

doi:10.3799/dqkx.2014.002

埃塞俄比亚施瑞地区花岗岩 地球化学特征及构造环境

韩世礼^{1,2}, 张术根^{2*}, 柳建新², 丁俊², 张文山^{2,3}

1. 南华大学核资源工程学院, 湖南衡阳 421001

2. 中南大学地球科学与信息物理学院, 湖南长沙 410083

3. 中色金地资源科技有限公司, 北京 100012

摘要: 埃塞俄比亚北部施瑞地区具有造山前、造山期和造山后3种花岗岩类型, 全岩 Sm-Nd 等时线测年结果表明, 造山前和造山后花岗岩成岩年龄分别为 824.4 ± 15.5 Ma 和 517.9 ± 5.8 Ma。3类花岗岩主量元素和稀土微量元素成分存在明显差异, 其中造山前花岗岩属于低钾过铝质花岗岩, 稀土分配模式属轻稀土弱富集型, 富集大离子亲石元素, 亏损 P 和 Ti 高场强元素; 造山期花岗岩为准铝质高钾钙碱性花岗岩, 稀土分配模式属轻稀土富集型, 富集大离子亲石元素和高场强元素; 造山后花岗岩为弱过铝质高钾钙碱性花岗岩, 稀土分配模式具强烈铈亏损的海鸥型, 富集大离子亲石元素, 明显亏损 P 和 Ti 高场强元素。综合研究表明: 造山前和造山期花岗岩均为 I 型幔源花岗岩, 构造环境处于被动大陆边缘—火山岛弧环境; 造山后花岗岩为 A2 型壳源主花岗岩, 是在洋盆关闭和阿拉伯—努比亚地盾成熟后, 由减薄的地壳部分熔融产生。

关键词: 花岗岩; 地球化学; 构造; Sm-Nd 同位素; 埃塞俄比亚; 施瑞。

中图分类号: P588.12; P595; P597

文章编号: 1000-2383(2014)01-0010-11

收稿日期: 2013-07-23

Geochemistry and Tectonic Setting of Granites from Shire Region, Ethiopia

Han Shili^{1,2}, Zhang Shugen^{2*}, Liu Jianxin², Ding Jun², Zhang Wenshan^{2,3}

1. School of Nuclear Resources Engineering, University of South China, Hengyang 421001, China

2. School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha 410083, China

3. Beijing Donia Resources Co., Ltd., Beijing 100012, China

Abstract: There are pre-, syn-, and post-orogenic granites in Shire region of northern Ethiopia. Whole rock Sm-Nd isochron dating results show that diagenetic age of pre-, and post-orogenic ages are 824.4 ± 15.5 Ma and 517.9 ± 5.8 Ma respectively. Major, rare-earth and trace elements of three kinds of granite are obviously different. The pre-orogenic granites are relatively low in MgO and high in SiO₂, belonging to the peraluminous series granite, with low K content and slight light REE enrichment, high large-ion lithophile element abundance and relative depletion of HFSE. The syn-orogenic granite belongs to the quasi-aluminous rock and high-potassium calc-alkaline granite, with the light REE enriched pattern, high large-ion lithophile element and HFSE abundances. The post-orogenic granite belongs to the weakly peraluminous high-potassium calc-alkaline granite, which has the chondrite-normalized REE patterns in the type of “gull” with severe depletion in Eu. The large-ion lithophile elements are concentrated, while P and Ti are severely depleted here. Comprehensive study shows both the pre- and syn-orogenic granites are I-type mantle-source granites in the passive continental margin-volcanic island arc tectonic setting; the post-orogenic granites are A2-type crust-source major granites, which were formed from the melting of thinner crust after the closure of oceanic basins and the growth of Arabian-Nubian shield.

Key words: granite; geochemistry; tectonics; Sm-Nd isotope; Ethiopia; Shire.

基金项目: 国家自然科学基金项目(No.41174103); 2010年国外矿产资源风险勘查专项资金项目(No.管理财[2010]211号)。

作者简介: 韩世礼(1979—), 男, 博士研究生, 矿产普查与勘探专业。

* 通讯作者: 张术根, E-mail: zhangshugenzsg@163.com

埃塞俄比亚北部位位于西冈瓦纳古陆北缘,是阿拉伯-努比亚地盾西南部新元古代岛弧增生带的重要组成部分 (Stern *et al.*, 1994; Woldemichael *et al.*, 2010).施瑞(Shire)地区是厄立特里亚阿斯马拉(Asmara)-埃塞俄比亚施瑞 VMS 型铜多金属成矿带的南西延伸地段,该地区岩浆活动频繁,火山岩系及侵入花岗岩大面积出露,具有优越的区域地质成矿条件和找矿前景.近年来,该成矿带发现了一批阿迪内弗斯(Adi Nefas)、德巴瓦(Debarwa)及英坝德芙(Emba Derho)等中大型 VMS 型铜锌矿床,被誉为世界上近 30 年来 VMS 型矿床找矿勘探方面取得的最大成就.此外,还发现了一批如古铺(Gupo)等与岩浆活动有关的热液脉型金矿床.前人对埃塞北部区域性花岗岩进行了不同程度的研究和探讨:Teklay(1997)、De Souza Filho and Drury(1998)和 Tadesse(1998)对花岗岩的野外产出特征、岩相学及岩石化学特征研究认为,埃塞北部区域花岗岩分为同构造期和构造期后花岗岩,均为钙碱性火山岛弧 I 型花岗岩;Tadesse *et al.*(2000)通过 Sm-Nd、Rb-Sr 及 Th-U-Pb 年代学特征表明,埃塞北部花岗岩具有明显的 3 期岩浆侵入事件,分别在 800 Ma、750 Ma 和 550 Ma 左右.然而,施瑞地区以往花岗岩地球化学研究程度较低.因此,研究区花岗岩带的地

球化学、成因及构造环境是目前研究施瑞-阿斯马拉成矿带形成环境的重点.本文通过各类花岗岩的主量元素、微量元素(含稀土)和同位素年代学进行综合分析,探讨其成因类型、源区性质、构造环境及演化,为成矿带铜多金属矿的成矿环境提供必要的基础性数据,为进一步探讨西冈瓦纳古陆东北缘消减带的构造特征和演化机制提供依据.

1 地质概况及岩石学特征

区内出露地层主要为晚元古代低绿片岩相变质火山岩、绢云母-石英-长石片岩、千枚岩、片岩、变质杂砂岩,中生界-古生界砂岩和第三纪玄武岩(图 1).其中火山岩的岩性类型从钠质系列到钾质系列,从基性、中性到酸性均有产出.断裂构造以北东向和东西向为主,局部发育北西向和南北向断裂.晚元古代花岗岩是研究区重要的地质体类型,面积占施瑞地区新元古界出露面积的 30%左右.根据产出特征、岩相学、地球化学及地质年代学研究,区内经历了造山前、造山期和造山后 3 期岩浆侵入活动,均属于晚元古代时期.关于造山前、造山期和造山后花岗岩的概念及判别方法,张旗等(2008)有较为详细的讨论.造山前花岗岩整体呈北东向侵入到新元古界变质火

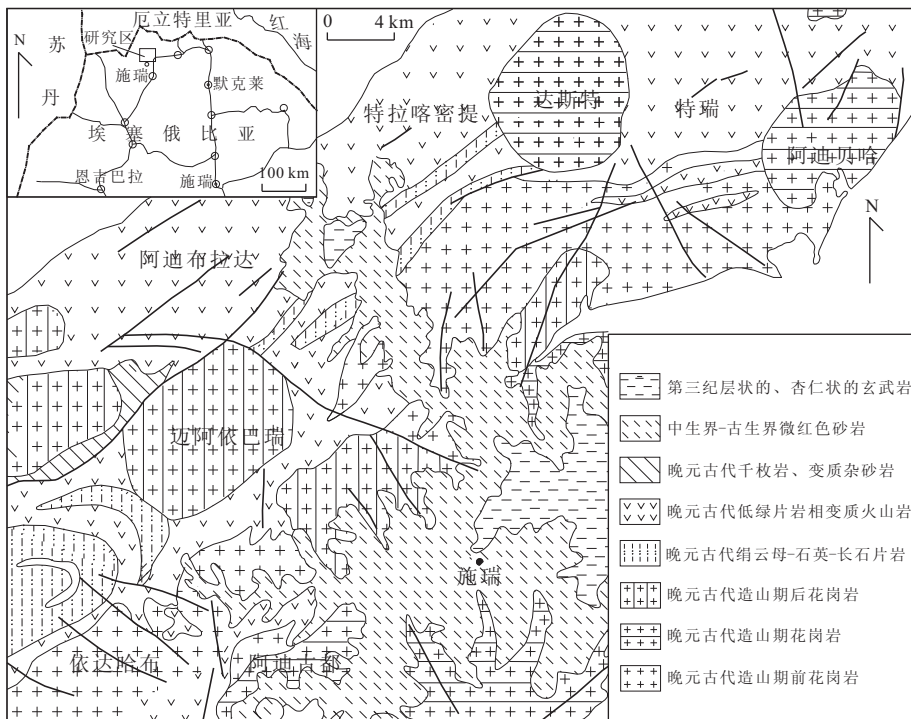


图 1 埃塞俄比亚施瑞地区地质简图

Fig.1 Geological sketch map of the Shire region in northern Ethiopia

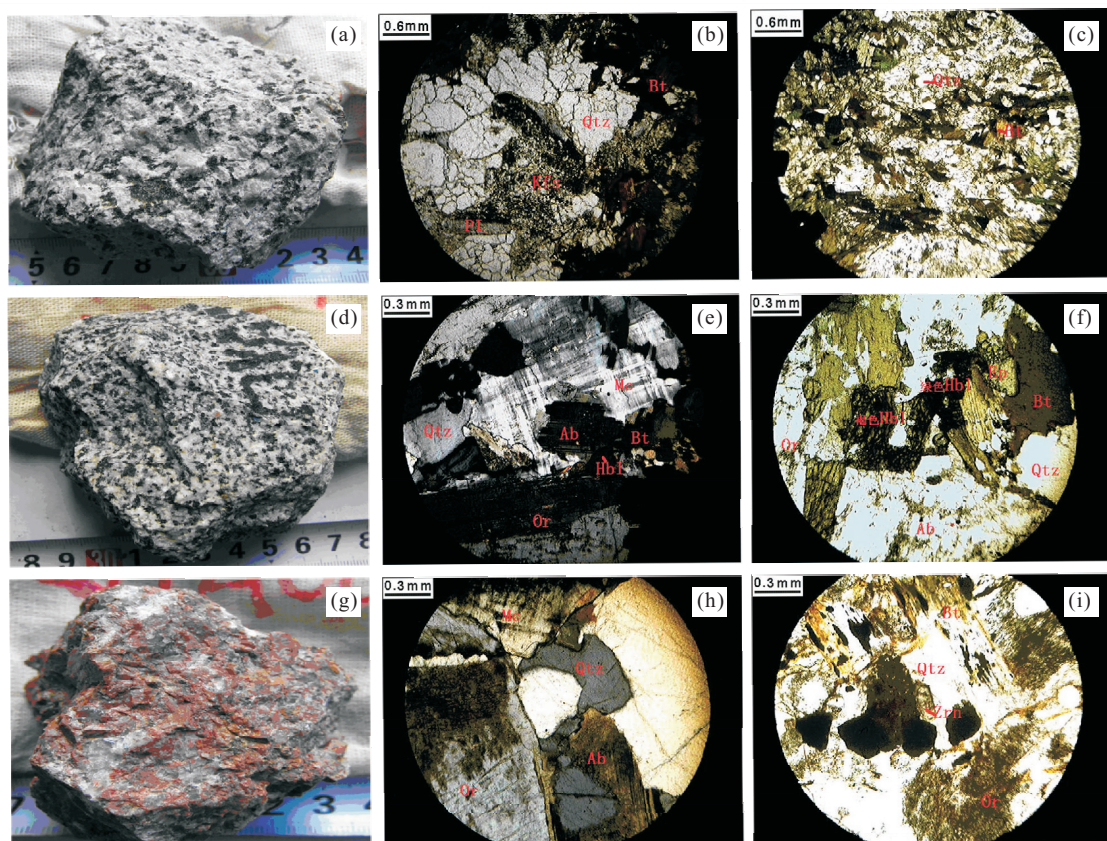


图 2 造山前(a~c)、造山期(d~f)和造山后(g~i)花岗岩野外及镜下照片

Fig.2 Photos of pre-(a-c), syn-(d-f), and post-(g-i) orogenic granitoids in the field and under microscope

a.灰白色花岗闪长岩;b.整体结构;c.定向排列的鳞片状黑云母;d.灰白色黑云母花岗岩;e.钠长石穿插微斜长石;f.黑云母交代角闪石;g.肉红色钾长花岗岩;h.石英与钠长石;i.锆石

山岩系,可被造山期和造山后花岗岩侵入分割,岩体内部劈理化强烈;造山期花岗岩呈近东西向展布,侵入到新元古界变质沉积岩或变质火山岩地层,岩体内部无劈理化现象;造山后花岗岩整体呈东西向侵入到新元古界变质火山岩,接触界面以节理、劈理面和断层为主。

造山前花岗岩:灰白色片麻理化花岗岩(图2a~2c),中粗粒结构,片状、片麻状构造。主要组成矿物为石英(35%~45%)、正长石(25%~35%)、斜长石(5%~10%)及黑云母(3%~5%),副矿物种类少,含量低,主要为磁铁矿和磷灰石。矿物定向排列显著,石英压碎明显,长石多压扁拉长变形,黑云母大多为鳞片状,张裂隙、劈理构造发育,表现为劈理化及糜棱岩化。

造山期花岗岩:灰白色黑云母花岗岩(图2d~2f),中细粒结构,块状构造,岩体边缘部分偶见片麻状构造。主要组成矿物为斜长石(25%~40%)、石英(25%~30%)、正长石(20%~25%)、黑云母(5%~

8%)及少量的角闪石(3%~5%),常见钠长石穿插微斜长石、黑云母交代角闪石。副矿物的种类多且含量高,有磷灰石、锆石、榍石、磁铁矿及褐帘石等。

造山后花岗岩:肉红色钾长花岗岩(图2g~2i),粗粒结构,块状构造。主要组成矿物为钾长石(45%~65%)、石英(20%~30%)、斜长石(10%~18%)及少量黑云母(1%~3%)。石英粒径多为5~8 mm,黑云母3~5 mm,钾长石8~20 mm或更粗。副矿物主要为榍石、锆石、磷灰石及磁铁矿。

2 样品测试方法

本研究主要针对造山前的依达哈布(Edaga Hibret)岩体、造山期的阿迪古都(Adi Gudo)附近岩体和造山后的迈阿依巴瑞(Mai Ebara)岩体(图1)进行了系统采样分析,主量和微量元素(含稀土)测试分析由澳实分析检测(广州)有限公司完成,其中主量元素采用ME-XRF06分析法,精度优于5%;微

表 2 造山前和造山后花岗岩 Sm-Nd 同位素分析结果及特征比值

Table 2 Sm-Nd isotopic analysis and characteristic ratios of of pre-orogen and post-orogen granitoids

样号	Sm(10^{-6})	Nd(10^{-6})	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} \pm 1\sigma$	$\epsilon_{\text{Nd}}(0)$	$f_{\text{Sm}/\text{Nd}}$
造山前花岗岩						
QA042	2.756	10.930	0.152 5	0.512 660 \pm 0.000 005	0.43	-0.22
QA044	2.882	11.950	0.146 0	0.512 632 \pm 0.000 003	-0.12	-0.26
QA045	2.460	9.463	0.157 3	0.512 691 \pm 0.000 006	1.03	-0.20
QA046	3.694	15.710	0.142 3	0.512 613 \pm 0.000 004	-0.49	-0.28
QA047	2.909	11.420	0.154 0	0.512 673 \pm 0.000 005	0.68	-0.22
QA051	2.965	9.815	0.182 7	0.512 830 \pm 0.000 006	3.75	-0.07
造山后花岗岩						
BB319	3.825	7.102	0.325 9	0.513 301 \pm 0.000 008	12.93	0.66
BB320	4.465	15.930	0.169 6	0.512 766 \pm 0.000 005	2.50	-0.14
BB321	6.122	21.640	0.171 2	0.512 775 \pm 0.000 004	2.67	-0.13
BB322	5.992	21.720	0.166 9	0.512 767 \pm 0.000 006	2.52	-0.15

量和微量元素(含稀土)地球化学分析结果见表 1, 全岩 Sm-Nd 同位素分析结果见表 2.

3 地球化学特征

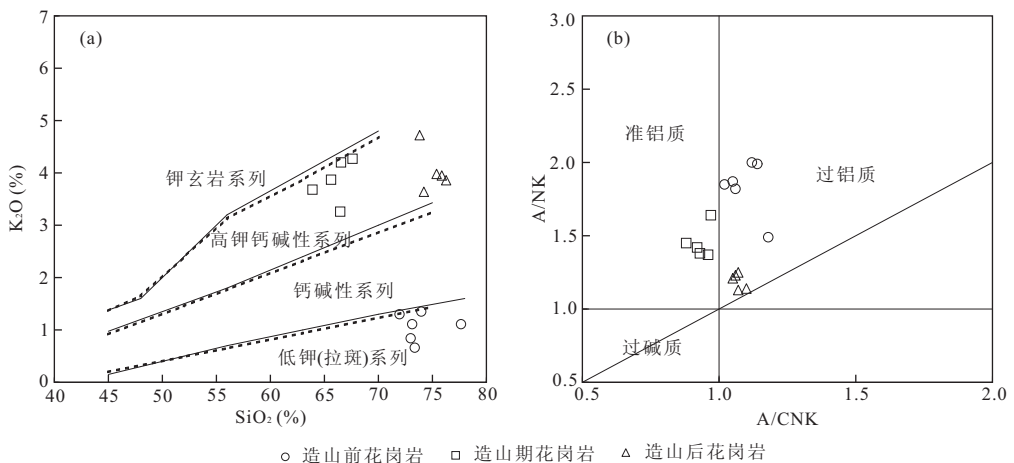
3.1 主要元素

3 类花岗岩的 SiO_2 含量较稳定, 其中造山后花岗岩 SiO_2 含量较高, 在 73.82%~76.27% 之间, 依次为造山前花岗岩($\text{SiO}_2 = 71.65\% \sim 73.97\%$)、造山期花岗岩($\text{SiO}_2 = 63.90\% \sim 67.61\%$). 岩浆分异结晶演化程度及酸性程度均比较高, 其中造山后花岗岩分异指数最高($DI = 91.31 \sim 95.87$), 各期花岗岩的分异演化程度表现为: 造山后花岗岩 > 造山前花岗岩 > 造山期花岗岩. 由花岗岩 $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ 图解(图 3a)和 $A/\text{NK}-A/\text{CNK}$ 图解(图 3b)可知, 造山前花岗岩属于低钾过铝质花岗岩; 造山期花岗岩为准铝

质高钾钙碱性花岗岩; 造山后花岗岩为弱过铝质高钾钙碱性花岗岩.

3.2 稀土元素

3 类花岗岩具有明显不同的稀土配分模式(图 4a~4c). 造山前花岗岩, 稀土总量偏低, ΣREE 变化范围为 $77.07 \times 10^{-6} \sim 166.14 \times 10^{-6}$, LR/HR 比值为 1.69~7.12, $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 为 0.68~2.61, 属轻稀土弱富集型(图 4a); Sm/Nd 在 0.25~0.31 之间, 表明化学分异程度较高; 铕异常($\delta\text{Eu} = 0.64 \sim 0.85$)不明显. 造山期花岗岩, 稀土总量 ΣREE 在 $114.12 \times 10^{-6} \sim 176.54 \times 10^{-6}$ 之间, 各样品稀土配分型式均为右倾曲线, 属轻稀土富集型(图 4b); LR/HR 范围在 9.31~17.21 之间, $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 为 7.06~21.90, 指示轻重稀土分馏程度较高; Sm/Nd 在 0.18~0.20 之间, 表明化学分异程度较高; 铕异常($\delta\text{Eu} = 0.75 \sim 0.92$)不明显. 造山后花岗岩, 稀土总量较高, ΣREE 在 $173.50 \times 10^{-6} \sim 281.64 \times 10^{-6}$ 之间, 具强烈铕亏

图 3 花岗岩 $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ 图解(a)和 $A/\text{NK}-A/\text{CNK}$ 图解(b)(据 Maniar and Piccoli, 1989)Fig.3 $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ diagram (a) and $A/\text{NK}-A/\text{CNK}$ classification diagram (b) for granitoids

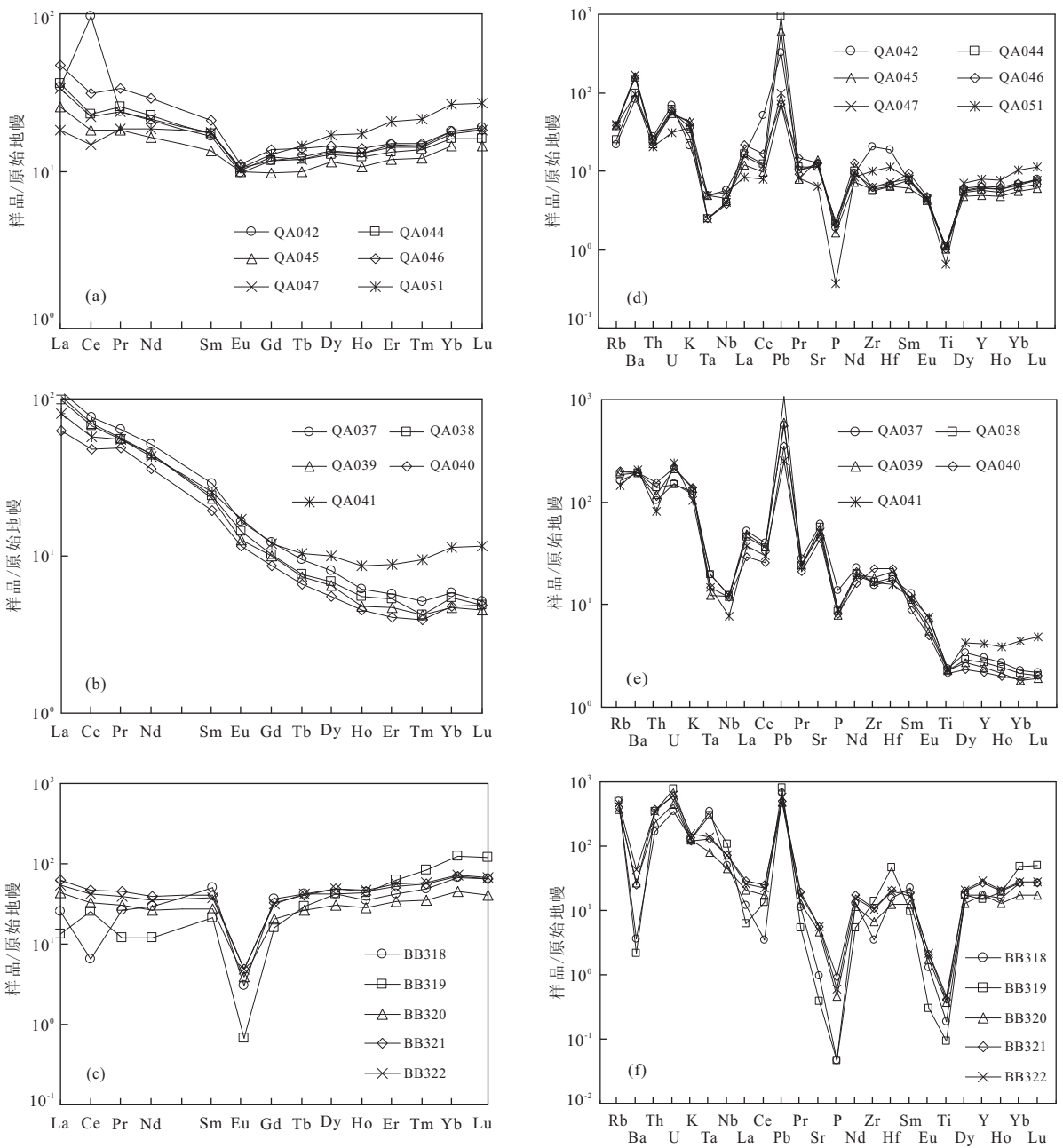


图 4 造山前、造山期和造山后花岗岩稀土元素球粒陨石标准化图解(a~c)和微量元素蛛网图(d~f)

Fig.4 Chondrite-normalized REE patterns(a-c) and primitive mantle normalized spider diagram(d-f) of pre-, syn-, and post-orogenic granitoids

a, d.造山前花岗岩; b, e.造山期花岗岩; c, f.造山后花岗岩

损的海鸥型分配模式(图 4c);轻重稀土元素分馏程度较低,LR/HR 范围在 0.63~1.88 之间, (La/Yb)_N在 0.11~1.00 之间;Sm/Nd 在 0.34~0.58 之间,表明化学分异程度相对较低;铕异常($\delta Eu = 0.04 \sim 0.17$)十分显著,反映岩浆演化过程中发生了强烈的斜长石分离结晶作用。

3.3 微量元素

在花岗岩的微量元素蛛网图(图 4d~4f)中,造

山前花岗岩亏损 P 和 Ti 高场强元素, Ta 和 Nb 相对亏损,显著富集的元素包括 Rb、Sr、Th、U、La、Zr、Hf 及 Pb 等大离子亲石元素、放射性元素(图 4d)。造山期花岗岩大离子亲石元素和放射性元素均比较富集, Ta、Nb、P 和 Ti 相对亏损,显著富集的元素包括 Rb、Sr、Th、U、La 等(图 4e)。造山后花岗岩明显亏损元素有 Ba、P 和 Ti,其他元素均有富集趋势,尤其显著富集的元素有 Rb、Th、U 及 Pb,包括

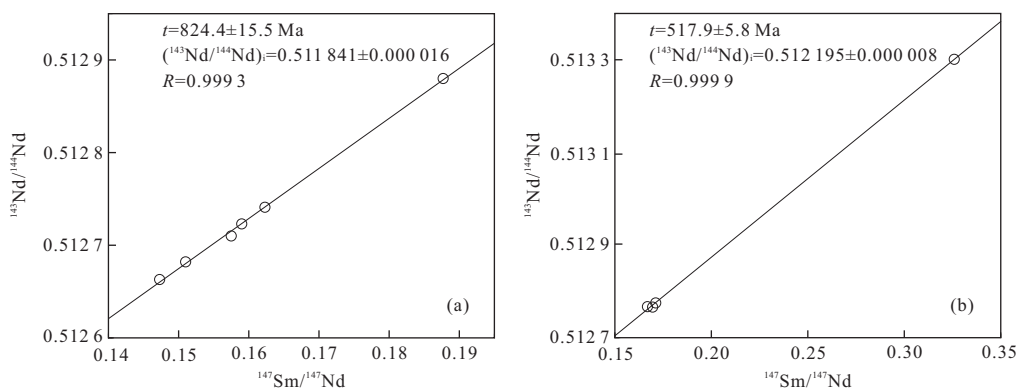


图 5 造山前(a)和造山后(b)花岗岩 Sm-Nd 全岩等时线

Fig.5 The Sm-Nd whole rock isochrons of pre-orogen(a) and post-orogen(b) granitoids

大离子亲石元素、放射性元素(图 4f), Pb 在 3 期花岗岩岩体均显著富集。各期花岗岩均具有 P 和 Ti 的亏损特征, 说明岩浆经历了较强的磷灰石和钛铁矿的分离结晶作用(杨德彬等, 2009); 各期花岗岩均富集强不相容元素 Rb 表明, 它们在形成过程中演化分异十分充分。造山前和造山期花岗岩的 Ta-Nb-Ti 负异常特征, 反映与俯冲作用有关(Turner *et al.*, 1996)。造山后花岗岩中的负 Ba 异常表明这类花岗岩是地壳岩石部分熔融的产物(Wan, 1999)。

3.4 Sm-Nd 同位素

埃塞北部造山期花岗岩同位素测年的报道较多(Teklay, 1997; De Souza Filho and Drury, 1998; Tadesse, 1998), 由 Tadesse *et al.* (2000) 对埃塞北部区域花岗岩进行的 Sm-Nd、Rb-Sr 及 Th-U-Pb 锆石同位素研究表明, 研究区内的达斯特(Deset)造山期花岗岩岩体的同位素年龄为 757 ± 30 Ma。然而研究区造山前花岗岩尚无确切的年龄数据, 造山后花岗岩测年数据及测试方法有限, 为此针对造山前和造山后花岗岩进行了全岩 Sm-Nd 同位素分析, 分析数据见表 2。

造山前花岗岩 6 个样品的全岩 Sm-Nd 等时线年龄限制在 (824.4 ± 15.5) Ma (图 5a), $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ 比值为 $0.1423 \sim 0.1827$, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 比值变化范围在 $0.512613 \sim 0.512830$ 之间, Nd 的初始比值为 0.511841 , $\epsilon_{\text{Nd}}(0)$ 在 $-0.117042 \sim 3.745333$ 之间, $\epsilon_{\text{Nd}}(t) = 5.18$, 表明源岩主体来自亏损地幔。造山后花岗岩 4 个样品的全岩 Sm-Nd 等时线年龄限制在 517.9 ± 5.8 Ma (图 5b), $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ 比值为 $0.1669 \sim 0.3259$, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 比值变化范围为 $0.512766 \sim 0.513301$, Nd 的初始比值为 0.512195 , $\epsilon_{\text{Nd}}(0)$ 为 $2.496889 \sim 12.933103$, $\epsilon_{\text{Nd}}(t) = 4.38$, 表明

源岩物质来自地幔源; 但除 BB319 号样品的 $\text{Sm}/\text{Nd} = 0.54$ 外, 其他 3 个样品 Sm/Nd 比值均在 0.28 左右, 小于 0.318, 反映为地壳源。因此, 可能的情况应是, 由亏损地幔衍生的岩浆混入大量先期地壳物质, 分异后形成中酸性岩浆。需要指出的是, 由于造山前和造山后花岗岩的 $f_{\text{Sm}/\text{Nd}} > -0.3$, 用单阶段模式计算 t_{DM} 会产生较大的偏差, 因此, 模式年龄在研究区不适用。

4 讨论

4.1 岩浆源区性质及成因

高场强元素比值在地幔部分熔融过程中变化较小, 在岩浆分离结晶过程中几乎保持不变, 其比值的差异被认为是源区成分的不同所引起的(李福林等, 2011)。造山前和造山期花岗岩的 Nb/Ta 平均比值为 100.75 和 40.97, 远远大于原始地幔均值 17.5 ± 2 (Hofmann, 1988; Green, 1995), 反映总体以幔源物质为主。造山后花岗岩 Nb/Ta 平均值为 3.73, 小于下地壳均值 8.3 (Rudnick and Gao, 2003), 岩体主要为陆壳物质部分熔融形成。高场强元素比值反映的各花岗岩类源区性质与同位素反映的结果一致。

在 $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}) - 10^4 \times \text{Ga}/\text{Al}$ 图解(图 6a)和 $\text{Y}-\text{SiO}_2$ 图解(图 6b)中, 造山前和造山期花岗岩均落在 I 型花岗岩区域, 说明岩浆是由未经风化的火山岩熔融形成的产物; 造山后花岗岩落在 A 型花岗岩区域, 分异指数 DI 为 $91.31 \sim 95.87$, 表明其具有张性花岗岩的特征, 反映了岩浆演化的伸展构造背景, 这一背景有利于花岗岩的就位和深部流体的上升(邵济安等, 2010)。由 Nb-Y-3Ga 图解(图 6c)可知造山后花岗岩属 A2 型造山后花岗岩类型, 然而 A 型

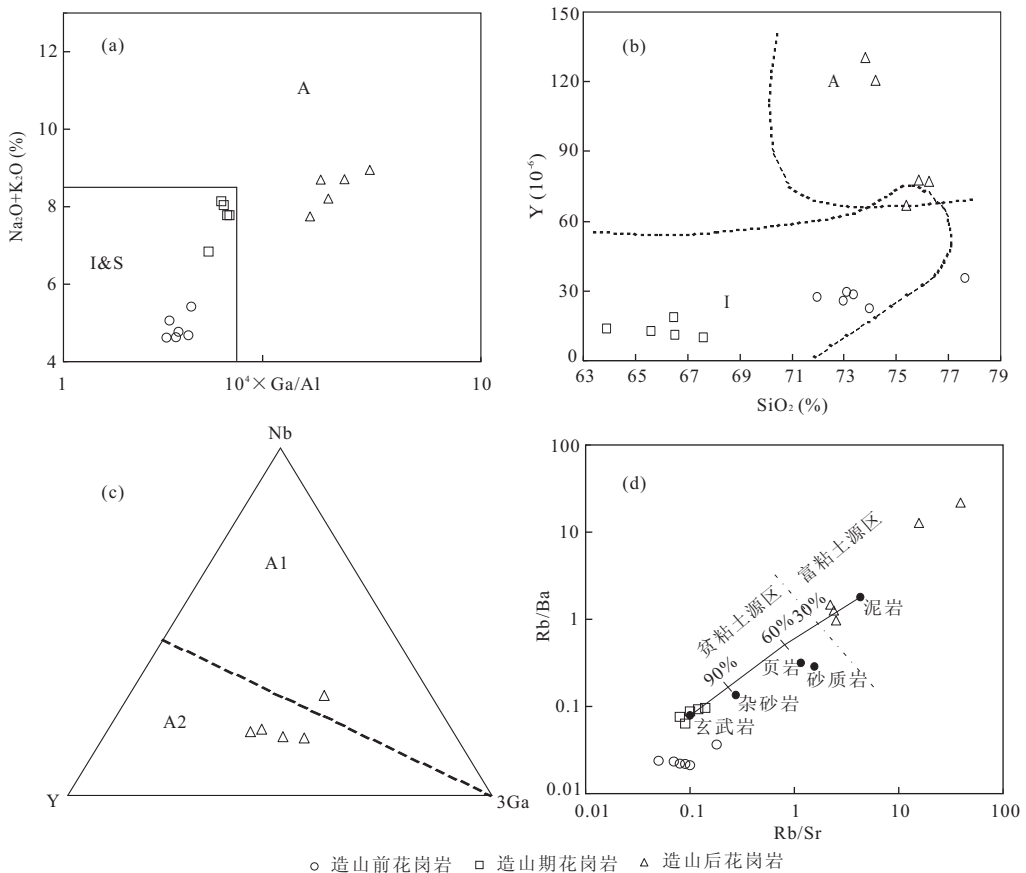


图 6 各期花岗岩 $(Na_2O+K_2O)-10^4 \times Ga/Al$ (据 Whalen *et al.*, 1987)、 $Y-SiO_2$ (据 Collins *et al.*, 1982)、 $Nb-Y-3Ga$ (据 Eby, 1992) 和 $Rb/Ba-Rb/Sr$ (据 Sylvester, 1998) 判别图

Fig.6 $(Na_2O+K_2O)-10^4 \times Ga/Al$, $Y-SiO_2$, $Nb-Y-3Ga$ and $Rb/Ba-Rb/Sr$ discrimination diagrams of granitoids

花岗岩与源岩无关, 不涉及物质来源, 代表产于伸展构造背景中的花岗岩(郭奎城等, 2011)。在花岗岩物源性性质 $Rb/Ba-Rb/Sr$ 图解(图 6d)中, 造山后花岗岩落在富粘土源区的泥岩与砂页岩之间, 表明其物质主要来源于地壳; 造山前和造山期花岗岩均落在玄武岩区附近, 反映了幔源物质的特征。

4.2 构造环境及演化

各花岗岩类主量、稀土微量元素特征明显不同, 其构造环境亦具有明显差异。在构造环境判别图 $Rb-(Yb+Ta)$ 和 $Rb-(Yb+Nb)$ 中(图 7), 造山前花岗岩落在火山岛弧区, 造山期花岗岩处在火山岛弧与同碰撞边界附近, 造山后花岗岩主要显示为板内环境。造山期花岗岩, 具有陡峭的轻稀土富集模式, 以及高 Sr、低 Y 和 Yb, 具有明显的埃达克岩特征, 说明造山期花岗岩产生于加厚的下地壳的部分熔融, 处于应力挤压状态, 地壳加厚, 体现了造山过程的存在。造山后花岗岩微量元素 Sr、Ba、Ti 和 P 的强烈亏损, 强烈负 Eu 异常, Yb 值较高等, 均体现了 A 型花岗岩的地球化学特征(谭俊等, 2008; 张旗等,

2012), 是减薄的地壳部分熔融产物, 处于造山后的伸展状态, 地壳减薄阶段。

在构造环境 R1-R2 判别图(图 8)中, 造山前花岗岩落于地幔分异区, 与物源性性质反映一致, 指示其形成时期陆壳还未成熟, 是洋壳碎片与早期陆壳部分熔融的产物, 显然属造山前花岗岩类型; 造山期花岗岩落在碰撞后抬升区域, 反映其构造环境处于泛非造山事件的阿拉伯-努比亚地盾增生聚合阶段; 造山后花岗岩大部分落在后造山环境, 其稀土显著负铕异常, 微量元素特征等, 均反映了其构造环境为造山后的板内伸展环境。

3 类花岗岩形成的背景与该时期区域构造演化阶段相一致。研究区造山前 (824.4 ± 15.5 Ma) 和造山期 (757 ± 30 Ma) 花岗岩, 属新元古代的拉伸纪, 处于新元古代早期沟-弧-盆演化阶段 ($860 \sim 750$ Ma), 被动大陆边缘-火山岛弧环境 (Tadesse *et al.*, 2000), 该阶段莫桑比克洋洋壳向西冈瓦纳古陆东北缘俯冲消减, 发育陆缘岛弧和弧后盆地, 源于地幔物质的火山岩、侵入岩及奥菲岩残留体构成莫

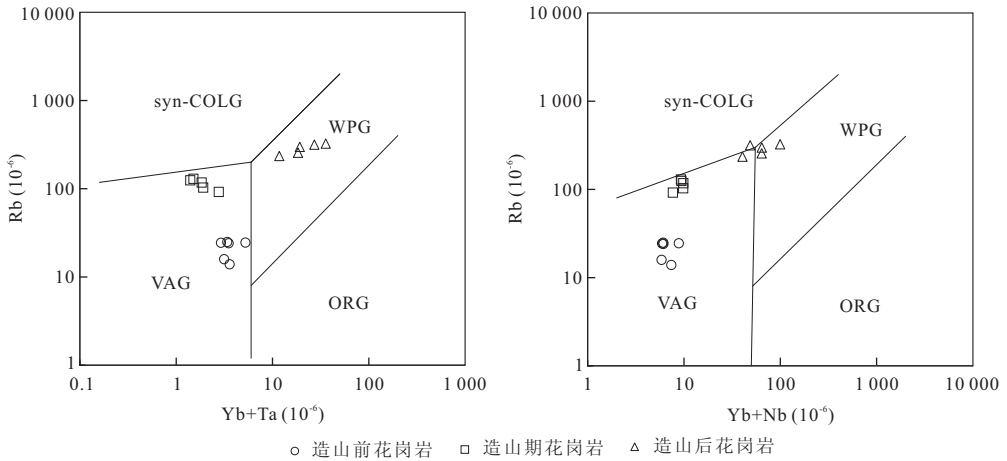


图 7 花岗岩构造环境判别图解(据 Pearce *et al.*, 1984; Pearce, 1996)

Fig.7 Tectonic environment discrimination of granitoids

syn-COLG.同碰撞花岗岩; VAG.火山弧花岗岩; WPG.板内花岗岩; ORG.洋脊花岗岩

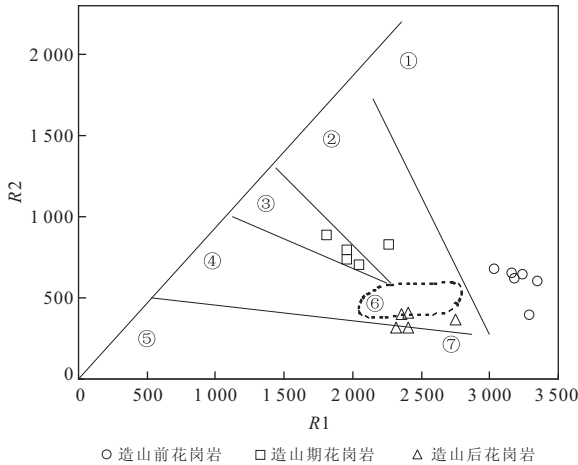


图 8 花岗岩构造环境 R1-R2 判别(据 Batchelor and Bowden, 1985)

Fig.8 R1-R2 multi-cation diagram for tectonic environment discrimination of granitoids

①地幔分异; ②碰撞前; ③碰后抬升; ④晚造山; ⑤非造山; ⑥同碰撞; ⑦后造山

桑比克洋初始陆壳, 西冈瓦纳古陆东北缘演化成被动大陆边缘环境, 形成钙碱性系列火山岩、沉积岩、侵入杂岩体复杂岩石组合, 陆壳增生扩展. 造山后花岗岩(517.9±5.8 Ma)属寒武纪的第二世, 是泛非造山事件后, 伴随洋盆关闭和阿拉伯-努比亚地盾的最终形成之后侵入的中酸性岩浆.

研究区花岗岩侵入事件的测年结果与前人研究的阿拉伯-努比亚地盾西南部花岗岩结果一致, 埃塞西部造山前花岗岩(原文为构造期)的测年结果在 820 Ma 左右 (Ayalew *et al.*, 1990), 埃塞北部至厄立特里亚纳克法(Nakfa)造山前花岗岩(原文为构

造期)年龄为 850 Ma 左右 (Teklay, 1997); 造山期花岗岩(750 Ma)同位素测年结果基本一致 (Teklay, 1997; De Souza Filho and Drury, 1998; Tadesse, 1998); Tadesse *et al.* (1997) 对埃塞北部边界的梅雷伯(Mereb)地区造山后花岗岩所测的年龄约束在 545±24 Ma, Ayalew *et al.* (1990) 对埃塞西部造山后花岗岩测得的年龄限制在 541±14 Ma. 结合地球化学特征对比研究发现, 从埃塞俄比亚西部到北部, 并进一步向北到厄立特里亚地区, 同属阿拉伯-努比亚地盾的西南部增生带, 具有相似的造山前、造山期和造山后 3 类岩浆侵入活动频繁期, 体现了阿拉伯-努比亚地盾从陆壳增生到成熟再到泛非造山期后不同时期的岩浆侵入事件.

5 结论

(1) 埃塞北部区域花岗岩具有造山前、造山期和造山后 3 期花岗岩类型, 各花岗岩类主量、稀土微量元素差异明显: 造山前花岗岩属于低钾过铝质花岗岩, 具轻稀土弱富集型分配模式; 造山期花岗岩为准铝质高钾钙碱性花岗岩, 稀土分配模式为轻稀土富集型; 造山后花岗岩为弱过铝质高钾钙碱性花岗岩, 稀土分配模式具强烈铈亏损的海鸥型. 造山前和造山后花岗岩相对亏损 P 和 Ti 高场强元素, 造山期花岗岩大离子亲石元素和高场强元素均比较富集.

(2) 造山前和造山期花岗岩均为 I 型花岗岩, 源区以幔源物质为主, 其形成时陆壳还未成熟, 是洋壳碎片与早期陆壳部分熔融的产物. 造山后为 A2 型花岗岩, 源区以壳源物质为主. 造山前和造山期花岗岩构造环境

处于新元古代早期沟—弧—盆演化阶段,被动大陆边缘—火山岛弧环境;造山后花岗岩是泛非造山事件后,伴随洋盆关闭和阿拉伯—努比亚地盾的最终形成之后侵入的中酸性岩浆,是减薄的地壳部分熔融产物。

(3) 造山前花岗岩全岩 Sm-Nd 年龄约束在 824.4 ± 15.5 Ma, 属新元古代的拉伸纪;造山后花岗岩全岩 Sm-Nd 等时线年龄为 517.9 ± 5.8 Ma, 属寒武纪第二世;对比以往区域花岗岩测年结果和地球化学特征,从埃塞俄比亚西部到北部,并进一步向北到厄立特里亚地区,同属阿拉伯—努比亚地盾的西南部增生带,具有相似的造山前、造山期和造山后 3 种花岗岩类型,反映了阿拉伯—努比亚地盾从陆壳增生到成熟再到泛非造山期后不同时期的岩浆侵入事件。

References

- Ayalew, T., Bell, K., Moore, M. J., et al., 1990. U-Pb and Rb-Sr Geochronology of Western Ethiopian Shield. *Geological Society of America Bulletin*, 102(9): 1309–1316. doi: 10.1130/0016-7606(1990)102<1309:UPARSG>2.3.CO;2
- Batchelor, R. A., Bowden, P., 1985. Petrogenetic Interpretation of Granitoid Rock Series Using Multicationic Parameters. *Chemical Geology*, 48(1–4): 43–55. doi: 10.1016/009-2541(85)90034-8
- Collins, W. J., Beams, S. D., White A. J. R., et al., 1982. Nature and Origin of A-Type Granites with Particular Reference to South-Eastern Australia. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 80(2): 189–200. doi: 10.1007/BF00374895
- De Souza Filho, C. R., Drury, S. A., 1998. A Neoproterozoic Supra-Subduction Terrane in Northern Eritrea, NE Africa. *Journal of the Geological Society*, 155(3): 551–566. doi: 10.1144/gsjps.155.3.0551
- Eby, G. N., 1992. Chemical Subdivision of the A-Type Granitoids; Petrogenetic and Tectonic Implications. *Geology*, 20(7): 641–644. doi: 10.1130/0091-7613(1992)020<0641:CSOTAT>2.3.CO;2
- Green, T. H., 1995. Significance of Nb/Ta as an Indicator of Geochemical Processes in the Crust-Mantle System. *Chemical Geology*, 120(3–4): 347–359. doi: 10.1016/009-2541(94)00145-X
- Guo, K. C., Zhang, W. L., Yang, X. P., et al., 2011. Origin of Early Permian A-Type Granite in the Wudaogou Area, Heihe City. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 41(4): 1077–1083 (in Chinese with English abstract).
- Hofmann, A. W., 1988. Chemical Differentiation of the Earth: The Relationship between Large Crust, and Oceanic Crust. *Earth and Planetary Science Letters*, 90(3): 297–314. doi: 10.1016/0012-821X(88)90132-X
- Li, F. L., Xie, Y., Zhou, H. W., et al., 2011. Petrogenesis and Geodynamic Setting of Early Cretaceous Dykes in the Chun'an Area, Zhejiang Province. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 31(3): 55–65 (in Chinese with English abstract).
- Maniar, P. D., Piccoli, P. M., 1989. Tectonic Discrimination of Granitoids. *Geological Society of America Bulletin*, 101(5): 635–643. doi: 10.1130/0016-7606(1989)101<0635:TDOG>2.3.CO;2
- Pearce, J. A., 1996. Source and Setting of Granitic Rocks. *Epi-sodes*, 19(4): 120–125.
- Pearce, J. A., Harris, N. B. W., Tindle, A. G., 1984. Trace Element Discrimination Diagrams for the Tectonic Interpretation of Granitic Rocks. *Journal of Petrology*, 25(4): 956–983. doi: 10.1093/petrology/25.4.956
- Rudnick, R. L., Gao, S., 2003. Composition of the Continental Crust. In: Holland, H. D., Turekian, K. K., eds., *Treaties on Geochemistry*. Elsevier Pergamon, Oxford.
- Shao, J. A., Mu, B. L., Zhu, H. Z., et al., 2010. Material Source and Tectonic Settings of the Mesozoic Mineralization of the Da Hinggan Mts. *Acta Petrologica Sinica*, 26(3): 649–656 (in Chinese with English abstract).
- Stern, R. J., Kröner, A., Bender, R., et al., 1994. Precambrian Basement around Wadi Halfa, Sudan: A New Perspective on the Evolution of the East Saharan Craton. *Geol. Rundsch.*, 83(3): 564–577. doi: 10.1007/BF00194162
- Sylvester, P. J., 1998. Post-Collisional Strongly Peraluminous Granites. *Lithos*, 45(1–4): 29–44. doi: 10.1016/S0024-4937(98)00024-3
- Tadesse, A. A., 1998. Geochemistry of Neoproterozoic Granitoids from the Axum Area, Northern Ethiopia. *Journal of African Earth Sciences*, 27(3–4): 437–460. doi: S0899-5362(98)00072-4
- Tadesse, T., Hoshino, M., Suzuki, K., et al., 2000. Sm-Nd, Rb-Sr and Th-U-Pb Zircon Ages of Syn- and Post-Tectonic Granitoids from the Axum Area of Northern Ethiopia. *Journal of African Earth Sciences*, 30(2): 313–327. doi: S0899-5362(00)00022-1
- Tadesse, T., Suzuki, K., Hoshino, M., 1997. Chemical Th-U-Total Pb Isochron Age of Zircon from the Mereb Granite in Northern Ethiopia. *The Journal of Earth Planetary Sciences, Nagoya University*, 44: 21–27.
- Tan, J., Wei, J. H., Li, S. R., et al., 2008. Geochemical Charac-

- teristics and Tectonic Significance of Kunlunian A-Type Granite, Guangxi. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 33(6): 743—754 (in Chinese with English abstract).
- Teklay, M., 1997. Petrology, Geochemistry and Geochronology of Neoproterozoic Magmatic Arc Rocks from Eritrea: Implications for Crustal Evolution in the Southern Nubian Shield. *Memoir 1, Department of Mines, Eritrea, Asmara*, 125.
- Turner, S., Arnaud, N., Liu, J., et al., 1996. Post-Collision, Shoshonitic Volcanism on the Tibetan Plateau: Implications for Convective Thinning of the Lithosphere and the Source of Ocean Island Basalts. *Journal of Petrology*, 37(1): 45—71. doi:10.1093/petrology/37.1.45
- Wan, Y.S., 1999. Barium Anomaly and Its Geochemical Significance. *Continental Dynamics*, 4(1): 84—87.
- Whalen, J. B., Currie, K. L., Chappell, B. W., 1987. A-Type Granites: Geochemical Characteristics, Discrimination and Petrogenesis. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 95(4): 407—419. doi:10.1007/BF00402202
- Woldemichael, B. W., Kimura, J. I., Dunkley, D. J., et al., 2010. 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. *International Journal of Earth Sciences*, 99(8): 1773—1790. doi:10.1007/s00531-009-0481-x
- Yang, D. B., Xu, W. L., Pei, F. P., et al., 2009. Petrogenesis of the Paleoproterozoic K-Feldspar Granites in Bengbu Uplift: Constraints from Petro-Geochemistry, Zircon U-Pb Dating and Hf Isotope. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 34(1): 148—164 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Q., Ran, H., Li, C. D., 2012. A-Type Granite: What is the Essence? *Acta Petrologica et Mineralogica*, 31(4): 621—626 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Q., Wang, Y. L., Jin, W. J., et al., 2008. Criteria for the Recognition of Pre-, Syn- and Post-Orogenic Granitic Rocks. *Geological Bulletin of China*, 27(1): 1—18 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 郭奎城, 张文龙, 杨晓平, 等, 2011. 黑河市五道沟地区早二叠世 A 型花岗岩成因. *吉林大学学报(地球科学版)*, 41(4): 1077—1083.
- 李福林, 谢瑜, 周汉文, 等, 2011. 浙江淳安早白垩世脉岩地球化学特征及成岩动力学背景. *矿物岩石*, 31(3): 55—65.
- 邵济安, 牟保磊, 朱慧忠, 等, 2010. 大兴安岭中南段中生代成矿物质的深部来源与背景. *岩石学报*, 26(3): 649—656.
- 谭俊, 魏俊浩, 李水如, 等, 2008. 广西昆仑关 A 型花岗岩地球化学特征及构造意义. *地球科学——中国地质大学学报*, 33(6): 743—754.
- 杨德彬, 许文良, 裴福萍, 等, 2009. 蚌埠隆起区古元古代钾长花岗岩的成因: 岩石地球化学、锆石 U-Pb 年代学与 Hf 同位素的制约. *地球科学——中国地质大学学报*, 34(1): 148—164.
- 张旗, 冉焱, 李承东, 2012. A 型花岗岩的实质是什么? *岩石矿物学杂志*, 31(4): 621—626.
- 张旗, 王元龙, 金惟俊, 等, 2008. 造山前、造山和造山后花岗岩的识别. *地质通报*, 27(1): 1—18.