

doi:10.3969/j.issn.1007-3701.2018.01.002

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^{*}

姚华舟¹, 陈开旭¹, 王建雄¹, 杨振强¹, 韦延光², 李闫华¹, 徐景银³, 孙为国³

YAO Hua-Zhou¹, CHEN Kai-Xu¹, WANG Jian-Xiong¹, YANG Zhen-Qiang¹, WEI Yan-Guang²,

LI Yan-Hua¹, XU Jing-Yin³, SUN Wei-Guo³

(1.中国地质调查局武汉地质调查中心, 武汉 430205; 2.中国地质调查局, 北京 100037;

3.湖北省地质局地球物理勘探大队, 武汉 430056)

摘要: 本文应用岩浆岩地球化学图解对东非裂谷系统(EARS)火山岩的岩石地球化学数据进行处理, 重点回顾和讨论埃塞俄比亚大裂谷(MER)、阿法(Afar)盆地及肯尼亚裂谷火山作用的构造环境和地幔柱成因。MER火山岩的岩石类型具双峰式火山岩套特征, 以高Ti的大陆溢流玄武岩(CFB)-大陆洋岛玄武岩(OIB)-流纹岩系列为主, 缺少中性岩, 是来自地幔柱岩浆分异的结果, 与板块俯冲作用无关。阿法(Afar)盆地和红海为CFB-MORB系列。肯尼亚裂谷(KR)及埃塞俄比亚大裂谷最南端图尔卡纳盆地只见以大陆OIB, 缺乏流纹岩。EARS是一个主动型地幔柱, 由地幔上涌冲击地壳底部而成, 其火山岩以富集常量元素Ti、Fe和Mg, 富集高场强元素Nb、Ta和相容元素V、Cr、Co和Ni为特征。绝大多数EARS火山岩的Nb/Zr>0.04和Ta/Hf比值>0.1, 在地球化学-构造环境判别图上落在板内火山岩的范围内(大洋板内和地幔柱), 集中在Nb/Zr>0.15和Ta/Hf比值>0.3范围内的火山岩样品可能为主动地幔柱成因。根据La/Nb、Ce/Pb和Ba/La比值, 地幔柱成因的MER火山岩可分为受地壳混染地幔和未受地壳混染的原始地幔两种类型。La/Nb(≤ 1)、Ce/Pb(30~50)、Ba/Nb比值(>10)和La/Yb ≤ 12 是来源于未受地壳混染原始地幔的重要判别标志。地球化学证据(微量元素, Sr-Nd-Pb-He同位素)表明, MER-阿拉伯-也门地幔柱起源于深部核-幔边界的HIMU。MER-Afar的前裂谷和同裂谷火山岩(50~12 Ma)具有高的³He同位素标志(R/Ra比值>16.4)说明其非洲板块之下存在一个深藏的地幔岩浆源深度大于670 km, 位于石榴子石-尖晶石橄榄岩过渡带(图6b、c、d)。MER-Afar大火山岩省及其最南端图尔卡纳湖和肯尼亚地体(克拉通, 改造的克拉通边缘和活动带)深部地壳底部之下的HIMU地幔可能是导致裂谷型的OIB和CFB异常发育的岩浆源区, 而Afar洼地(吉布提)、红海和亚丁湾形成于后裂谷期(5~0 Ma)的MORB和亏损LREE玄武岩则归因于HIMU、富集地幔(EM₁-EM₂)与DM混合地幔源的熔融, 其岩浆源区地壳拉张减薄带之下的尖晶石橄榄岩区。

关键词: 东非裂谷系统(MERS); 火山岩地球化学标志; 主动地幔柱; 无混染地幔

中图分类号: P581

文献标识码: A

文章编号: 1007-3701(2018)01-010-12

Yao H Z, Chen K X, Wang J X, Yang Z Q, Wei Y G, Li Y H, Xu J Y, Sun W G. The geochemical criteria of mantle plume origin for Cenozoic volcanism, Eastern African Rift System (EARS). *Geology and Mineral Resources of South China*, 2018, 34(1):10-21.

Abstract: Based on the compilation of published geochemical data by utilizing the geochemical software of igneous petrology to deal with litho-geochemical data of Eastern African Rift System (EARS), this paper discusses and reviews the tectonic setting and mantle plume origin for the volcanism of Main Ethiopia Rift (MER), Afar depression and Kenya Rift. The volcanic types of MER are composed of high-Ti continental

收稿日期: 2017-11-17; 修回日期: 2018-1-10

基金项目: 商务部援外项目(2007 援外技合作字第 41 号); 科技部国际合作项目(2009DFA20630)联合。

第一作者: 姚华舟(1962-), 男, 博士, 研究员, 主要从事综合地层学、区域地质调查和境外地质调查研究工作, E-mail: yexc2009@126.com.

flood basalt(CFB)-continental ocean island basalt(OIB)-rhyolite series, which are bimodal volcanic suites with lack of intermediate rocks. These rock series may be considered to be generated by gravitational differentiation of mantle plume, and therefore their origin is not related to slab subduction. Afar depression and Red Sea display CFB-MORB series. Kenya Rift and the Turkana depression (the most southern part of MER) show continental OIB-type only with lack of rhyolites. EARS is a result of a large, active mantle plume impinging upon the base of continental crust. All of their volcanic rocks are characterized by enrichment of main elements of Ti, Fe and Mg, trace elements (HFSE) of Nb and Ta, and metal elements of V, Cr, Co and Ni. Almost EARS's volcanic rocks have ratios of $Nb/Zr > 0.04$ and $Ta/Hf > 0.1$, and present on the discrimination diagrams of geochemical-tectonic setting in the intraplate basalt area (within oceanic plate and mantle plume), in which the volcanic rocks with high ratios of $Nb/Zr > 0.15$ and $Ta/Hf > 0.3$ are related to mantle plume origin. According to La/Nb, Ce/Pb and La/Ba ratios, however, the rocks derived from mantle plume may be classified into two types: primary mantle and mantle contaminated by continental crust. The important criteria to determine the uncontaminated primary mantle mainly depend on the ratios of La/Nb (≤ 1), Ce/Pb (30~50), Ba/Nb (> 10) and La/Yb (≤ 12). Geochemical evidence (trace elements, Sr-Nd-Pb-He isotopic ratios) display that the mantle plumes of MER-Saudi Arabia-Yemen are originated from the core-mantle boundary. The MER-Afar's pre- and syn-rift volcanic rocks (50~12 Ma) with a high- 3He component (up to 16.4 Ra) originate from HIMU suggesting that there are a large, deeply sited mantle source at depths below 670 km beneath the African plate, which is located within a mixture area of spinel-garnet peridotite transition zone. The HIMU mantle below the deeply sited base of the lithosphere, underlain MER-Afar large igneous province, Kenya dome (craton, reworked craton margin and mobile belt) and Turkana depression, maybe a igneous source to create a number of rift-type of OIB and CFB's development, whereas the post-rift MORB and depleted LREE basalt erupted in Afar depression (Djibouti), Red Sea and Aden Gulf are interpreted as a result of plume-derived melts from mixing of HIMU, enriched mantle (EM_1-EM_2) and DM, whose igneous source originates from a area of spinel-garnet peridotite beneath the crust thinning and extension zone.

Key words: eastern African rift system (EARS); volcanism, active mantle plume; geochemical criteria; uncontaminated mantle

自南而北贯穿在东非高原上的东非裂谷系统(EARS)是世界上最大和最长的新生代陆内深裂谷。其中,研究得最详尽的地段是位于EAR中部的主体部分埃塞俄比亚大裂谷(MER)、阿法(Afar)洼地及其以南的肯尼亚裂谷(KR)。研究EARS新生代裂谷火山岩的意义在于它提供一个由主动型地幔柱的大陆板内裂谷演变为初始大洋(红海和亚丁湾)的典型范例。它的大陆溢流-裂谷火山岩岩石类型、地球化学特点及其演化模式(断裂-地壳减薄系统)具有独特的陆内裂谷特征,显然不同于板块汇聚边缘和弧后扩张带,其构造环境及成因具有全球性的对比意义,与世界上三大大陆玄武岩(印度、西伯利亚和峨眉山大火成岩省)之一的二叠纪峨眉山玄武岩相似。

此外, MER的渐新世火山凝灰岩和火山碎屑

还可追索到距离该裂谷 2700 km 以外的印度洋深海钻井中。岩石地球化学特征、古生物地层学、古地磁学、Pb、O 同位素学地球化学和古气候学的对比研究表明,产于EOGM全球寒冷气候事件之后的渐新世火山碎屑,与埃塞俄比亚至也门相同时代的火山熔结凝灰岩的化学成份完全可以对比。这对于解释印度洋板块和EAR的古构造运动以及全球古气候变暖都具有相当重要的科学参考价值。

本文是国际合作研究项目的部分成果之一。其中,岩石化学数据主要根据中国-埃塞俄比亚联邦民主共和国的矿产地质调查和资源开发合作项目的区域岩石分析资料^{[1]①-④}和公开发表MER的岩石地球化学文献^[2-26],应用Minpet2.0岩浆岩地球化学作图软件^[27]进行处理,并与峨眉山大火成岩省地幔柱头成因苦橄玄武岩和流纹岩的地球化学特征^[28-30]

相比较。目的在于通过回顾 EAR 裂谷火山岩若干地球化学标志,揭示主动地幔柱成因的陆内裂谷火山岩演化规律,作为划分非造山带火山岩的参考依据。

1 主动地幔柱的 CFB-OIB-MORB 火山岩及其构造演化模式

EARS 经历了前-裂谷(45–32 Ma)、裂谷(26–12 Ma)和后-裂谷(5–0 Ma)三个演化阶段^[19]。始新世或更早以前为前-裂谷阶段^[8],MER 壳下的地幔热柱使深部熔岩以岩墙形式侵入或涌出地表,渐渐形成了(火山)熔岩高原,发育了中生代(晚侏罗世–白垩纪)的高原大陆溢流玄武岩(CFB)^[1–3]。

裂谷早期,以埃塞俄比亚高原为中心发生断裂和地壳扩张减薄两种形式交替的构造活动,在 MER 裂谷边界的地壳产生一系列的断裂系统(NW 侧边界为 SDFZ 断裂带,SE 侧边界为 WFB 断裂带)。随着大陆不断地扩张,沿该断裂系统向南发展为 KR 裂谷^[11],向北发展成为 Afar 洼陷一直延伸到红海南部,开始了裂谷型的玄武岩浆侵入活动和裂谷后的火山爆发^[2–3]。始新世(50 Ma)至第四纪 MER-Afar 及其以南的 KR 火山岩演化为主动地幔热柱的 OIB-MORB^[10–11]。

后-裂谷阶段的裂谷火山岩岩石类型是以高钛拉斑玄武岩系列(碱性基性系列)和大陆溢流玄武岩(CBF)为主,向东北方向与红海和亚丁湾构成一个三叉裂谷的西南分枝(夭折裂谷),演变为双峰式裂谷火山岩。最后在三叉裂谷中心演变为第四纪洋中脊玄武岩(MORB)和类似洋岛玄武岩的大陆 OIB^[12–14]。

EARS 火山岩是双峰式的火山岩套^[4]。基性火山岩以拉斑玄武岩系列为主,少量为钙碱性系列。其中,包括了渐新–中新世 CFB-MORB、流纹岩^[2–7]和 Afar 第四纪–现代的亏损 LREE 玄武岩^[20–21]。资料表明,该火山岩套的下部为含橄榄碱性玄武岩、拉斑玄武岩、粗面玄武岩(夏威夷岩)和歪长粗面岩,上部为夏威夷岩和橄榄粗安岩。中新–上新世后由夏威夷岩、含橄榄石拉斑玄武岩、拉斑玄武岩等组成^[8]。位于 MER 的西侧的埃塞俄比亚西北部阿西姆(Axum)地区为碱玄岩系列(碱性玄武和碱性流纹岩)^[9]。该火山岩套上覆的‘主硅质岩组’响岩(碱流纹岩)为层状的超碱性熔结凝灰岩。MER 北部与

阿法盆地交界附近的呈 EW 向分布的也雷–图卢–韦勒尔(Y–T–W)断裂裂谷以南地区盛产渐新–更新世“双峰式”玄武–流纹质火山岩^[15]。MER 南部的渐新–更新世玄武岩和流纹质火山碎屑岩也具“双峰式”火山岩特色^[16]。KR 裂谷只见 OIB^[11],不存在 MORB(图 1),意味着其成因与地幔热柱的活动有密切的成因联系。

CFB 和 OIB 的广泛发育是主动地幔柱裂谷特有的典型特征。其基性火山岩在 MAF 图解上(图 1),KR 玄武岩分布在 OIB 范围内,而 MER 和 Afar 的火山岩主要分布在 CFB 和 MORB 范围内。中酸性的响岩、粗面岩和流纹岩则落在扩张中心岛(即陆内扩张盆地)的范围内,是地幔岩浆分异结晶的结果。据图 1 所示,EARS 裂谷火山岩的构造环境演化途径可划分为 CFB→OIB 演化模式(KR 裂谷)和 CFB→MORB–扩张中心岛(MER、Afar 和红海)演化模式。EARS 裂谷内以缺乏岛弧型 IAB 而区别于主动大陆边缘裂谷。由此可见,CFB 和 OIB 火山岩是地幔柱成因裂谷火山岩区别于板块汇聚边界弧火山岩的重要岩石学标志,具有典型意义。

2 主动地幔柱裂谷的岩石地球化学特征

2.1 常量元素

EARS 火山岩在常量元素和微量元素的 SiO₂ 变异图上表现为“双峰式”的分布模式(图 2a),分别分布于中–基性和中–酸性的范围内。基性火山岩的常量元素以高 Ti (TiO₂>2%)、高 Fe 和高 Mg (MgO>3%)为特征,缺少安山岩,而中–酸性岩(SiO₂含量 59.05%~75.23%)以低钛、低铁,低镁及高钠、高钾的碱性岩为特征。在 Afar 洼地和吉布提还发现有亏损 LREE 玄武岩^[21–22]。Afar 洼地第四纪至现代的亏损 LREE 玄武岩具有较高的 Ti、Fe 和 Mg,属于典型的 CFB 玄武岩(图 1)。

在 SiO₂ 变异图解上,基性和酸性火山岩的 Yb、Y 两元素随 SiO₂ 含量的增加呈正相关变化关系(图 2b、c),恰好与主动大陆边缘岛弧型火山岩的 Yb、Y 与 SiO₂ 含量呈负相关的变化趋势相反,证明了 EARS 火山岩与板块俯冲作用无关。Sr 在 Sr–SiO₂ 变异图解上,分布在地幔源区和地壳分异结晶区两个不同的范围内,形成于两个不连续的分异趋势(图略)。TiO₂ 随 SiO₂ 含量的增加呈明显递减的变

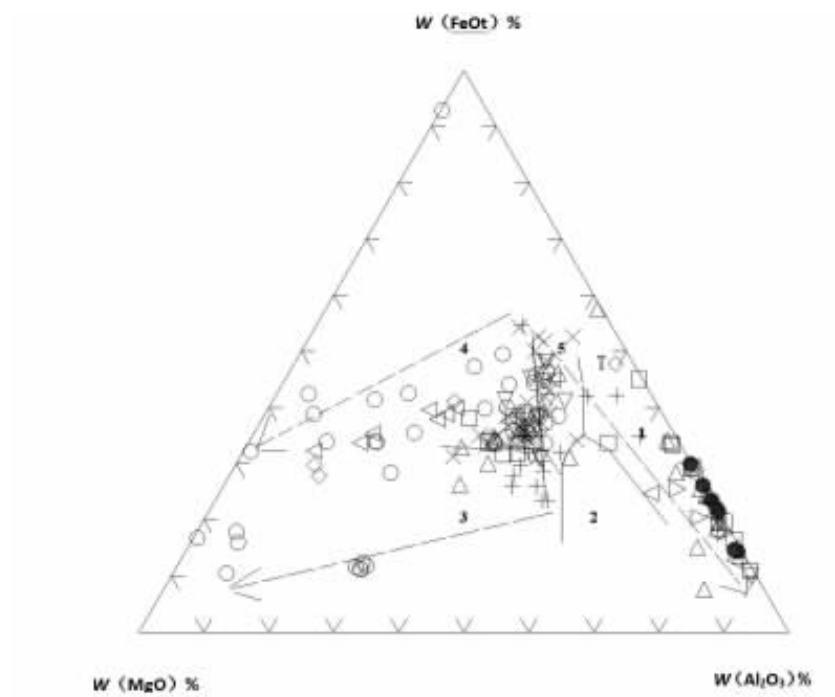


图1 EARS火山岩常量元素MAF地球化学图解

Fig.1 GeochemicalMAF diagrams of main elements for EARS's volcanic rocks

1-扩张中心岛(即大陆裂谷和陆内扩张盆地), 2-造山带岛弧玄武岩(IAB), 3-洋中脊玄武岩(MORB), 4-洋岛玄武岩(OIB), 5-大陆溢流玄武岩(CFB). 箭头表示构造环境演变的趋势。

图例: ×MER-阿法盆地的渐新-中新世裂谷型CFB-OIB玄武岩^[12,4-5,7-8,21]和绍阿省至红海南部中新世-现代裂谷型的“双峰式”火山岩^[6]; +阿法盆地曼达 Hararo玄武岩和吉布提第四纪亏损LREE玄武岩^[21-22]和红海南部Ramad海山、Zibair岛、也门Hamdan和沙特阿拉伯Jizan的第四纪碱性玄武岩(OIB-MORB)^[14]; ΔMER北部阿西姆地区渐新-中新世“双峰式”(CFB)碱性玄武岩、响岩和粗面岩^[9]和Y-T-W断裂裂谷以南的渐新-更新世“双峰式”碱性质火山岩^[15-16]; ●亚丁湾DSDP 231的上新-更新世后-裂谷型的英安-流纹质微粒火山碎屑^[24]; ▽印度洋ODP的711 A钻井岩芯的渐新-更新世流纹质火山碎屑^[18]; ▽MER最南端图尔卡纳湖始新世(32-50Ma)前-裂谷型的CFB玄武岩^[19,26]和Y-T-W断裂前-裂谷(24.3-35Ma)玄武岩^[15]; ◁MER中新世(12-22Ma)同-裂谷型流纹岩^[6]、Y-T-W断裂同-裂谷型(5.92-7.64Ma)玄武-英安岩^[15]和MER最南端图尔卡纳湖同-裂谷型的玄武岩(CFB-OIB)^[19,26]; □MER及其最南端图尔卡纳湖至肯尼亚的后-裂谷型玄武岩^[19,26]、上新-更新世至现代(0-5Ma)流纹岩^[6]、第四纪流纹质火山碎屑^[23,25]和Y-T-W断裂的后-裂谷型流纹岩^[15]; ◇峨嵋山大火成岩省二叠纪苦橄玄武岩(OIB)和晚期流纹岩^[28-30]和本区新生代裂谷火山岩的区域平均值(标记为T)^[1]; ○肯尼亚裂谷的始新世至现代裂谷型的霞岩-苏长玄武岩(OIB)系列^[11]和埃塞俄比亚塔纳湖的渐新-更新世裂谷型橄榄岩捕虏体和围岩^[10,29]。

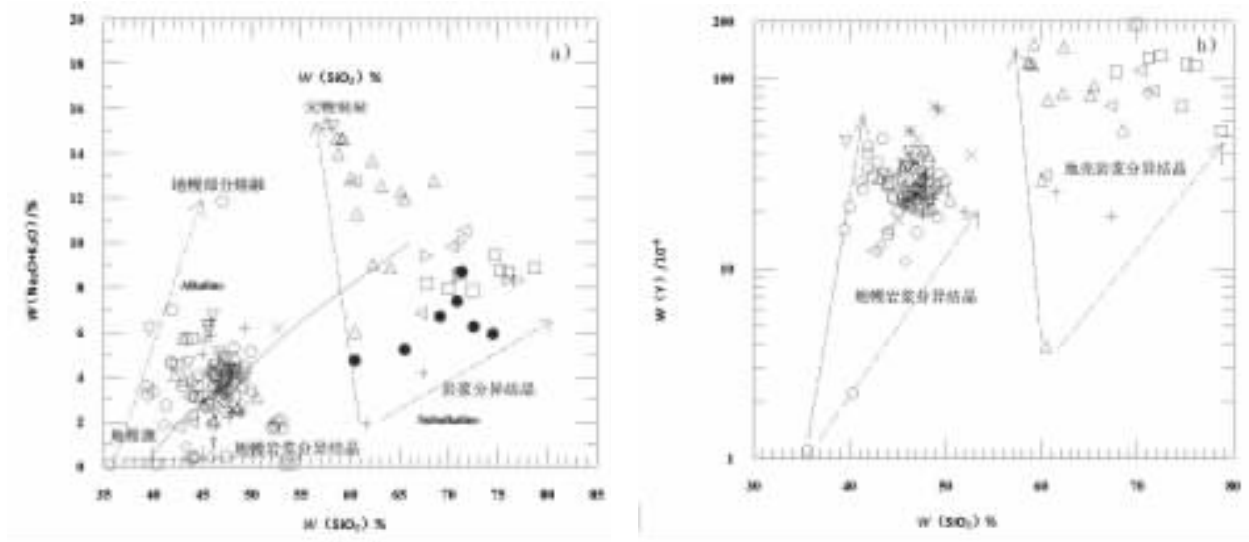
化趋势(图略)。显然,酸性火山岩来源于深部玄武质岩浆分异并混染各种陆源成分的特征,这可以在同位素地球化学特征上得到证实(例如, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.70489\sim 0.70651$, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.51254\sim 0.51283$ 和 $\delta^{18}\text{O} = +4.5\sim +6.4\%$ 等)^[2-3]。

EARS流纹岩在 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ 哈克图上,落在裂谷+大陆造陆隆升的构造环境内(图略),证明其母岩区为陆内非造山环境。印度洋ODP的711A钻井岩芯中所见的渐新-更新世流纹质火山碎屑的常量元素组成与MER图尔卡纳(Turkana)湖的流纹质火山碎屑相近(图2a),也落在陆内非造山环境中

(图略),暗示其火山物质来源是由EARS(埃塞俄比亚的库塔贝尔Kuta Ber地区至也门萨纳Sana'a地区)提供的^[17-18]。相比之下,亚丁湾DSDP 231钻井的上新-更新世流纹质微粒火山碎屑^[24]在 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ 图解上具有更低的 Al_2O_3 含量,显示为裂谷型火山喷发性质。

2.2 微量元素和稀土元素

EARS基性火山岩的微量元素大离子亲石元素Ba相当富集,但不富集Rb和Th。高场强元素Zr、Nb和相容元素V、Cr、Co、Ni,稀土元素和Y也比较富集。在原始地幔标准化蛛网图上以富集Ba、

图2 EARS火山岩的X-SiO₂变异图解Fig. 2 X-SiO₂ variation diagrams for EAR's volcanic rocks (Legend as in Fig. 1)a)(Na₂O+K₂O)-SiO₂图解:alkaline碱性玄武岩系列,subalkaline亚碱性玄武岩系列;b)Y-SiO₂图解:图例同图1.

Nb、Ta、La、Ce、P 和 Nd 为特征表现为左侧隆起并且向右倾斜的曲线。这种非俯冲成因的陆内火山岩典型蛛网图(图略),可划分为高钛拉斑玄武岩(30 Ma,地幔源)和低钛流纹岩(地壳分异成因)两种基本曲线类型,以及它们之间的过渡类型^[31-33]。前者是一条大离子亲石元素突起的向右倾斜的曲线,在标准化蛛网图上表现为具有弱的 Cs、Th、U、K、Pb、Yb 和 Lu 低谷,没有明显的 Nb 和 Ta 低谷,不属于岛弧型的曲线类型,显示其未受地壳混染的原始地幔特征;后者为低 Mg 酸性火山岩,在标准化蛛网图上显示 Cs、Th、Ta 和 Ti 低谷和 Sr 凸起的曲线类型,代表受地壳混染岩石圈地幔岩浆的分异结晶作用。

2.3 Ti、Mg、Fe 和微量金属元素的来源

EARS 火山岩富集常量元素 Ti、Fe、Mg 和微量金属元素 Ni、Cr、Co、V、Cu、Zn 等。MgO>3.5 者显然来源于地幔,暗示其玄武岩的源区与上地幔的部分熔融有成因联系。在 CaO/Al₂O₃-MgO 图解和 FeOt-MgO 图解(图 3b)上可以展示出 Mg 和 Fe 元素的分异演化途径。图 3a 上显示 Cr(和 Ni)的富集发生在 MgO>10 的范围内,高 Ni(>300×10⁻⁶)、高 Cr(>700×10⁻⁶)、高 FeOt 和高 Co 含量是上地幔局部熔融结果,其次与岩浆源区的橄榄石强烈分异以及裂谷晚期地壳岩浆结晶分异有关(图 3a、b)。

3 EARS 火山岩的地幔成因和源区

3.1 非板块俯冲的地球化学标志

微量元素中耐熔的高场强元素 Th、Nb、Zr、Ta、Hf 和 REE 的比值具有指示大地构造环境的意义。研究表明,它们的比值(Nb/Zr、La/Zr 和 Ta/Hf)不但适用于基性,也适用中酸性板内火山岩构造环境和成因的判别^[34-38]。

通常 Nb/Zr 比值>0.04 和 Ta/Hf 比值>0.1 是划分板内和岛弧环境的分界线标志。如图 4 所示, EARS 火山岩全部样品的 Nb/Zr 比值>0.04 和 Ta/Hf 比值>0.1, 在微量元素地球化学-构造环境判别图解上都是落在大陆板内环境、地幔柱、大洋板内玄武岩区内:显示在 Th/Hf-Ta/Hf 图解(图 4)上,几乎缺乏大陆边缘拉张带(初始裂谷)样品,相当多的样品集中在地幔热柱和大洋板内玄武岩区内;在 La/Zr-Nb/Zr 图解(图略)、Nb-Y 图解(略)和 Rb-(Y+Nb)图解上(略)都分布在板内裂谷玄武岩范围内,也明显地缺乏大陆边缘拉张带(初始裂谷)和陆-陆碰撞带的样品,证明其成因与地幔引起的 CFB 和 OIB 岩浆分异作用有关,与板块俯冲无关。

高 Nb 和 Ta 含量的特征对于判别地幔热柱成因玄武岩至关重要。EARS 基性火山岩、新生地裂

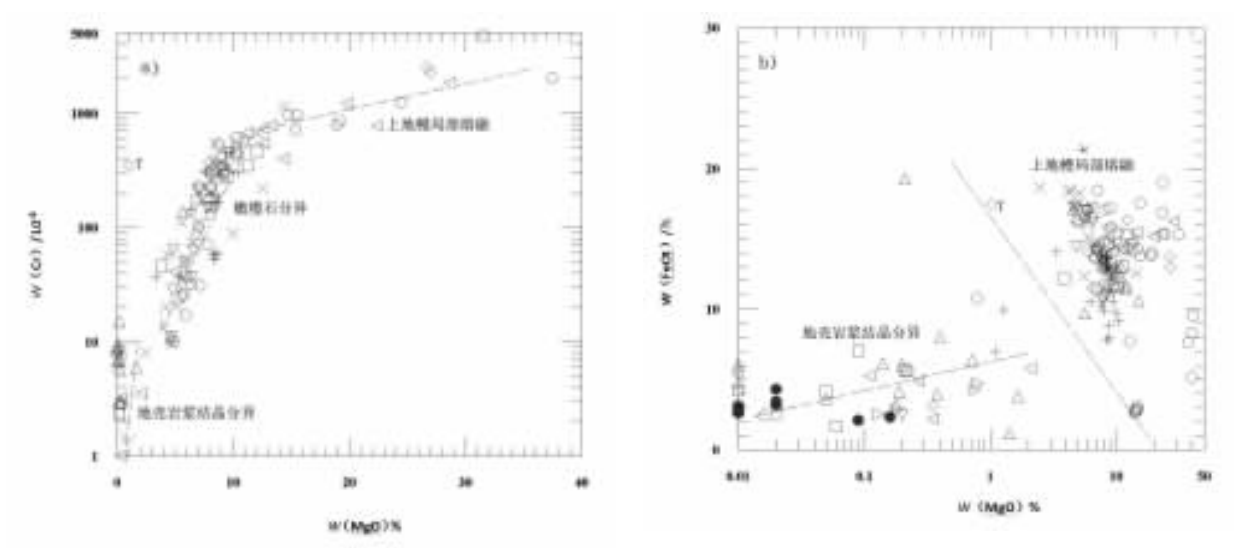


图3 EARS火山岩X-MgO变异图解

Fig. 3 X-MgO variation diagrams for EARS's volcanic rocks (Legend as in Fig.1)

a)Cr-MgO图解;b)FeO-MgO图解;图例同图1.

谷火山岩的区域平均值^[1]和峨眉山玄武岩都落在板内范围内(图4a),而且比较集中在地幔热柱和大洋板内玄武岩区内(图4d),显示其地幔柱成因。在Th/Yb-Ta/Yb图解上,绝大多数EARS火山岩样品落在板内玄武岩(WPB,地幔热柱成因)的范围内,无样品落在主动大陆边缘(ACM)的范围内,证明本区火山岩与板块的碰撞环境无关。

3.2 混染和未被混染的地幔岩浆源

地幔柱学说是20世纪六十年代兴起的新理论,对于促进大陆板内的大火成岩省、大陆裂谷、三叉裂谷、大洋板内和板块发散边界玄武岩的构造环境及成因研究起着重要推动作用,大大地提高了MORB和大陆板内(包括我国西南地区峨眉山大火成岩省和“三江”地区)地幔热柱成因玄武岩及其含矿性的研究水平^[40-43],对于确定裂谷火山岩的地幔柱成因无疑有重要的理论参考意义。

根据岩石地球化学特征,判别火山岩来自原始地幔标志是:以(Th/Nb)_N<1、Nb/La比值>1、Nb/Ta比值(=17.5)^[44]、低⁸⁷Sr/⁸⁶Sr(i)比值以及与OIB相似的La/Nb和La/Ba比值为标志^[31-33]。按照Ba/Nb比值(≤10)、La/Nb比值(≤1)、Ce/Pb比值(>30)^[2-3]和Nb/U比值(>50)^[45]作为鉴别地幔柱源岩浆的重要标志,可以识别出两种EARS基性火山岩类型:受地壳混染的地幔和无混染的原始地幔。在Ba/Nb-La/

Nb图解上显示,未受地壳混染的基性火山岩(图5a左下角)分布在原始地幔范围内(Ba/Nb≤10,La/Nb比值(≤1),受HIMU地幔制约。本区新生代裂谷火山岩的区域平均值^[1]也落在此范围内,而受地壳混染的地幔源基性和中酸性火山岩则分布于Ba/Nb比值>10的范围内,显然EM地幔起重要作用。

在Nb-Ta-Zr/Sm图解(图5b)上,绝大多数基性火山岩沿着原始地幔线(Nb/Ta=17.5)^[46]分布于板内火山岩带(WBP)范围内,表明其物质源区为大陆板内地幔。MER西北部阿西姆地区和阿法盆地少数渐新世-现代火山岩以及部分峨眉山晚期玄武岩和流纹岩落在Zr/Sm>30~50的范围内,暗示着这些地区的玄武岩和流纹岩是地幔源岩浆侵入过程中TTG(或玄武质下地壳)局部熔融的产物,并遭受强烈混染作用。

实际资料显示,La/Nb-Ce/Pb图解(图6)也能准确地显示受地壳混染和无混染裂谷火山岩的地球化学判别标志。Ce/Pb比值在该图中用于区别和划分地壳、壳-幔混染带和未受混染地幔方面更为可靠。据的研究,未受地壳混染MER裂谷火山岩都分布于地幔线(La/Nb比值≤1)之下。还可识别出:地壳源的火山岩分布于Ce/Pb比值≤5~10的范围内(壳-幔混染带),Ce/Pb=10~30为混染地幔,Ce/Pb>30~50者为未受地壳混染地幔源MER裂谷火

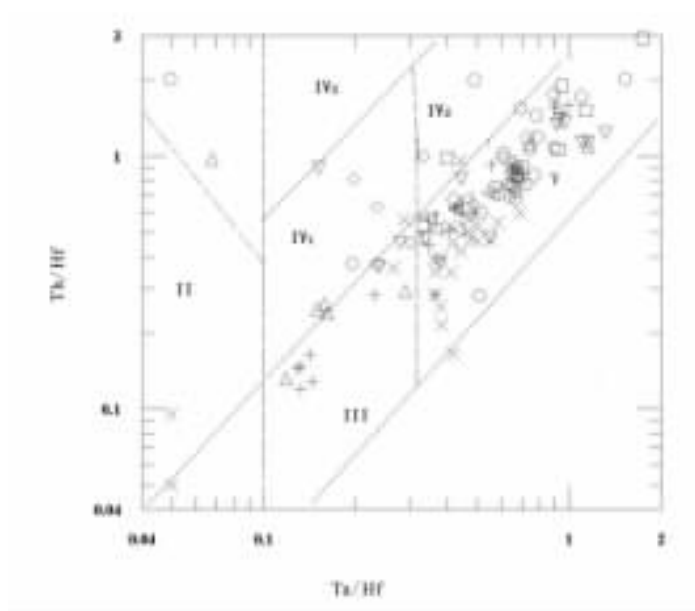


图4 MERS火山岩地球化学-构造环境图解

Fig. 4 Discrimination diagrams of geochem - tectonic setting for MERS's volcanic rocks (Legend as in Fig.1)

Th/Hf-Ta/Hf图解(图式仿汪云亮等,2001)^[30];III-大洋板内玄武岩区,IV1-陆内裂谷及陆缘裂谷拉斑玄武岩区,IV2-陆内裂谷碱性玄武岩区,IV3-大陆拉张带(或初始裂谷)玄武岩区,V-地幔热柱玄武岩区;图例同图1。

山岩^[2]。MER最南端图尔卡纳湖至肯尼亚的前-裂谷型玄武岩^[19,26]以及出露于翁吉断裂带(WFB断裂)NE地段第四纪裂谷玄武岩是无混染的岩石圈上地幔岩浆(Ce/Pb比值>30~50,La/Nb比值≤1),而大多数MER-Afar的渐新-中新世玄武岩(Ce/Pb=10~30)则受到地壳不同程度的混染(壳-幔混染和混染地幔)(图6)。

另外,在La/Yb-Yb图解上(图略),大多数EARS基性火山岩比较集中分布在La/Yb比值5~12的地幔范围内。KR裂谷型玄武岩分布在La/Yb比值>12的地壳混染区域,显示其地幔源区与峨眉山玄武岩相似,残留相为石榴子石结晶分离有关,而MER-Afar、红海和吉布提玄武岩则与板内火山弧的角闪石结晶分异作用有关。

3.3 地幔岩浆源区深度和性质

EARS裂谷系统的形成是活动地幔柱上涌演化的结果^[10]。前-裂谷的火山活动以断裂充填(岩墙、岩脉)和溢流为主^[12]。其中,MER裂谷的NW侧边界SDZF(锡提-德伯雷-泽伊特)断裂系统的CFB玄武岩的原始岩浆深度(100~130 km)比其SE侧边界的WFB(翁吉)断裂带的玄武岩的原始岩浆深度(30 km)要深得多。受地幔柱的活动的影响,SE侧

地壳比NW侧大大减薄^[2-3]。

裂谷早期的火山岩具有CFB和OIB的性质^[2-3,11-12,14-15],岩浆起源于上地幔橄榄石岩石圈至软流圈之间,裂谷晚期具有明显的地壳混染和结晶分异作用。根据对中新世-第四纪碱性火山熔岩的He和Sr-Nd-Pb同位素测试结果证明,MER-阿拉伯-也门裂谷不是单个地幔柱活动的结果^[33],其演化过程中存在两类以上地幔柱:(i)形成MER-Afar大火山岩省的地幔是一个大的以高³He同位素标志(R/Ra比值8.1~16.4,Ra为大气层He的³He/⁴He比值)为特征的地幔柱,起源于深部核-幔边界(D"层,深度2900 km),MER同-裂谷型的高钛CFB是来自深部地幔柱(上、下地幔分界以下,>670 km)的炙热物质所致,属于高铀/铅值地幔(HIMU型)和富集地幔(EM1-EM2)型的混合地幔源^[14];(ii)几个次一级的浅成地幔柱,例如MER北部分支的Y-T-W断裂裂谷为次一级的地幔隆起,源区分散展布于非洲板块深度500 km之下;(iii)KR裂谷与MER最南端图尔卡纳湖玄武岩之间的地幔源继承了埃塞俄比亚高原裂谷前的地幔性质,是具有高放射性Pb特征的HIMU地幔^[19,26];KR玄武岩³He同位素的R/Ra比值为5~10,其地幔柱起源于上地幔。微

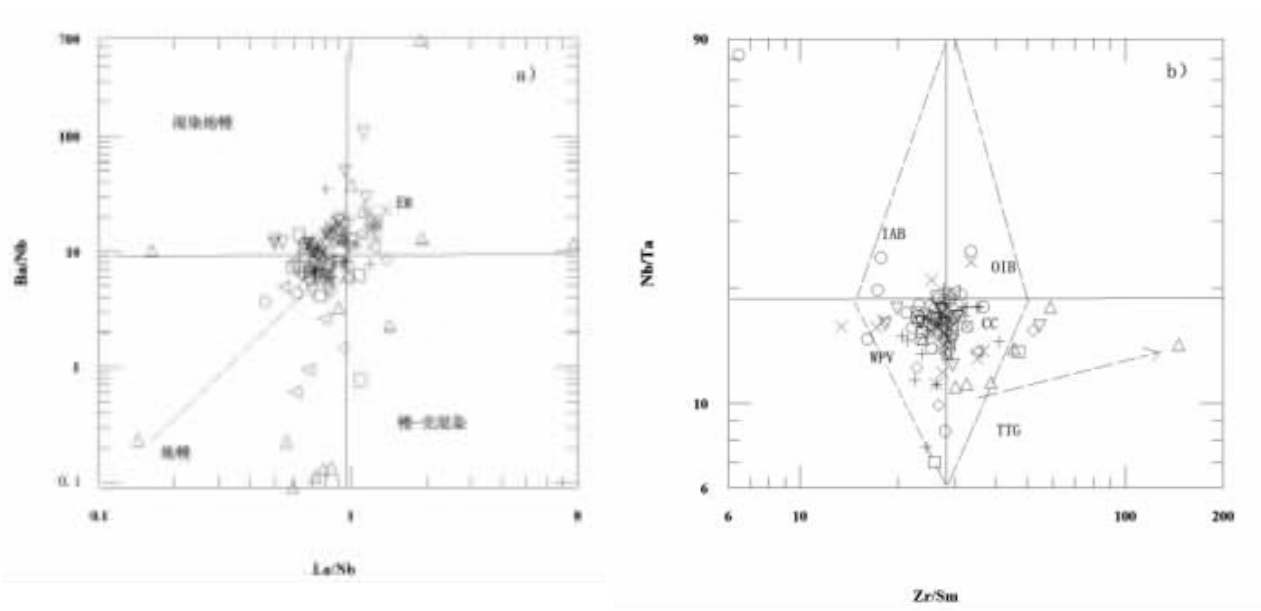


图5 EARS裂谷火山岩来源于无污染地幔和地壳污染地幔的判别图解

Fig. 5 Discrimination diagrams of EARS's volcanic rocks derived from uncontaminated mantle and contaminated mantle by crust (Legend as in Fig.1)

a)Ba/Nb-La/Nb图解(图式仿Furman,2006^[26]):右上角La/Nb比值 ≤ 1 和Ba/Nb比值 ≥ 10 的范围内代表原始地幔区,☆表示为HIMU地幔,EM为富集地幔;b)Nb/Ta-Zr/Sm图解(图式仿Richards& Kerrich,2007^[46]):Nb/Ta的地幔线和Zr/Sm的地幔线正交点为原始地幔值.南美洲安第斯山弧火山的范围:WPV板内火山岩带,OIB大陆洋岛玄武岩,CC大陆壳,MORB洋中脊玄武岩,IAB岛弧玄武岩,CC上地壳,TTG太古代的云英闪长岩-奥长花岗岩-花岗岩重熔物质来源区.图右下方的箭头表示岩石圈地幔岩浆源受TTG污染的演变趋势.图例同图1.

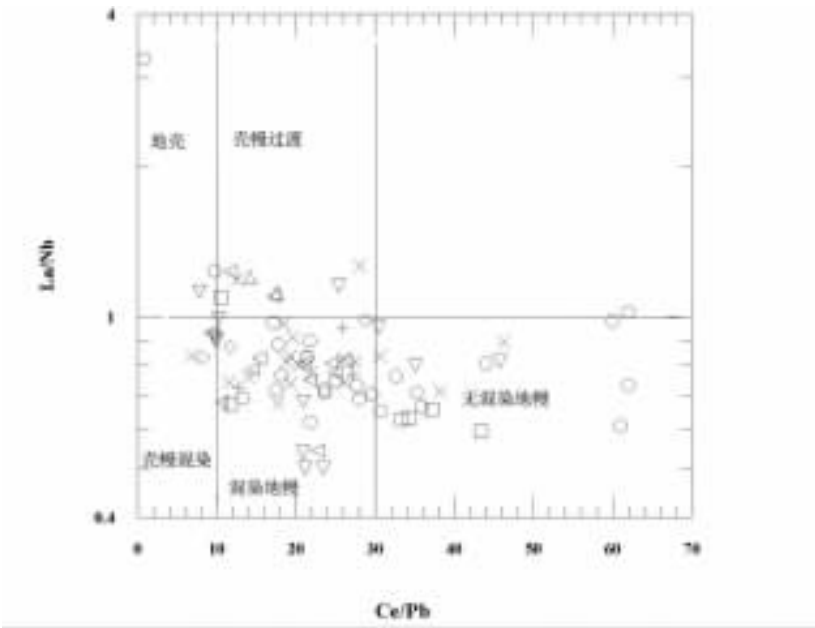


图6 EARS火山岩的La/Nb-Ce/Pb 地幔成因图解

Fig. 6 La/Nb-Ce/Pb diagrams for MERS's volcanic rocks derived from mantle (Legend as in Fig.1)

La/Nb-Ce/Pb图解(图式仿Rooney,2007^[2]):La/Nb ≤ 1 为地幔成因,Ce/Pb=5~10为地壳和壳-幔过渡带,Ce/Pb=10~30为地壳污染地幔,Ce/Pb=30~50为未遭受地壳污染地幔.图例同图1.

量元素和放射性 Sr-Nd-Pb-He 同位素数据表明, KR 的物质来源也不是由单一的地幔源, 而是 HIMU 和 EM1-EM2 混合地幔源^[41]。

上述各个地幔柱的玄武岩和苦橄岩的地球化学特征反映了它们岩浆源区的属性和深度的差别。根据 Rb/Sr-Ba/Rb 图解(图略)可以显示出各地幔柱岩浆源区残留相的差异。源区矿物组成分析结果显示, 裂谷早期源区残留相以角闪石为主, 而裂谷晚期源区残留相中含有大量金云母。来自金云母残留相分异的岩浆与角闪石残留相达到平衡的岩浆相比, 具有变化较大的 Rb/Sr 值(>0.06)和较低的 Ba/Rb 值(<20), 而来自角闪石残留相分异岩浆具有明显低于金云母残留相分异岩浆的 Rb/Sr 值(<0.06)和较大低的 Ba/Rb 值(>20)的特点^[48]。因此, 当裂谷早期源区残留相为角闪石时, 暗示源区残留相中含有辉石、石榴石, 地幔以石榴子石橄榄岩为主, 而裂谷晚期源区有金云母、金红石和榍石矿物残留时, 表示地幔的残留相以尖晶石(Sp)为主, 属于尖晶石橄榄岩, 导致熔体中亏损 Nb、Ta、Ti 元素。

由于石榴子石和尖晶石中的 REE 含量和在蛛网图上的配分曲线各不相同^[48], 导致岩石圈上地幔的上部和下部发生部分熔融时产生不同的 REE 分异特征。据此, 可以区别出其源区为石榴子石橄榄岩和尖晶石橄榄岩以及它们之间的过渡类型。大量研究表明, 石榴子石橄榄岩经低度部分熔融所生成的岩浆相对富集 LREE, HREE 显著分馏, 且具有较高的(Ce/Yb)_N 值; 而尖晶石橄榄岩部分熔融所生成的岩浆具有 HREE 相对平坦的稀土配分曲线形态^[48]。

在 Sm/Yb-Sm 图解(图 7a)上显示, 本区前-裂谷的 CFB 岩浆和裂谷早期 OIB 岩浆的岩石圈地幔部分熔融首先发生在石榴子石-和尖晶石橄榄岩混合的区域内。裂谷期 OIB 岩浆肯尼亚克拉通及其边缘活动带以及 MER 大量岩浆是在石榴子石橄榄岩稳定区范围内进行的部分熔融。在图 7a 上偏向集中于石榴子石橄榄岩平衡熔融曲线富集, 暗示源区的残留相中大量富集石榴子石; 而在裂谷晚期, 岩石圈地幔部分熔融趋向于发生在尖晶石橄榄岩平衡熔融曲线附近, 显示岩石圈拉张减薄作用起着主导地位。

裂谷演化过程岩石圈减薄的情况与 La/Sm-Sm/Yb 图解表示的结果完全一致, 肯尼亚克拉通及其边缘活动带和 MER-Afar 大火山岩省的玄武岩均落在原始地幔部分熔融线之上(图 7b), 但是

KR 玄武岩比 MER-Afar 大火山岩省、红海以及峨眉山玄武岩的具有更高的 Sm/Yb 值, 表明其玄武岩部分熔融程度相对较低。由于地幔中石榴子石橄榄岩的稳定深度大于 75 km, 这就说明引起 KR 裂谷爆发的地幔柱深度相对 MER-Afar 大火山岩省的埃塞俄比亚北部阿西姆地区 and 红海地区的深度要深得多。后者在图 7b 上处于尖晶石橄榄岩部分熔融线附近, 而且还混染有许多亏损地幔成分。

REE 的 Dy/Yb-La/Yb 图解^[48](图略)与上述两个图解(图 7a, b)表示的结果相同。MER-Afar 大火山岩省的玄武岩都落在石榴子石橄榄岩熔融线和石榴子石-尖晶石橄榄岩混合的范围内, 并且埃塞俄比亚塔纳湖的渐新-更新世裂谷型橄榄岩俘虏体的围岩与峨嵋山大火成岩省二叠纪苦橄玄武岩的地球化学特征相似, 具有较高的 La/Yb 比值。相对而言, Afar 盆地曼达 Hararo 玄武岩和吉布提第四纪亏损 LREE 玄武岩具有最低的 Dy/Yb 和 La/Yb, 落在尖晶石橄榄岩熔融线附近, 表明这些玄武岩混入 DM 地幔成分相当多, 为岩石圈减薄的产物。

4 结论

EAR 新生代火山岩是典型的被动大陆边缘地幔柱成因的陆内裂谷火山岩, 其岩浆岩地球化学演化特征不同于板块汇聚边缘岛弧火山岩。

(1) AERS 裂谷发育以前形成高原地貌, 发育为断裂充填和喷溢(岩墙)的拉斑玄武岩(以高钛 CFB 为标志), 逐渐过渡为大陆 OIB 和 MORB, 而流纹岩则是陆内裂谷晚期扩张的产物(图 1)。裂谷火山岩演化模式表现由 CFB-OIB 和 CFB-MORB-扩张中心岛组成的岩石系列。岩石组合具有双峰式火山岩套特征, 以缺乏低钾中性安山岩类和岛弧型玄武岩(图 2)而区别于主动大陆边缘岛弧火山岩。

(2) EARS 火山岩可划分为两种基本曲线类型: 高钛拉斑玄武岩(30 Ma, 地幔柱成因)和低钛流纹岩(地壳分异成因), 微量元素不具备俯冲成因的典型岛弧火山岩常见的亏损 Nb 和 Ta 特征以及稀土元素 Y、Yb 与 SiO₂ 呈负相关现象。地幔柱成因玄武岩为大陆板内高钛 CFB-OIB 类型, 地球化学特征表现为富集常量元素 Ti、Fe 和 Mg, 富集高场强元素 Nb、Ta 和金属元素 V、Cr、Co 和 Ni, 具有地幔柱特征的高 ³He 同位素标志。

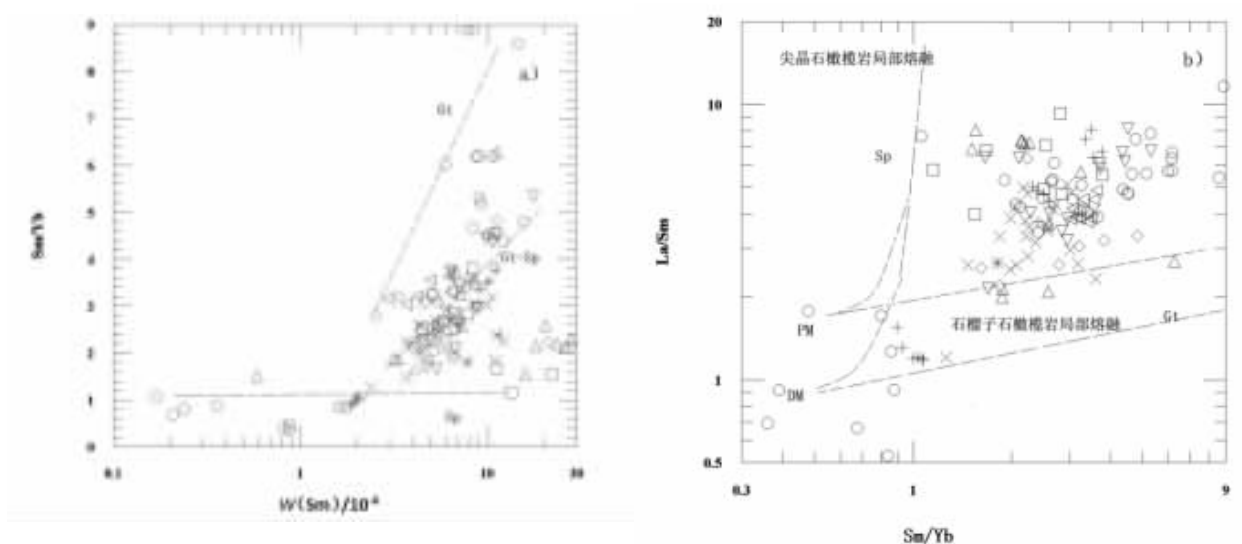


图7 EARS裂谷演化过程中岩浆源区的Rb/Sr-Ba/Rb图解和REE比值图解

Fig. 7 Discrimination diagrams of Rb/Sr-Ba/Rb and REE Ratios During EARS Rifting evolution process (Legend as in Fig.1)

a) Sm/Yb-Sm图解^[45];图中展示了裂谷早期MER-Afar和红海的石榴子石-尖晶石(Gt-Sp)、KR的石榴子石(Gt)和裂谷晚期尖晶石(Sp)橄榄岩平衡熔融曲线;b)La/Sm-Sm/Yb图解^[47];岩浆源区的石榴子石(Gt)和尖晶石(Sp)橄榄岩平衡熔融曲线,DM亏损地幔,PM原始地幔源,UC地壳.图例同图1.

(3)MER 陆内地幔柱成因的火山岩可以划分出受地壳混染的地幔和未受地壳混染的原始地幔两种类型。MER 前-裂谷高钛 CFB 和第四纪玄武岩均为未受混染的地幔柱岩浆岩。MER 西北部阿西姆地区以及阿法盆地少数渐新世-现代火山岩与峨眉山玄武岩相对比,都受到一定的 TTG(或玄武质下地壳)混染,但其程度甚弱。

(4)从 KR 和 MER-Afar 大火山岩省的岩石组合特征判断,MER 最南端图尔卡纳湖和巨厚的肯尼亚克拉通地壳之下深部的 HIMU 地幔可能是导致裂谷的 OIB 和 CFB 异常发育(图 1)的主导因素,而 Afar 洼地、红海和亚丁湾 MORB 和亏损 LREE 玄武岩的发育则归因于 HIMU、富集地幔(EM1-EM2)与 DM 地幔的混合。

感谢国家商务部援外司和中国地质调查局对本项目的资助。在野外考察期间得到了埃塞俄比亚矿业能源部和埃塞俄比亚地质调查局的大力支持和协助。

注释:

①姚华舟,徐菊明,王平安,等. 中国援埃塞俄比亚矿产地质

调查前期考察报告[R]. 武汉:中国地质调查局武汉地质调查中心,2006.

②China Geological Survey, Ministry of Mine and Energy of Ethiopia. Joint Investigation Report of Mineral Resource and Geology of Ethiopia [R]. Wuhan:Wuhan Center of China Geological Survey,2006.

③姚华舟,陈开旭,徐景银,等. 埃塞俄比亚Gimbi-Nejo地区区域地球化学调查报告(水系沉积物测量比例尺1:250000)[R]. 武汉:中国地质调查局武汉地质调查中心,2010.

④姚华舟,陈开旭,王建雄,等.埃塞俄比亚Asosa-Gimbi地区优势金属矿产成矿规律研究[R].武汉:中国地质调查局武汉地质调查中心,2011.

参考文献:

- [1] 姚华舟, 陈开旭, 王建雄, 等. 埃塞俄比亚地质、地球化学和找矿[M]. 北京: 科学出版社(印刷中), 2018.
- [2] Rooney T O, Furman T, Bastow I D, Ayalew D, Yirgu G. Lithospheric modification during crustal extension in the Main Ethiopian Rift [J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2007, 112(B10): 1-8.
- [3] Rooney T O, Bastow I D, Keir D. Insights into extensional processes during magma assisted rifting: Evidence from aligned scoria cones [J]. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 2011, 201(1-4): 83-96.

- [4] Raschka H and Muller. Contributions to the geochemistry of volcanic rocks, Afar region, Ethiopia[C]// Pilger A and Rosler A (eds), Afar Depression of Ethiopia. Inter-Union Commission on Geodynamics Scientific Report No.14. Stuttgart, Germany: E.Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung (Nagele u. Obermiller), 1975, 341-351,391-416.
- [5] Yirgu G, Ebinger C J, Maguire PKH (eds). The Afar Volcanic Province within the East African Rift System [C]. London: Geological Society London, Special Publication, 2006,259: 1-327.
- [6] Ayalew D, Ebinger CJ, Bourdon E, Wolfenden E, Yirgu G, Grassineau N. Temporal compositional variation of syn-rift rhyolites along the western margin of the southern Red Sea and northern main Ethiopian Rift[C]//Yirgu G, Ebinger CJ, Maguire P K H (eds). The Afar Volcanic Province within the East African Rift System. London:Geological Society, Special Publication, 2006, 259: 121 - 130.
- [7] Ayalew D, Gibson S A. 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, 2009,112(3 - 4): 461 - 476.
- [8] Furman T, Bryce J, Rooney T, Hanan B, Yirgu G, Ayalew D. Heads and tails: 30 million years of the Afar plume[C]// Yirgu G, Ebinger CJ, Maguire P K H (eds).The Afar Volcanic Province within the East African Rift System. London:Geological Society London, Special Publication, 2006,259:95-120.
- [9] Hagos M, Koeberl C, Kabeto K, Koller F. Geochemical characteristics of the alkaline basalts and the phonolite - trachyteplugs of the Axum area, northern Ethiopia [J]. Austrian Journal of Earth Sciences, 2010,103(2):153-170.
- [10] Roger S, Pik R, Dautria J M, Coulon C, Yirgu G, Ayalew D, Legros P. Active or passive passive rifting in Ethiopia Contribution of peridotitic xenoliths from the Lake Tana area [J]. Académie des Sciences - Series IIA - Earth and Planetary Science, 1997, 324(12):1009-1016.
- [11] Macdonald R, Rogers N W, Fitton J, Black S, Smith M. Plume-Lithosphere Interactions in the Generation of the Basalts of the Kenya Rift, East Africa [J]. Journal of petrology, 2001, 42(5): 877-900.
- [12] Corti G. Continental rift evolution: From rift initiation to incipient break -up in the Main Ethiopian Rift, East Africa[J]. Earth-Science Reviews, 2009, 96 (1-2):1 - 53.
- [13] Pik R, Marty B, Hilton D R. How many mantle plumes in Africa The geochemical point of view [J].Chemical Geology, 2006, 226(3-4):100-114.
- [14] Volker F, Altherr R, Jochum K P, Mcculloch M T. Quaternary volcanic activity of the southern Red Sea: new data and assessment of models on magma sources and Afar plume -lithosphere interaction [J]. Tectonophysics, 1997, 278(1):15-29.
- [15] Abebe T, Mazzrini F, Innocenti F, Manetti P. The Yerer-Tullu Wellel volcano-tectonic lineament: a transtensional structure in central Ethiopia and the associated magmatic activity [J]. Journal of African Earth Sciences, 1998, 26 (1): 135-150
- [16] Adhana T A. The occurrence of a complete continental rift type of volcanic rocks suite along the Yerer-Tullu Wellel Volcano Tectonic Lineament, Central Ethiopia [J]. Journal of African Earth Sciences, 2014, 99:374-385.
- [17] Gabriel G W, Hart W K, Katoh S, Beyene Y, Suwa G. Correlation of Plio - Pleistocene Tephra in Ethiopian andKenyan rift basins: Temporal calibration of geological features and hominid fossil records[J]. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 2005,147(1-2): 81 - 108.
- [18] Peate I U, Baker J A, Kent A J R, Al-Kadasi M, Al-Subbary A, Ayalew D, Menzies M. Correlation of Indian Ocean tephra to individual Oligocenesilicic eruptions from Afro-Arabian flood volcanism [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2003, 211(3-4):311-327.
- [19] Stewart K, Rogers N. Mantle plume and lithosphere contributions to basalts from southern Ethiopia [J]. Earth and Planetary Science Letters,1996,139 (1-2):195-211.
- [20] Rooney T O, Furman T, Yirgu G, Ayalew D. Structure of the Ethiopian lithosphere: Xenolith evidence in the Main Ethiopian Rift [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2005, 69(15): 3889 - 3910.
- [21] Barrat J A, Joron J L, Taylor R N, Fourcade S, Nesbitt RW, Jahn B M. Geochemistry of basalts from Manda Hararo, Ethiopia: LREE-depleted basalts in Central Afar [J]. Lithos, 2003, 69(1-2): 1 - 13.
- [22] Daoud M A, Maury R C, Barrat J-A, Taylor R N, Gall B L, Guillou H, Cotten J, Rolet J. A LREE -depleted component in the Afar plume: further evidence from Quaternary Djibouti basalts[J]. Lithos, 2010, 114(3 - 4): 327 - 336.
- [23] Hart W K, Walter R C, Woldegabriel G. Tephra sources and correlations in Ethiopia: Application of elemental and neodymium isotope data [J]. Quaternary International, 1992, 13-14: 77-86.

- [14] Feakins S, Brown F, deMenocal P. Plio-Pleistocene microtephra in DSDP Site 231, Gulf of Aden [J]. *Journal of African Earth Science*, 2007, 48(5): 341–352.
- [25] Brown F H, Fuller C R. Stratigraphy and tephra of the Kibish Formation, southwestern Ethiopia [J]. *Journal of Human Evolution*, 2008, 55(3): 366–403.
- [26] Furman T, Kaleta K, Bryce J, Hanan B B. 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*, 2006, 59(6): 2583–2591.
- [27] Richard L R. Minpet version 2.02 – Mineralogical and petrological data processing system for windows [R]. Quebec (Canada), 1995.
- [28] 姜常义, 钱壮志, 姜寒冰, 唐冬梅, 张蓬勃, 朱士飞. 云南宾川-永胜-丽江地区低钛玄武岩和苦橄岩的岩石成因与源区性质[J]. *岩石学报*, 2007, 23(4): 777–792.
- [29] 张招崇, Mahoney J J, 王福生, 赵莉, 艾羽, 杨铁铮. 峨眉山大火成岩省西部苦橄岩及其共生玄武岩的地球化学-地幔柱头部熔融的证据 [J]. *岩石学报*, 2006, 22(6): 1538–1552.
- [30] 邵辉, 徐义刚, 何斌, 黄小龙, 罗震宇. 峨眉山大火成岩省晚期双峰式火山岩岩石地球化学特征[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2007, 26(4): 350–358.
- [31] 夏林圻, 夏祖春, 徐学义, 李向民, 马中平. 利用地球化学方法判别大陆玄武岩和岛弧玄武岩 [J]. *岩石矿物学杂志*, 2007, 26(1): 77–89.
- [32] 张鸿翔, 徐志方, 马英军, 刘丛强. 大陆溢流玄武岩的地球化学特征及起源 [J]. *地球科学——中国地质大学学报*, 2001, 26(3): 261–268.
- [33] Macpherson C G, Hall R. Tectonic controls of geochemical evolution in arc magmatism in SE Asia (C) //In: *Proceedings PACRIM 99 congress*, Australian Institute of mining and metallurgy Publications, Series, 1999, 4/99: 359–368.
- [34] 汪云亮, 张成江, 修淑芝. 玄武岩类形成的大地构造环境的Th/Hf – Ta/Hf图解判别 [J]. *岩石学报*, 2001, 17(3): 413–421.
- [35] 孙书勤, 张成江, 黄润秋. 板块汇聚边缘玄武岩大地构造环境的Th、Nb、Zr判别 [J]. *地球科学进展*, 2006, 21(6): 593–598.
- [36] 武莉娜, 王志畅, 汪云亮. 微量元素La, Nb, Zr在判别大地构造环境方面的应用 [J]. *华东地质学院学报*, 2003, 26(4): 343–348.
- [37] 朱章显, 杨振强, 胡鹏. 苏门答腊岛(印尼)巴东地区埃含矿火山岩的地球化学特征和构造环境意义 [J]. *中国矿业*, 2014, 23(8): 92–99, 109.
- [38] 高小卫, 吴秀荣, 杨振强. 巽他古陆核东南边缘新生代埃达克质岩的成因和源区: 回顾 [J]. *华南地质与矿产*, 2015, 31(3): 225–235.
- [39] Gorton M P, Schandl E S. From continents to island arcs: a geochemical index of tectonic setting for arc-related and within-plate felsic to intermediate volcanic rocks [J]. *Canadian Mineralogist*, 2000, 38(5): 1065–1073.
- [40] Ernst R E, Buchan K L. Recognizing mantle plumes in the geological record [J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2003, 31: 469–523.
- [41] 张招崇, 董书云. 大火成岩省是地幔柱作用引起的吗? [J]. *现代地质*, 2007, 21(2): 247–254.
- [42] 徐义刚, 钟孙霖. 峨眉山大火成岩省_地幔柱活动的证据及其熔融条件[J]. *地球化学*, 2001, 30(1): 1–9.
- [43] 宋谢炎, 侯增谦, 汪云亮, 张成江, 曹志敏, 李佑国. 峨眉山玄武岩的地幔热柱成因[J]. *矿物岩石*, 2002, 22(4): 27–32.
- [44] Stolz A J, Jochun K P, Spettel B, Hofmann A W. Fluid and melt-related enrichment in the sub-arc mantle evidence from Nb/Ta variations in island arc [J]. *Geology*, 1997, 24(7): 587–590.
- [45] 郑永飞, 主编. *地球化学动力学* [M]. 北京: 科学出版社, 1999, 1–392.
- [46] Richards J P, Kerrich R. Special Paper: Adakite-Like Rocks: Their Diverse Origins and Questionable Role in Metallogenesis [J]. *Economic Geology*, 2007, 102(4): 537–576.
- [47] 张招崇, 王福生, 郝艳丽, Mahoney J J. 峨眉山大火成岩省和西伯利亚大火成岩省地球化学物征的比较及其成因启示[J]. *岩石矿物学杂志*, 2005, 24(1): 12–20.
- [48] 于峻川, 莫宣学, 喻学惠, 朱弟成, 李逸川, 黄雄飞. "三江"北段昌都陆块晚三叠世钾质-超钾质火山岩成因及地质意义[J]. *岩石学报*, 2014, 30(11): 3334–3344.