第 57 卷 第 2 期 2024 年 (总 234 期)

西 オヒ 地 质

NORTHWESTERN GEOLOGY

Vol. 57 No. 2 2024(Sum234)



**引文格式:**曾国平,王建雄,向文帅,等. 厄立特里亚西部新元古代岛弧花岗岩对东非造山带构造演化的指示意义 [J]. 西北地质, 2024, 57(2): 159-173. DOI: 10.12401/j.nwg.2023144

**Citation:** ZENG Guoping, WANG Jianxiong, XIANG Wenshuai, et al. The Augaro Arc-type Granite in the Nubia Shield, Western Eritrea: Petrogenesis and Implications for Neoproterozoic Geodynamic Evolution of the East African Orogen[J]. Northwestern Geology, 2024, 57(2): 159–173. DOI: 10.12401/j.nwg.2023144

# 厄立特里亚西部新元古代岛弧花岗岩对 东非造山带构造演化的指示意义

曾国平1,王建雄1,\*,向文帅1,2,张紫程3,姜军胜1,向鹏1

(1. 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,湖北武汉 430205; 2. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院,北京 100083; 3. 中国地质矿业有限公司,北京 100029)

摘 要:东非造山带是东西冈瓦纳大陆的拼合带,详细解剖其形成演化过程对深入理解超大陆旋 回具有重要意义。笔者报道了厄立特里亚西部 Augaro 地区 Meraf 花岗岩的锆石 U-Pb 年龄、全岩 地球化学和 Sr-Nd-Hf 同位素组成,以研究其成因及其对东非造山带新元古代构造演化的指示意 义。LA-ICPMS 锆石 U-Pb 定年结果为(875±6) Ma,形成于新元古代拉伸纪。Meraf 花岗岩具有高 硅、钙碱性、过铝质特征,稀土元素配分曲线总体右倾,LREE 富集,HREE 相对亏损,弱 Eu 负异常 (δEu=0.70~0.91),富集 Ba、Rb、K等大离子亲石元素,相对亏损 Ta、Nb、Ti 等高场强元素,属于岛弧 性质 I 型花岗岩。 ε<sub>Hf</sub>(t) 值为正 (7.7~9.9), I<sub>Sr</sub> 值较低 (0.702 00~0.702 73), ε<sub>Nd</sub>(t) 值为 4.85~6.06。结合微 量元素特征,说明 Meraf 花岗岩为俯冲洋壳板片脱水交代上覆地幔楔并使其部分熔融的产物,指 示区内大陆裂解和莫桑比克洋形成早于 875 Ma。

关键词:地球化学;岛弧花岗岩;锆石 U-Pb 定年;新元古代;东北非造山带 中图分类号:P59;P581 文献标志码:A 文章编号:1009-6248(2024)02-0159-15

# The Augaro Arc-type Granite in the Nubia Shield, Western Eritrea: Petrogenesis and Implications for Neoproterozoic Geodynamic Evolution of the East African Orogen

ZENG Guoping<sup>1</sup>, WANG Jianxiong<sup>1,\*</sup>, XIANG Wenshuai<sup>1,2</sup>, ZHANG Zicheng<sup>3</sup>, JIANG Junsheng<sup>1</sup>, XIANG Peng<sup>1</sup>

Wuhan Center of China Geological Survey / Central South China Innovation Center for Geosciences, Wuhan 430205, Hubei, China;
 School of Earth Science and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;
 China Geological Mining Company Ltd., Beijing 100029, China)

**Abstract:** The East African orogen is a collisional collage belt of East Gondwana and West Gondwana. A deep study of the evolution of the orogenic belt is of great significance for understanding the supercontinent cycles. Zircon LA-ICP MS U–Pb ages and Hf isotopic compositions, whole rock major and trace elements and Sr-Nd

收稿日期: 2023-05-31; 修回日期: 2023-07-24; 责任编辑: 曹佰迪

基金项目:中国地质调查局项目"北部非洲国际合作地质调查"(D20230126),湖北省自然科学基金项目"努比亚地盾前寒武 纪斑岩 Cu-Au 矿床相关的埃达克质岩成因:对泛非增生造山作用和区域成矿的指示"(2022CFB850)联合资助。

作者简介:曾国平(1990-),男,高级工程师,博士,主要从事北部非洲地质矿产调查研究。E-mail: 1204929467@qq.com。

<sup>\*</sup>通讯作者:王建雄(1966-),男,教授级工程师,主要从事北部非洲地质矿产调查研究。E-mail: 245425463@qq.com。

2024 年

petrogenesis and implications for the Neoproterozoic tectonic evolution of the East African orogenic belt. LA-ICPMS zircon U-Pb dating of the Meraf granite yields magmatic crystallization age of (875±6) Ma. The Meraf granite has geochemistry patterns resembling those of Arc-type granite, with high-SiO<sub>2</sub>, calc-alkaline and peraluminous, and enriched in LREE and LILE such as Ba, Rb, K, relatively depleted in HREE and HFSE such as Ta, Nb, Ti, with weak Eu negative anomalies ( $\delta$ Eu= 0.70-0.91). Combined with the positive  $\varepsilon_{Hf}$  (*t*) (7.7~9.9), low initial <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr (0.702 00~0.702 73), and remarkable  $\varepsilon_{Nd}(t)$  values (4.85~6.06), the Meraf granite is supposed to be the product of partial melting of the mantle wedge triggered by dehydration of the subducting oceanic plate. Together with widespread Neoproterozoic arc-type granites in the East African orogen, the break-up of Supercontinent and formation of Mozambique oceanic are believed to predate the 875Ma.

Keywords: geochemistry; arc-type granite; zircon U-Pb dating; Neoproterozoic; east african orogen

新元古代时期是超大陆裂解、低纬度冰川发育等 的重要阶段,涉及全球性的古板块运动、气候变迁等 一些列跨学科重大科学问题,已经成为国际地球科学 研究的热点和前沿(郑永飞, 2003)。东非造山带为全 球3大造山带之一,形成于新元古代东西冈瓦纳大陆 拼合过程(查显锋等, 2023), 经历了罗迪尼亚超大陆 裂解、莫桑比克洋形成、洋壳俯冲、增生造山、冈瓦纳 超大陆碰撞拼合的完整威尔逊构造旋回(Stern et al., 2010; Johnson et al., 2011), 出露了全球保存最好、范 围最广的新元古代新生地壳(Li et al., 2018)。深入解 剖东非造山带,有助于揭示新元古代罗迪尼亚超大陆 裂解过程和冈瓦纳超大陆形成历史,为罗迪尼亚和冈 瓦纳超大陆的模型再造提供可靠支撑。受多重因素 影响,学界对东非造山带的研究程度远远落后于科迪 勒拉造山带、特提斯造山带等类似规模的造山带 (Stern, 1994)。综合区内沉积、构造和岩浆活动等方 面研究成果,前人认为区内新元古代大陆裂解开始于 870 Ma, 形成莫桑比克洋, 800 Ma 发生洋壳俯冲(Stern et al., 2010)。但该构造演化时限的关键证据主要为早 期单颗粒锆石蒸发法年龄(Stern et al., 2010),数据精 度存疑,且与区内新近报道的年龄数据相互矛盾(Teklay et al., 2003; Woldemichael et al., 2010; 赵凯等, 2020), 亟需开展进一步研究重新厘定区域构造演化时限。

花岗岩是大陆地壳的主要组成部分(Rudnick et al., 2003; 吴树宽等, 2023), 是研究造山带构造演化过程 中壳幔相互作用的良好载体, 对其岩浆作用时限、源 区性质及其形成机制的深入研究, 对深入理解造山带 及大陆地壳等动力学过程具有重要的科学意义(吴福 元等, 2007b; 过磊等, 2019)。厄立特里亚主体位于东 非造山带北段的努比亚地盾核心区域内(图 la), 其岩

浆活动清楚地显示出从早新元古代大洋岛弧玄武岩 到泛非造山后(约540 Ma)碱性花岗岩与玄武岩的演 化过程(Stern, 1994; Johnson et al., 2011),为研究区域 构造演化历史提供了最为直接的证据。前人对该国 中东部火山岩及侵入岩进行了详细研究,积累了丰硕 成果和大量数据资料(Woldehaimanot, 2000; Andersson et al., 2006; Teklay, 2006),但对其西部大面积出露 的早新元古代花岗岩的研究则相对薄弱(Teklay, 1997; 赵凯等, 2020)。厄立特里亚西部发育 Augaro-Adobha 铜金成矿带,产出了 Bisha 和 Zara 等大型铜金矿床, 同时广泛出露新元古代花岗岩类侵入体。对这些花 岗岩开展系统的成岩年代和岩石成因研究不仅有助 于深入理解区域构造演化历史,也会对区域成矿作用 认识有所裨益。

文中选择厄立特里亚西部 Augaro 地区典型的 Meraf 花岗岩体, 开展锆石 U-Pb 年代学、岩石地球化 学和同位素地球化学方面的研究, 厘定其成岩年代, 并探讨其岩石成因, 为深入探讨厄立特里亚西部地区 地质构造演化提供新的支撑。

## 1 地质背景

厄立特里亚位于非洲东北部,大地构造上位于东 西冈瓦纳之间的东非造山带内,其境内 60% 以上的基 底岩石属于努比亚地盾组成部分。根据岩性及构造 特征,厄立特里亚新元古代基底可进一步划分为 5 个 地块单元(图 1b),从西至东依次为西部的 Barka 地块, 由角闪岩相变沉积岩和镁铁质片岩组成;北部的 Hagar 地块,以镁铁质和长英质变火山岩为主;中西部 Adobha Abi 地块,主要为蛇绿岩和大理岩,其两侧为



图 a 据 Johnson 等(2011)修, 年龄数据来源于 Woldemichael 等(2010); 图 b 据 Teklay(2006)修, 年龄数据来源于 Teklay 等(2003)、赵凯等(2020); 图 c 据 Nevsun Resources Ltd.(2004)修

图1 努比亚地盾地质简图(a)厄立特里亚地块划分简图(b)和 Augaro 地区地质简图(c)

Fig. 1 (a) Sketch of Nubian geology, (b) simplified terrane map of Eritrea and (c) geology map of the Augaro district

区域性 NNE 向剪切带所限制, 东侧为 Barka 剪切带 (BSZ), 西侧为 Baden 剪切带; 中部 Nakfa 地块也是分 布面积最大的一个地块单元, 主要出露绿片岩相变火 山沉积岩和同碰撞至后碰撞花岗岩; 东部 Arig 地块, 主要发育后碰撞花岗岩和变沉积岩(Teklay, 1997)。

Augaro地区位于厄立特里亚首都阿斯马拉(Asmara)西南约180 km 处, Barka 剪切带东侧的 Nakfa 地 块内。区内出露地层主要为新元古代变火山沉积岩, 以安山质凝灰岩和火山碎屑角砾岩为主,多发育 NE向-NEE向片理。区域性 NE向 Augaro 韧性剪切 带为区内主导性构造,走向20°~60°,延伸超过5 km, 宽数米至数十米,倾向南东,倾角近直立。该剪切带 控制了 NE 向和 NEE 向次级断裂的展布和岩浆岩的 分布。区内岩浆岩主要为新元古代火山岩、侵入岩和 脉岩等,少量新生代玄武岩。新元古代火山岩以安山 岩、斑状安山岩为主,出露面积较广。侵入岩主要为 花岗岩类,多呈岩体或岩株,分布于西南与东北部。 脉岩主要以闪长岩脉为主,产状较复杂,规模较小,长 度多在150 m 范围以内,零散分布。

此外,新元古代构造运动也为区内斑岩型铜金矿

和造山型金矿提供了有利成矿环境。目前, Augaro地区已经勘查发现 Anagulu 斑岩型铜金矿床(Alpha-exploration, 2023)和 Meraf、Augaro、Damiscioba、Antore等多个造山型金矿床(点)(曹强等, 2020;向文帅等, 2021)。

# 2 样品特征与分析方法

#### 2.1 样品岩相学特征

笔者的研究对象为 Augaro 地区东北部的 Meraf 花岗岩。该花岗岩体是 Meraf 金矿床的赋矿围岩, 整体呈 NE 向延伸,走向 32°,具有一定的片理化,与区 域主剪切带方向一致。手标本呈灰白色,细粒花岗质 结构,块状构造,主要成分为石英、钾长石、斜长石和 角闪石等。薄片鉴定显示:石英含量约为 30%,正低 突起,无色透明或浅黄色,干涉色一级黄白,他形粒状, 粒径为 0.05~0.8 mm,其中粒径<0.1 mm 者多呈半自 形,少量波状消光,而粒径大于 0.1 mm 者则多见波状 消光,显示后期曾受较强应力作用。长石含量约为 65%,无色透明,自形板、柱状,部分发生了绢云母化 蚀变。绢云母化长石长轴为 0.4~1 mm,含量约为 36%,少量保留有长石假像;未完全或未蚀变的长石有 条纹长石(负低突起,颗粒大小为 0.4~1.0 mm,含量约 为 16%)、斜长石(正低突起,大小为 0.3~0.7 mm,见 有聚片双晶和卡钠复合双晶,含量约为 4%)、钾长石( 大小为 0.4~0.9 mm, 见卡式双晶, 含量约为 4%)。白 云母为正中突起, 闪突起明显, 呈片状, 干涉色为二级 蓝绿, 含量约为 3%, 与绢云母化长石紧密伴生, 可能 为后期热液产物。不透明矿物多为黄铁矿, 呈近正方 形的四边形, 含量约为 2%(图 2)。



Qz. 石荚; Pl. 斜长石; Kfs. 钾长石; Ms. 白云母 **图2** Meraf 花岗岩手标本(a)和镜下照片(b、c、d) Fig. 2 (a) Hand specimen photograph and (b, c, d) micrographs of the Meraf granite

## 2.2 分析方法

本次研究在厄立特里亚西部 Augaro 地区采集了 4件 Meraf 花岗岩样品,样品均采集自较新鲜露头,空 间分布均匀,代表性强。4件样品均开展了全岩主量、 微量和稀土元素以及 Sr-Nd 同位素分析,其中1件 (D0408-02G)同时开展锆石 U-Pb 定年和 Lu-Hf 同位 素测试。本次研究所有测试分析均在自然资源部中 南矿产资源监督检测中心完成。

锆石的前期准备工作主要由广州拓岩检测技术 有限公司完成。全岩样品经粉碎淘洗后,用电磁选和 重液浮选法分选,再经双目镜优选锆石颗粒。基于反 射光、透射光和阴极发光显微照相,选取最合适的分 析点位。激光剥蚀系统采用 GeoLas 2005 (Lambda Physik,德国),同时配备一个信号平滑装置,ICP-MS 采用 Neptune Plus (Thermo Fisher Scientific,德国),以 Ar+He 和少量 N<sub>2</sub> 为等离子载气(Hu et al., 2008),空白 信号大约 20~30 s,样品信号约 50 s。采用 91500 作外 标进行 U-Pb 同位素分馏校正,每分析 5 个样品点,分 析 2 次 91500。锆石微量元素含量以 SRM610 为外标、 <sup>29</sup>Si 为内标的方法进行定量计算(Liu et al., 2010)。详 细的仪器操作条件和数据处理方法同 Hu 等(2012)。 采用软件 ICPMSDataCal 对分析数据进行离线处理 (Liu et al., 2010)。锆石样品的 U-Pb 年龄谐和图绘制 和年龄权重平均计算均采用 Isoplot/Ex\_ver3 (Ludwig, 2004)完成。

锆石 Lu-Hf 同位素测试采用激光剥蚀系统和 MC-ICP-MS。在锆石 U-Pb 分析的相同点位或附近选择点 位,激光束斑为 50 μm,详细仪器操作条件和分析方法 将去除风化面的新鲜岩石样品碎至 200 目进行 全岩地球化学分析。主量元素分析采用帕拉科生产 的 AXIOS 型 X-荧光光谱仪,采用 Li<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub>溶液融化样 品,分析精度高于 1%。微量元素分析采用美国热电 公司的 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)。稀土元素分析流程:用 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>、HCIO<sub>4</sub>、HF 和 HNO<sub>3</sub> 消解全岩粉末样品,以(1+1)王水和 H<sub>2</sub>O 溶解盐 类,以<sup>103</sup>Rh 和<sup>185</sup>Re 作内标元素直接测定稀土各分量 (曾国平等, 2022)。

采用热电离质谱仪 Triton 完成全岩 Sr 和 Nd 同位 素分析。以标准物质 NBS987(Sr)、GBW04411(Sr)、 BCR-2(Nd)和 JMC(Nd)分别对仪器和分析全流程进 行监控。NBS987和 GBW04411的<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr 同位素组成 测定平均值分别为 0.710 28±0.000 02(2σ)和 0.759 99± 0.000 20(2σ),标准 BCR-2 测定的 Sm 和 Nd 平均值分 别为 6.508×10<sup>-6</sup> 和 28.62×10<sup>-6</sup>, <sup>143</sup>Nd/<sup>144</sup>Nd=0.512 625± 0.000 006, 基准物质 JMC 的<sup>143</sup>Nd/<sup>144</sup>Nd=0.511 551± 0.000 004, 与推荐值在误差范围内一致。<sup>87</sup>Rb/<sup>86</sup>Sr 和 <sup>147</sup>Sm/<sup>144</sup>Nd 的精度分别优于 1% 和 0.5%。全流程 Rb、 Sr 空白分别为 1×10<sup>-10</sup> 和 3×10<sup>-10</sup>, Sm、Nd 空白分别为 7×10<sup>-11</sup> 和 1×10<sup>-10</sup>。

## 3 分析结果

## 3.1 锆石 U-Pb 年代学特征

厄立特里亚西部 Meraf 花岗岩的锆石 U-Pb 年代 学测试结果见表 1。其中的锆石晶形较好,多呈半自 形-自形短柱状、棱柱状,颗粒较大,粒径为 80~ 120 μm,震荡环带清晰(图 3)。18 个测试点的 Th 含 量为 33.1×10<sup>-6</sup>~142×10<sup>-6</sup>, U含量为 73.4×10<sup>-6</sup>~160× 10<sup>-6</sup>, Th/U 值为 0.45~0.96(均值为 0.69),表明其为岩 浆成因(Hoskin, 2005;柳永正等, 2023;熊万宇康等, 2023)。测试点的谐和度均超过 96%,均位于谐和曲 线及附近,指示后期热事件影响不明显。<sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U 年 龄为 870~882 Ma,加权平均年龄值为(875±6) Ma,可

表 1 厄立特里亚西部花岗岩锆石 U-Pb 同位素测试结果表

Tab. 1 Zheon 0-10 isotope results of granites noin western Entry	Tab.	1	Zircon U-Pb	isotope	results	ofg	granites	from	western	Eritre
--	------	---	-------------	---------	---------	-----	----------	------	---------	--------

占旦	$^{232}$ Th(×10 <sup>-6</sup> )	<sup>6</sup> ) <sup>238</sup> U(×10 <sup>-6</sup> )	<b>T</b> 1 / T 1	同位素比值						年龄(Ma)			
777-0			Th/U	<sup>207</sup> Pb/ <sup>206</sup> Pb	1σ	<sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U	1σ	<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U	1σ	<sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U	1σ	206Pb/238U	1σ
D0804-b02 - 1	124	155	0.80	0.072 4	0.000 8	1.4477	0.034 1	0.145 1	0.003 0	909	14	874	17
D0804-b02 - 3	89.5	108	0.83	0.0704	0.001 1	1.4180	0.035 8	0.145 4	0.002 6	897	15	875	14
D0804-b02 - 5	142	160	0.88	0.068 0	0.000 8	1.355 1	0.021 8	0.144 7	0.002 2	870	9	871	12
D0804-b02 - 6	119	139	0.85	0.069 3	0.000 9	1.395 4	0.026 7	0.146 0	0.002 6	887	11	879	15
D0804-b02 - 7	33.1	73.4	0.45	0.068 9	0.001 1	1.383 7	0.029 9	0.145 8	0.002 6	882	13	877	15
D0804-b02 - 8	120	190	0.63	0.067 6	0.001 0	1.3548	0.026 0	0.145 9	0.002 8	870	11	878	16
D0804-b02 - 9	77.3	139	0.56	0.067 2	0.001 1	1.357 9	0.029 7	0.146 7	0.002 8	871	13	882	16
D0804-b02 - 10	74.1	106	0.70	0.068 0	0.001 0	1.372 8	0.027 3	0.146 2	0.002 4	877	12	880	13
D0804-b02 - 11	118	123	0.96	0.068 2	0.001 0	1.362 4	0.025 5	0.144 6	0.002 0	873	11	870	11
D0804-b02 - 12	52.2	94.9	0.55	0.069 3	0.000 9	1.384 1	0.027 2	0.144 6	0.002 5	882	12	871	14
D0804-b02 - 13	56.6	112	0.50	0.068 9	0.001 0	1.384 5	0.029 6	0.145 7	0.002 7	882	13	877	15
D0804-b02 - 16	71.3	104	0.69	0.068 4	0.000 9	1.375 5	0.025 0	0.145 7	0.002 3	879	11	877	13
D0804-b02 - 18	53.8	77.3	0.70	0.068 7	0.000 9	1.3802	0.024 2	0.145 8	0.002 3	881	10	877	13
D0804-b02 - 19	79.1	120	0.66	0.0674	0.000 8	1.357 3	0.025 1	0.145 9	0.002 4	871	11	878	13
D0804-b02 - 21	74.4	141	0.53	0.068 1	0.000 8	1.365 6	0.022 1	0.145 1	0.001 7	874	10	873	9
D0804-b02 - 23	224	301	0.74	0.072 0	0.000 8	1.441 9	0.026 3	0.144 6	0.001 9	906	11	871	11
D0804-b02 - 24	105	125	0.84	0.067 7	0.001 0	1.3498	0.022 6	0.144 8	0.001 9	867	10	872	11
D0804-b02 - 25	110	194	0.57	0.067 8	0.0007	1.3707	0.021 8	0.1464	0.002 2	876	9	881	12



红圈代表年龄点位;黑圈代表Hf同位素点位

图3 Meraf花岗岩锆石CL图像和同位素值

Fig. 3 CL images and isotopic values of zircon from the Meraf granite





Fig. 4 (a) Zircon U-Pb concordia diagram and (b) chondrite-normalized REE patterns of the Meraf granite

能代表了该岩体的侵位结晶年龄(图 4a)。

Meraf 花岗岩中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 (图 4b),且具有弱负 Eu 异常和明显的正 Ce 异常, Y/Ho 值为 29.65~34.11(均值 32.15),具有典型岩浆锆 石的特征(Hoskin, 2005)。

### 3.2 全岩地球化学特征

Meraf花岗岩的全岩主量元素、微量元素和稀土 元素测试结果见表 2。该岩体总体显示出高 Si、相对 富 Na 和 Al 的特征。SiO<sub>2</sub>含量为 71.13%~74.92%,平 均值为 73.87%,在 TAS 图解中 4 件样品均落入花岗岩 区域内(图 5a),显示高 Si 的特征。碱质含量较高, ALK(Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O)为 6.44%~7.05%(均值为 6.69%),以 Na<sub>2</sub>O(3.28%~4.16%,均值为 3.82%)为主;K<sub>2</sub>O 含量较 低,为 2.39%~3.77%(均值为 2.87%), Na<sub>2</sub>O/K<sub>2</sub>O 值为 0.87~1.69(均值为 0.77)。SiO<sub>2</sub>-K<sub>2</sub>O 图解中,样品点主 要落入钙碱性区域,显示出钙碱性特征(图 5b)。样 品 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>含量为 13.38%~14.42%,平均值为 13.84%, A/CNK 值 为 1.09~1.44(均值为 1.27), A/NK 值为 1.43~1.52(均值为 1.47),在 A/CNK-A/NK 图解(图 5c) 中,样品点集中分布在过铝质区域。此外,样品具 有较低的 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>(0.06%~0.10%,均值 0.08%)、MgO (0.54%~0.84%,均值为0.64%)和CaO(0.24%~0.96%,均值为0.86%)。

Meraf 花岗岩的 ΣREE 为 74.33×10<sup>-6</sup>~127.62×10<sup>-6</sup>, 平均为 96.73×10<sup>-6</sup>,低于地壳平均值 164×10<sup>-6</sup> (Taylor et al., 1981)。LREE 为 54.90×10<sup>-6</sup>~104.40×10<sup>-6</sup>,平均 为 74.79×10<sup>-6</sup>, HREE 为 19.43×10<sup>-6</sup>~25.09×10<sup>-6</sup>,平均 为 21.94×10<sup>-6</sup>。LREE/HREE 为 2.83~4.50,平均为 3.38。 球粒陨石标准化稀土元素配分曲线总体右倾, LREE 富集, HREE 相对亏损(图 6a),其中 La/Sm 与 Gd/Yb 值分别为 4.53~5.84 和 1.29~1.74,表明轻稀土分馏 程度较重稀土更为显著。Eu 负异常较明显(δEu=0.70~ 0.91,平均为 0.82),说明岩浆母岩部分熔融时有斜长 石的残留,或岩浆演化过程中有明显的斜长石分离结 晶。微量元素原始地幔标准化蛛网图(图 6b)显示,该 花岗岩表现出 Ba、Rb、K 等大离子亲石元素的相对富 集以及 Ta、Nb、Ti 等高场强元素的相对亏损。

## 3.3 锆石 Lu-Hf 和全岩 Sr-Nd 同位素特征

厄立特里亚西部 Meraf 花岗岩的锆石 Lu-Hf 同位 素测试结果见表 3。花岗岩锆石 17个测试点的 <sup>176</sup>Lu/<sup>177</sup>Hf 值为 0.000 699~0.002 271,平均为 0.001 580, 表明该分析锆石中衰变产生的<sup>177</sup>Hf 极少,获取的 <sup>176</sup>Hf/<sup>177</sup>Hf 值基本代表了成岩时岩浆体系的 Hf 同位素

样号	D0408-b02(Y)	D0408-b04	D0408-b05	D0408-b06
SiO <sub>2</sub>	74.92	71.13	75.26	74.17
$Al_2O_3$	13.38	14.03	13.52	14.42
TiO <sub>2</sub>	0.26	0.32	0.27	0.33
$Fe_2O_3$	1.18	1.3	1.46	1.58
FeO	0.61	0.97	0.37	0.61
$FeO^{T}$	1.67	2.14	1.68	2.03
MnO	0.02	0.05	0.04	0.03
MgO	0.54	0.84	0.56	0.62
CaO	0.96	1.97	0.29	0.24
Na <sub>2</sub> O	4.05	3.8	3.28	4.16
K <sub>2</sub> O	2.39	2.76	3.77	2.55
$P_2O_5$	0.06	0.10	0.08	0.07
烧失量	1.55	2.63	1.02	1.2
总量	99.91	99.90	99.92	99.97
Na <sub>2</sub> O+K <sub>2</sub> O	6.44	6.56	7.05	6.71
Na <sub>2</sub> O/K <sub>2</sub> O	1.69	1.38	0.87	1.63
FeO <sup>T</sup> /MgO	3.10	2.56	3.01	3.29
A/NK	1.45	1.52	1.43	1.50
A/CNK	1.22	1.09	1.35	1.44
Li	2.87	5.06	4.73	4.73
Be	1.18	1.25	1.34	1.28
Sc	1.94	3.45	7.11	3.15
V	17.1	26.6	17.8	25.6
Cr	5.96	8.64	7.68	7.16
Co	2.79	4.92	3.60	3.64
Ni	6.36	8.67	7.66	9.46
Ga	21.4	19.5	25.1	21.8
Rb	47.2	54.8	67.7	48.5
Sr	186	266	188	212
Y	12.7	11.1	10.7	14.2
Zr	165	205	188	222
Nb	3.97	3.90	4.56	4.54
Cs	0.39	0.60	0.50	0.56
Ba	766	634	1 010	764
La	21.6	12.7	11.1	16.6
Ce	51.7	26.3	25.1	39.3
Pr	5.62	3.44	3.17	4.18
Nd	21.0	13.8	12.4	16.2
Sm	3.70	2.73	2.45	3.12
Eu	0.78	0.76	0.68	0.73
Gd	3.10	2.37	2.14	2.80
Tb	0.47	0.39	0.36	0.46
Dy	2.60	2.31	2.23	2.84
Но	0.53	0.48	0.47	0.58
Er	1.52	1.35	1.38	1.69
Tm	0.25	0.22	0.24	0.28
Yb	1.78	1.55	1.66	1.96
Lu	0.27	0.23	0.25	0.28
Hf	4.20	4.82	4.75	5.43
Та	0.38	0.35	0.47	0.46
Pb	8.98	7.81	8.87	8.96
Th	5.99	4.79	7.18	5.73
U	1.37	1.19	1.57	1.54
LREE	104.40	59.73	54.90	80.13
HREE	23.22	20.00	19.43	25.09
REE	127.62	79.73	74.33	105.22
LREE/HREE	4.50	2.99	2.83	3.19
La/Sm	5.84	4.65	4.53	5.32
Gd/Yb	1.74	1.53	1.29	1.43
(La/Yb) <sub>N</sub>	8.70	5.88	4.80	6.08
δΕυ	0.70	0.91	0.91	0.76
δCe	1.15	0.98	1.04	1.16

表 2 厄立特里亚西部花岗岩主量(%)、微量和稀土(10<sup>-6</sup>)元素测试结果表 Tab. 2 Major (%), trace and rare earth  $(10^{-6})$  elements results of granites from western Eritrea



a. (Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O) vs. SiO<sub>2</sub> 图解,底图据 Middlemost(1994); b. K<sub>2</sub>O vs. SiO<sub>2</sub> 图解,底图据 Peccerillo 等(1976); c. A/CNK vs. A/NK 图解,底图 据 Maniar 等(1989); d. FeO\*/MgO vs. (Zr+Nb+Ce+Y)图解,底图据 Whalen 等(1987)

图5 Meraf花岗岩全岩地球化学图解





Fig. 6 (a) Chondirite normalized REE-pattern and (b) primitive mantle normalized spider diagram of the Meraf granite

组成(吴福元等, 2007a)。17颗锆石的<sup>176</sup>Hf<sup>117</sup>Hf值为 0.282455~0.282537, ε<sub>Hf</sub>(t)值为 7.7~9.9, 两阶段模式 年龄 T<sub>DM2</sub>(Hf)变化于 1 093~1215 Ma。

Meraf花岗岩全岩 Sr-Nd 同位素分析结果见表 4。

初始<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr 值计算采用锆石 U-Pb 年龄 875 Ma。4件 样品的 *I*<sub>Sr</sub> 为 0.702 00~0.702 73, 均值为 0.702 43, 接近 地幔初始值(0.704±0.002)。 ε<sub>Nd</sub>(*t*)值为 4.85~6.06, 均 值为 5.36, 较为均一, 两阶段模式年龄 T<sub>DM2</sub>(Nd)为

#### 表 3 厄立特里亚西部花岗岩锆石 Hf 同位素测试结果表

Tab. 3 Zircon Hf isotope results of granites from western Eritrea

点号	<sup>176</sup> Hf/ <sup>177</sup> Hf	1σ	<sup>176</sup> Lu/ <sup>177</sup> Hf	1σ	<sup>176</sup> Yb/ <sup>177</sup> Hf	1σ	年龄 (Ma)	$\epsilon_{\rm Hf}(\theta)$	$\epsilon_{\rm Hf}(t)$	T <sub>DM1</sub>	T <sub>DM2</sub>	$f_{\rm Lu/Hf}$
D0408-b02 - 1	0.282 511	0.000 015	0.001 569	0.000 021	0.049 342	0.000 577	874	-9.2	9.2	1 063	1 1 3 4	-0.95
D0408-b02 - 3	0.282 473	0.000 017	0.001 392	0.000 022	0.040 320	0.000 820	875	-10.6	8.0	1 1 1 3	1 203	-0.96
D0408-b02 - 4	0.282 509	0.000 014	0.001 960	0.000 017	0.056 534	0.000 479	871	-9.3	8.8	1 078	1 1 5 2	-0.94
D0408-b02 - 5	0.282 477	0.000 014	0.001 786	0.000 013	0.050 718	0.000 462	879	-10.4	8.0	1 1 1 9	1 207	-0.95
D0408-b02 - 6	0.282 455	0.000 013	0.000 699	0.000 004	0.020 135	0.000 087	877	-11.2	7.8	1 1 1 8	1 2 1 5	-0.98
D0408-b02 - 7	0.282 491	0.000 014	0.001 554	0.000 007	0.045 299	0.000 297	878	-10.0	8.6	1 093	1 1 7 3	-0.95
D0408-b02 - 8	0.282 487	0.000 016	0.001 637	0.000 005	0.046 273	0.000 141	880	-10.1	8.4	1 101	1 183	-0.95
D0408-b02 - 9	0.282 506	0.000 012	0.001 285	0.000 005	0.036 654	0.000 233	882	-9.4	9.4	1 063	1 1 3 2	-0.96
D0408-b02 - 10	0.282 479	0.000 014	0.001 221	0.000 015	0.037 185	0.000 438	870	-10.4	8.2	1 099	1 188	-0.96
D0408-b02 - 11	0.282 468	0.000 013	0.001 402	0.000 006	0.039 755	0.000 083	871	-10.8	7.7	1 121	1 2 1 5	-0.96
D0408-b02 - 12	0.282 521	0.000 015	0.002 271	0.000 033	0.065 457	0.000 898	877	-8.9	9.2	1 070	1 1 37	-0.93
D0408-b02 - 15	0.282 485	0.000 017	0.001 789	0.000 003	0.050 721	0.000 205	877	-10.1	8.2	1 108	1 192	-0.95
D0408-b02 - 17	0.282 483	0.000 013	0.001 226	0.000 010	0.035 902	0.000 355	877	-10.2	8.4	1 095	1 1 7 9	-0.96
D0408-b02 - 18	0.282 485	0.000 015	0.001 925	0.000 014	0.055 076	0.000 422	878	-10.2	8.1	1 1 1 2	1 197	-0.94
D0408-b02 - 21	0.282 476	0.000 016	0.001 765	0.000 007	0.050 625	0.000 366	871	-10.5	7.8	1 1 2 0	1 212	-0.95
D0408-b02 - 22	0.282 537	0.000 013	0.001 803	0.000 016	0.057 800	0.000 587	872	-8.3	9.9	1 034	1 093	-0.95
D0408-b02 - 23	0.282 475	0.000 014	0.001 569	0.000 004	0.047 910	0.000 194	881	-10.5	8.1	1 1 1 5	1 203	-0.95

#### 表 4 厄立特里亚西部花岗岩全岩 Sr-Nd 同位素测试结果表

Tab. 4 Whole rock Sr-Nd isotope results of granites from western Eritrea

样品编号	$Rb(10^{-6})$	$Sr(10^{-6})$	<sup>87</sup> Rb/ <sup>86</sup> Sr	<sup>87</sup> Sr/ <sup>86</sup> Sr	2σ	I <sub>Sr</sub>	$\epsilon_{\rm Sr}(\theta)$	$\varepsilon_{\rm Sr}(t)$	$f_{ m Rb/Sr}$
D0408-b02(Y)	47.2	186	0.734 8	0.711 58	0.000 007	0.702 39	100.5	-15.3	7.89
D0408-b04	54.8	266	0.5966	0.710 074	0.000 008	0.702 61	79.1	-12.2	6.21
D0408-b05	67.7	188	1.042 7	0.715 04	0.000 005	0.702 00	149.6	-20.8	11.61
D0408-b06	48.5	212	0.662 5	0.711 018	0.000 011	0.702 73	92.5	-10.5	7.01
样品编号	Sm(10 <sup>-6</sup> )	Nd( 10 <sup>-6</sup> )	147Sm/144Nd	143Nd/144Nd	2σ	I <sub>Nd</sub>	$\epsilon_{\rm Nd}(t)$	T <sub>2DM</sub>	$f_{ m Sm/Nd}$
D0408-b02(Y)	3.7	21	0.106 5	0.512 387	0.000 007	0.511 776	5.22	1 1 1 1	-0.46
D0408-b04	2.73	13.8	0.1196	0.512 505	0.000 005	0.511 819	6.06	1 043	-0.39
D0408-b05	2.45	12.4	0.1195	0.512 443	0.000 004	0.511 757	4.85	1 141	-0.39
D0408-b06	3.12	16.2	0.1164	0.512 449	0.000 007	0.511 781	5.32	1 103	-0.41

 $1\,043\!\sim\!1\,141\;Ma_{\circ}$ 

# 4 讨论

## 4.1 岩石类型

基于地球化学和矿物学特征,可将花岗岩划分为 I型、S型、M型和A型等4类花岗岩(Whalen, 1985; Whalen et al., 1987; Chappell et al., 1992; 吴福元等, 2007b)。M型花岗岩通常被认为直接起源于地幔基 性岩浆演化(Whalen, 1985), 但本次研究花岗岩明显 缺少基性矿物和暗色包体,排除 M 型花岗岩的可能性。

S型花岗岩来源于上地壳沉积岩的部分熔融 (Chappell et al., 2012),通常含有较多白云母、石榴子 石和堇青石等富铝矿物(Clemens, 2003),且 A/CNK 值 通常大于 1.1, Na<sub>2</sub>O 含量较低。并且 S型花岗岩一般 含有源区沉积岩中老的继承锆石(Villaros et al., 2009)。 此外,由于磷灰石在过铝质熔体中溶解度很高,在偏 铝质-弱过铝质熔体中快速饱和,S型花岗岩通常含有 较高的 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>(Chappell, 1999)。本次研究的 Meraf 花岗 岩的 A/CNK 值 (1.09~1.44)和 SiO<sub>2</sub> 含量 (71.13%~75.26%)较高,具有一定 S 型花岗岩特征。但显微镜下的绢云母化、白云母化和硅化等指示这种富铝、富硅特点可能与后期金成矿过程中的蚀变热液作用有关,并非其原生地球化学特征。此外,该花岗岩的Na<sub>2</sub>O 含量明显高于 K<sub>2</sub>O(Na<sub>2</sub>O/K<sub>2</sub>O=0.87~1.69), P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>含量极低(0.056%~0.102%),且锆石年龄集中,未见核边结构和古老残留锆石,均说明其为 S 型花岗岩的可能性不大。

A 型花岗岩与源岩无关,代表产于伸展构造背景 (非造山或裂谷环境)中高温无水的花岗岩(>800 ℃), 其以"富碱"、"高温"、"无水"为特征(Loiselle, 1979),具有较高的 SiO<sub>2</sub>、Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O、FeO<sup>T</sup>/MgO(平均 值为 22.84)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 型花岗岩也可以是碱性花岗岩,同时也可能是钙碱 性、弱碱-准铝、弱过铝花岗岩(许保良等,1998)。I 型 花岗岩通常被认为是下地壳岩浆岩重熔的产物(Chappell et al., 2012),通常表现为花岗闪长岩,并含有大量 角闪石(Chappell et al., 2001)。此外,I型花岗岩通常 具有低 A/CNK(<1.1)、FeO<sup>T</sup>(<1%)和高 Na<sub>2</sub>O/K<sub>2</sub>O (>1)(王强等, 2000)。

Meraf花岗岩具有明显的贫碱(ALK均值为 6.69%)和 REE(均值为 96.73×10<sup>-6</sup>)的特征,明显不同 于A型花岗岩"富碱"、富集 REE 的特征,且缺乏 A 型花岗岩常见的强烈 Eu 负异常。其较低的 A/CNK 值(1.09~1.44)和高的 Na<sub>2</sub>O/K<sub>2</sub>O 值(0.87~1.69),相对 富集 CaO(0.237%~1.970%,均值 0.86%),与I型花岗 岩相似, 锆石 Ti 含量温度计估算的结晶温度范围 (640~805 ℃, 均值为 733 ℃), 锆石饱和温度估算为 754~780 ℃, 均值为 769 ℃, 也表现为低温岩浆特征, 与 A 型花岗岩相去甚远, 更接近 I 型花岗岩。且在 Zr+Nb+Ce+Y vs. FeO<sup>\*</sup>/MgO 图解中, 含花岗岩所有样 品均落入 M/I/S 花岗岩区域(图 5d)。综上所述, 厄立 特里亚西部 Augaro 地区的 Meraf 花岗岩很可能属于 I 型花岗岩。

## 4.2 岩浆源区与成岩机制

前人研究显示,锆石  $\epsilon_{\rm Hf}(t)$ 值可以示踪岩浆源区, 正的 ε<sub>н</sub>(t) 值通常指示源区为亏损地幔或从亏损地幔 中新生的年轻地壳,负的 ɛ<sub>нf</sub>(t)值通常揭示岩浆源区 为古老地壳(Vervoort et al., 1999; 吴福元等, 2007a)。 厄立特里亚西部 Augaro 地区的 Meraf 花岗岩的  $\varepsilon_{Hf}(t)$ 值均为正值(7.7~9.9),指示其岩浆源区主要为亏损 地幔或新生地壳物质。此外, Meraf 花岗岩较低的 Isr 值(0.70200~0.70273)和正的  $\epsilon_{Nd}(t)$ 值(4.85~6.06)也 显示出相似的指示性。ɛ<sub>Nd</sub>(t)-成岩年龄(Ma)图解中, Meraf花岗岩所有样品均接近亏损地幔演化线,并与 前人汇总的努比亚地盾区新元古代岩浆岩,特别是碰 撞前(>650 Ma)岩浆岩的 Nd 同位素分布范围十分接 近(图 7a)。 $\varepsilon_{Nd}(t)$ - $I_{Sr}$ 图解中, Meraf花岗岩与埃塞俄 比亚西部 Ghimbi 地区及厄立特里亚西部 Augaro 地区 相似年龄的岩浆岩基本重合,所有样品均接近亏损地 幔区域(图 7b)。前人研究认为,上述努比亚地盾的新 元古代岩浆岩均主要起源于亏损地幔,说明 Meraf 花 岗岩的母岩浆起源于亏损地幔的可能性较大(Teklay et al., 2003; Woldemichael et al., 2010; Gamaleldien et al.,



a. ε<sub>Nd</sub>(*t*) vs. 成岩年龄(Ma)图,努比亚地盾区范围据 Gamaleldien 等(2022),亏损地幔线据 Nelson 等(1985); b. ε<sub>Nd</sub>(*t*) vs. *I*<sub>(st)</sub>图, 底图据 Pearce 等(1984), Ghimbi 地区岩浆岩据 Woldemichael 等(2010), Augaro 地区岩浆岩据 Teklay 等(2003)

图7 Meraf 花岗岩 Sr-Nd 同位素图解

Fig. 7 Diagrams of Sr-Nd isotopes of the Meraf granite

80

60

40

20

Rb (×10<sup>-6</sup>)

2022)。此外,相对于其岩浆结晶年龄(875±6) Ma,较为年轻的 Hf 二阶段模式年龄(T<sub>DM2</sub>=1093~1215 Ma) 和 Nd 二阶段模式年龄(T<sub>DM2</sub>=1043~1141 Ma)也基本 排除了古老地壳物质作为主要源区的可能性。

从亏损地幔或新生地壳物质到 I 型花岗岩的形成 演化模式主要有基性岩浆的同化混染和结晶分异 (Lee et al., 2014)、壳幔岩浆混合(Yang et al., 2006)以 及镁铁质岩石部分熔融(Sisson et al., 2005)等。

基性岩浆经过同化混染和结晶分异形成的花岗

岩, 一般具有过碱质特征(Patiño Douce, 1997), 这与本次研究的 Meraf花岗岩的过铝质特征(A/CNK= 1.09~1.44)不一致。并且, Meraf花岗岩外围缺少同时代的基性岩-中性岩组合, 明显不同于幔源岩浆结晶分异的岩石类型组合(Litvinovsky et al., 2002)。此外,本次研究的样品在 Rb-Rb/V和 La/Yb-Y 图解上均表现出明显的线性关系(图 8), 与分离结晶过程完全不符。因此, 分离结晶的成因模式不太适用于 Meraf花岗岩。





Meraf花岗岩的标本和显微镜观察均未见镁铁质 暗色微粒包体, Sr-Nd-Hf 同位素组成和全岩地球化学 成分都较为均一,不同于壳幔岩浆混合作用产生的相 对分散的同位素组成(Griffin et al., 2002)。Meraf花岗 岩的 Nb/Ta 值(9.70~11.14)明显低于幔源岩浆的 Nb/Ta 值(17.5±2),更接近下地壳源岩浆的 Nb/Ta 值(11~ 12)。显然,地质和地球化学特征都不支持 Meraf 花岗 岩的壳幔混合模式。

2

3

Rb/V

相容元素与不相容元素之间的线性关系指示 Meraf花岗岩母岩浆形成于部分熔融(图 8)。通常认 为,拆沉下地壳(Wang et al., 2006)、加厚下地壳(Petford et al., 1996)或者俯冲洋壳板片熔流体交代地幔 楔(Martin et al., 2005)是较常发生部分熔融的镁铁质 岩石。但是,拆沉下地壳部分熔融形成的花岗质熔体 通常具有富钾特征,并呈现出高的 MgO,这显然与 Meraf花岗岩偏钠质(Na<sub>2</sub>O/K<sub>2</sub>O=0.87~1.69)、低 MgO (0.54%~0.84%)的特征不符。Kay 等(1991)认为 La/Yb 值>30时,岩浆源区较深,为 50~60 km; La/Yb 值 <15 时,岩浆源区则较浅,为 30~35 km。Meraf花岗 岩的 La/Yb 值为 6.69~12.13,明显小于 15,说明其岩 浆源区较浅,并非起源于加厚下地壳部分熔融。

厄立特里亚西部 Meraf 花岗岩具有较高的 SiO, 含量和 A/CNK 值, 较低的 MgO、Ni 和 Cr 含量, 相对 富集 Ba、Rb、K 等大离子亲石元素(LILE),相对亏损 Nb、Ta、Ti 等高场强元素(HFSE),显示出弧岩浆岩的 特征(Zheng, 2019),说明其母岩浆极有可能来自于俯 冲洋壳板片熔流体交代地幔楔的部分熔融。其较低 的全岩锆石饱和温度(754~780℃)也不足以使角闪 石发生部分熔融,需要幔源岩浆的底侵和外来水的加 入(Collins et al., 2016)。研究显示,陆缘弧玄武岩通常 具有较高的 K<sub>2</sub>O 含量,其部分熔融形成的熔体相对富 K<sub>2</sub>O(Sisson et al., 2005); 而洋壳玄武岩具有较高的 Na<sub>2</sub>O含量,在H<sub>2</sub>O饱和条件下发生低程度部分熔融 可以形成过铝质、钠质花岗岩(Petford et al., 1996)。 因此,本次研究的 Meraf 花岗岩可能形成于洋内弧环 境,这一点也得到了区内岩性组合(蛇绿岩、钙碱性岩 浆岩与未成熟沉积岩)和放射性同位素组成的支撑 (Stern et al., 2010)。Meraf花岗岩的弱负 Eu 异常 (δEu=0.70~0.91), 说明部分熔融过程中有斜长石残 留。P、Ti的负异常则指示源区有磷灰石等 Fe-Ti氧 化物残留。鉴于 Meraf 花岗岩的岩浆源区较浅,不符 合金红石作为副矿物的稳定条件(>1.5 GPa、>50 km) (熊小林等,2005),其 Nb、Ta 的亏损可能是继承了俯 冲洋壳释放流体 Nb、Ta 亏损等微量元素特征。综上 所述,厄立特里亚西部 Meraf 花岗岩是新元古代早期 (~875 Ma),洋壳俯冲过程中,俯冲洋壳板片脱水交 代上覆地幔楔并使其部分熔融的产物。

## 4.3 构造意义

东非造山带是东西冈瓦纳大陆的拼合带,详细解 剖其形成演化过程对深入理解新元古代罗迪尼亚-冈 瓦纳超大陆旋回具有重要意义。在此背景下,众多国 际学者从沉积岩、岩浆岩、蛇绿岩带和构造等角度对 东非造山带的构造演化历史开展了研究探讨(Kröner et al., 1991; Stern, 1994; Teklay et al., 2003; Andersson et al., 2006; Johnson et al., 2011), 初步认为 870~800 Ma 为区内大陆裂解和莫桑比克洋形成阶段,约800 Ma 才开始进入洋壳俯冲阶段,并形成与之相关的岛弧岩 浆活动和新生地壳物质(Stern et al., 2010; Johnson et al., 2011)。这一认识的主要依据是东非造山带零散分布 的新元古代海相沉积岩、角闪岩相基性-超基性岩、双 峰式火山岩和蛇绿岩。苏丹境内的双峰式火山岩被 认为是大陆裂解早期的产物,其锆石年龄大约为 870~840 Ma(Stern, 1994)。但限于工作条件和时代 古老,区内尚未系统识别出新元古代大陆裂解的系列 产物,早期年龄数据也多来自单颗粒锆石蒸发法,高 精度年龄数据较缺乏。随着研究的深入,越来越多与 该观点相左的花岗岩成因及年代学成果被报道。如 埃塞俄比亚西部广泛发育的岛弧岩浆岩被认为最早

形成于约为830 Ma(Woldemichael et al., 2010; Blades et al., 2015); 厄立特里亚西部 Augaro 地区的火山沉积岩 序列被认为形成于弧后环境, 其锆石平均<sup>207</sup>Pb/<sup>206</sup>Pb 年 龄为849 Ma(Teklay et al., 2003); 厄立特里亚西部 Ko-ka 花岗岩被认为形成于由俯冲作用引起的弧后拉张 环境, 其锆石 U-Pb 年 龄为(851.2±1.9) Ma(赵凯等, 2020)。这些现象都说明, 约851 Ma 时, 区内已经产 生了洋壳俯冲相关的岛弧岩浆活动, 也暗示大陆裂解 和莫桑比克洋形成的时间更早。

研究发现, 厄立特里亚西部 Augaro 地区的 Meraf 花岗岩为钙碱性 I 型花岗岩。这类钙碱性花岗岩多 形成于类似安第斯山的大陆弧背景或类似于喀里多 尼亚的碰撞后构造环境。年代学和岩石地球化学特 征指示 Meraf 花岗岩的成因与约 875 Ma 的洋壳俯冲 相关。在 Rb-(Y+Nb)和 Rb-(Yb+Ta)图解中, Meraf 花 岗岩的所有样品均落入岛弧花岗岩区域(图 9),分布 范围与区域上已知的同时期岛弧花岗岩十分接近,如 埃塞俄比亚西部的 Bure 花岗岩和厄立特里亚西部的 Koka花岗岩等(赵凯等, 2020; 姜军胜等, 2021), 说明 Meraf花岗岩形成于相似的岛弧构造背景。此外, Meraf 花岗岩所处的 Nakfa 地块中广泛分布~850 Ma 的钙碱性花岗岩类,并且多具有大洋岛弧特征(Teklay et al., 2002)。在没有主要剪切带或地壳断裂的情况下, Nakfa 地块可能代表了东非造山带与俯冲相关的岛弧 系统(Teklay, 2006)。综上所述, 厄立特里亚西部 Augaro 地区的岛弧花岗岩指示东非造山带在大约 875 Ma 时已经开始进入大洋板片俯冲阶段,而区内大陆裂解 和莫桑比克洋形成则应更早。从罗迪尼亚超大陆裂



底图据 Pearce 等(1984); Bure 花岗岩数据来源于姜军胜等(2021); Koka 花岗岩数据来源于赵凯等(2020); syn-COLG 为同碰撞花岗岩; VAG 为岛弧花岗岩; ORG 为洋中脊花岗岩; WPG 为板内花岗岩; post-COLG 为后碰撞花岗岩

图9 Meraf 花岗岩类构造环境判别图解



解在全球的表现来看,这一认识与澳大利亚一些新元 古代盆地的沉降史相吻合,这些盆地保存了 900 Ma 区域裂谷事件的证据(Lindsay et al., 1987)。

# 5 结论

(1)厄立特里亚西部 Augaro 地区的 Meraf 花岗岩的锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄为(875±6) Ma, 形成于新元古代拉伸纪。

(2)Meraf花岗岩具有较高的 SiO<sub>2</sub>含量和 A/CNK 值,较低的 MgO、Ni和 Cr含量,富集 Ba、Rb、K 等大 离子亲石元素,相对亏损 Ta、Nb、Ti 等高场强元素, 属于岛弧性质 I 型花岗岩。

(3)Meraf花岗岩为俯冲洋壳板片脱水交代上覆 地幔楔并使其部分熔融的产物,指示区内大陆裂解和 莫桑比克洋形成早于 875 Ma。

致谢:野外工作得到了厄立特里亚地质调查局的大力支持与帮助,锆石 U-Pb 定年和 Lu-Hf 同位素分析得到了武汉地质调查中心童喜润高级工程师的帮助,全岩主微量分析测试得到了武汉地质调查中心曾美云工程师的全力支持。感谢审稿专家提出的 宝贵修改意见。

# 参考文献(References):

- 曹强,杨增海,秦秀峰,等.东部非洲厄立特里亚 Augaro 金矿区 特征及找矿预测[J].矿产勘查,2020,11(10):2239-2253.
- CAO Qiang, YANG Zenghai, QIN Xiufeng, et al. Characteristics and prospecting prediction of Augaro gold deposit in Eritrea, East Africa[J]. Mineral Exploration, 2020, 11(10); 2239–2253.
- 过磊,李建星,郭琳,等.南阿尔金茫崖碱长花岗岩锆石 U-Pb 定 年及岩石成因研究[J].西北地质,2019,52(1):1-13.
- GUO Lei, LI Jianxing, GUO Lin, et al. Zircon U-Pb Dating and Petrogenesis of Alkali-feldspar Granite in Mangnai Area, South Altun, NW China[J]. Northwestern Geology, 2019, 52(1): 1–13.
- 姜军胜,胡鹏,向文帅,等.埃塞俄比亚西部布雷地区类埃达克 岩年代学、地球化学及对区域构造演化的指示[J].地质学 报,2021,95(4):1260-1272.
- JIANG Junsheng, HU Peng, XIANG Wenshuai, et al. Geochronology, geochemistry and its implication for regional tectonic evolution of adakite- like rockinthe Bure area, western Ethiopia[J]. Acta Geologica Sinica, 2021, 95(4): 1260–1272.
- 柳永正,张海平,张永清,等.内蒙古中东部玛尼吐组火山岩形成时代及其大地构造环境[J].西北地质,2023,56(2):46-60.
- LIU Yongzheng, ZHANG Haiping, ZHANG Yongqing, et al. Zircon U-Pb Age and Tectonic Setting of the Manitu Formation in the

Middle–East Inner Mongolia, China[J]. Northwestern Geology, 2023, 56(2): 46–60.

- 王强,赵振华,熊小林.桐柏-大别造山带燕山晚期A型花岗岩 的厘定[J].岩石矿物学杂志,2000,19(4):297–306.
- WANG Qiang, ZHAO Zhenhua, XIONG Xiaolin. The ascertainment of late-yanshanian A-type granite in Tongbai-Dabie Orogenic Belt[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2000, 19(4): 297–306.
- 吴福元,李献华,郑永飞,等.Lu-Hf同位素体系及其岩石学应用 [J].岩石学报,2007a,23(2):185-220.
- WU Fuyuan, LI Xianhua, ZHENG Yongfei, et al. Lu-Hf isotopic systematics and their applications in petrology[J]. Acta Petrologica Sinica, 2007a, 23(2): 185–220.
- 吴福元,李献华,杨进辉,等.花岗岩成因研究的若干问题[J]. 岩石学报,2007b,23(6):1217-1238.
- WU Fuyuan, LI Xianhua, YANG Jinhui, et al. Discussions on the petrogenesis of granites[J]. Acta Petrologica Sinica, 2007b, 23(6): 1217–1238.
- 吴树宽,陈国超,李积清,等.东昆仑东段沟里地区战红山过铝 质流纹斑岩年代学、岩石成因及构造意义[J].西北地质, 2023,56(2):92-108.
- WU Shukuan, CHEN Guochao, LI Jiqing, et al. Geochronology, Petrogenesis and Tectonic Significance of Zhanhongshan Peraluminous Rhyolite Porphyry in Gouli Area, Eastern Section of East Kunlun[J]. Northwestern Geology, 2023, 56(2): 92–108.
- 向文帅,赵凯,张紫程. 厄立特里亚 Augaro 金矿床碳氢氧硫同 位素特征及其成因意义[J]. 地质学报, 2021, 95(4): 1284-1291.
- XIANG Wenshuai, ZHAO Kai, ZHANG Zicheng. Studies on C- H-O- S isotopes of Eritrea Augaro gold deposit and its implications for gold genesis[J]. Acta Geologica Sinica, 2021, 95(4): 1284–1291.
- 熊小林, J Adam, T H Green, 等. 变质玄武岩部分熔体微量元素 特征及埃达克熔体产生条件[J]. 中国科学 (D 辑: 地球科 学), 2005, 30(09): 41-50.
- XIONG Xiaolin, Adam J, Green T H, et al. Characteristics of trace elements in partial melt of metabasalt and the conditions for the generation of Adak melt[J]. Science in China Ser (D Earth Sciences), 2005, 30(09): 41–50.
- 熊万宇康,赵梦琪,于森,等.造山带洋陆转换过程与岩浆作用: 以东昆仑都兰地区古生代花岗岩为例[J].西北地质,2023, 56(6):113-139.
- XIONG Wanyukang, ZHAO Mengqi, YU Miao, et al. Ocean–Continent Transition Process and Magmatism in Orogenic Belts: A Case Study of Paleozoic Granites in the Dulan Area of East Kunlun[J]. Northwestern Geology, 2023, 56(6): 113–139.
- 许保良, 阎国翰, 张臣, 等. A 型花岗岩的岩石学亚类及其物质 来源[J]. 地学前缘, 1998, (03): 113-124.
- XU Baoliang, YAN Guohan, ZHANG Chen, et al. Petrological Subdivision and Source Material of A-type Granites[J]. Earth Science Frontiers, 1998, (03): 113–124.
- 曾国平,王建雄,向文帅,等. 厄立特里亚中部 Adi Keyh A 型流 纹岩成因及地质意义[J]. 华南地质, 2022, 38(1):157-173.

- ZENG Guoping, WANG Jianxiong, XIANG Wenshuai, et al. Petrogenesis and Geological Significance of the Adi Keyh A-type Rhyolite in Central Eritrea[J]. South China Geology, 2022, 38(1): 157–173.
- 查显锋, 计文化, 辜平阳, 等. 阿拉伯地盾地质构造演化与关键 地质矿产问题浅析[J]. 西北地质, 2023, 56(5): 204-213.
- ZHA Xianfeng, JI Wenhua, GU Pingyang, et al. Tectonic Evolution and Key Geological Mineral Issues of Arabian Shield[J]. Northwestern Geology, 2023, 56(5): 204–213.
- 赵凯,姚华舟,王建雄,等. 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, 2020, 45(1): 156-167.
- ZHAO Kai, YAO Huazhou, WANG Jianxiong, et al. Zircon U-Pb Geochronology and Geochemistry of Koka Granite and Its Geological Significance, Eritrea[J]. Earth Science, 2020, 45(1): 156–167.
- 郑永飞. 新元古代岩浆活动与全球变化 [J]. 科学通报, 2003, (16): 1705-1720.
- ZHENG Yongfei. Neoproterozoic magmatic activity and global change [J]. Chinese Science Bulletin, 2003, (16): 1705–1720.
- Alpha-exploration. Aburna (Hill 52 Central Areas) Drill Results May 2023. 2023https://alpha-exploration.com/project/kerkasha-eritrea/.
- Andersson U B, Ghebreab W, Teklay M. Crustal evolution and metamorphism in east-central Eritrea, south-east Arabian-Nubian Shield[J]. Journal of African Earth Sciences, 2006, 44(1): 45–65.
- Blades M L, Collins A S, Foden J, et al. Age and hafnium isotopic evolution of the Didesa and Kemashi domains, western Ethiopia[J]. Precambrian Research, 2015, 270267-284.
- Chappell B W, Bryant C J, Wyborn D. Peraluminous I-type granites[J]. Lithos, 2012, 153142–153.
- Chappell B W, White A J R, Allen C M. Two contrasting granite types; 25 years later[J]. Australian Journal of Earth Sciences, 2001, 48(4); 489–499.
- Chappell B W, White A J R. I- and S-type granites in the Lachlan Fold Belt[J]. Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth Sciences, 1992: 1–26.
- Chappell B W. Aluminium saturation in I- and S-type granites and the characterization of fractionated haplogranites[J]. Lithos, 1999, 46(3): 535–551.
- Chung S, Liu D, Ji J, et al. Adakites from continental collision zones: Melting of thickened lower crust beneath southern Tibet[J]. Geology, 2003, 31: 1021–1024.
- Clemens J D. S-type granitic magmas; petrogenetic issues, models and evidence[J]. Earth-Science Reviews, 2003, 61(1-2): 1–18.
- Collins W J, Huang H, Jiang X. Water-fluxed crustal melting produces Cordilleran batholiths[J]. Geology, 2016, 44(2): 143–146.
- Gamaleldien H, Li Z, Abu Anbar M, et al. Geochronological and isotopic constraints on Neoproterozoic crustal growth in the Egyptian Nubian Shield: Review and synthesis[J]. Earth-Science Reviews, 2022, 235: 104244.

- Griffin W L, Wang X, Jackson S E, et al. Zircon chemistry and magma mixing, SE China: In-situ analysis of Hf isotopes, Tonglu and Pingtan igneous complexes[J]. Lithos, 2002, 61(3): 237–269.
- Hoskin P W O. Trace element composition of hydrothermal zircon and the alteration of Hadean zircon from the Jack Hills, Australia[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2005, 69(3): 637–648.
- Hu Z, Liu Y, Gao S, et al. A "wire" signal smoothing device for laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry analysis[J]. Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy, 2012, 78: 50–57.
- Hu Z, Liu Y, Gao S, et al. A local aerosol extraction strategy for the determination of the aerosol composition in laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry[J]. Journal of Analytical Atomic Spectrometry, 2008, 23(9): 1192–1203.
- Johnson P R, Andresen A, Collins A S, et al. 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, 2011, 61(3): 167–232.
- Kay S M, Mpodozis C, Ramos V A, et al. Magma source variations for mid-late Tertiary magmatic rocks associated with a shallowing subduction zone and a thickening crust in the Central Andes (28 to 33 degrees S)[J]. Special Paper - Geological Society of America, 1991, 265: 113–137.
- Kröner A, Linnebacher P, Stern R J, et al. Evolution of Pan-African island arc assemblages in the southern Red Sea Hills, Sudan, and in southwestern Arabia as exemplified by geochemistry and geochronology[J]. Precambrian Research, 1991, 53(1): 99–118.
- Rudnick L R, Gao S. Composition of the continental crust[M]. Elsevier: In: Treatise on Geochemistry, 2003: 1–64.
- Lee C A, Bachmann O. How important is the role of crystal fractionation in making intermediate magmas? Insights from Zr and P systematics[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2014, 393: 266–274.
- Li X, El-Rahman Y A, Anbar M A, et al. Old Continental Crust Underlying Juvenile Oceanic Arc: Evidence From Northern Arabian-Nubian Shield, Egypt[J]. Geophysical Research Letters, 2018, 45(7): 1–8.
- Lindsay J F, Korsch R J, Wilford J R. Timing the breakup of a Proterozoic supercontinent: Evidence from Australian intracratonic basins[J]. Geology, 1987, 15(11): 1061–1064.
- Litvinovsky B A, Jahn B, Zanvilevich A N, et al. Petrogenesis of syenite-granite suites from the Bryansky Complex (Transbaikalia, Russia): implications for the origin of A-type granitoid magmas[J]. Chemical Geology, 2002, 189(1): 105–133.
- Liu Y, Hu Z, Zong K, et al. Reappraisement and refinement of zircon U-Pb isotope and trace element analyses by LA-ICP-MS[J]. Chinese Science Bulletin, 2010, 55(15): 1535–1546.
- Loiselle M C, Wones D R. Characteristics and origin of anorogenic granites[J]. Geological Society of America, 1979, 11(7): 468.

- Ludwig K R. Isoplot/Ex, a geochronological toolkit for Microsoft Excel, Version 3.00. Berkeley Geochronology Center, Berkeley, Ca, 2004.
- Maniar P D, Piccoli P M. Tectonic discrimination of granitoids[J]. Geological Society of America Bulletin, 1989, 101(5): 635–643.
- Martin H, Smithies R H, Rapp R, et al. An overview of adakite, tonalite-trondhjemite-granodiorite (TTG), and sanukitoid: relationships and some implications for crustal evolution[J]. Lithos, 2005, 79(1): 1–24.
- Middlemost E A K. Naming materials in the magma/igneous rock system[J]. Earth-Science Reviews, 1994, 37(3): 215–224.
- Nevsun Resources Ltd. Preliminary Regional Geology Augaro-Tokombia-Maikokah Area Gash-Barka District[J].Southwestern Eritrea, 2004.
- Nelson B K, DePaolo D J. Rapid production of continental crust 1. 7 to 1. 9 by ago: Nd isotopic evidence from the basement of the North American midcontinent[J]. Geological Society of America Bulletin, 1985, 96: 746–754.
- Patiño Douce A E. Generation of metaluminous A-type granites by low-pressure melting of calc-alkaline granitoids[J]. Geology, 1997, 25(8); 743–746.
- Pearce J A, Harris N B W, Tindle A G. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks[J]. Journal of Petrology, 1984, 25(4): 956–983.
- Peccerillo A, Taylor S R. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, northern Turkey[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1976, 58(1): 63–81.
- Petford N, Atherton M. Na-rich partial melts from newly underplated basaltic crust; the Cordillera Blanca Batholith, Peru[J]. Journal of Petrology, 1996, 37(6): 1491–1521.
- Schiano P, Monzier M, Eissen J P, et al. Simple mixing as the major control of the evolution of volcanic suites in the Ecuadorian Andes[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 2010, 160(2): 297–312.
- Sisson T W, Ratajeski K, Hankins W B, et al. Voluminous granitic magmas from common basaltic sources[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 2005, 148(6): 635–661.
- Stern R J, Johnson P. Continental lithosphere of the Arabian Plate: A geologic, petrologic, and geophysical synthesis[J]. Earth-Science Reviews, 2010, 101(1-2): 29–67.
- Stern R J. ARC Assembly and Continental Collision in the Neoproterozoic East African Orogen: Implications for the Consolidation of Gondwanaland [J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 1994, 22(1): 319–351.
- Sun S S, Mcdonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes[J]. Geological Society, London, Special Publications, 1989, 42(1): 313–345.
- Taylor S R, Mclennan S M. The composition and evolution of the continental crust; rare earth element evidence from sedimentary

rocks. Philosophical Transactions of the Royal Society of London[J]. Series a: Mathematical and Physical Sciences, 1981, 301(1461): 381–399.

- Teklay M, Haile T, Kröner A, et al. A Back-arc Palaeotectonic Setting for the Augaro Neoproterozoic Magmatic Rocks of Western Eritrea[J]. Gondwana Research, 2003, 6(4): 629–640.
- Teklay M, Kröner A, Mezger K. Enrichment from plume interaction in the generation of Neoproterozoic arc rocks in northern Eritrea: implications for crustal accretion in the southern Arabian-Nubian Shield[J]. Chemical Geology, 2002, 184(1): 167–184.
- Teklay M. Neoproterozoic arc-back-arc system analog to modern arcback-arc systems; evidence from tholeiite-boninite association, serpentinite mudflows and across-arc geochemical trends in Eritrea, southern Arabian-Nubian Shield[J]. Precambrian Research, 2006, 145(1–2): 81–92.
- Teklay M. Petrology, Geochemistry and Geochronology of Neoproterozoic Magmatic Arc Rocks from Eritrea: Implications for Crustal Evolution in the Southern Nubian Shield[R]. Asmara, Eritrea: Department of Mines-Ministry of Energy Mines and Water Resources-State of Eritrea, 1997.
- Vervoort J D, Blichert-Toft J. Evolution of the depleted mantle: Hf isotope evidence from juvenile rocks through time[J]. Geochimica lt Cosmochimica Acta, 1999, 63(3–4): 533–556.
- Villaros A, Stevens G, Buick I S. Tracking S-type granite from source to emplacement: Clues from garnet in the Cape Granite Suite[J]. Lithos, 2009, 112(3): 217–235.
- Wang Q, Xu J, Jian P, et al. Petrogenesis of adakitic porphyries in an extensional tectonic setting, Dexing, south China; implications for the genesis of porphyry copper mineralization[J]. Journal of Petrology, 2006, 47(1): 119–144.
- Whalen J B, Currie K L, Chappell B W. A-type granites: geochemical characteristics, discriminatuon and petrogenesis[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1987, 95: 407–419.
- Whalen J B. Geochemistry of an Island-Arc Plutonic Suite:the Uasilau-Yau Yau Intrusive Complex, New Britain, P. N. G[J]. Journal of Petrology, 1985, 26(3): 603–632.
- Woldehaimanot B. Tectonic setting and geochemical characterisation of Neoproterozoic volcanics and granitoids from the Adobha Belt, northern Eritrea[J]. Journal of African Earth Sciences, 2000, 30(4): 817–831.
- Woldemichael B W, Kimura J, Dunkley D J, et al. SHRIMP U–Pb zircon geochronology and Sr –Nd isotopic systematic of the Neoproterozoic Ghimbi-Nedjo mafic to intermediate intrusions of Western Ethiopia: a record of passive margin magmatism at 855 Ma?[J]. International Journal of Earth Sciences, 2010, 99(8): 1773–1790.
- Yang J, Wu F, Chung S, et al. A hybrid origin for the Qianshan Atype granite, northeast China: Geochemical and Sr-Nd-Hf isotopic evidence[J]. Lithos, 2006, 89(1-2): 89–106.
- Zheng Y. Subduction zone geochemistry[J]. Geoscience Frontiers, 2019, 10(4): 1223–1254.