized REE patterns (b) from the Adi Keyh Rhyolite in Central Eritrea

表 1 厄立特里亚中部 Adi Keyh 流纹岩锆石 U-Pb 测试结果
Table 1 LA-ICP-MS U-Pb data of zircons from the Adi Keyh Rhyolite in Central Eritrea

点号	^{232}Th ($\times 10^{-6}$)	^{238}U ($\times 10^{-6}$)	Th/U	同位素比值				年龄 (Ma)					
				$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ		
KB1901-b04-1	192	242	0.80	0.0497	0.0030	0.0275	0.0015	0.0041	0.0001	27.5	1.5	26.2	0.5
KB1901-b04-2	1977	1439	1.37	0.0472	0.0010	0.0268	0.0006	0.0041	0.0001	26.9	0.6	26.6	0.4
KB1901-b04-3	910	1021	0.89	0.0483	0.0010	0.0273	0.0006	0.0041	0.0001	27.3	0.6	26.4	0.3
KB1901-b04-4	430	326	1.32	0.0456	0.0021	0.0254	0.0012	0.0040	0.0001	25.5	1.2	26.0	0.5
KB1901-b04-5	268	248	1.08	0.0455	0.0021	0.0257	0.0012	0.0041	0.0001	25.8	1.2	26.6	0.5
KB1901-b04-6	169	209	0.81	0.0475	0.0024	0.0262	0.0013	0.0041	0.0001	26.2	1.3	26.1	0.5
KB1901-b04-7	1178	1033	1.14	0.0476	0.0012	0.0265	0.0007	0.0040	0.0001	26.6	0.7	26.0	0.4
KB1901-b04-8	896	822	1.09	0.0484	0.0013	0.0268	0.0007	0.0040	0.0001	26.8	0.7	25.9	0.4
KB1901-b04-9	324	283	1.14	0.0487	0.0022	0.0266	0.0012	0.0040	0.0001	26.7	1.2	25.7	0.4
KB1901-b04-10	309	373	0.83	0.0494	0.0020	0.0275	0.0011	0.0041	0.0001	27.5	1.0	26.2	0.5
KB1901-b04-11	358	306	1.17	0.0462	0.0022	0.0249	0.0011	0.0040	0.0001	25.0	1.1	25.9	0.5
KB1901-b04-12	1331	1286	1.03	0.0476	0.0012	0.0262	0.0007	0.0040	0.0000	26.3	0.7	25.7	0.3
KB1901-b04-13	306	289	1.06	0.0472	0.0019	0.0259	0.0010	0.0040	0.0001	26.0	1.0	26.0	0.5
KB1901-b04-14	436	371	1.18	0.0476	0.0021	0.0258	0.0010	0.0040	0.0001	25.9	1.0	25.7	0.4
KB1901-b04-16	429	317	1.35	0.0456	0.0024	0.0249	0.0013	0.0040	0.0001	25.0	1.3	25.8	0.5
KB1901-b04-18	1230	1033	1.19	0.0465	0.0010	0.0259	0.0006	0.0040	0.0001	26.0	0.6	26.0	0.4
KB1901-b04-19	169	184	0.92	0.0479	0.0025	0.0267	0.0013	0.0041	0.0001	26.8	1.3	26.3	0.5
KB1901-b04-20	387	433	0.89	0.0466	0.0020	0.0258	0.0010	0.0041	0.0001	25.9	1.0	26.2	0.5
KB1901-b04-22	925	900	1.03	0.0456	0.0013	0.0255	0.0008	0.0041	0.0001	25.6	0.8	26.1	0.4
KB1901-b04-23	99.1	143	0.69	0.0469	0.0039	0.0259	0.0019	0.0042	0.0001	26.0	1.9	27.0	0.6
KB1901-b04-24	1043	928	1.12	0.0488	0.0014	0.0272	0.0008	0.0040	0.0001	27.2	0.8	26.0	0.4
KB1901-b04-25	95.6	128	0.74	0.0468	0.0034	0.0255	0.0016	0.0041	0.0001	25.5	1.6	26.2	0.5
KB1901-b04-26	199	259	0.77	0.0451	0.0020	0.0248	0.0011	0.0041	0.0001	24.9	1.1	26.1	0.5

表 2 厄立特里亚中部 Adi Keyh 流纹岩主量 (wt.%)、微量和稀土 ($\times 10^{-6}$) 元素测试结果

Table 2 Major oxides (wt.%) and Trace elements (ppm) of the Adi Keyh Rhyolite in Central Eritrea

样号	KB1901-b01	KB1901-b02	KB1901-b03	KB1901-b04	KB1901-b05
SiO ₂	73.10	72.97	73.06	73.10	73.53
Al ₂ O ₃	12.66	12.64	12.48	12.35	12.56
TiO ₂	0.20	0.22	0.19	0.20	0.19
Fe ₂ O ₃	3.52	3.65	3.54	3.75	2.62
FeO	0.33	0.28	0.55	0.29	0.71
FeO ^f	3.50	3.56	3.73	3.66	3.07
MnO	0.09	0.09	0.19	0.18	0.09
MgO	0.093	0.103	0.080	0.103	0.093
CaO	0.09	0.21	0.10	0.10	0.12
Na ₂ O	4.20	4.18	4.20	4.10	4.20
K ₂ O	4.92	4.92	4.81	4.84	4.88
P ₂ O ₅	0.057	0.056	0.056	0.057	0.057
烧失量	0.73	0.69	0.61	0.89	0.82
总量	99.99	100.00	99.88	99.96	99.88
Na ₂ O+K ₂ O	9.12	9.10	9.01	8.94	9.08
K ₂ O/Na ₂ O	1.17	1.18	1.15	1.18	1.16
FeO ^f /MgO	37.62	34.59	46.67	35.57	33.01
A/NK	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03
A/CNK	1.02	1.00	1.01	1.01	1.01
Li	16.1	16.3	14.9	17.5	17.0
Be	4.86	4.93	5.41	5.55	4.71
Sc	8.40	8.34	8.30	7.68	7.81
V	3.59	5.81	2.57	3.69	2.23
Cr	4.78	6.06	14.9	5.12	5.52
Co	0.42	0.36	1.80	2.20	0.44
Ni	2.76	3.32	3.76	4.96	3.18
Ga	22.9	22.9	23.5	23.3	23.1
Rb	92.2	95.6	88.7	92.6	91.2
Sr	9.09	11.8	11.1	10.3	10.5
Y	108	76.1	92.2	97.8	92.2
Zr	1400	1180	1180	1190	1290
Nb	90.6	103.0	88.9	89.2	88.7
Cs	0.22	0.22	0.22	0.22	0.19
Ba	199	198	228	240	176
La	180	145	165	165	165
Ce	386	329	350	375	382
Pr	48.4	37.0	44.3	45.1	45.4
Nd	171	132	145	146	146
Sm	27.0	23.0	24.9	25.3	25.2
Eu	2.45	2.04	2.25	2.24	2.17
Gd	23.4	19.2	21.9	22.1	22.0
Tb	3.72	2.96	3.36	3.41	3.38
Dy	21.1	16.8	19.0	19.3	18.9
Ho	4.26	3.30	3.74	3.85	3.74
Er	11.8	9.32	10.5	10.9	10.5
Tm	1.93	1.52	1.67	1.73	1.66
Yb	12.6	10.4	11.5	11.7	11.4
Lu	1.85	1.52	1.68	1.68	1.64
Hf	25.4	23.7	22.7	21.0	23.3
Ta	4.95	5.02	4.92	4.95	5.14
Pb	19.3	26.7	13.4	18.8	18.1
Th	19.4	16.6	16.4	16.4	17.2
U	2.64	2.10	1.97	4.31	2.62
LREE	814.85	668.04	731.45	758.64	765.77
HREE	188.66	141.12	165.55	172.47	165.42
Σ REE	1003.51	809.16	897.00	931.11	931.19
LREE/HREE	4.32	4.73	4.42	4.40	4.63
La/Sm	6.67	6.30	6.63	6.52	6.55
Gd/Yb	1.86	1.85	1.90	1.89	1.93
La _N /Yb _N	10.25	10.00	10.29	10.12	10.38
δ Eu	0.30	0.30	0.29	0.29	0.28
δ Ce	1.01	1.10	1.00	1.07	1.08

中源区有斜长石残留。微量元素原始地幔标准化蛛网图(图 6b)显示,岩石较富集 Th、La、Ce、Nd、Zr 元素,略微亏损 Ta、Nb,强烈亏损 Ba、Sr、P、Ti 元素。

3.3 锆石原位 Hf 同位素特征

在锆石 U-Pb 测年的基础上,进一步开展了原位 Hf 同位素分析。锆石 Hf 同位素的分析点位及对应的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值(黄色数字所示)见图 3, Hf 同位素组成、相关参数及计算结果列于表 3。结果显示, Adi Keyh 流纹岩锆石的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值变化在

0.283096~0.283335 之间, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值较为集中,显示为异常高的正值(+12.0~+20.4)。在锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 频率直方图(图 7a)上, Adi Keyh 流纹岩具有单峰组成特征。

3.4 全岩 Sr 同位素特征

本次研究分析了 5 件流纹岩的全岩 Sr 同位素组成(表 4), 结果显示 Adi Keyh 流纹岩具有较为均一的 Sr 同位素初始值(0.70424~0.70477), 且初始值较低(均值为 0.70460), 揭示了其与地幔的亲缘性。

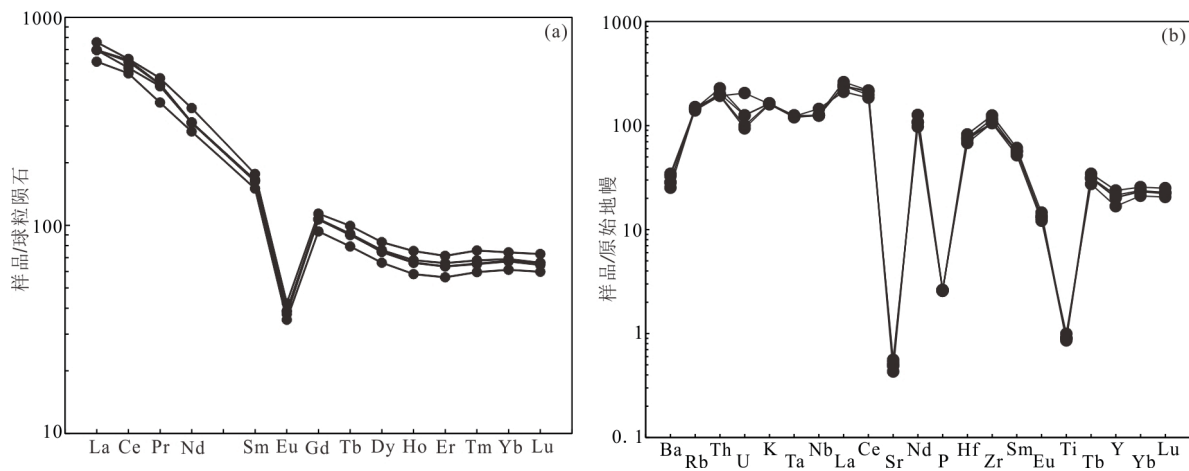


图 6 厄立特里亚中部 Adi Keyh 流纹岩稀土元素球粒陨石标准化分布型式图(a)和微量元素原始地幔标准化蛛网图(b) (标准化值据 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 6 Chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive mantle-normalized trace element spider diagrams (b) of the Adi Keyh Rhyolite in Central Eritrea (The chondrite and PM normalizing values are from Sun and McDonough, 1989)

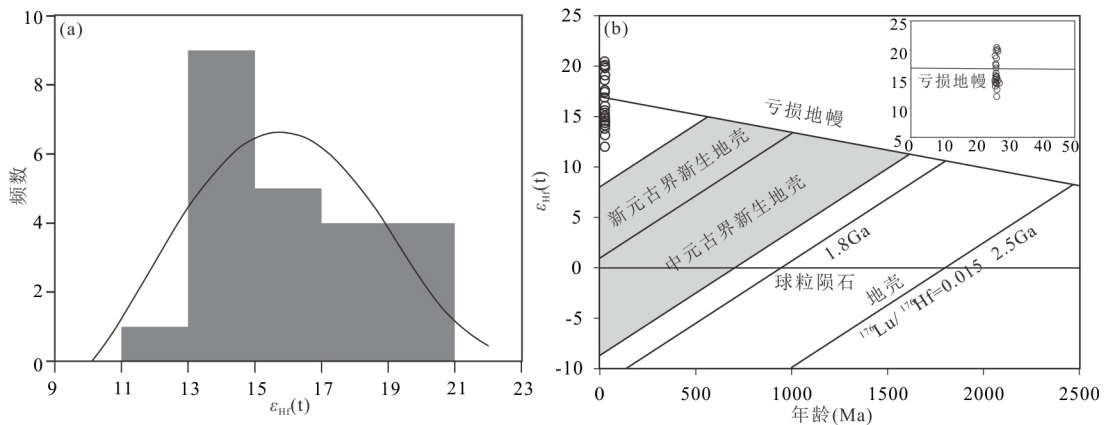


图 7 厄立特里亚中部 Adi Keyh 流纹岩锆石 Hf 同位素图解

Fig. 7 Hf isotope diagrams for the Adi Keyh Rhyolite in Central Eritrea

(a) 锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 直方图;(b) 锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ -年龄(Ma)图解.

表3 厄立特里亚中部 Adi Keyh 流纹岩锆石 Hf 同位素分析结果

Table 3 Lu-Hf isotopic compositions of zircons from the Adi Keyh Rhyolite in Central Eritrea

点号	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	1σ	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	1σ	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	1σ	年龄 (Ma)	$\varepsilon_{\text{Hf}}(0)$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	t_{DM1}	t_{DM2}	$f_{\text{Lu/Hf}}$
KB1901-b04-1	0.283157	0.000018	0.004228	0.000028	0.153201	0.001475	26.2	13.6	14.1	145	178	-0.87
KB1901-b04-2	0.283319	0.000024	0.007135	0.000007	0.302282	0.000978	26.6	19.3	19.8	-118	-142	-0.79
KB1901-b04-3	0.283330	0.000022	0.010379	0.000031	0.425279	0.000645	26.4	19.7	20.1	-154	-162	-0.69
KB1901-b04-4	0.283212	0.000017	0.005192	0.000007	0.191285	0.000127	26	15.6	16.0	61	69	-0.84
KB1901-b04-5	0.283177	0.000016	0.004103	0.000041	0.148655	0.001634	26.6	14.3	14.8	114	138	-0.88
KB1901-b04-6	0.283182	0.000018	0.005048	0.000012	0.183104	0.000184	26.1	14.5	15.0	109	130	-0.85
KB1901-b04-7	0.283251	0.000023	0.008095	0.000022	0.328764	0.001066	26	16.9	17.4	-2	-5	-0.76
KB1901-b04-8	0.283256	0.000020	0.005818	0.000039	0.231396	0.001213	25.9	17.1	17.6	-10	-17	-0.82
KB1901-b04-9	0.283179	0.000019	0.004559	0.000048	0.167998	0.001667	25.7	14.4	14.9	113	135	-0.86
KB1901-b04-10	0.283191	0.000022	0.006479	0.000019	0.240987	0.000437	26.2	14.8	15.3	99	113	-0.80
KB1901-b04-11	0.283199	0.000017	0.004950	0.000021	0.186634	0.001204	25.9	15.1	15.6	82	96	-0.85
KB1901-b04-12	0.283297	0.000023	0.008284	0.000012	0.352018	0.001096	25.7	18.5	19.0	-83	-96	-0.75
KB1901-b04-13	0.283168	0.000018	0.003653	0.000045	0.135660	0.001961	25.7	14.0	14.5	126	156	-0.89
KB1901-b04-14	0.283162	0.000018	0.004435	0.000063	0.171413	0.002964	26	13.8	14.3	139	169	-0.87
KB1901-b04-15	0.283149	0.000020	0.004114	0.000040	0.155568	0.001750	25.8	13.3	13.8	158	195	-0.88
KB1901-b04-16	0.283238	0.000019	0.005804	0.000043	0.244285	0.002171	26	16.5	16.9	20	19	-0.83
KB1901-b04-17	0.283130	0.000019	0.003562	0.000022	0.133011	0.001229	26.3	12.7	13.2	183	231	-0.89
KB1901-b04-18	0.283335	0.000025	0.008209	0.000022	0.322047	0.000258	26.2	19.9	20.4	-151	-174	-0.75
KB1901-b04-19	0.283285	0.000025	0.008066	0.000028	0.334484	0.001528	26.1	18.1	18.6	-62	-74	-0.76
KB1901-b04-20	0.283162	0.000017	0.003532	0.000003	0.128965	0.000225	27	13.8	14.3	134	167	-0.89
KB1901-b04-21	0.283322	0.000022	0.007360	0.000010	0.303549	0.000835	26	19.5	19.9	-125	-148	-0.78
KB1901-b04-22	0.283096	0.000017	0.002793	0.000014	0.102765	0.000737	26.2	11.4	12.0	232	299	-0.92
KB1901-b04-23	0.283197	0.000021	0.003914	0.000022	0.147666	0.001172	26.1	15.0	15.5	83	99	-0.88

注: $\varepsilon_{\text{Hf}}(t) = \left\{ \left[\frac{^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}}{^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}} \right]_s - \left[\frac{^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}}{^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}} \right]_{\text{CHUR}, 0} \times (e^{\lambda t} - 1) \right\} / \left[\left(\frac{^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}}{^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}} \right)_{\text{CHUR}, 0} \times (e^{\lambda t} - 1) - 1 \right] \times 10000$; $t_{\text{DM1}} = 1/\lambda \times \ln \{ 1 + [(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_s - (^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}}] / [(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_s - (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}}] \}$; $t_{\text{DM2}} = t_{\text{DM1}} - t$; $f_{\text{Lu/Hf}} = \left[\frac{(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_s}{(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR}, 0}} - 1 \right] / \left[\frac{(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_s}{(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR}, 0}} - 1 \right] - \left[\frac{(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}}}{(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR}, 0}} - 1 \right]$; $f_{\text{CC}} = f_{\text{Lu/Hf}}$ 值; $f_{\text{CC}} = f_{\text{Lu/Hf}}$ 值; $f_{\text{s}} = f_{\text{Lu/Hf}}$ 值; t 样品形成时间; $(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_s$ 和 $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_s$ 为样品测量值; $(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR}, 0} = 0.0332$; $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR}, 0} = 0.282772$ (Blichert-Toft and Albar è de, 1997), $(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}} = 0.0384$; $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}} = 0.28325$; $\lambda = 1.865 \times 10^{-11} \text{y}^{-1}$ (Griffin et al., 2000)

表4 厄立特里亚中部 Adi Keyh 流纹岩 Sr 同位素分析结果

Table 4 Sr isotopic compositions of the Oligocene rhyolite in Central Eritrea

样品编号	t(Ma)	Rb(ppm)	Sr(ppm)	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	2σ	$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$
KB1901-b01	26	92.2	9.09	29.3708	0.715484	0.000010	0.70464
KB1901-b02	26	95.6	11.8	23.4598	0.713288	0.000006	0.70463
KB1901-b03	26	88.7	11.1	23.1393	0.713255	0.000009	0.70471
KB1901-b04	26	92.6	10.3	26.0329	0.713853	0.000003	0.70424
KB1901-b05	26	91.2	10.5	25.1510	0.714061	0.000010	0.70477

注: 计算参数为 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i = (^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_s - (^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr})_s \times (e^{\lambda t} - 1)$; $\lambda = 1.42 \times 10^{-11} \text{y}^{-1}$; t 代表样品形成的年龄

4 讨论

4.1 岩石类型

A 型流纹岩代表产于伸展构造背景(非造山

或裂谷环境)中高温无水的岩浆岩($> 760^\circ\text{C}$), 其以“富碱”、“高温”、“无水”为特征(Loiselle and Wones, 1979; 吴福元等, 2007; 张旗等, 2012), 具有较高的 SiO_2 、 $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ 、 $\text{FeO}^{\text{T}}/\text{MgO}$ 和较低的

CaO 含量, 富集 Ga、Zr、Nb、Ta、Y、Ce、F、REE 等元素, 亏损 Ba 和 Sr。从岩石类型上, A 型流纹岩可以是碱性流纹岩, 也可能是钙碱性、弱碱 - 准铝质、弱过铝质流纹岩(许保良等, 1998)。

Adi Keyh 流纹岩具有较高的硅含量 ($\text{SiO}_2=72.97\% \sim 73.53\%$), P_2O_5 含量极低 ($0.056\% \sim 0.057\%$), A/CNK 比值也较低 ($1.00 \sim 1.02$) (表 2), 且未见富铝矿物等特征, 基本排除 S 型流纹岩的可能。同时, 岩石富钾 ($\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}=1.15 \sim 1.18$)、铁质 ($\text{FeO}^T=3.50\% \sim 3.73\%$) 等也明显不同于 I 型流纹岩(贾小辉等, 2009)。其富碱 (ALK 均值 9.05%) 和稀土元素 (REE 均值 914.39×10^{-6}), 贫 Al_2O_3 (均值 12.54%) 和 Sr (均值 10.56×10^{-6}) 等特征与 A 型

流纹岩的吻合度较高(Loiselle and Wones, 1979; Whalen et al., 1987; 张旗等, 2012)。样品 $10000 \times \text{Ga}/\text{Al}$ 为 $3.42 \sim 3.58$, 均大于 2.6; $\text{Zr}+\text{Nb}+\text{Ce}+\text{Y}$ 为 $1688.1 \times 10^{-6} \sim 1984.6 \times 10^{-6}$, 远大于 350×10^{-6} 。在流纹岩岩石类型判别图解中(图 8), 均落入 A 型流纹岩区域。锆石 Ti 含量温度计估算的结晶温度中值为 795°C , 也呈现出较高的成岩温度下限。综上所述, Adi Keyh 流纹岩应属于 A 型流纹岩。

4.2 成岩机制

A 型流纹岩可能的形成机制主要有幔源岩浆与壳源岩浆混合(Yang J H et al., 2006)、幔源岩浆结晶分异(Eby, 1992)以及地壳物质部分熔融(Skjerlie and Johnston, 1992; Patiño Douce, 1997)三

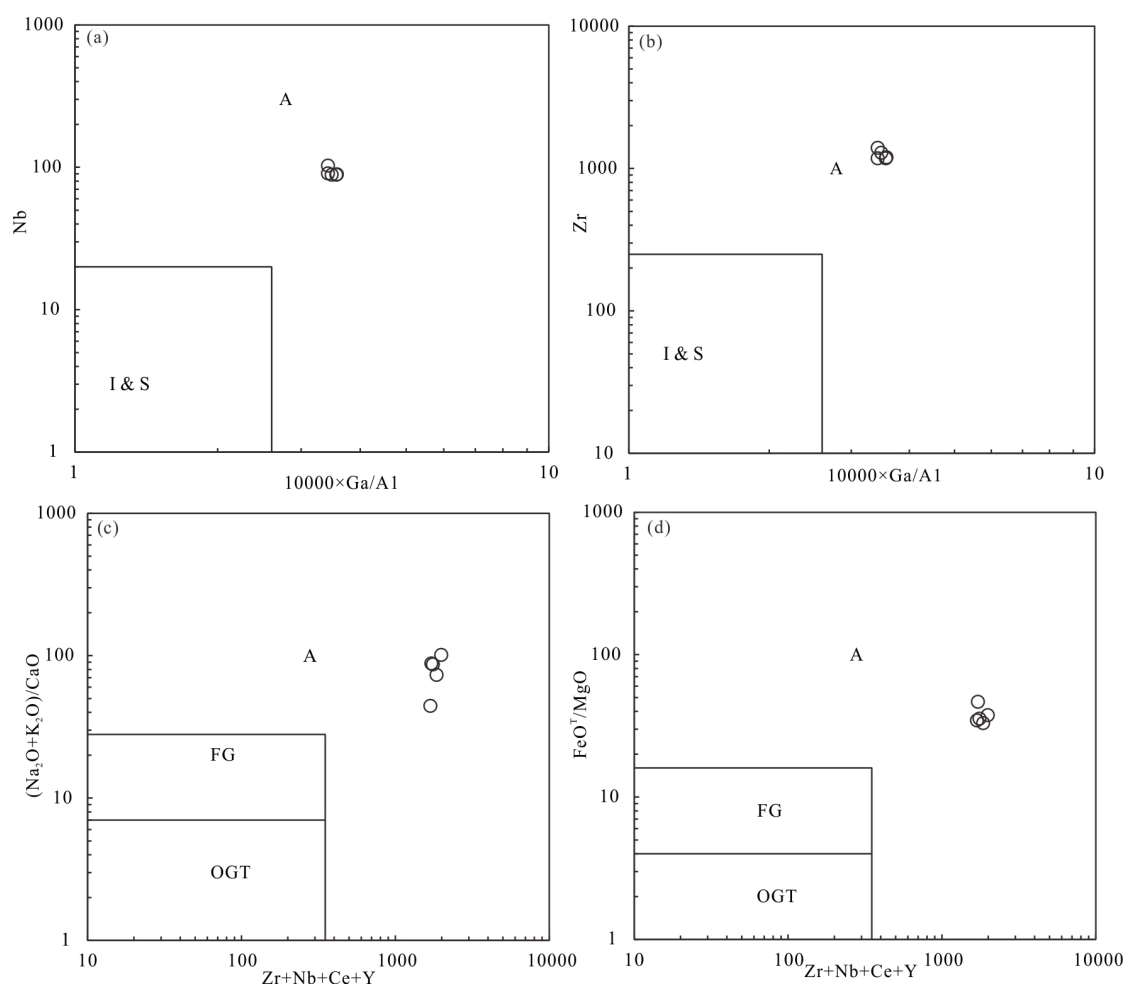


图 8 厄立特里亚中部 Adi Keyh 流纹岩类型判别图解(据 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 8 Adi Keyh Rhyolite samples plotted in the discrimination diagrams for A-type granitoids(after Sun and McDonough, 1989)
(a) Nb- $10000 \times \text{Ga}/\text{Al}$ 图解; (b) Zr- $10000 \times \text{Ga}/\text{Al}$ 图解; (c) $(\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O})/\text{CaO}-(\text{Zr}+\text{Nb}+\text{Ce}+\text{Y})$ 图解; (d) $\text{FeO}^T/\text{MgO}-(\text{Zr}+\text{Nb}+\text{Ce}+\text{Y})$ 图解;
A-A 型流纹岩; I&S-I 型与 S 型流纹岩; FG- 分异的流纹岩; OGT- 未分异的 M、I、S 型流纹岩。

种。Adi Keyh 流纹岩的标本和显微镜下的特征显示,其缺乏镁铁质暗色微粒包体,Hf(表 3)和 Sr(表 4)同位素组成及全岩地球化学成分都较为均一,与壳幔岩浆混合作用产生的相对分散的同位素特征(Griffin et al., 2002; Eiler, 2007)明显不同。显然,地质和地球化学特征都不支持 Adi Keyh 流纹岩为壳幔混合成因。

幔源玄武质岩浆结晶分异通常形成过碱质岩浆(Patiño Douce, 1997),这与厄立特里亚 Adi Keyh 流纹岩弱过铝质的特征不一致。此外,Adi Keyh 流纹岩外围虽发育大面积玄武岩,但是缺失安山岩等一系列过渡岩石类型,这与幔源岩浆结晶分异作用的岩石类型组合也明显不同(Litvinovsky et al., 2002)。并且当前的共识也认为流纹岩来自幔源岩浆也极少见(吴福元等, 2007)。因此,Adi Keyh 流纹岩由幔源岩浆结晶分异形成的可能性不大。

研究表明,不同地壳物质的部分熔融都可以形成 A 型流纹岩,如变质沉积岩(Collin et al., 1982)、无水下地壳残留体以及新生镁铁质下地壳(雷勇亮等, 2021)等。Adi Keyh 流纹岩的弱过铝质特征,较高的相容元素含量(Cr: 4.78×10^{-6} ~ 14.90×10^{-6} 、Ni: 2.76×10^{-6} ~ 4.96×10^{-6} 、Co: 0.36×10^{-6} ~ 2.20×10^{-6})和 Nb/U、Ce/Pb 比值(均值 36.61 和 19.90)(Hofmann et al., 1986)等,均有别于变质沉积岩部分熔融形成的岩浆岩。此外,Adi Keyh 流纹岩的高 TiO₂/MgO 比值(1.90~2.43)、高(Na₂O+K₂O)/Al₂O₃ 比值(0.72)和高 SiO₂(72.97%~73.53%)含量等与无水下地壳残留体部分熔融形成的岩浆岩也不一致(Skjerlie and Johnston, 1992)。

吴福元等(2007)指出,具有正 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值的花岗岩基本上都是初生地壳再造的产物,花岗岩中所包含的地幔地球化学信息很可能与新生镁铁质地壳有关,新生镁铁质下地壳的部分熔融可以产生 A 型流纹岩。Adi Keyh 流纹岩 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值集中于亏损地幔演化线附近(图 7b), Sr 同位素初始值 [$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$]_i = 0.70424~0.70477] 接近地幔值(Lindberg and Eklund, 1988),并具有较高的 K₂O(4.81%~4.92%)和相容元素(Cr、Ni、Co)含量等,均指示其可能为新生镁铁质下地壳部分熔融产物。综上所述,Adi Keyh 流纹岩可能形成于东非 EARS 渐新世新生镁

铁质下地壳的部分熔融。Adi Keyh 流纹岩的 MgO 含量偏低、Fe/Mg 比值较高,并且贫 Ca,强烈亏损 Ba 和 Sr, Eu 负异常较强,反映源区经历了低程度部分熔融,斜方辉石和斜长石成为残留相(于玉帅等, 2011; 马超等, 2019)。

4.3 构造意义

研究表明, A 型流纹岩的形成需要高温低压条件(张旗等, 2012), 主要形成于大陆弧后、后碰撞以及板内伸展等一系列地壳伸展减薄的构造环境(Whalen et al., 1996; Yang J H et al., 2006), 因此 A 型流纹岩是判断伸展背景的重要岩石学标志(吴福元等, 2007)。伸展背景又可分为板片俯冲的弧后或碰撞造山后伸展背景和非造山环境中的大陆裂谷与板内热点、地幔柱等伸展背景(吴福元等, 2007)。俯冲 - 造山环境中大陆地壳或镁铁质下地壳物质的部分熔融通常形成 A₂ 型流纹岩(吕昭英等, 2019; Yan J M et al., 2019), 非造山环境通常形成与洋岛玄武岩类似的 A₁ 型流纹岩(Yang J H et al., 2006)。Adi Keyh 流纹岩 5 件样品在 Nb-Y 和 Rb-(Yb+Ta)图解(图 9a 和 b)中均落入板内区域, 指示为非造山环境产物。并且,样品的 Y/Nb 比值为 0.74~1.19, 均小于 1.2, 在 Nb-Y-Ce 和 Yb-Ta-Y/Nb 图解(图 9c 和 d)中也均落入 A₁ 型流纹岩区域, 说明其属于 A₁ 板内型流纹岩(Yang J H et al., 2006)。姚华舟等(2018)在总结 EARS 的新生代火山作用地球化学标志过程中, 指出区内流纹岩在 Al₂O₃-SiO₂ 哈克图中均落入裂谷 + 大陆造陆隆升的构造环境内, 暗示其形成于陆内非造山环境。本文结合锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年结果(26.1 ± 0.2 Ma), 可以厘定 Adi Keyh 地区流纹岩为渐新世板内岩浆活动的产物。

地幔剪切波速异常(Ritsema et al., 1999)、新生代岩浆活动(George et al., 1998)以及稀土元素地球化学(Schilling, 1973)等证据表明, 从始新世(~45 Ma)以来, 东北非地区经历了地幔柱大陆板内裂谷演变为初始大洋的构造活动过程(姚华舟等, 2018), 形成了贯穿东非高原的 EARS, 并以双峰式火山岩组合为特色。厄立特里亚中部 Adi Keyh 地区的玄武岩 - 流纹岩双峰式火山岩组合基本符合 EARS 的火山岩组合特征。结合其成岩年龄, 本文

认为该流纹岩的形成与 EARS 地幔柱活动有关。虽然,学界对于是一个还是多个地幔柱活动导致 EARS 形成还存在争议(George et al., 1998; Ebinger and Sleep, 1998; Meshesha and Shinjo, 2008),但是一个基本的共识是连接红海、亚丁湾和东北非裂谷东支的三角点阿法地区在 32~25Ma 之间为地幔

柱活动中心 [也叫阿法地幔柱 (Schilling, 1973)], 随后区域上进入裂谷演化阶段(26~12 Ma)。综上可知,渐新世 EARS 裂谷期阿法地幔柱活动引发了岩石圈伸展,进而形成了厄立特里亚中部 Adi Keyh 地区的 A 型流纹岩。

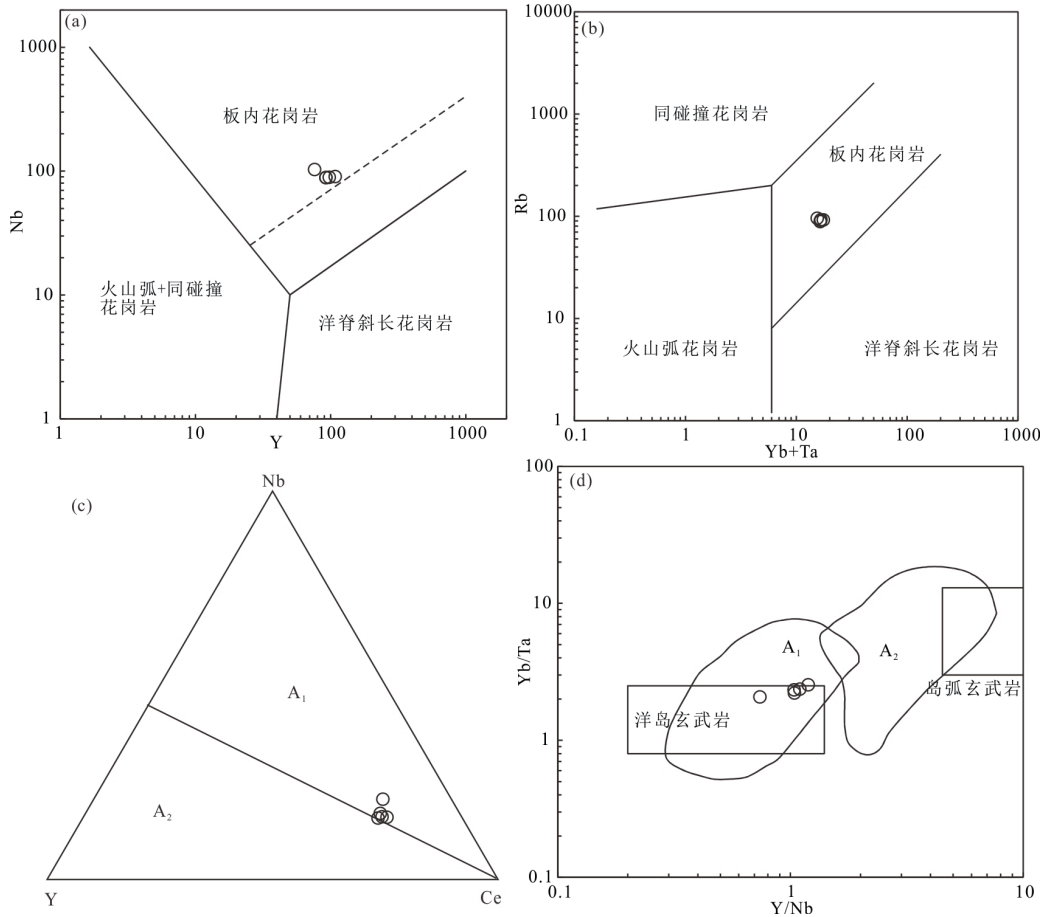


图 9 厄立特里亚中部 Adi Keyh 流纹岩构造环境判别图解(底图据 Pearce et al., 1984 和 Yang J H et al., 2006)

Fig. 9 Tectonic discrimination diagrams of the Adi Keyh Rhyolite in Central Eritrea (after Pearce et al., 1984 and Yang J H et al., 2006)

5 结论

(1)厄立特里亚中部 Adi Keyh 流纹岩成岩年龄为 26.1 ± 0.2 Ma, 属渐新世, 具有 A 型流纹岩地球化学特征: 高硅、富碱、富钾, 并富集 Th、La、Ce、Nd、Zr, 而强烈亏损 Ba、Sr、P 和 Ti, 且 $Zr+Nb+Ce+Y$ 含量和 $10000 \times Ga/Al$ 比值高。

(2)岩石地球化学和 Hf-Sr 同位素特征指示, Adi Keyh 流纹岩可能为新生镁铁质下地壳部分熔融的产物。

(3)微量元素地球化学图解指示 Adi Keyh 流纹岩为 A₁ 型板内流纹岩, 构造背景为渐新世 EARS 裂谷期阿法地幔柱活动环境下引发的岩石圈伸展。

成文过程中与邱啸飞研究员、周佐民高级工程师及杨奇获助理研究员等进行了有益探讨, 在此致以诚挚谢意。感谢两位匿名审稿专家提出的建设性意见。

参考文献:

- 陈开旭, 孙为国, 王建雄, 张继纯, 胡瑞春, 李闫华, 刘国庆, 汤质华, 严永祥. 2013. 厄立特里亚中南部地区地质与地球化学调查报告 [R]. 武汉: 中国地质调查局武汉地质调查中心.
- 贾小辉, 王强, 唐功建. 2009. A型花岗岩的研究进展及意义 [J]. 大地构造与成矿学, 33(3): 465-480.
- 雷勇亮, 戴佳文, 白强, 王凯兴, 孙立强, 刘晓东, 余驰达, 何世伟. 2021. 东昆仑造山带海德乌拉铝质 A 型流纹岩成因及其意义 [J]. 岩石学报, 37(7): 1964-1982.
- 刘超然, 徐大良, 赵小明, 邓新, 谭满堂. 2021. 南大别蕲春构造混杂岩带中变质沉积岩源区和时代限定 [J]. 华南地质, 37(1): 1-28.
- 吕昭英, 陈沐龙, 胡在龙, 傅杨荣, 魏昌欣, 袁勤敏, 常振宇, 黄武轩. 2019. 琼北翁田铝质 A 型花岗岩的锆石 U-Pb 年代学、地球化学特征及其地质意义 [J]. 华南地质与矿产, 35(3): 306-316.
- 马超, 汤艳杰, 英基丰. 2019. 俯冲带岩浆作用与大陆地壳生长 [J]. 地球科学, 44(4): 1128-1142.
- 吴福元, 李献华, 杨进辉, 郑永飞. 2007. 花岗岩成因研究的若干问题 [J]. 岩石学报, 23(6): 1217-1238.
- 夏林圻, 徐学义, 李向民, 夏祖春, 马中平. 2012. 亚洲 3 个大火成岩省 (峨眉山、西伯利亚、德干) 对比研究 [J]. 西北地质, 45(2): 1-26.
- 许保良, 阎国翰, 张臣, 李之彤, 何中甫. 1998. A 型花岗岩的岩石学亚类及其物质来源 [J]. 地学前缘, 5(3): 113-124.
- 姚华舟, 陈开旭, 王建雄, 杨振强, 韦延光, 李闫华, 徐景银, 孙为国. 2018. 东非裂谷系统 (EARS) 地幔柱成因的新生代火山作用地球化学标志 [J]. 华南地质与矿产, 34(1): 10-21.
- 于玉帅, 高原, 杨竹森, 田世洪, 刘英超, 曹圣华, 胡为正, 郟海满. 2011. 西藏措勤尼雄矿田滚纠铁矿侵入岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄与地球化学特征 [J]. 岩石学报, 27(7): 1949-1960.
- 张旗, 冉皞, 李承东. 2012. A 型花岗岩的实质是什么? [J]. 岩石矿物学杂志, 31(4): 621-626.
- 赵凯, 姚华舟, 王建雄, Ghebsha F G, 向文帅, 杨镇. 2020. 厄立特里亚 Koka 花岗岩锆石 U-Pb 年代学、地球化学特征及其地质意义 [J]. 地球科学, 45(1): 156-167.
- Abbate E, Bruni P, Ferretti M P, Delmer C, Laurenzi M A, Hagos M, Bedri O, Rook L, Sagri M, Libsekal Y. 2014. The East Africa Oligocene intertrappean beds: Regional distribution, depositional environments and Afro/Arabian mammal dispersals [J]. Journal of African Earth Sciences, 99: 463-489.
- Ayalew D, Barbey P, Marty B, Reisberg L, Yirgu G, Pik R. 2002. Source, genesis, and timing of giant ignimbrite deposits associated with Ethiopian continental flood basalts [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 66(8): 1429-1448.
- Ayalew D, Gibson S A. 2009. Head-to-tail transition of the Afar mantle plume: Geochemical evidence from a Miocene bimodal basalt-rhyolite succession in the Ethiopian Large Igneous Province [J]. Lithos, 112(3-4): 461-476.
- Baker J A, Thirlwall M F, Menzies M A. 1996. Sr-Nd-Pb isotopic and trace element evidence for crustal contamination of plume-derived flood basalts; Oligocene flood volcanism in western Yemen [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 60(14): 2559-2581.
- Barrat J A, Joron J L, Taylor R N, Fourcade S, Nesbitt R W, Jahn B M. 2003. Geochemistry of basalts from Manda Hararo, Ethiopia: LREE-depleted basalts in Central Afar [J]. Lithos, 69(1-2): 1-13.
- Blichert-Toft J, Albarède F. 1997. The Lu-Hf isotope geochemistry of chondrites and the evolution of the mantle-crust system [J]. Earth Planet Science Letters, 148: 243-258.
- Caricchi L, Ulmer P, Peccerillo A. 2006. A high-pressure experimental study on the evolution of the silicic magmatism of the Main Ethiopian Rift [J]. Lithos, 91(1-4): 46-58.
- Collins W J, Beams S D, White A J R, Chappell, B W. 1982. Nature and origin of A-type granites with particular reference to southeastern Australia [J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 80(2): 189-200.
- Ebinger C J, Sleep N H. 1998. Cenozoic magmatism throughout east Africa resulting from impact of a single plume [J]. Nature, 395: 788-791.

- Eby G N. 1992. Chemical subdivision of the A-type granitoids: petrogenetic and tectonic implications[J]. *Geology*, 20(7): 641-644.
- Eiler J M. 2007. On the Origins of Granites[J]. *Science*, 315(5814): 951-952.
- Frost B R, Barnes C G, Collins W J, Arculus R J, Ellis D J, Frost C D. 2001. A Geochemical Classification for Granitic Rocks[J]. *Journal of Petrology*, 42(11): 2033-2048.
- Furman T, Kaleta K M, Bryce J G, Hanan B B. 2006a. Tertiary Mafic Lavas of Turkana, Kenya: Constraints on East African Plume Structure and the Occurrence of High- μ Volcanism in Africa[J]. *Journal of Petrology*, 47(6): 1221-1244.
- Furman T, Bryce J G, Rooney T, Hanan B B, Yirgu G, Ayalew D. 2006b. Heads and tails: 30 million years of the Afar plume[J]. Geological Society, London, Special Publications, 259(1): 95-119.
- George R, Rogers N, Kelley S. 1998. Earliest magmatism in Ethiopia: Evidence for two mantle plumes in one flood basalt province[J]. *Geology*, 26(10): 923-926.
- George R, Rogers N. 2002. Plume dynamics beneath the African plate inferred from the geochemistry of the Tertiary basalts of southern Ethiopia[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 144(3): 286-304.
- Griffin W L, Pearson N J, Belousova, E, Jackson S E, van Achterbergh E, O' Reilly S Y, Shee S R. 2000. The Hf isotope composition of cratonic mantle: LAM-MC-ICPMS analysis of zircon megacrysts in kimberlites[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64: 133-147.
- Griffin W L, Wang X, Jackson S E, Pearson N J, O' Reilly S Y, Xu X S, Zhou X M. 2002. Zircon chemistry and magma mixing, SE China: in-situ analysis of Hf isotopes, Tonglu and Pingtan igneous complexes[J]. *Lithos*, 61(3-4): 237-269.
- Hawkesworth C, Kelley S, Turner S, Roex L A, Storey B. 1999. Mantle processes during Gondwana break-up and dispersal[J]. *Journal of African Earth Sciences*, 28(1): 239-261.
- Hofmann A W, Jochum K P, Seufert M, White W M. 1986. Nb and Pb in oceanic basalts: new constraints on mantle evolution[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 79(1-2): 33-45.
- Hoskin P W O. 2005. Trace element composition of hydrothermal zircon and the alteration of Hadean zircon from the Jack Hills, Australia[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 69(3): 637-648.
- Hu Z C, Liu Y S, Gao S, Liu W G, Zhang W, Tong X R, Lin L, Zong K Q, Li M, Chen H H, Zhou L, Yang L. 2012. Improved in situ Hf isotope ratio analysis of zircon using newly designed X skimmer cone and jet sample cone in combination with the addition of nitrogen by laser ablation multiple collector ICP-MS[J]. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 27(9): 1391-1399.
- Johnson P R, Andresen A, Collins A S, Fowler A R, Fritz H, Ghebreab W, Kusky T, Stern R J. 2011. Late Cryogenian–Ediacaran history of the Arabian–Nubian Shield: A review of depositional, plutonic, structural, and tectonic events in the closing stages of the northern East African Orogen[J]. *Journal of African Earth Sciences*, 61(3): 167-232.
- Kieffer B, Arndt N, Lapierre H, Bastien F, Bosch D, Pecher A, Yirgu G, Ayalew D, Weis D, Jerram D A, Keller F, Meugniot C. 2004. Flood and Shield Basalts from Ethiopia: Magmas from the African Superswell[J]. *Journal of Petrology*, 45(4): 793-834.
- Kirstein L A, Peate D W, Hawkesworth C J, Turner S P, Harris C, Mantovani M S M. 2000. Early Cretaceous basaltic and rhyolitic magmatism in southern Uruguay associated with the opening of the South Atlantic[J]. *Journal of Petrology*, 41(9): 1413-1438.
- Le Maitre R W. 1989. A classification of igneous rocks and glossary of terms: Recommendations of the International Union of Geological Sciences Subcommittee on the systematics of igneous rocks[M]. Oxford, UK: Blackwell Scientific Publications, 1-193.
- Lindberg B, Eklund O. 1988. Interactions between basaltic and granitic magmas in a Svecofennian postorogenic granitoid intrusion, Aland, Southwest Finland[J]. *Lithos*, 22(1): 13-23.

- Litvinovsky B A, Jahn B, Zanzvilevich A N, Saunders A, Poulain S, Kuzmin D V, Reichow M K, Titov A V. 2002. Petrogenesis of syenite-granite suites from the Bryansky Complex (Transbaikalia, Russia); implications for the origin of A-type granitoid magmas[J]. *Chemical Geology*, 189(1-2): 105-133.
- Liu Y S, Hu Z C, Gao S, Güenther D, Xu Juan, Gao C G, Chen H H. 2008. In situ analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard[J]. *Chemical Geology*, 257(1-2): 34-43.
- Liu Y S, Gao S, Hu Z C, Gao C G, Zong K Q, Wang D B. 2010a. Continental and oceanic crust recycling-induced 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.
- Liu Y S, Hu Z C, Zong K Q, Gao C G, Gao S, Xu J, Chen H H. 2010b. Reappraisal and refinement of zircon U-Pb isotope and trace element analyses by LA-ICP-MS[J]. *Chinese Science Bulletin*, 55(15): 1535-1546.
- Loiselle M C, Wones D R. 1979. Characteristics and origin of anorogenic granites[J]. *Geological Society of America Abstracts with Programs*, 11(7): 468.
- Ludwig K R. 2004. Isoplot/Ex, a geochronological toolkit for Microsoft Excel, Version 3.00. [J]. Berkeley Geochronology Center, Berkeley, CA.
- Maniar P D, Piccoli P M. 1989. Tectonic discrimination of granitoids[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 101(5): 635-643.
- Marty B, Pik R, Gezahegn Y. 1996. Helium isotopic variations in Ethiopian plume lavas; nature of magmatic sources and limit on lower mantle contribution[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 144(1-2): 223-237.
- Meshesha D, Shinjo R. 2007. Crustal contamination and diversity of magma sources in the northwestern Ethiopian volcanic province[J]. *Journal of Mineralogical and Petrological Sciences*, 105(5): 272-290.
- Meshesha D, Shinjo R. 2008. Rethinking geochemical feature of the Afar and Kenya mantle plumes and geodynamic implications[J]. *Journal of Geophysical Research*, 113, B09209.
- Patiño Douce A E. 1997. Generation of metaluminous A-type granites by low-pressure melting of calc-alkaline granitoids[J]. *Geology*, 25(8): 743-746.
- 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.
- Peccerillo A, Taylor S R. 1976. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, northern Turkey[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 58(1): 63-81.
- Peng Z X, Mahoney J J. 1995. Drillhole lavas from the northwestern Deccan Traps, and the evolution of Réunion hotspot mantle[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 134: 169-185.
- Pik R, Deniel C, Coulon C, Yirgu G, Hofmann C, Ayalew D. 1998. The northwestern Ethiopian Plateau flood basalts; classification and spatial distribution of magma types[J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 81(1-2): 91-111.
- Reichow M K, Saunders A D, White R V, Al' Mukhamedov A I and Medvedev A Y. 2005. Geochemistry and petrogenesis of basalts from the West Siberian Basin: An extension of the Permo-Triassic Siberian Traps, Russia[J]. *Lithos*, 79(3-4): 425-452.
- Riley T R, Leat P T, Pankhurst R J, Harris C. 2001. Origins of large volume rhyolitic volcanism in the Antarctic Peninsula and Patagonia by crustal melting[J]. *Journal of Petrology*, 42(6): 1043-1065.
- Ritsema J, Heijst V H J, Woodhouse J H. 1999. Complex Shear Wave Velocity Structure Imaged Beneath Africa and Iceland[J]. *Science*, 286(5446): 1925-1928.
- Rooney T, Furman T, Bastow I, Ayalew D, Yirgu G. 2007. Lithospheric modification during crustal extension in the Main Ethiopian Rift[J]. *Journal of Geophysical Research*, 112, B10201.
- Schilling J G. 1973. Afar Mantle Plume: Rare Earth Evidence[J]. *Nature*, 242: 2-5.
- Sheth H C, Pnande K, Bhutani R. 2001. ^{40}Ar - ^{39}Ar ages of Bombay trachytes: Evidence for a Palaeocene[J].

- Geophysical Research Letters, 28(18): 3513-3516.
- Skjerlie K P, Johnston A D. 1992. Vapor-absent melting at 10 kbar of a biotite- and amphibole-bearing tonalitic gneiss: Implications for the generation of A-type granites[J]. *Geology*, 20: 263-266.
- Stern R J, Ali K A, Liegeois J P, Johnson P R, Kozdroj W, Kattan F H. 2011. Distribution and significance of pre-Neoproterozoic zircons in juvenile Neoproterozoic igneous rocks of the Arabian-Nubian Shield[J]. *American Journal of Science*, 310(9): 791-811.
- Stewart K, Rogers N. 1996. Mantle plume and lithosphere contributions to basalts from southern Ethiopia[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 139(1-2): 195-211.
- 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 Publications, 42(1): 313-345.
- Taylor S R, McLennan S M. 1981. The composition and evolution of the continental crust; rare earth element evidence from sedimentary rocks[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 301(1461): 381-399.
- Teklay M, Asmerom Y, Toulkeridis T. 2005. Geochemical and Sr-Nd isotope ratios in Cenozoic basalts from Eritrea: evidence for temporal evolution from low-Ti tholeiitic to high-Ti alkaline basalts in Afro-Arabian continental flood basalt province[J]. *Periodico di Mineralogia*, 74(3): 167-182.
- Whalen J B, Currie K L, Chappell B W. 1987. A-type granites: geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 95: 407-419.
- Whalen J B, Jenner G A, Longstaffe F J, Hegner E. 1996. Nature and evolution of the eastern margin of Iapetus: geochemical and isotopic constraints from Siluro-Devonian granitoid plutons in the New Brunswick Appalachians[J]. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 33(2): 140-155.
- Xu Y G, Luo Z Y, Huang X L, He B, Xiao L, Xie L W and Shi Y R. 2008. Zircon U-Pb and Hf isotope constraints on crustal melting associated with the Emeishan mantle plume[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 72(13): 3084-3104.
- Yan J M, Sun G S, Sun F Y, Li L, Li H R, Gao Z H, Hua L, Yan Z P. 2019. Geochronology, Geochemistry, and Hf Isotopic Compositions of Monzogranites and Mafic-Ultramafic Complexes in the Maxingdawannan Area, Eastern Kunlun Orogen, Western China: Implications for Magma Sources, Geodynamic Setting, and Petrogenesis[J]. *Journal of Earth Science*, 30(2): 335-347.
- Yang J H, Wu F Y, Chung S L, Wilde S A, Chu M F. 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.