

<http://www.geojournals.cn/dzxb/ch/index.aspx>

苏丹白垩纪碎屑岩中的柱状节理与裂谷肩旋转

吕洪波¹⁾ 卢华复¹⁾ O. M. Abdullatif²⁾ M. Kheir²⁾

1) 南京大学地球科学系, 210093; 2) 苏丹喀土穆大学地质系

内容提要 笔者在苏丹西部 Mellit 地区白垩系碎屑岩中发现一种罕见的柱状节理, 经研究认为是沉积岩层受到中新世喷发的玄武岩熔岩流的烘烤而失水收缩形成的。可以合理地假定柱状节理在形成时是垂直于大地基准面的, 根据柱状节理和沉积岩层的产状, 笔者计算出 Mellit 地块的两期旋转事件: 自晚白垩世初期到中新世初期该地块向 338° 方向倾斜了 18°, 而自中新世以来又向 138° 方向倾斜了 18°。经过详细分析非洲大陆西部、北部、中部和东部中生代裂谷带的构造演化史后发现: Mellit 地块实际上位于南苏丹裂谷带的西北裂谷肩上, 该地块自晚白垩世初期至中新世初期, 向 NW 方向倾斜是南苏丹裂谷带于裂谷化阶段造成的裂谷肩块体的向外旋转; 该地块自中新世以来向 SE 方向倾斜是南苏丹裂谷带在后裂谷热沉降阶段造成的裂谷肩块体的向内旋转。而南苏丹裂谷带进入后裂谷热沉降阶段是与新生代东非裂谷带和红海的发育分不开的。

关键词 苏丹 白垩纪 碎屑岩 柱状节理 裂谷肩旋转

在裂谷化阶段, 地幔上涌对两侧裂谷肩大陆块体造成明显的掀斜作用, 或称为块体的旋转(包括裂谷内断块的旋转)。这种现象在年轻裂谷带(如东非裂谷带)表现得特别明显, 块体的旋转由两侧向裂谷带呈明显增强的趋势(Rouby et al., 1996)。裂谷化阶段出现的裂谷肩大陆块体向外旋转(outward rotation)早为研究者所认识, 然而人们尚未注意到: 后裂谷热沉降阶段, 伴随着地幔上涌的消失, 两侧裂谷肩块体向裂谷带也发生明显的倾斜, 笔者称其为向内旋转(inward rotation)。完整的裂谷演化旋回包含裂谷化阶段和热沉降阶段; 对于裂谷肩而言, 早、晚两种方向相反而强度相近的旋转作用常常相互抵消而掩盖块体的旋转历史, 特别是后裂谷热沉降阶段向内旋转现象。本文笔者吕洪波在苏丹喀土穆大学任教期间, 与 Abdullatif 等合作研究苏丹裂谷的沉积作用时, 在苏丹西部 Mellit 地区发现白垩纪碎屑岩中存在柱状节理(图版 I)。对这一现象的研究不仅对柱状节理的成因理论是一种补充, 而且还能够通过柱状节理和白垩纪沉积层产状关系的研究识别出苏丹西北部大陆块体向外、向内的旋转历史, 进而讨论裂谷肩地块旋转与南苏丹裂谷带的演化以及东非裂谷和红海的形成之间的成因联系。

近年来, 中国地质界对古裂谷的研究越来越多(许志琴, 1980; 唐连江, 1985; 龙汉春, 1988; 郁建华等, 1990; Xia et al., 1991, 1992; 夏邦栋等, 1992; 夏文臣等, 1995; 刘德来等, 1998; 任富根等, 1999), 然而由于地理位置所限, 对于更新、更完整的中新生代裂谷的研究尚少(何廉生等, 1980)。本文对非洲中、新生代裂谷演化过程的研究可为中国古裂谷的研究所借鉴。

1 区域地质概况

非洲北部广布中生代的碎屑岩, 主体为白垩系。下伏前寒武纪变质杂岩。苏丹共和国北方

大部分地区都有白垩系(中段)零星出露,以砂岩为主,夹一些砾岩和粘土岩。自苏丹西部达尔富尔(Darfur)地区向东北直至红海西海岸的努比亚沙漠(撒哈拉沙漠东段)断续分布着一条以碱性玄武岩为主的第三纪火山岩带,低角度不整合(局部平行不整合)覆盖在白垩系碎屑岩之上(Vail,1978;Franz et al.,1987;Wycisk et al.,1990;Urlacher et al.,1993;GRAS,1995)。由于后期的剥蚀作用,大片的玄武岩席只剩大小不等的火山残丘或玄武岩熔岩台地(图1)。

在北达尔富尔省首府 El Fashir 东北 200 km 的 Tagabo 山一带,白垩系出露较好,据微体古生物化石判断为早白垩世末至晚白垩世初(阿尔必期—塞诺曼期),Wycisk 等(1990)将其命名为 Tagabo 组,厚 150~200 m。Tagabo 山一带分布有第三纪玄武岩,其北部 80 km 处为著名的 Meidob 火山田,而其西南近 100 km 处的 Mellit 镇附近有零星分布的玄武岩,年龄为 20~23 Ma(GRAS,1995)。钻孔显示玄武岩低角度不整合覆盖于 Tagabo 组之上(表 1)。

表 1 苏丹西部白垩系中部 Tagabo 组的基本特征
Table 1 "Middle" Cretaceous (Albian to Cenomanian)
Tagabo Formation in Tagabo Hill, western Sudan

时代	厚度	岩石特征
第三纪		玄武岩,分布于小山丘上,构成玄武岩残丘,低角度不整合覆盖于 Tagabo 组之上
白垩纪	Tagabo 组 第三单元	30 m 块状粗粒含高岭石砂岩为主,夹有部分生物扰动以及发育交错层理的中细粒砂岩,偶夹透镜状杂色高岭页岩
	Tagabo 组 第二单元	30 m 3. 以发育交错层理的砂岩为主,顶部为细粒含高岭石砂岩,见有古土壤痕迹,为河漫滩沉积,古流向为自 SW 向 NE 2. 含砾砂岩,板状、槽状交错层理发育。粒度向上变细 1. 中粗粒含高岭石砂岩,为水道充填沉积(本单元侵蚀超覆于第一单元之上)
	Tagabo 组 第一单元	90 m 中粗粒砂岩为主,发育板状交错层理以及槽状交错层理,为辫状河沉积,古流向为自 W 向 E。底部有一层底砾岩,不整合覆盖于前寒武纪变质基底之上
前寒武纪		主要为片麻岩和片岩。顶部常常有几十米厚的风化壳,长石等明显高岭土化

据 Wycisk et al(1990);Urlacher et al. (1993)。

苏丹西部 Mellit 镇附近出露晚白垩世塞诺曼期 Tagabo 组上部(第三单元),以中薄层砂岩、含砾砂岩为主,见交错层理,局部有厚层及块状粗砂岩层,也存在薄层泥质粉砂岩和极薄层泥质岩。在一条干河谷的谷坡及小山丘上出露该套地层中(厚度 >30 m)发育与层面近垂直的柱状节理。由于剥蚀和沙丘覆盖,地表未见碎屑岩与玄武岩直接接触,但据 Mellit 附近小山丘上出露玄武岩火山颈的位置,参考该区白垩系标准

剖面(表 1),推测在该露头之上几十米曾覆盖第三纪玄武岩。因为接触带之下的碎屑岩在玄武岩喷发之前受到长期的风化作用,在玄武岩喷发时又受到强烈的热烘烤,变得破碎而易于剥蚀,难以形成柱状节理,也难以保存,故现在出露的发育柱状节理的白垩纪碎屑岩层是位于接触带以下几十米的。

2 柱状节理的基本特征、成因与构造意义

2.1 基本特征

柱状节理有下列特点:① 柱子多为六棱柱和五棱柱,个别为四棱柱。柱体与岩层层面近于垂直。该处地层比较平缓且稳定地向东北倾斜,经过赤平投影得知,柱面交线与层面间的交角为 72°(表 2)。② 柱子在粉砂岩中较细,直径为 4~5 cm,即柱状节理相对密集,且节理缝较宽;而在石英砂岩中柱状节理相对稀疏,柱子直径为 10~15 cm,而且节理缝变窄甚至消失(图版 I-5)。③ 发育于粉砂岩、细砂岩中的柱状节理,柱面呈灰黑色,柱子内部岩石变得致密坚硬,

可见轻微的角岩化。白垩系碎屑岩受到第三纪玄武岩的烘烤现象在苏丹东部与厄立特里亚共和国交界的 Kassala 地区也较多见, 尽管那儿未见柱状节理的报道(GRAS et al., 1995)。(4) 在石英砂岩中见轻微的石英岩化, 碎屑颗粒界限模糊, 说明经历了轻度的热变质作用。

2.2 柱状节理的成因

沉积岩中的柱状节理是比较罕见的。本文研究的节理首先不是构造节理, 它们不具有定向性、等距性等特点, 不能够配套反映应力场(图版 1-2, 3)。其次, 也不是泥裂, 它们不仅发育于泥质岩中, 也发育于砂岩和含砾砂岩中, 而且节理缝穿过多层岩石而不被充填。笔者观察了一

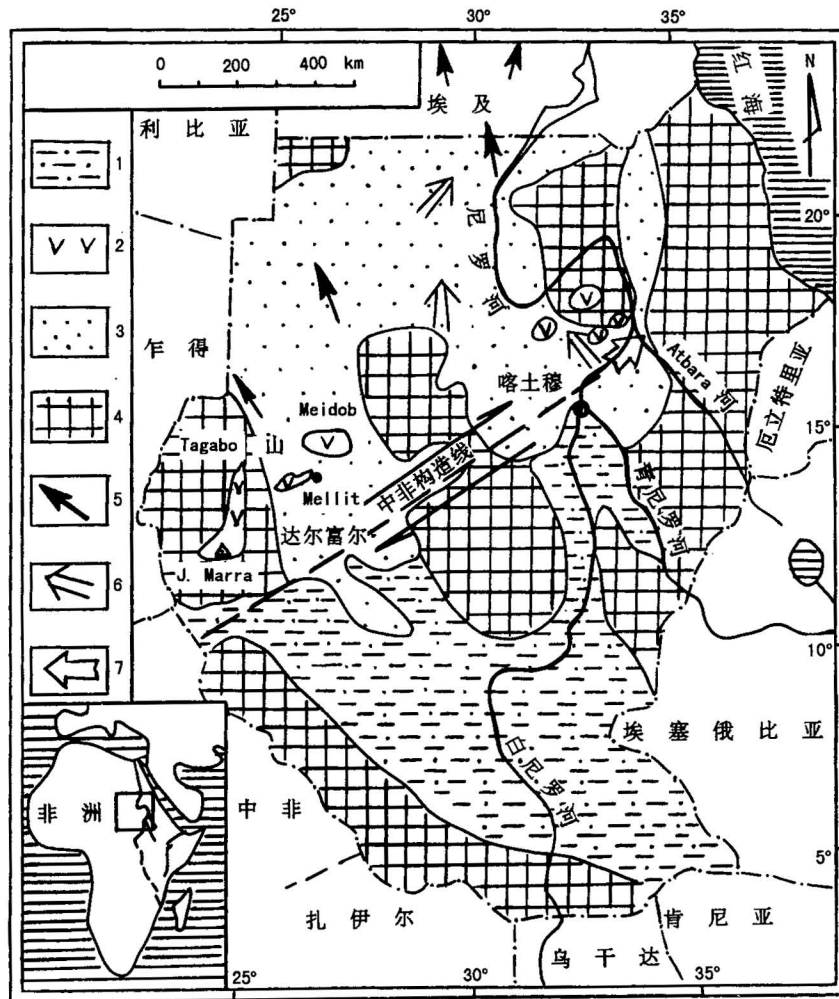


图 1 苏丹共和国地质简图(据 Vail, 1978; GRAS et al., 1995)简化)

Fig. 1 Geological sketch map of Sudan (simplified after Vail, 1978; GRAS et al., 1995)

1—新生代沉积物; 2—第三纪玄武岩; 3—中生代沉积岩; 4—前寒武纪基底杂岩; 5、6、7—白垩纪中部沉积层古流向(5—据 Vail, 1978, 6—据 GRAS et al., 1995, 7—笔者实测)

1—Cenozoic sediments; 2—Tertiary basalts; 3—Mesozoic sedimentary rocks; 4—Precambrian basement complex; 5, 6, 7—paleoflow of Cretaceous sedimentary rocks (5—according to Vail, 1978; 6—according to GRAS et al., 1995; 7—measured by the author (Lü Hongbo))

座高 30 多米的小山丘,其上所有的岩层都发育柱状节理,即影响厚度至少达 30 m。

从区域分布上看,凡是发育柱状节理的晚白垩世碎屑岩均位于第三纪玄武岩分布带内,说明两者有着密切的成因联系。事实上,正是第三纪玄武岩浆的喷发覆盖了较为平坦的白垩纪砂岩、泥岩层,在一定的深度范围内(影响厚度至少在 30 m 以上)使之受到热烘烤而失水收缩。因受热比较均匀,故受热后沿着与熔岩席平行的面产生了分布比较均匀的收缩中心,进而形成柱状节理。由于含泥质多的细砂岩、粉砂岩原生孔隙度大,粘土等层状矿物含水较多,受热后粘土失水并发生部分重结晶,体积收缩量很大,故形成的柱状节理相对密集,节理缝稍宽;而比较纯的石英砂岩原生空隙度相对较小,且以石英作格架颗粒,收缩量就小,故柱状节理相对稀疏,节理缝很窄甚至消失(图版 I-5)。

表 2 苏丹西部 Mellit 地区岩层和柱状节理产状的赤平投影结果

Table 2 Result of stereographic projection of the occurrences of sedimentary strata and the columnar jointing in Mellit, West of Sudan

柱子及其法平面的产状	柱状节理面产状	柱子产状	柱子法平面产状
	24°∠83°		
	316°∠72°	317°∠72°	137°∠18°
沉积层的产状	层面产状	层面与柱子法平面交线产状	层面与柱子法平面的交角
	55°∠7°	68°∠7°	18°
沉积层产状变化史	晚白垩世塞诺曼期	渐新世初期	现在
	水平	338°∠18°	55°∠7°
苏丹西部大陆块体旋转历史	晚白垩世塞诺曼期	晚白垩世至渐新世	渐新世至今
	初始状态	向 338°方向倾斜(旋转)18°	向 138°方向倾斜(旋转)18°

柱状节理的形成机理,主要是沉积物受到热烘烤失去粒间水和粘土矿物的层间水体积收缩,并发生部分重结晶所致。粘土矿物在 105℃ 以下即排除粒间水而干缩(方邳森等, 1987),而具有烘烤边则说明受热温度远不止 100 多度。根据高岭石

的差热曲线可知,在 105~110℃ 附近有一个明显的吸热谷,高岭石失去层间水,管状体因失水而变为板状体,体积收缩明显,而到 400~700℃ 则失去结构水。高岭石干燥收缩值为 3%~10%,蒙脱石的失水收缩率则更大(方邳森等,1990)。可见,沉积物颗粒越细,粘土矿物越多,受热后收缩率就越大,这就是泥质岩中柱状节理较密的原因。Mellit 附近的碎屑岩成熟度较低,除了少量的石英砂岩外,岩石中以粘土为主的杂基含量均超过 15%,高岭石砂岩和含砾砂岩中粘土的体积含量有的超过 50%(Wycisk et al., 1990),这些特点都说明这套岩石受到适当的热烘烤后很容易因失水而收缩。

2.3 构造意义——产状变化与地块倾斜的关系

第三纪玄武岩浆在苏丹西部、北部形成了一个呈 NE 向延伸的、近水平的玄武岩高原。玄武岩熔岩席对其下较平坦的沉积岩的热烘烤在平面上较为均匀,特别是对埋藏于地下几十米深的沉积岩层的烘烤更为均匀,即热力梯度等值面平行于玄武岩席的顶面,故沉积岩中的柱状节理应和玄武岩席中的柱状节理一样,都基本上垂直于当时的大地水准面。

柱状节理轴线现在产状是 317°∠72°,其法平面代表玄武岩喷发时的古大地水准面,现产状为 137°∠18°(表 2)。将岩层产状投影到节理柱的法平面上,求出第三纪玄武岩喷发时的地层产状为 338°∠18°(表 2)。即自晚白垩世地层沉积至第三纪玄武岩喷发,Mellit 地区地块向 338°方向倾斜了 18°,而自中新世初期玄武岩喷发至今该地块又向 138°方向倾斜了 18°(图 2)。

3 地块旋转与非洲中生代裂谷演化的关系讨论

上述计算主要基于两个条件:一个是碎屑岩沉积时岩层基本上处于水平状态,另一个是自

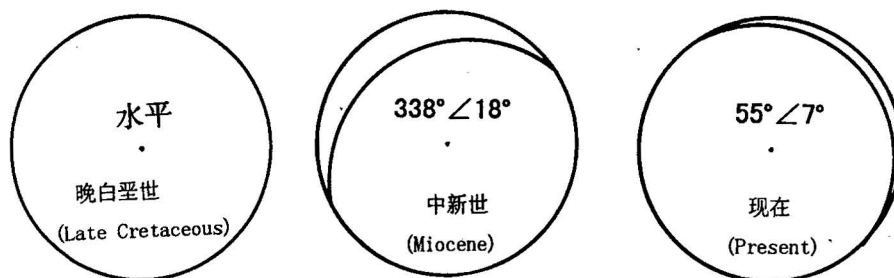


图 2 苏丹西部 Mellit 地区晚白垩世沉积岩层自晚白垩世至今产状变化的赤平投影图解(下半球投影)

Fig. 2 Stereographic projection showing the occurrence changes of Upper Cretaceous sedimentary strata from Late Cretaceous to present (lower hemisphere projection)

晚白垩世以来非洲北部陆块没有受到强烈的挤压褶皱作用。

苏丹中部、西部和北部晚白垩世碎屑岩的沉积环境为辫状河平原、曲流河平原相以及湖泊相(Bussert, 1993a; Bussert, 1993b; GRAS et al., 1995), 其原始地层基本上是水平的。

大量研究表明, 自中侏罗世冈瓦纳大陆破裂开始, 非洲大陆就一直处于拉张状态(Janssen et al., 1993; Reynolds, 1993; Foster et al., 1996)。笔者在苏丹西部和北部考察所见的晚白垩世碎屑岩层都是非常平缓地向东北方倾斜, 角度一般在 10° 以内, 有的几乎是水平的, 从未发现褶皱的地层(图版 I-6~8)。苏丹区域地质调查的成果也显示出这一特征(Almond et al., 1993; GRAS, 1995)。因此, 地层在不同阶段的产状值便可用来探讨白垩纪以来非洲东部和北部裂谷演化对苏丹地块的影响。中、晚白垩世, 非洲北部和西部存在着一个大的沉积—沉陷带, 而苏丹北部克拉通地块位于该带的东南部, 以辫状河平原相和湖岸平原相为主, 间有湖相沉积(Bussert, 1993b)。非洲北部在整个白垩纪以地壳拉张、裂谷化、火山活动和陆块向北倾斜为特征(Flexer et al., 1993)。笔者搜集了苏丹境内晚白垩世碎屑岩的古流向资料(Vail, 1978; Wycisk et al., 1990; GRAS et al., 1995), 结合实地测量的结果, 作图发现古水流方向主要为自 SSE 向 NNW(图 1), 这也说明西北方向存在着大的沉积、沉降中心。这个大型盆地在拉张背景下由许多小型地堑联合而成(Bussert, 1993a), 沉积盆地的东南边界大约位于苏丹共和国的中部, 即中非构造线一带, 而此带南部除了裂谷区外没有发现晚白垩世沉积(Vail et al., 1986), 故南部不属于苏丹北部盆地区而应属于另一个盆地区——南苏丹裂谷区(South Sudan Rifts)。

有趣的是, 从晚白垩世初塞诺曼期开始到中新世之初该处地壳向西北方向(338°)倾斜了 18° , 而中新世至今却又向东南方向(138°)倾斜了 18° 。这两个近乎相反方向的倾斜值都是 18° , 接近于使 Mellit 附近的地块恢复到晚白垩世初期的定位状态。这不是巧合, 而是由非洲西部、北部、东部中新代裂谷的演化所决定的。

笔者选择著名的贝努埃盆地、利比亚北部盆地、苏丹北部盆地、南苏丹裂谷和肯尼亚裂谷、东非裂谷和红海裂谷等进行比较(图 3, 图 4)。

从图 4 中可以看出, 非洲西部贝努埃槽地的裂谷化结束于晚白垩世早期, 而热沉降期结束于始新世初(Guiraud et al., 1992a, 1992b); 利比亚裂谷的裂谷化结束于晚白垩世初, 而热沉降结束于始新世(Guiraud et al., 1992b); 苏丹北方局部的裂谷化结束于晚白垩世早期, 热沉降结束于始新世初期, 而大部分地区裂谷化和热沉降都不明显(Guiraud et al., 1992b); 南苏

丹裂谷区经历了3次裂谷化(Abdullatif et al., 1993),最后一次裂谷化结束于渐新世,而热沉降期结束于上新世以后(Guiraud et al., 1992b; Abdullatif et al., 1993);发育于肯尼亚的Anza裂谷的裂谷化最后结束期几乎和南苏丹裂谷一样(Guiraud et al., 1992b; Binks et al., 1992);东非裂谷带的裂谷化明显始于渐新世,至今仍未结束(Guiraud et al., 1992b; McHargue et al., 1992);红海的裂谷化开始于始新世,上新世以后发育成新生的洋盆(Guiraud et al., 1992b; Ebinger, 1989)。从上述事件发生的先后次序不难看出,非洲西部边缘的裂谷化结束得最早,然后是非洲苏丹西北地区以及非洲西部和北部地区,南苏丹裂谷和肯尼亚的Anza裂谷结束得较晚,而最晚的东非裂谷和红海仍未结束(图3,图4)。

按照裂谷演化的先后次序可将非洲西部、北部、中部和东部划分成3个大的呈NE向延伸的裂谷演化带:①西北裂谷带:非洲西北、利比亚到埃及以及苏丹西部和北部是一个统一的克

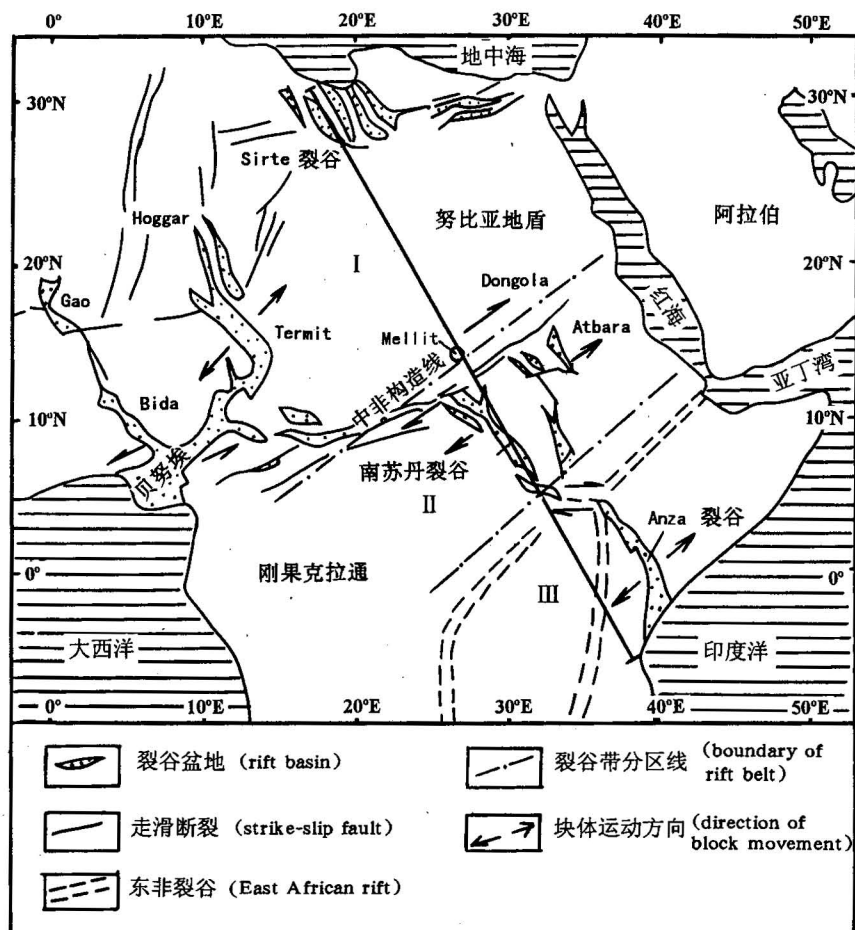


图3 非洲西部、北部、中部和东部中生代裂谷分布简图(Bosworth, 1992; Bosworth 等, 1994; 略改动)

Fig. 3 A sketch map showing the distribution of Mesozoic—Cenozoic rifts in the western, northern, central and eastern Africa (Modified after Bosworth, 1992; Bosworth et al., 1994)

I—西北裂谷带; II—南苏丹裂谷带; III—东非裂谷带

I—Northwestern Rift Belt; II—South Sudan Rift Belt; III—East African Rift Belt

拉通盆地(撒哈拉克拉通),这个盆地的东南边缘就是苏丹中部的中非构造线(Mellit 地区恰好位于克拉通盆地的南东边缘),而在这个大的盆地中发育了几个裂谷区(图 3- I)。②南苏丹裂谷带:尽管每个裂谷都呈 NW 向延伸(走向为 140° 左右,正好与中非构造线垂直),但是 4 个裂谷却紧靠中非构造线南侧自西南向东北分布,依次为 Muglad、白尼罗、青尼罗和 Atbara,构成了一个宽达 600 km 以上的大型裂谷带,Mellit 地区正好位于其西北裂谷肩上(图 3- II)。③东非裂谷带:柱状节理测量点 Mellit 地区恰好位于西北克拉通盆地的东南边缘和南苏丹裂谷带的西北侧裂谷肩上。如果从利比亚北方的裂谷区向南东切一条剖面,并展示该剖面所切的不同裂谷带自白垩纪以来不同阶段的主要构造特征,就能看出苏丹西北部陆块与这些裂谷带演化的时空关系(图 3- III、图 5)。

晚白垩世初期,苏丹西北部克拉通盆地在塞诺曼期接受沉积时,贝努埃槽地和利比亚裂谷以及苏丹北方的局部裂谷正处于裂谷化的后期,而南苏丹裂谷区则处于一个短暂的热沉降期(图 5a)。此时 Tagabo 组地层刚刚结束沉积,地层基本上处于水平状态。

晚白垩世以后,克拉通盆地西北部就处于拉张力的作用下(Janssen et al., 1993; Foster et al., 1996),此时到第三纪苏丹西北部玄武岩喷发,苏丹西北 Mellit 地区地块向 338° 方向倾斜了 18° 。苏丹西北部第三纪玄武岩喷发的高峰期分别为 $36\sim 20$ Ma、 $16\sim 10$ Ma 和 6 Ma,而 Mellit 地区的玄武岩年龄为 $23\sim 20$ Ma(Urlacher et al., 1993),相当于中新世初期,正好与利比亚裂谷等西北部裂谷的热沉降期相对应,同时对应于南苏丹裂谷区的第二期和第三期裂谷化期。尽管南苏丹裂谷区第二期裂谷化后曾出现了短暂的热沉降期,但是从塞诺曼末期到渐新世主要是两期裂谷化期(图 4)。来自克拉通盆地西北裂谷的热沉降的影响是将盆地东南边缘的地块向西北倾斜,由于距离比较远,这种作用对 Mellit 地区的影响可能比较微弱;然而南苏丹裂谷的裂谷化作用伴随着裂谷带之下的地幔上涌对处于其西北侧裂谷肩上的 Mellit 一带地块却可以产生明显的掀斜作用(图 5b)。裂谷化形成的隆起一般可达 $1\sim 2$ km 高,几百千米宽,可持续几十个百万年(Morgan, 1983)。根据磷灰石裂变径迹研究,红海因地幔上涌从 13.8 Ma 以来使得两侧陆块抬升了 $2.5\sim 4$ km,而红海大陆架却下降了 4 km,形成了巨大的 Nubia-Arabia Dome(Bohannon et al., 1989)。东非裂谷带地幔上涌造成东非高原隆起高达 $1\sim 3$ km,而宽达 1000 km(Ebinger, 1989),可见影响的范围是非常大的。地震资料表明,下地壳减薄比

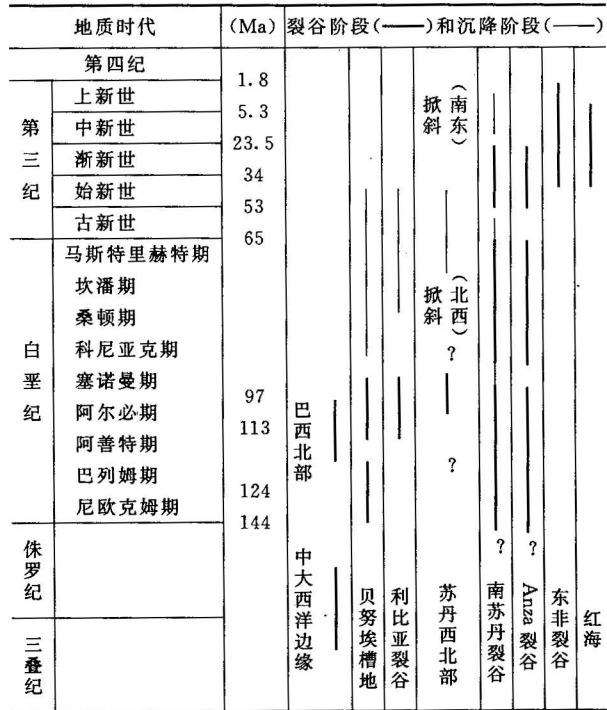


图 4 中生代以来非洲不同地点裂谷演化对比图

Fig. 4 Comparison diagram showing the evolution of different rifts in Africa from Mesozoic to recent

据(after) Fairhead et al., 1991; Chang et al., 1992; Favre et al., 1992; Guiraud et al., 1992a, 1992b; Pavoni, 1992; Wilson et al., 1992; Abdullatif et al., 1993)

上地壳拉伸断裂的范围要广,而地幔岩石圈减薄的范围更广,即地幔上涌的范围要比裂谷的范围大得多(Guiraud et al., 1992b, 1993)。南苏丹裂谷带宽达 600 km 以上(Schull, 1988),而 Mellit 地区距南苏丹裂谷带最大的裂谷——Muglad 盆地西北边缘仅 250 km(图 3),因此南苏丹裂谷带第二、第三期裂谷化伴随的地幔上涌对西北侧裂谷肩陆块的掀斜作用是显而易见的。

红海和东非裂谷分别于始新世和渐新世开始裂谷化作用(Guiraud et al., 1992b; Janssen et al., 1993; Foster et al., 1996),而南苏丹裂谷带和 Anza 裂谷的裂谷化结束于渐新世末期,然后进入了后裂谷热沉降期(图 4)。南苏丹裂谷区后裂谷期的热沉降对其西北裂谷肩上的 Mellit 一带陆块产生了重要的影响,使之沿着 NE 向的水平轴向东旋转,即向 138°方向倾斜了 18°(图 5c)。研究表明,后裂谷热沉降期裂谷肩向裂谷区的倾斜(块体旋转)非常明显,向两侧影响的宽度超过裂谷本身的宽度(Cochran, 1983),而且影响范围比裂谷化期的掀斜范围还要大,裂谷肩的沉降和挠曲可以持续 50 Ma(Guiraud et al., 1992b)。由此可以推断,南苏丹裂谷带在这个热沉降期对苏丹西北大陆块体造成的向东南方的倾斜之影响范围至少要超出 Mellit 一带。

南苏丹裂谷带的热沉降与红海和东非裂谷的裂谷化期相对应,根本原因是地幔上涌体的

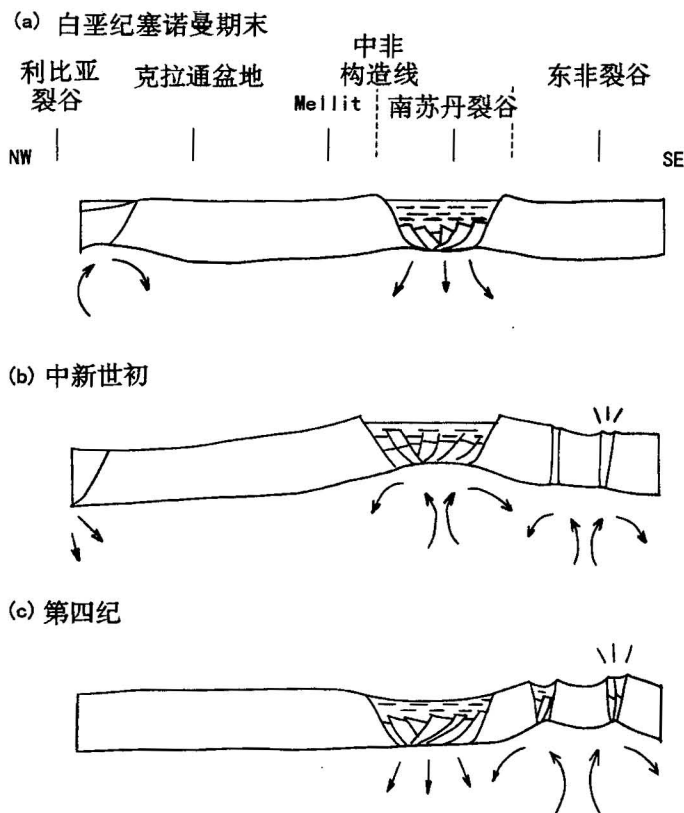


图 5 非洲不同地带裂谷的中新生代演化与苏丹西北陆块倾斜的关系剖面示意图(为图 3 之图切剖面)

Fig. 5 Sketch profiles showing the relationship between the evolution of different rifts and the continental blocks in northwestern Sudan from Mesozoic to Cenozoic (the cross section of Fig. 3)

转移。由于东非裂谷和红海的裂谷化伴随着地幔热隆起向该区的转移和集中,造成与之相邻的南苏丹裂谷区的上地幔隆起因冷却而收缩,故进入后裂谷热沉降期。显然,苏丹西北 Mellit 一带陆块自渐新世以来向 138°方向倾斜了 18°这一构造事件与东非裂谷和红海的裂谷化作用有着直接的成因联系。正是东非裂谷和红海的裂谷化作用导致非洲西部、北部和中部一系列裂谷带被废弃。有意义的是这些被废弃的裂谷却含有重要的油气藏,如:南苏丹裂谷(Schull, 1988; McHargue et al., 1992)、西非尼日利亚的贝努埃槽地(Akande et al., 1998)和 Bida 盆地、北非埃及裂谷、西亚伊拉克西北和叙利亚东南裂谷等。可见,研究这类裂谷的构造演化历史具有重要的理论意义和经济意义。

4 结论

(1) 苏丹西部 Mellit 地区白垩系碎屑岩中的柱状节理是中新生喷发的玄武岩熔岩流对其下伏

的碎屑岩产生烘烤作用的结果。含粘土的碎屑岩受到适当的热烘烤而失水收缩甚至部分重结晶,在与熔岩流垂直的方向上产生裂隙而形成柱状节理。

(2) 根据沉积岩和柱状节理的产状计算出:晚白垩世初期到中新世初苏丹西北 Mellit 地区地块向 338°方向倾斜了 18°,而自中新世至今该地块又向 138°方向倾斜了 18°。

(3) 苏丹西北陆块位于南苏丹裂谷带的西北裂谷肩上,其向 NW 旋转是南苏丹裂谷带在渐新世末以前裂谷化阶段对裂谷肩陆块掀斜的结果,为裂谷肩的向外旋转;而该地块中新世以来向 SE 方向的旋转则是后裂谷热沉降阶段南苏丹裂谷带内地幔上涌体的消失造成的,为裂谷肩的向内旋转。

(4) 造成南苏丹裂谷带及非洲西部、北部裂谷作用结束事件恰是东非裂谷和红海自新生代以来裂谷化作用。地幔上涌体从非洲西、北部和中部向东非及红海一带转移是根本原因。

笔者十分感谢苏丹喀土穆大学地质系和苏丹能源矿产部的同行们,他们为野外工作的完成尽了最大的努力。笔者还要感谢中国驻苏丹大使馆的胡振国武官和有关官员,他们对笔者在苏丹的科研工作给予了无私的援助。南京大学地球科学系的夏邦栋教授、方中教授以及其他有关教师对本文提出了良好的建议,笔者在此一并致谢。

参 考 文 献

- 方邨森,任磊夫等. 1987. 沉积岩石学教程. 北京:地质出版社,141~181.
- 方邨森,方金满,刘常荣. 1990. 中国陶瓷矿物原料. 南京大学出版社,8~61.
- 何廉声,王光宇,石效超. 1980. 西沙海槽—新生代裂谷. 地质论评,26(6):486~489.
- 刘德来,马莉. 1998. 松辽盆地裂谷期前火山岩与裂谷盆地关系及动力学过程. 地质论评,44(2):130~135.
- 龙汉春. 1988. 论华北地区地壳拉张、挤压与裂谷推覆构造的成因联系. 地质论评,34(2):105~113.
- 任富根,李双保,丁士应等. 1999. 熊耳裂陷印支期碱性岩浆活动成矿作用、生成模式. 地质论评,44(增刊):659~667.
- 唐连江. 1985. 谈裂谷带内的矿产. 地质论评,31(3):271~275.
- 夏邦栋,刘洪磊,吴运高,杨惠民. 1992. 滇黔桂裂谷. 石油实验地质,14(1):20~30.
- 夏文臣,周杰,雷建喜等. 1985. 滇黔桂晚海西—中印支伸展裂谷海盆地的演化. 地质学报,69(2):97~112.
- 许志琴. 1980. 谈谈裂谷. 地质论评,26(3):260~264.
- 郁建华,付会芹,张凤兰等. 1990. 北京及附近元古宇裂谷槽中球斑花岗岩套的地球化学. 地质学报,64(4):309~321.
- Abdullatif O M, Barazi N. 1993. Sedimentology and maturity evaluation of the NW Muglad and Nile Rift Basin, Sudan. In: Thorweihe U, Schandelmeier H, ed. Geoscientific Research in Northeast Africa. Rotterdam; Balkema, 395~399.
- Akande S O, Erdtmann B D. 1998. Burial metamorphism (thermal maturation) in Cretaceous sediments of the southern Benue Trough and Anambra Basin, Nigeria. AAPG Bulletin, 82: 1191~1206.
- Almond D C, Ahmed F. 1993. Field guide to the geology of the Sabaloka Inlier, Sudan. Khartoum University Press, 1~60.
- Badley M E, Price J D, Backshall L C. 1989. Inversion, reactivated faults and related structures; Seismic examples from the southern North Sea. Geol. Soc. Spec. Publ., 44: 201~219.
- Bohannon R G, Naeser C W, Schmidt D L, Zimmermann R A. 1989. The timing of uplift, volcanism, and rifting peripheral to the Red Sea: A case for passive rifting? Journal of Geophysical Research, 94: 1683~1701.
- Bosworth W. 1992. Mesozoic and early Tertiary rift tectonics in East Africa. Tectonophysics, 209: 115~137.
- Bosworth W, Morley C K. 1994. Structural and stratigraphic evolution of Anza rift, Kenya. Tectonophysics, 236: 93~115.
- Bussert R. 1993a. Evolution of Cretaceous continental basins in northern Sudan. In: Thorweihe U, Schandelmeier H, ed. Geoscientific Research in Northeast Africa. Rotterdam; Balkema, 407~414.
- Bussert R. 1993b. The Albian-Cenomanian paleoclimate in northern Sudan. In: Thorweihe U, Schandelmeier H, ed. Geoscientific Research in Northeast Africa. Rotterdam; Balkema, 415~419.
- Chang H K, Kowsmann R O, Figueiredo A M F, Bender A M. 1992. Tectonics and stratigraphy of the East Brazil Rift System: an overview. Tectonophysics, 213: 97~138.
- Cochran. 1983. Effects of finite rifting times on the development of sedimentary basins. Earth and Planetary Science Letters, 66: 289~302.

- Ebinger C J. 1989. Tectonic development of the western branch of the East African rift system. *Geological Society of America Bulletin*, 101: 885~903.
- Fairhead J D, Binks R M. 1991. Differential opening of the Central and South Atlantic Oceans and the opening of West African rift system. *Tectonophysics*, 187: 191~203.
- Favre P, Stampfli G M. 1992. From rifting to passive margin: The example of the Red Sea, Central Atlantic and Alpine Tethys. *Tectonophysics*, 215: 69~97.
- Flexer A, Rosenfeld A, Ilani I, Hirsch F. 1993. Basin evolution of the northern margins of the Arabo-Nubian craton during Maastriachian—Paleocene times. In: Thorweihe U, Schandelmeier H, ed. *Geoscientific Research in northeast Africa*. Rotterdam: Balkema, 243~248.
- Foster D A, Gleadow A J W. 1996. Structural framework and denudation history of the flanks of Kenya and Anza Rifts, East Africa. *Tectonics*, 15: 258~271.
- Franz G, Puchelt H, Pasteels P. 1987. Petrology, geochemistry and age relations of Triassic and Tertiary volcanic rocks from southwest Egypt and northwest Sudan. *Journal of African Earth Sciences*. 6: 335~352.
- GRAS, RRI. 1995. Accompanying geological notes to the 1: 1,000,000 scale geological atlas of the republic of the Sudan. Bulletin No. 40. Khartoum University Press, 5~100.
- Guiraud R, Maurin J C. 1992a. Early Cretaceous rifts of Western and Central Africa: an overview. *Tectonophysics*, 213: 153~168.
- Guiraud R, Binks R M, Fairhead J D, Wilson M. 1992b. Chronology and geodynamic setting of Cretaceous—Cenozoic rifting in West and Central Africa. *Tectonophysics*, 213: 227~234.
- Guiraud R, Maurin J C. 1993. Cretaceous rifting and basin inversion in Central Africa. In: Thorweihe U, Schandelmeier H, ed. *Geoscientific Research in northeast Africa*. Rotterdam: Balkema, 203~206.
- Janssen M E, Stephenson R A, Cloetingh S. 1993. Changes in plate motions and their control on the subsidence of rifted basins in the African plate. In: Thorweihe U, Schandelmeier H, ed. *Geoscientific Research in northeast Africa*. Rotterdam: Balkema, 185~188.
- McHargue T R, Heidrick T L, Livingstone J E. 1992. Tectono-stratigraphic development of the Interior Sudan rifts, Central Africa. *Tectonophysics*, 213: 187~202.
- Morgan P. 1983. Constraints on rift thermal processes from heat flow and uplift. *Tectonophysics*, 94: 227~298.
- Pavoni N. 1992. Rifting of Africa and pattern of mantle convection beneath the African plate. *Tectonophysics*, 215: 35~53.
- Reynolds P O. 1993. Plate tectonic aspects of continental rift basin formation in Central and West Sudan. In: Thorweihe U, Schandelmeier H, ed. *Geoscientific Research in Northeast Africa*. Rotterdam: Balkema, 207~212.
- Rouby D, Souriot Th, Brun J P, Cobbold P R. 1996. Displacements, strains and rotations within the Afar depression (Djibouti) from restoration in map view. *Tectonics*, 15(5): 952~965.
- Schull T. 1988. Rift basins of interior Sudan: petroleum exploration and discovery. *The American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 72: 1128~1142.
- Urlacher G, Franz G. 1993. The Meidob volcanic field, Darfur Dome, Sudan. In: Thorweihe U, Schandelmeier H, ed. *Geoscientific Research in Northeast Africa*. Rotterdam: Balkema, 295~299.
- Vail J R. 1978. Overseas geology and mineral resources (No. 49)—Outline of the geology and mineral deposits of the Democratic Republic of the Sudan and adjacent areas. London, 1~68.
- Vail J R, Hughes D J, Abdel-Magid A E M, Abdel-Ranman E M, Toum I M. 1986. Geology of southern Blue Nile Province, Sudan. *Bull. Geological Research Authority of Sudan*, 37: 31~32.
- Wilson B M, Guiraud R. 1992. Magmatism and rifting in Western and Central Africa, from Late Jurassic to Recent times. *Tectonophysics*, 213: 203~225.
- Wycisk P, Klitzsch E, Jas C, Reynolds O. 1990. Intracratonal sequence development and structural control of Phanerozoic strata in Sudan. In: Klitzsch E, Schrank E, ed. *Research in Sudan, Somalia, Egypt and Kenya—Results of the Special Research Project "Geoscientific Problems in Arid and Semiarid Areas"*. Period 1987~1990. Berlin: Berliner geowiss. Abh. A120: 45~86.
- Xia Bangdong, Shi Guangyu, Fang Zhong, Yu Jinhai, Wang Ciyin, Tao Xiancong, Li Huimin. 1991. The Late Paleozoic rifting on Hainan Island, China. *ACTA Geologica Sinica*, 4(4): 341~355.
- Xia Bangdong, Yu Jinhai, Fang Zhong, Wang Ciyin, Shi Guangyu. 1992. Carboniferous bimodal volcanic rocks and their plate tectonic setting, Hainan Island. *Chinese Journal of Geochemistry*, 11(1): 70~79.

图 版 说 明

1. 白垩纪砂岩中的柱状节理(苏丹西部 Mellit 地区)。
2. 白垩纪砂岩中的柱状节理,横截面多呈六边形或五边形(苏丹西部 Mellit 地区)。
3. 白垩纪砂岩中的柱状节理(苏丹西部 Mellit 地区)。
4. 白垩纪含砾砂岩中的柱状节理,可见清晰的斜层理(苏丹西部 Mellit 地区)。
5. 白垩纪石英砂岩中的柱状节理,可见柱子加粗而节理缝变窄(苏丹西部 Mellit 地区)。
6. 白垩纪砂岩层中的板状交错层理,岩层倾角很小(苏丹北部尼罗河东岸,距离苏丹首都喀土穆 200 km)。
7. 白垩纪砂岩,岩层产状近水平(地点同 6)。
8. 白垩纪巨厚层粘土沉积,岩层产状很缓(苏丹北部尼罗河西岸,距离苏丹首都喀土穆 200 km)。

The Columnar Jointing in Cretaceous Clastic Rocks and the Rotation of Rift Shoulder in Sudan

Lü Hongbo¹⁾ Lu Huafu¹⁾ O. M. Abdullatif²⁾ M. Kheir²⁾

1) *Department of Earth Sciences, Nanjing University, Nanjing, 210093, China*

2) *Department of geology, University of Khartoum, Khartoum, Sudan*

Abstract

The Tertiary basaltic rocks are discontinuously distributed from the west to the northeast of Sudan, in the Sahara Desert, overlying the Cretaceous clastic rocks. The authors of this paper found a kind of columnar jointing in the Cretaceous clastic rocks in the Mellit area, western Sudan. The Cretaceous sedimentary rocks were baked by the basaltic lava flow erupted in the Early Miocene, contracting in volume owing to loss of water contained mainly in the clays of the clastic rocks, and thus forming the columnar jointing. According to the occurrences of jointing and the sedimentary strata the authors calculated the two different rotations of the Mellit block: the block tilted toward 338° for 18° from Late Cretaceous to the beginning of Miocene, and tilted toward 138° for 18° since Miocene. By analyzing in detail the structural evolutionary history, from Mesozoic to Cenozoic, of different rift belts in western, northern, central and eastern Africa, the authors think that the Mellit area was on the northwestern shoulder of the South Sudan Rift. The rotation of the Mellit block toward northwest was the outward rotation of the northwestern shoulder of the South Sudan Rift during the rifting phase, and the rotation toward southeast was the inward rotation of the rift shoulder during the post-rift thermal sag episode. The authors also conclude that the South Sudan Rift entered the post-rift thermal sag phase because of the development and evolution of the East African Rift and Red Sea in the Cenozoic.

Key words: Sudan; Cretaceous; clastic rocks; columnar jointing; rift shoulder rotation

作者简介

吕洪波,男,1957年生。1985年在南京大学地球科学系获理学硕士学位;1994~1995年受中国国家教委派遣赴苏丹喀土穆大学地质系任客座教授两年。现为南京大学地球科学系副教授,从事沉积学、大地构造学、构造地质学的研究。通讯地址:210093,南京大学地球科学系(卢华复);E-mail: hongbolu@telus.net。

