

DOI:10.19948/j.12-1471/P.2023.01.08

苏丹红海州新元古代A型花岗岩的地球化学特征及构造意义

周佐民^{1,2}, 李勇³, 刘晓阳^{1,2}, 吴兴源^{1,2}

(1. 中国地质调查局天津地质调查中心, 天津 300170; 2. 中国地质调查局南部非洲矿业研究所, 天津 300170; 3. 中国地质调查局武汉地质调查中心, 武汉 430205)

摘要: 苏丹红海州位于努比亚地盾, 本文在该地厘定出一套新元古代花岗岩, 由中粗粒-中细粒正长花岗岩、中细粒碱长花岗岩组成, LA-ICP-MS 定年结果显示, 岩体形成于 713 ± 4 Ma, 属于泛非造山事件的产物。花岗岩 SiO_2 含量较高, 为 70.80%~77.83%, A/CNK 为 0.94~1.08, A/NK 为 1.12~1.44, 为准铝质-弱过铝质花岗岩。花岗岩具有相似的稀土元素和微量元素配分模式, 稀土配分模式呈右倾 V 字形曲线, 轻重稀土分异中等 ($\text{LREE/HREE}=2.46\sim 7.13$), δEu 为 0.30~0.57, 负锆异常中等-强烈。富含大离子亲石元素 Th、U、K 和高场强元素 Zr、Hf, 亏损高场强元素 Nb、Ta、Sr、P 和 Ti。花岗岩具有低 I_{Sr} 比值、亏损 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值和 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值, T_{DM1} 与 T_{DM2} 值较为一致。岩体为 A_2 型花岗岩, 形成于俯冲阶段弧后拉张环境, 因弧后伸展减薄导致软流圈物质上涌, 明显的升温、减压促使新生地壳部分熔融。

关键词: 苏丹红海州; 努比亚地盾; 新元古代; A型花岗岩; 新生地壳; 弧后拉张

中图分类号: P588.121; P595; P542

文献标识码: A

文章编号: 2097-0188(2023)01-0071-10

阿拉伯-努比亚地盾是全球 Rodinia 超大陆研究、泛非造山事件研究和新生地壳研究的热点地区之一, 是由泛非造山事件形成的新元古代地盾, 也是至今地球上保存最好、出露面积最大的新生大陆地壳记录了一套完整的年轻大陆地壳的形成过程: 泛非造山演化史^[1-2]。Kennedy 最早提出泛非运动的概念, 用以表示非洲大陆上非克拉通岩系 (non-cratonic terrain) 的构造-热事件, K-Ar 时代集中在 650~540 Ma, 当时并未发现典型的造山标志或巴罗式变质带^[3]。Kröner 重新定义了泛非造山, 将其扩展为 950~450 Ma^[4]。Stern 注意到 500 Ma 的时间跨度比显生宙任何一个造山带都更长, 因此涉及到泛非造山旋回, 必须在时间跨度和区域尺度上得到更好的限制。通过对比北非、东非、南非和阿拉伯半岛以及南极、澳大利亚和南美洲的同位素和年代学特征, 将泛非的概念拓展至大冈瓦纳并且定义为现在的泛非造山 870~550 Ma^[5], 囊括了一个持久的、完整的威尔逊旋回, 代表了大洋板块的裂解、大洋俯冲、岛弧形成及弧后、板块碰撞拼合, 再到新生地壳的逃逸构造、走滑剪切、张性断裂等一系列的构造演化过程, 包括俯冲、碰撞和后碰撞时期, 不包括大陆裂解和被动大陆

边缘沉积事件。

然而, 对于时间跨度如此之大的泛非造山作用, 其构造岩浆演化阶段划分仍然存在一定的争议^[1,6-7], 比如俯冲机制下, 弧后岩浆作用的界定缺乏切实可靠的证据, 主要是很难找到确切的岩石学或者地球化学证据。苏丹红海州地区位于努比亚地盾, 也处于西冈瓦纳大陆的东缘, 是东、西冈瓦纳碰撞拼合的界限。本次在该区域厘定出一套 A 型花岗岩套, 通过岩石学、年代学和地球化学研究, 探讨其岩石成因及构造意义。

1 区域地质背景与岩石学特征

在东北非, 由于新元古代-早古生代泛非造山事件的构造、岩浆和变质活动, 形成了两个不同的地壳域: 撒哈拉准克拉通和努比亚地盾^[7]。本次研究区域位于努比亚地盾 (图 1), 该地盾是在 900~700 Ma 期间增生形成的新生陆壳, 出露面积大, 保存较为完整, 可能受控于东、西冈瓦纳的汇聚。研究区位于苏丹红海州, 出露的前寒武纪地层主要为绿片岩、黑云母片岩、绢云母片岩和大理岩等。岩浆岩较为发育, 分布较广, 总体呈近南北向、北北东向展布, 主要是

收稿日期: 2021-12-16

资助项目: 中国地质调查局项目“中-苏合作苏丹红海州地区 1/25 万地质地球化学调查项目 (1212011220911)”

作者简介: 周佐民 (1986-), 男, 助理研究员, 主要从事岩石学、地球化学和地热研究, E-mail: zzm04013114@163.com。

<http://hbdz.org.cn>

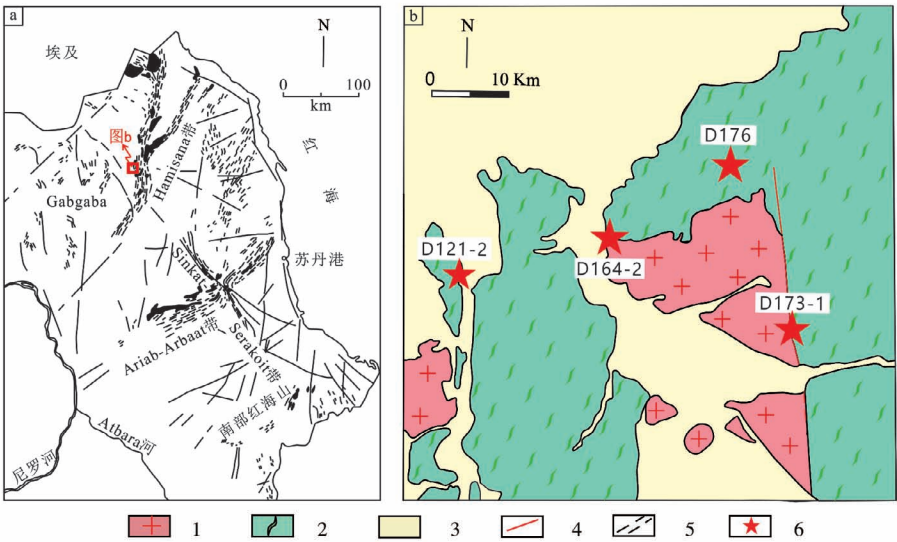


图1 苏丹努比亚地盾及其构造简图(a)和研究区地质简图(b)
Fig.1 Geological and tectonic sketch of the Nubian shield (a) and geological map of the study area (b)
1. 新元古代花岗岩;2. 新元古代绿片岩;3. 第四系;4. 断层;5. 韧性剪切带;6. 采样位置

新元古代的产物,侵入火山质绿片岩、云母片岩中。区内断裂构造以北北东向为主,其中发育的剪切带也具有同样的走向。

本次研究的岩体由中粗粒-中细粒正长花岗岩、中细粒碱长花岗岩组成(表1,图2)。所有岩体均无变质变形或变质很弱,总体呈肉红色,出露面积相对较小,呈指状或面状侵入周边围岩,围岩岩性主要为灰绿色-灰色中基性绿片岩,绿片岩片理大致为北北东-北东走向。野外地质调查见花岗岩侵入体切割绿片岩片理,接触界线截然,接触热变质环带无或不发育。D121-2样品为中粗粒正长花岗岩,块状构造,中粗粒花岗结构,由钾长石(55%±)、斜长石(10%±)、石英(25%±)、角闪石(3%±)、黑云母(7%±)组成,角闪石长柱状、短柱状,半自形-它形,蓝色-黄绿色多色性。在花岗岩体周边发育辉长岩体,两者共同侵入安山岩围岩。D173-1样品为中细粒正长花岗岩,块状构造,中细粒花岗岩结构,局部不等粒结构,由钾长石(50%±)、斜长石(25%±)、石英(24%±)、黑云母(1%±)组成。岩体展布方向大致为335°。D164-2样品为中细粒(二长)花岗岩,块状构造,中细粒花岗

结构,由钾长石(50%±)、斜长石(20%±)、石英(30%±)、少量黑云母(约1%±)组成,部分斜长石可见环带构造。中细粒(二长)花岗岩体近南北向侵入安山岩围岩。以上三个样品的副矿物主要有磷灰石、锆石、磁铁矿、钛铁矿、榍石等。中细粒碱长花岗岩(D176)为中细粒花岗结构,块状构造,由钾长石(66%±)、斜长石(6%±)、石英(25%±)、黑云母(3%±)组成,粒径1~4 mm;副矿物主要为锆石、磷灰石、磁铁矿、钛铁矿、榍石和褐帘石等。中细粒碱长花岗岩体侵入安山岩围岩,在花岗岩体中见安山岩的围岩捕虏体,岩体总体呈面状展布。

2 分析方法

2.1 锆石 U-Pb 年代学

将野外采集的5 kg 新鲜岩石样品(D121-2,中粗粒正长花岗岩)利用人工重砂方法分选出锆石,挑选晶型完好的代表性锆石用环氧树脂固定及抛光,使其露出核部,然后进行反射光和透射光照相,并进行阴极发光CL照相。CL拍照工作在南京宏创地质勘查技术服务有限公司完成。LA-ICP-MS 锆石 U-Pb

表1 野外采集样品信息表
Table 1 The information of samples collected in the field

样品号	纬度	经度	岩性	新鲜程度
出露面积	D121-2	21° 21' 20.32"N	34° 31' 50.76"E	中粗粒正长花岗岩
新鲜	~100 m ²	D164-2	21° 22' 21.85"N	34° 36' 38.76"E
中细粒花岗岩	新鲜	~20 m ²	D173-1	21° 23' 27.12"N
34° 41' 45.37"E	中细粒正长花岗岩	新鲜	~500 m ²	D176
21° 25' 36.25"N	34° 39' 15.89"E	中细粒碱长花岗岩	新鲜	~40 m ²

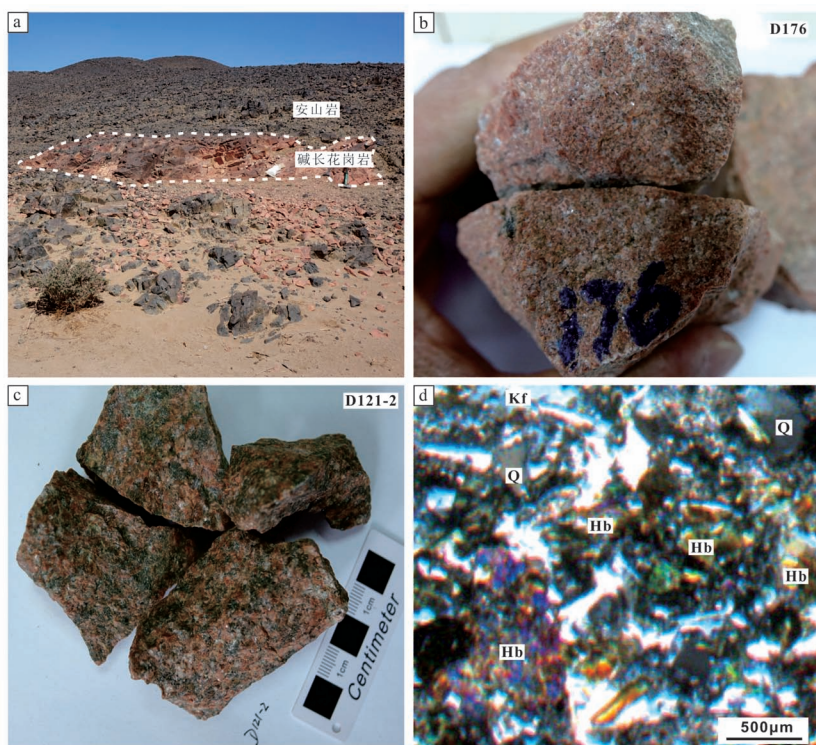


图2 苏丹红海州新元古代A型花岗岩代表性样品
Fig.2 The representative samples of the Neo-proterozoic A-type granites in Red Sea State, Sudan

a. 碱长花岗岩面状(指状)侵入安山岩;b.D176碱长花岗岩;c.D121-2正长花岗岩;d.D121-2显微镜下照片:Hb.角闪石,Kf.钾长石,Q.石英

测年工作在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室进行,使用Agilent 7500a ICP-MS完成。分析过程中,激光束斑直径采用32 μm。采用外标锆石91500进行校正, ^{206}Pb - ^{238}U 年龄和U、Th、Pb的含量由ICPMSDataCal软件获得。加权年龄与谐和年龄值(图)由ISOPLLOT 3.76计算并绘制。

2.2 全岩元素地球化学

对所采集的4个新鲜样品进行全岩元素地球化学测试,全岩主量元素、微量元素和稀土元素分析在自然资源部武汉中南矿产资源监督检测中心(武汉综合岩矿测试中心)检测。除FeO含量采用湿化学方法测得外,其余氧化物在X射线荧光光谱仪(XRF)上进行,由X荧光光谱α系数测定,分析精度为1%。稀土元素和微量元素采用电感耦合等离子质谱仪(ICP-MS)方法测得,经国际标准和国家标准监控,对于稀土元素的测定误差小于5%,对于其它微量元素的测定误差为5%~12%。

2.3 Sr-Nd-Hf 同位素

Sr-Nd同位素比值的测定分析在中国地质大学

(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室的表面热电离质谱仪(TIMMS)完成。准备约100 mg粉末样,用专用的阳离子交换柱进行分离。Sr同位素以国际标准NBS987进行监控, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值采用 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}=0.710\,275 \pm 0.000\,010$ 校正。Nd同位素采用国际标准JNdi-1进行监控, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 采用 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}=0.512\,119 \pm 0.000\,008$ 校正。锆石Hf同位素测试也在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室的LA-MC-ICP-MS上完成,锆石颗粒剥蚀束斑直径44 μm,所测Hf点主要位于锆石已有的测年点位置, ^{176}Lu 的半衰期取 1.865×10^{11} 年,亏损地幔单阶段Hf模式年龄(T_{DM})计算采用现今值 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf} = 0.283\,25$ 和 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf} = 0.038\,4$,陆壳两阶段Hf模式年龄($T_{2\text{DM}}$)采用 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf} = 0.015$ 。

3 形成时代

本次研究对代表性的正长花岗岩样品D121-2的21颗锆石进行了LA-ICP-MS测年,测年结果列于表2。锆石普遍为无色透明、浅褐色,自形-半自形,50~150 μm,长宽比约为1/1~3/1,具有典型的岩浆震荡环带(图3),这些锆石特征说明其为岩浆锆石。其中,18颗锆石给出了谐和年龄(图3),为 713 ± 4 Ma (MSWD=0.87),代表岩浆侵位年龄或者结晶年龄,说明岩体形成于新元古代。16号点的谐和度较差(86%),17号点和20号点可能为岩浆捕获的早期结晶锆石,三个锆石不参加投图。

4 地球化学特征

4.1 主量元素特征

苏丹红海州花岗岩的主量元素组成见表3,花岗岩的 SiO_2 含量较高,为70.80%~77.83%, $\text{FeO}^{\text{I}}/\text{MgO}$ 比值变化较大,为3.23%~22.93%,A/CNK为0.94~1.08,A/NK为1.12~1.44,为准铝质-弱过铝质(图4a)。在 SiO_2 - $\text{FeO}^{\text{I}}/(\text{FeO}^{\text{I}}+\text{MgO})$ 图解中(图4b),红海

州A型花岗岩主要为铁质花岗岩类。

4.2 稀土元素和微量元素特征

苏丹红海州地区花岗岩的稀土元素和微量元素测试结果见表3,稀土元素配分模式和微量元素蛛网图见图5a-b。稀土元素含量变化稍大, $66.65\times 10^{-6}\sim 154.72\times 10^{-6}$,配分曲线模式为较缓的右倾V字形或“海鸥型”曲线,轻重稀土分异中等,LREE/HREE值

为2.46~7.13, δEu 为0.30~0.57,具有较为中等-强烈的负铕异常。 Eu 负异常随 SiO_2 含量增大逐渐强烈,可能与长石尤其是斜长石的结晶分离有关。红海州A型花岗岩富含大离子亲石元素Th、U、K和高场强元素Zr、Hf,亏损高场强元素Nb、Ta、Sr、P和Ti,所有样品的微量元素标准化配分模式基本一致,反映出具有共同的源区。Sr、P和Ti随岩浆结晶分异演化,负

表2 红海州花岗岩LA-ICP-MS锆石U-Pb同位素测试结果
Table 2 LA-ICP-MS zircon U-Pb isotopic analyses of the granites in Red Sea State

点号	Th ($\times 10^{-6}$)	U ($\times 10^{-6}$)	Th/U	同位素比值				年龄 /Ma			
				$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ
D121-2-01	255	1 096	0.23	1.010 9	0.029 3	0.114 9	0.001 3	709	14.8	701	7.4
D121-2-02	258	1 115	0.23	1.024 5	0.031 4	0.114 7	0.001 2	716	15.8	700	7.0
D121-2-03	193	837	0.23	1.015 6	0.031 0	0.117 4	0.001 4	712	15.6	716	8.1
D121-2-04	169	943	0.18	1.051 1	0.028 4	0.116 6	0.001 5	729	14.1	711	8.7
D121-2-05	235	1 057	0.22	1.024 9	0.025 8	0.117 5	0.001 2	716	13.0	716	6.7
D121-2-06	203	865	0.23	1.007 2	0.026 1	0.117 8	0.001 2	707	13.2	718	6.8
D121-2-07	130	591	0.22	1.059 9	0.031 4	0.117 8	0.001 3	734	15.5	718	7.5
D121-2-08	219	990	0.22	1.007 9	0.032 8	0.115 0	0.001 5	708	16.6	702	8.5
D121-2-09	201	912	0.22	1.080 5	0.044 3	0.116 2	0.001 7	744	21.6	708	9.6
D121-2-10	136	718	0.19	1.093 5	0.046 7	0.114 7	0.001 6	750	22.7	700	9.2
D121-2-11	114	706	0.16	1.091 3	0.034 6	0.118 0	0.001 5	749	16.8	719	8.6
D121-2-12	47.3	213	0.22	1.158 3	0.048 7	0.117 8	0.001 9	781	22.9	718	10.8
D121-2-13	103	604	0.17	1.118 0	0.038 3	0.118 0	0.001 7	762	18.4	719	9.7
D121-2-14	140	736	0.19	1.154 7	0.040 0	0.118 4	0.001 5	779	18.9	721	8.7
D121-2-15	159	845	0.19	1.118 6	0.040 2	0.118 4	0.001 7	762	19.3	721	9.6
D121-2-16	202	912	0.22	1.245 4	0.046 1	0.118 1	0.001 6	821	20.9	719	9.1
D121-2-17	205	1 007	0.20	1.122 1	0.041 0	0.123 2	0.001 7	764	19.6	749	9.6
D121-2-18	135	724	0.19	1.134 0	0.043 0	0.116 9	0.002 0	770	20.4	712	11.6
D121-2-19	156	740	0.21	1.064 1	0.036 3	0.117 3	0.001 7	736	17.9	715	9.6
D121-2-20	140	789	0.18	1.168 7	0.038 2	0.122 8	0.001 6	786	17.9	747	9.5
D121-2-21	245	1 062	0.23	1.116 7	0.034 4	0.118 3	0.001 5	761	16.5	721	8.7

注:以上年龄数据在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室通过LA-ICP-MS完成。

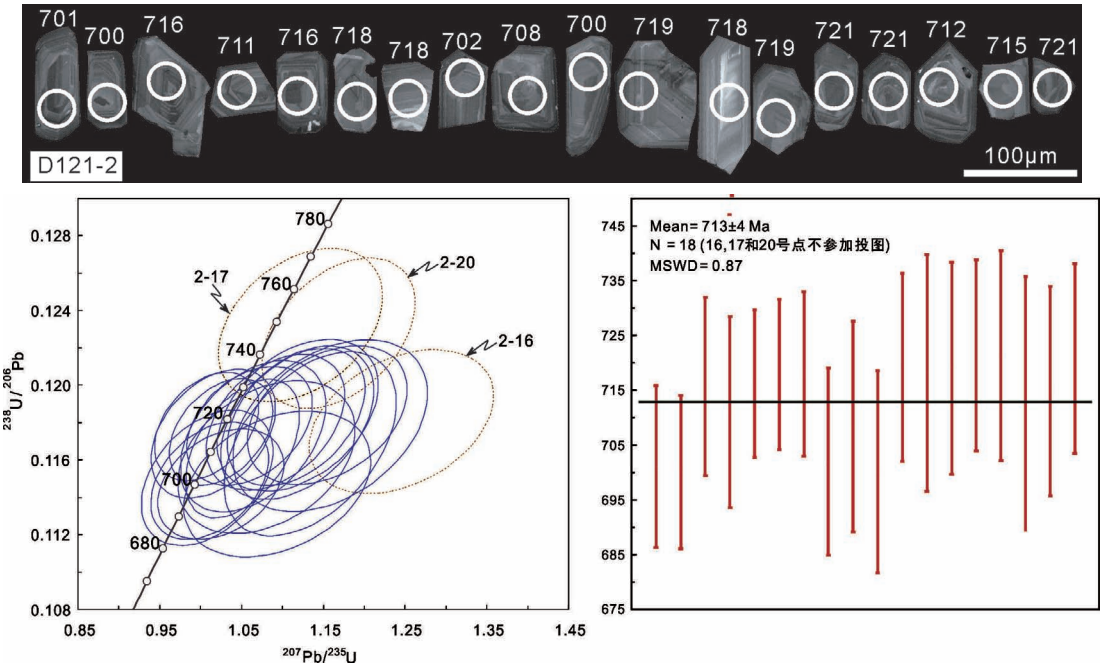


图3 苏丹红海州花岗岩锆石CL特征与锆石U-Pb谐和图
Fig.3 Cathodoluminescence (CL) images of selected zircons and Zircons U-Pb concordia diagram

异常逐渐增强,可能是由于斜长石、磷灰石和含钛矿物(比如钛铁矿和榍石)的分离结晶导致的。

4.3 Sr–Nd–Hf 同位素特征

苏丹红海州花岗岩的 Sr-Nd 同位素测试结果和计算结果见表4,本次对样品 D121-2 进行了 Sr-Nd 同位素测试, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}=0.706\ 4$, $\epsilon_{\text{Nd}}(t)=+7.00$, $T_{2\text{DM}}=0.85$ 。对样品 D176 进行锆石 Hf 同位素测试,测试结果和计算结果见表4, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 $+6.8\sim+9.3$, 平均值为 $+8.20$, T_{DM1} 值为 $0.92\sim1.02\ \text{Ga}$, T_{DM2} 值为 $1.04\sim1.20\ \text{Ga}$ 。

5 岩石成因

5.1 成因类型

苏丹红海州花岗岩为准铝质–弱过铝质,刚玉分子含量低($0\sim0.93$),均小于1,明显不同于典型的S型花岗岩^[10],低的 P_2O_5 含量($0.02\sim0.15\%$)也不同于典型的S型花岗岩($\text{P}_2\text{O}_5>0.20\%$)^[11]。结合其富集 Zr、Hf 等高场强元素、明显高的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 、 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值以及 T_{DM2} 值与 T_{DM1} 值较为接近的特征,区别于典型的I型花岗岩。从图4b和图6a-b的判别图解可以看出,苏丹红海州花岗岩为A型花岗岩。A₁亚类花岗岩在稀土和

微量元素配分模式图上 Nb 几乎不亏损,而 A₂ 亚类具有较强的 Nb 亏损; A₁ 亚类的 $\text{La}_\text{N}/\text{Yb}_\text{N}>12$, 负 Eu 异常不明显,而 A₂ 亚类的 $\text{La}_\text{N}/\text{Yb}_\text{N}<10$, 负 Eu 异常明显^[12-13]。红海州花岗岩亏损 Nb, Eu 负异常明显, $\text{La}_\text{N}/\text{Yb}_\text{N}<10$ ($\text{La}_\text{N}/\text{Yb}_\text{N}$ 值为 $1.23\sim4.65$), 在 Eby 等(1992) A₁-A₂ 判别图解(图6)上也全部落入 A₂ 区域^[14], 因此,红海州花岗岩应该为 A₂ 型花岗岩。

5.2 物质来源讨论

苏丹红海州地区 A 型花岗岩具有相似的稀土元素和微量元素配分模式,说明样品是同源岩浆分异形成的, Eu、Sr、P 和 Ti 元素的负异常特征也反映了长石、钛铁矿、磷灰石和榍石等矿物的分离结晶。

关于 A 型花岗岩的来源,目前仍然存在较大的争议,主要的观点有:(1)残留长英质麻粒岩重熔说,认为是在 I 型花岗岩形成之后所残留的长英质麻粒岩再次熔融形成,高温重熔促使角闪石、黑云母分解和锆石、磷灰石溶解,导致 F 和 HFSE 含量迅速增高^[15-16]; (2)英云闪长岩和花岗闪长岩直接部分熔融说^[17],认为可以由英云闪长岩在无水环境或水不饱和环境下通过部分熔融直接形成; (3)幔源碱性岩浆结

表3 红海州A型花岗岩的地球化学分析结果

Table 3 Geochemical compositions of the A-type granites in Red Sea State

样号	D121-2	D173-1	D176	D164-2	样号	D121-2	D173-1	D176	D164-2
岩性	正长花岗岩	正长花岗岩	碱长花岗岩	花岗岩	岩性	正长花岗岩	正长花岗岩	碱长花岗岩	花岗岩
SiO ₂	72.05	70.8	76.6	77.83	Ba	531	307	168	224
TiO ₂	0.305	0.756	0.088	0.07	La	23.1	18.4	13.9	7.48
Al ₂ O ₃	13.72	12.88	12.7	12.34	Ce	59.7	50.7	38	20.8
Fe ₂ O ₃	2.52	1.39	0.262	0.501	Pr	7.43	7.33	3.83	3.09
FeO	0.515	2.69	0.991	0.627	Nd	31.6	29.9	12.4	12.1
MnO	0.041	0.066	0.02	0.019	Sm	6.88	6.27	2.27	3.54
MgO	0.379	1.22	0.081	0.047	Eu	0.68	1.1	0.22	0.35
CaO	1.42	2.58	0.271	0.699	Gd	5.99	5.24	2.17	3.18
Na ₂ O	4.08	3.34	3.41	4.1	Tb	1.1	0.86	0.36	0.72
K ₂ O	4.6	3.19	5.27	3.62	Dy	6.9	5.14	2.36	5.2
P ₂ O ₅	0.051	0.154	0.016	0.016	Ho	1.46	1.02	0.52	1.15
FeO ⁱ	2.78	3.94	1.23	1.08	Er	4.06	2.72	1.62	3.41
FeO ⁱ /MgO	7.34	3.23	15.15	22.93	Tm	0.68	0.43	0.3	0.63
FeO ⁱ / (FeO ⁺ +MgO)	0.88	0.76	0.94	0.96	Yb	4.51	2.84	2.24	4.36
A/CNK	0.96	0.94	1.08	1.03	Lu	0.63	0.4	0.34	0.64
A/NK	1.17	1.44	1.12	1.16	Hf	9.66	8.18	3.58	6.55
Sc	8.54	11	5.98	8.37	Ta	0.76	0.49	0.69	0.77
Cr	10.5	33.4	22	3.3	Pb	10	6.7	11.3	7.67
Co	2.89	8.42	0.81	0.42	Th	6.07	4.09	7.81	2.75
Ni	3.28	12.5	3.74	0.32	U	4.54	1.94	3.73	3.9
Zn	30	36.2	2.8	38.2	δEu	0.32	0.57	0.30	0.31
Ga	19.2	14.4	13.1	15.9	ΣREE	154.72	132.35	80.53	66.65
Rb	51.6	45.8	52.1	36.2	LREE/HREE	5.11	6.10	7.13	2.46
Sr	141	214	22	45.9	10 ⁴ ×Ga/Al	2.64	2.11	1.95	2.43
Y	35.1	25.8	14.2	28.1	Y/Nb	3.71	4.07	2.85	7.72
Zr	303	338	64.1	103	Ce/Nb	6.32	8.00	7.62	5.71
Nb	9.45	6.34	4.99	3.64	Yb/Ta	5.93	5.80	3.25	5.66
Cs	0.4	0.9	0.71	0.37	Zr+Nb+Ce+Y	407.25	420.84	121.29	155.54

注:主量元素单位为%;微量元素的单位为10⁻⁶;以上数据在自然资源部中南矿产资源监督检测中心检测完成。

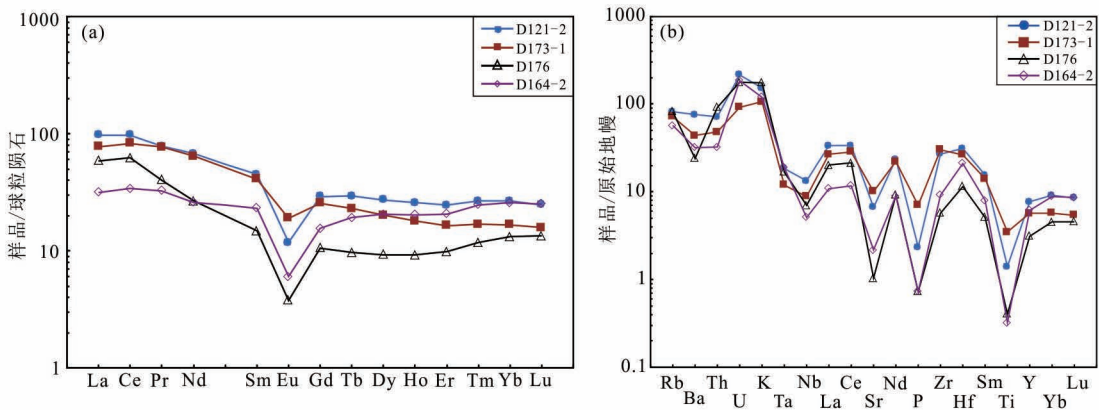


图4 ANK-A/CNK图解(a)和SiO₂-FeOⁱ/(FeOⁱ+MgO)图解(b) (据参考文献[8])
Fig.4 ANK-A/CNK diagram (a) and SiO₂-FeOⁱ/(FeOⁱ+MgO) diagram (b)

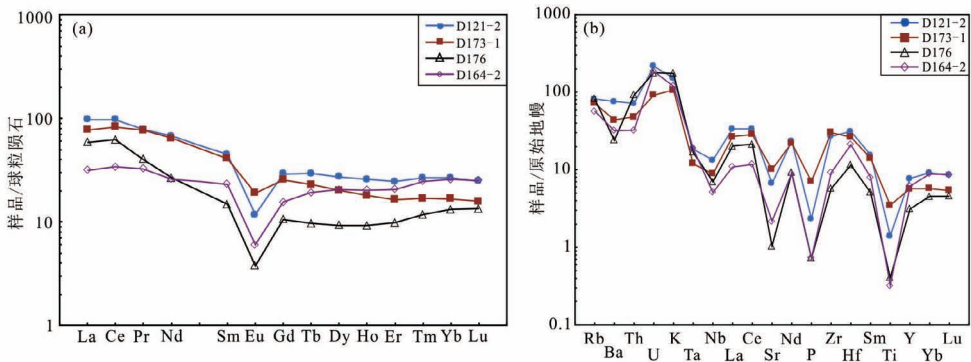


图5 苏丹红海州A型花岗岩的稀土配分模式和微量元素蛛网图 (据参考文献[9])
Fig.5 Chondrite-normalized REE patterns (a) and the Chondrite-normalized multi-element diagram of the A-type granites in Red Sea State (b)

表4 苏丹红海州花岗岩的Sr-Nd同位素组成

Table 4 Sr-Nd isotopes of the granites in Red Sea State

样品号	⁸⁷ Rb/ ⁸⁶ Sr	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr	(⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr) _i	¹⁴⁷ Sm/ ¹⁴⁴ Nd	¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd	ε _{Nd} (t)	T _{2DM} /Ga	Sm/Nd	f _{Sm/Nd}
D121-2	1.06	0.717 19	0.706 4	0.13	0.512 692	7.00	0.85	0.22	-0.33

注:以上数据由中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室的表面热电离质谱仪(TIMS)完成。

表5 苏丹红海州花岗岩的锆石Hf同位素组成

Table 5 Zircon Hf isotopes of the granites in Red Sea State

点号(D176)	¹⁷⁶ Hf/ ¹⁷⁷ Hf	2σ	¹⁷⁶ Yb/ ¹⁷⁷ Hf	2σ	¹⁷⁶ Lu/ ¹⁷⁷ Hf	2σ	ε _{Hf} (t)	T _{DM1} /Ga	T _{DM2} /Ga	f _{Lu/Hf}
1	0.282 607	0.000 036	0.034 144	0.000 820	0.001 323	0.000 031 7	9.3	0.92	1.04	-0.96
2	0.282 532	0.000 040	0.022 881	0.000 218	0.000 916	0.000 008 8	6.8	1.02	1.20	-0.97
3	0.282 583	0.000 042	0.029 975	0.000 167	0.001 181	0.000 006 0	8.5	0.95	1.09	-0.96

注:以上数据由中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室的LA-MC-ICP-MS完成。

晶分离后形成残余花岗质熔体^[14,18]; (4)幔源碱性岩浆与壳源岩浆(岩石)反应后形成正长质岩浆,经分异演化形成花岗质熔体^[19];或正长质岩浆再与酸性壳源岩浆(岩石)反应,形成花岗质岩石; (5)幔源拉斑质岩浆极端分异或底侵拉斑玄武岩低度部分熔融^[20-22]; (6)源自地幔岩石重熔分异形成碱性花岗岩^[23]; (7)经幔源岩浆底侵加热后,下地壳发生熔融^[16,24,25]; (8)壳幔岩浆混合^[26]。可以看出,A型花岗岩的成因和物质来源仍

然没有统一的认识,或者说任何一种单一的模式都无法概括和兼顾所有问题,或许是多因子作用的综合过程^[12-13],A型花岗岩可能是多源多成因的^[27]。

前两种模式都是熔融模式,模式一最大的挑战有两点:其一,石英+斜长石+碱性长石+角闪石+黑云母±榍石±锆石±磷灰石的英云闪长质残留相矿物组合不符合实验测试结果,随温度逐渐升高和部分熔融程度逐渐增大,碱性长石(860℃,5%熔融程度)和

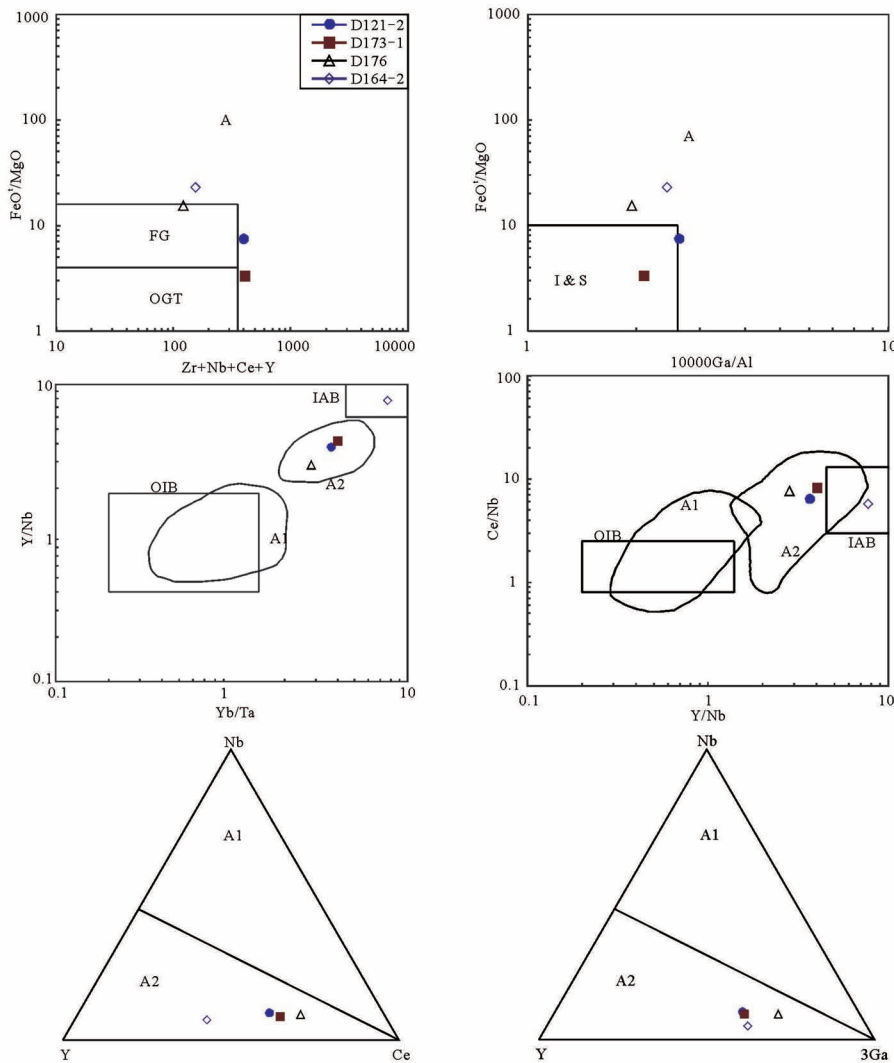


图6 苏丹红海州花岗岩的岩石类型判别图解 a-b图引自文献^[15];c-f图引自文献^[14]

Fig.6 Discrimination diagrams of the A-type granites in Red Sea State

A. A型花岗岩; I&S. I型和S型花岗岩; FG. 分异的长英质花岗岩; OGT. 没分异的M、I和S型花岗岩; A1. A1型花岗岩; A2. A2型花岗岩; OIB. 洋岛玄武岩; IAB. 岛弧玄武岩

黑云母(880℃, 18%熔融程度)相继消失, 而15%的熔融程度是形成活动岩浆的最低限度。因此, 英云闪长质岩石至少在熔融时不可能有碱性长石和黑云母的残留。其二, 主量元素地球化学特征矛盾。理论上, 残留相应富Ca、Al(斜长石)和Fe、Mg(辉石±角闪石), 亏损Si和K, Fe/Mg比值低, 而实际却完全相反。模式二的挑战在于微量元素地球化学特征: A1亚类花岗岩的Y、Nb、Ta、Zr、Hf、Ga、Ce等不相容元素与OIB洋岛玄武岩具有明显的亲缘性。苏丹红海州目前尚未发现有幔源碱性岩浆岩和正长岩, 因此排除模式三和模式四。红海州A型花岗岩非碱性花岗岩, 因此模式六不合适。花岗岩中并未发现镁铁质包体, Hf同位素比较均一, 所以模式八也不合适。本

花岗岩SiO₂含量较高(70.8%~77.83%, 平均值为74.32%)、同时期的基性-超基性岩浆岩很少发育, 排除了幔源岩浆直接分异演化或底侵岩浆低度部分熔融模式, 该模式通常产生低硅的中性岩石组分^[28]。根据前人研究资料, 努比亚地盾在700~850 Ma期间处于俯冲阶段, 包括俯冲消减带、弧和弧后构造机制。苏丹位于努比亚地盾, 而努比亚地盾主要由新元古代的新生地壳组成, 其源于地幔分异演化, 因此苏丹红海州的A型花岗岩可能是俯冲阶段弧后拉张机制启动后, 幔源岩浆上涌, 促使新生地壳重熔而形成的。Litvinovsky等经过研究发现, 在努比亚地盾上, 大量的A型花岗岩形成于新生地壳^[29]。不同于古老克拉通的Sr-Nd同位素特征^[30-31], 前人研究认为, 新生的新元古代地幔熔体的初始Sr同位素比值约为0.703^[7,32], ε_{Nd}(t)值的变化范围为+3~+10^[33], 红海州A型花岗岩具有低的I_{Sr}比值(0.706

4)、亏损的ε_{Nd}(t)值(+7.00)和ε_{Hf}(t)值(+6.8~+9.3, 平均值为+8.20)以及较为一致的T_{DM1}、T_{DM2}值(0.92~1.02 Ga和1.04~1.20 Ga), 说明其很可能是源于新生地壳的部分熔融。

6 形成的构造环境

A型花岗岩最初的定义是“非造山”的张性环境^[17], 但目前它的含义得到了空前的拓展, 不再限于板内裂解的“非造山”环境, 还可以形成于后碰撞时期、后造山以及与俯冲相关的构造环境^[34-36]。Bonin提出大的A型花岗岩省往往不发育在板内环境, 而是位于板块的边缘, A型花岗岩在空间上与造山事件无关, 但在时间上关系密切, 可延续至造山事件结束

后 500 Ma,直到碱性岩的出现^[13]。虽然 A 型花岗岩可以形成于整个地质史的不同构造部位^[15],但岩浆侵入于伸展拉张的构造环境为大家所公认,区域构造背景可以是伸展、挤压或剪切走滑构造环境^[37,38]。

苏丹红海州位于努比亚地盾,新元古代 800 ~ 650 Ma 期间,大洋岛弧、弧后盆地混杂体横向拼合堆积形成了阿拉伯-努比亚地盾的新生物质,同时也形成了一系列弧-弧缝合带,伴随发育大洋俯冲、岛弧和弧后岩浆作用。Evuk 等认为,720 ~ 630 Ma 为泛非造山最后的岩浆活动、变质活动峰期,遍布于撒哈拉准克拉通、Bayuda 沙漠和阿拉伯-努比亚地盾^[7]。根据前人研究成果,在全球的构造演化过程中,包括泛非造山和古亚洲洋的构造演化,850 Ma 为俯冲起始时间(initial subduction),850 ~ 700 Ma 或 870 ~ 690 Ma 为俯冲阶段,700 ~ 625 Ma 为主碰撞期,两期都伴随着大量的岩浆作用和变质作用^[39-41]。最近,有学者在努比亚地盾与苏丹相邻的厄立特里亚地区发现了 851 Ma 的 A 型花岗岩,其形成于俯冲作用下的弧后伸展构造环境^[42],与本次研究的 A 型花岗岩属于同一构造阶段,且两者是在相似构造背景下形成的。红海州 A 型花岗正是在俯冲阶段弧后拉张环境下,由于软流圈物质上涌,促使新生地壳熔融后经过分离结晶演化而来。

7 结论

(1) 苏丹红海州花岗岩 SiO_2 含量较高,为准铝质-弱过铝质 A_2 型花岗岩。LA-ICP-MS 测年结果显示,其形成于 713 ± 4 Ma。

(2) 花岗岩具有低的 I_{Sr} 比值、亏损的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值和 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值, T_{DM1} 与 T_{DM2} 值也较为一致,可能源于新生地壳的部分熔融。

(3) 岩体形成于俯冲阶段弧后拉张环境,因弧后伸展减薄导致软流圈物质上涌,明显的升温、减压促使新生地壳部分熔融。

致谢:室内测试分析得到了中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室和中南矿产资源监督检测中心的大力支持,审稿专家和责任编辑仔细审阅文稿并提出了很好的修改意见,在此谨致谢忱。

参考文献:

[1] 魏浩,徐九华,王建雄,等.非洲东北部阿拉伯-努比亚地盾(ANS)构造演化与金成矿作用[J].地质与勘探,2015,

51(2):383-394.

- [2] ORIOLO S, OYHANTÇABAL P, WEMMER K, et al. Contemporaneous assembly of Western Gondwana and final Rodinia break-up: Implications for the supercontinent cycle[J]. Geoscience Frontiers, 2017.
- [3] KENNEDY W Q. The structural differentiation of Africa in the Pan-African (± 500 m.y.) tectonic episode[J]. In: Leeds University Research Institute for African, 1964, 8: 48-49.
- [4] KRÖNER. Late Precambrian plate tectonics and orogeny: a need to redefine the term Pan-African[J]. In: Klerkx, J., Michot, J. (Eds.), African Geology. Royal, 1984: 23-28.
- [5] STERN R J. Arc asseby 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: 319-351.
- [6] ORIOLO S, OYHANT ÇABAL P, WEMMER K, et al. Contemporaneous assembly of Western Gondwana and final Rodinia break-up: Implications for the supercontinent cycle[J]. Geoscience Frontiers, 2017.
- [7] EVUK D, FRANZ G, FREI D, et al. The Neoproterozoic evolution of the central-eastern Bayuda Desert (Sudan)[J]. Precambrian Research, 2014, 240: 108-125.
- [8] FROST B R, BARNES C G, COLLINS W J, et al. A Geochemical Classification for Granitic Rocks[J]. Journal Of Petrology, 2001, 42: 2033-2048.
- [9] 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.
- [10] WOLF M B, LONDON D. Apatite dissolution into peraluminous haplogranitic melts: An experimental study of solubilities and mechanisms[J]. Geochimica Et Cosmochimica Acta, 1994, 58(19): 4127-4145.
- [11] CHAPPELL B W. Aluminium saturation in I- and S-type granites and the characterization of fractionated haplogranites[J]. Lithos, 1999, 46(3): 535-551.
- [12] 周佐民. 碱质 A 型花岗岩的判别、成因与构造环境[J]. 华南地质与矿产, 2011, 27(3): 215-220.
- [13] BONIN B. A-type granites and related rocks: Evolution of a concept, problems and prospects[J]. Lithos, 2007, 97(1-2): 1-29.
- [14] EBY G N. Chemical subdivision of the A-type granitoids: Petrogenetic and tectonic implications[J]. Geology. 1992, 20: 641-644.
- [15] WHALEN J B, CURRIE K L, CHAPPELL B W. A-type granites: geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1987, 95(4): 407-419.
- [16] COLLINS W J, BEAMS S D, WHITE A J R, et al. Nature and origin of A-type granites with particular reference to

- southeastern Australia[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1982, 80(2): 189–200.
- [17] CREASER R A, PRICE R C, WORMALD R J. A-type granites revisited: Assessment of a residual–source model[J]. Geology, 1991, 19(2): 163.
- [18] LOISELLE M C, WONES D R. Characteristics and origin of anorogenic granites[J]. Geological society of American Bulletin (Abstracts with Programs), 1979, 11: 468.
- [19] MINGRAM B, TRUMBULL R B, LITTMAN S, et al. A petrogenetic study of anorogenic felsic magmatism in the Cretaceous Paresis ring complex, Namibia: evidence for mixing of crust and mantle–derived components[J]. Lithos, 2000, 54(1): 1–22.
- [20] LITVINOVSKY B A, JAHN B, ZANVILEVICH A N, et al. Crystal fractionation in the petrogenesis of an alkali monzodiorite – syenite series: the Oshurkovo plutonic sheeted complex, Transbaikalia, Russia[J]. 2002, 64: 97–130.
- [21] TURNER S P, FODEN J D, MORRISON R S. Derivation of some A2 type magmas by fractionation of basaltic magma: An example from the Pathaway Ridge, South Australia[J]. Lithos, 1992, 28: 151–179.
- [22] FROST C D, FROST B R, CHAMBERLAIN K R, et al. Petrogenesis of the 1.43 Ga Sherman batholith, SE Wyoming, USA: a reduced, rapakivi-type anorogenic granite[J]. Journal of Petrology, 1999, 40(12): 1771–1802.
- [23] 赵振华, 王中刚, 邹天人, 等. 新疆乌伦古富碱侵入岩成因探讨[J]. 地球化学, 1996, 25(3): 205–220.
- [24] ANDERSON L J, BENDER E E. Nature and origin of Proterozoic A-type granitic magmatism in the southwestern United States of America[J]. Lithos, 1989, 23: 19–52.
- [25] RÄMÖ O T, MCLEMORE V T, HAMILTON M A, et al. Intermittent 1630–1220 Ma magmatism in central Mazatzal province: New geochronologic piercing points and some tectonic implications[J]. Geology, 2003, 31(4): 335.
- [26] YANG J H, WU F Y, CHUNG S L, et al. A hybrid origin for the Qianshan A-type granite, northeast China: Geochemical and Sr–Nd–Hf isotopic evidence[J]. Lithos, 2006, 89(1–2): 89–106.
- [27] 王德滋, 周新民. 中国东南部晚中生代花岗质火山–侵入杂岩成因与地壳演化[J]. 北京: 科学出版社, 2002: 160–188.
- [28] 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.
- [29] LITVINOVSKY B A, JAHN B M, EYAL M. Mantle–derived sources of syenites from the A-type igneous suites – New approach to the provenance of alkaline silicic magmas[J]. Lithos, 2015, 232: 242–265.
- [30] 任军平, 王杰, 古阿雷, 等. 赞比亚东北部正长花岗岩的锆石 U–Pb 年龄和 Lu–Hf 同位素特征[J]. 地质调查与研究, 2019, 42(3): 161–165.
- [31] SUN K, ZHANG L L, ZHAO Z D, et al. Episodic crustal growth in the Tanzania Craton: evidence from Nd isotope compositions[J]. China Geology, 2018, 1(2): 210–224.
- [32] 吴兴源, 刘晓阳, 任军平, 等. 坦桑尼亚 Panda 山碳酸岩地球化学特征及岩石成因研究进展[J]. 地质调查与研究, 2019, 42(2): 86–95.
- [33] ALI K A, MOGHAZI A M, MAURICE A E, et al. Composition, age, and origin of the ~620 Ma Humr Akarim and Humrat Mukbid A-type granites: No evidence for pre–Neoproterozoic basement in the Eastern Desert, Egypt[J]. International Journal of Earth Sciences, 2012, 101: 1705–1722.
- [34] EBY G N. The A-type granitoids: A review of their occurrence and chemical characteristics and speculations on their petrogenesis[J]. Lithos, 1990, 26(1–2): 115–134.
- [35] 吴锁平, 王梅英, 戚开静. A 型花岗岩研究现状及其述评[J]. 岩石矿物学杂志, 2007, (1): 57–66.
- [36] 贾小辉, 王强, 唐功建. A 型花岗岩的研究进展及意义[J]. 大地构造与成矿学, 2009, 33(3): 465–480.
- [37] 李小伟, 莫宣学, 赵志丹, 等. 关于 A 型花岗岩判别过程中若干问题的讨论[J]. 地质通报, 2010, (Z1): 278–285.
- [38] MILANI L, LEHMANN J, NAYDENOV K V, et al. A-type magmatism in a syn–collisional setting: The case of the Pan–African Hook Batholith in Central Zambia[J]. Lithos, 2015, 216–217: 48–72.
- [39] ABDELSALAM M G, STERN R J. Mapping Precambrian structures in the Sahara Desert with SIR–C/X–SAR radar: The Neoproterozoic Keraf Suture, NE Sudan[J]. Journal of Geophysical Research: Planets, 1996, 101(E10): 23063–23076.
- [40] DOBRETISOV N L, BUSLOV M M, VERNIKOVSKY V A. Neoproterozoic to Early Ordovician Evolution of the Paleo–Asian Ocean: Implications to the Break–up of Rodinia[J]. Gondwana Research, 2003, 6(2): 143–159.
- [41] KHAİN E V, BIBIKOVA E V, SALNIKOVA E B, et al. The Palaeo–Asian ocean in the Neoproterozoic and early Palaeozoic: new geochronologic data and palaeotectonic reconstructions[J]. Precambrian Research, 2003, 122(1): 329–358.
- [42] 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.

Review of research progress on quality assessment methods of 3D geological models

WANG Yuan-hao¹, GAO Zhen-ji^{2*}, SONG Yue²

(1. Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2. Command Center of Natural Resources Comprehensive Survey, China Geological Survey, Beijing 100055, China)

Abstract: Three-dimensional geological model plays an important role in geological prospecting and resource evaluation, and its quality determines the application potential and effect of the model. This paper reviews the research progress of 3D geological model quality evaluation at home and abroad, and systematically expounds the factors that affect the quality of 3D geological model, including the complexity of modeling geological objects, the accuracy and quality of modeling data sources, the methods of 3D geological modeling, and the expert knowledge of modeling personnel. At the same time, the paper analyzes the principle, advantages and disadvantages of the main methods of quality evaluation of 3D geological models, and holds that the quality evaluation of 3D geological models has gradually entered the era of quantitative evaluation from qualitative evaluation. Finally, this paper summarizes the problems existing in the research of 3D geological model quality assessment methods, and discusses its future development trend.

Key words: 3D geological model; model uncertainty; model quality; evaluation methods; influencing factors

Geochemical characteristics and tectonic implications of the Neoproterozoic A-type granites in Red Sea State, Sudan

ZHOU Zuo-min^{1,2}, LI Yong³, LIU Xiao-yang^{1,2}, WU Xing-yuan^{1,2}

(1. Tianjin Center, China Geological Survey, Tianjin 300170, China; 2. Mining institute of Southern Africa, China Geological Survey, Tianjin 300170, China; 3. Wuhan Center, China Geological Survey, Wuhan 430205, China)

Abstract: The Red Sea State of Sudan is located in the Nubian shield. A series of Neoproterozoic granites are identified in the Red Sea State, which consist of medium-coarse- and medium-fine-grained syenogranites and middle-fine-grained alkali feldspar granites. Zircon U-Pb dating implies the granites are intruded in 713 ± 4 Ma, which are formed in Pan-African orogenic event. They show high SiO_2 contents (70.80% ~ 77.83%). They are metaluminous or weak peraluminous with A/CNK ratios of 0.94 ~ 1.08 and A/NK ratios of 1.12 ~ 1.44. They show the similar Chondrite-normalized REE and multi-trace elements patterns. The REE patterns are right-inclined with REE medium differentiations of LREE/HREE ratios of 2.46 ~ 7.13 and display “V” shaped curve and medium to strong Eu anomaly with δEu values of 0.30 ~ 0.57. The granites are characterized by the enrichment of large ion lithophile elements (LILEs) such as Th, U, K and high field-strength elements (HFSEs) such as Zr, Hf and by the depleted Nb, Ta, Sr, P and Ti contents. They show low I_{Sr} ratios, depleted $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ values and the similar T_{DM1} and T_{DM2} values. The granites chemically show A_2 -type affinity. We propose that the 713 Ma A-type magmatism might be driven by upwelling of asthenosphere and subsequent partial melts of juvenile crust of Nubian shield on conditions of obvious Heating and decompression in a back-arc extensional setting.

Key words: Red Sea State in Sudan; Nubian shield; Neoproterozoic; A-type granite; juvenile crust; back-arc extensional setting