

DOI: 10.19657/j.geoscience.1000-8527.202510300130

# 中生代中-西非裂谷系形成演化的应力来源与叠加机制

范庆凯, 高敏, 张忠民, 郭金瑞, 王兴华, 张立伟

(中国石化石油勘探开发研究院, 北京 102206)

**摘要:** 中-西非裂谷系横跨中非大陆, 其形成演化的应力机制仍不明确。本文通过梳理中生代非洲大陆周缘构造应力发育特征, 对比各应力在裂谷系内部的响应特征, 揭示出中-西非裂谷系两个分支分别继承了跨撒哈拉活动带和中非剪切带等构造薄弱带。在先存薄弱带的基础上, 周缘大洋扩张带来的远程挤压效应、热点隆升垂向挤压、新特提斯洋裂谷拉张和非洲—欧亚板块碰撞挤压等四类构造应力是中-西非裂谷系发育的关键外因。其中, 周缘大洋扩张产生的挤压应力分别来自西侧大西洋和东侧西索马里海盆, 扩张速率越快, 对应的挤压应力越大, 地质历史上扩张速率的突变可直接导致邻近盆地的沉积不整合, 并与洋底断裂带走向突变具有明显对应关系。裂谷系中非分支完整记录了中生代两期拉张作用和一期构造反转, 西非分支则只记录了第二期NE—SW向拉张和圣通期构造反转。西索马里海盆扩张挤压应力和新特提斯裂谷拉张应力影响裂谷系西非分支和中非分支Benue槽以东地区, 南大西洋扩张挤压应力影响整个裂谷系, 圣通期挤压应力作用集中于西非分支和中非分支的中西部, 热点活动的影响范围则局限于Benue槽。各类构造应力在中-西非裂谷系汇聚并叠加影响, 其基本形态与规模于中生代奠定。

**关键词:** 中-西非裂谷系; 构造应力; 洋底扩张; 热点影响; 板块碰撞

**中图分类号:** P542.4; P553 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-8527(2026)04-1139-13

## Mesozoic Evolution of the West and Central African Rift System and Analysis of Its Stress Source in Mesozoic

FAN Qingkai, GAO Min, ZHANG Zhongmin, GUO Jinrui, WANG Xinghua, ZHANG Liwei

(Sinopec Petroleum Exploration and Production Research Institute, Beijing 100026, China)

**Abstract:** The West and Central African Rift System (WCARS) spans the Central African continent, whose stress regime of evolution remains unclear. We examine the characteristics of tectonic stress in the periphery of African continent during Mesozoic, and compare the response of tectonic stress within the rift system, revealing that 2 branches of WCARS inherit the Trans-Saharan mobile zone and the Central African shear zone respectively. Above the inherited weak zones, there are 4 kinds of tectonic stresses acting as key external factors for the development of WCARS, such as seafloor spreading related far field compression, hot spot related vertical compression, Neotethys rift related tension, and Africa-Eurasia collision related compression. Among them, the compressional stress generated by seafloor spreading came from the Atlantic Ocean on the west of Africa and the West Somali Basin on the east, and faster spreading rates usually cause greater compressional stresses.

**收稿日期:** 2025-10-30; **修回日期:** 2026-03-11; **编辑:** 李龚健。

**基金项目:** 中国石化科技部项目 (P24179); 国家自然科学基金重大研究计划 (92255302)。

**作者简介:** 范庆凯, 男, 副研究员, 1991年出生, 主要从事构造地质、石油地质等方面的研究。Email: fanqk.syky@sinopec.com。

**引用格式:** 范庆凯, 高敏, 张忠民, 等. 中生代中-西非裂谷系形成演化的应力来源与叠加机制 [J]. 现代地质, 2026, 40 (4): 1139-1151. DOI: 10.19657/j.geoscience.1000-8527.202510300130.

FAN Qingkai, GAO Min, ZHANG Zhongmin, et al. Mesozoic Evolution of the West and Central African Rift System and Analysis of Its Stress Source in Mesozoic [J]. GEOSCIENCE, 2026, 40 (4): 1139-1151. DOI: 10.19657/j.geoscience.1000-8527.202510300130.

Mutations of spreading rate in geological history can directly lead to sedimentary unconformities in adjacent basins, showing a clear correspondence with the strike change of the oceanic fault zones. The Central African branch fully records two tensions and one tectonic inversion in Mesozoic, while the West African branch only records the second NE-SW tension and the tectonic inversion in Santonian. The spreading related compression of Western Somali Sea and the tensile stress of the Neotethys Rift affected West African branch and the east of Benue Trough in the Central African branch. The spreading related compression of South Atlantic affected the entire WCARS. The compressional stress in Santonian was concentrated in the West African branch and central-western part of the Central African branch, and the influence of hotspot was limited to Benue Trough. All tectonic stresses converged and superimposed in WCARS, whose morphology and scale were primarily determined in Mesozoic.

**Key words:** West and Central African Rift System; tectonic stress; seafloor spreading; hotspot influence; plate collision

## 0 引言

自元古代以来,非洲大陆经历了复杂的构造演化史,形成了不同时代的沉积盆地<sup>[1]</sup>。其中,晚古生代以来冈瓦纳大陆的裂解不仅促使现今非洲两侧大西洋和印度洋被动大陆边缘盆地的形成,还导致了非洲大陆内部裂谷盆地的发育。中-西非裂谷系横跨中非大陆,总长度超过6400 km,是受剪切带影响而发育的中-新生代陆内裂谷盆地,在中生代基本定型。宏观上,中-西非裂谷系呈“人字型”,可划分为西非和中非两个分支,前者自尼日利亚向北进入尼日尔和利比亚,后者向东穿过乍得南部进入苏丹和肯尼亚<sup>[2-3]</sup>(图1)。该裂谷系形成于早白垩世非洲内部各陆块的裂离,并伴随非洲-南美板块的离散和南大西洋的形成<sup>[2-6]</sup>。裂谷系沿线发育多个雁列式排列的沉积盆地,单个盆地多为不对称的半地堑结构,形成机制以伸展和走滑为主,包括中非分支的Doba、Doseo、Salamat、Bongor、Muglad等盆地<sup>[7-11]</sup>,以及西非分支的Benue、Bornu、Termit等盆地<sup>[12-14]</sup>,已发现可采储量9.3亿t,待发现可采资源量115亿t油当量(据IHS),具有巨大的油气勘探潜力。

中-西非裂谷系的发育受到泛非期活动带(形成于约600 Ma)的影响,具体表现为该裂谷系发育位置与泛非期活动带位置高度吻合。其中,前人研究表明,中生代苏丹裂谷的发育受控于泛非期陡倾剪切带的复活<sup>[17]</sup>;在Benue槽,白垩纪的断层活动重新激活了泛非期的糜棱岩走滑带<sup>[18]</sup>。

在泛非期构造薄弱带基础上,中生代非洲大陆及其周缘的构造运动对中-西非裂谷系的形态和

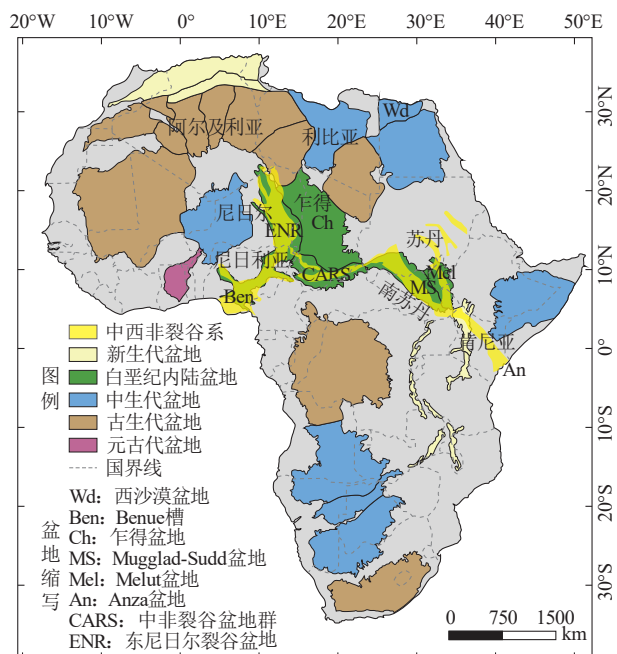


图1 非洲大陆沉积盆地与中-西非裂谷系分布图(据文献[15-16]修改)

Fig. 1 Map showing sedimentary basins in Africa and WCARS (modified after references [15-16])

规模具有至关重要的影响,不同期次的构造运动在非洲大陆上施加了不同的构造应力。然而,不同时期构造应力的来源和方向,以及如何叠加组合才能形成现今中-西非裂谷系的形态仍无明确定论。需要说明的是,区域构造对裂谷系的响应存在一定时间差,且部分期次的构造运动相对局限,对裂谷系的影响可以忽略。另一方面,构造运动通常持续一定时间,其起始与终止时间难以准确厘定。

本文旨在从中生代非洲大陆周缘大洋扩张、

裂谷伸展、板块碰撞和内部热点活动等4个方面分析中-西非裂谷系的演化历史与构造应力来源,探究其对沿线盆地结构的影响,并通过揭示非洲大陆周缘构造运动期次、中-西非裂谷系内部沉积不整合、断裂组合形态等方面的紧密联系,尝试建立周缘主要板块构造运动与中-西非裂谷系构造转折间的响应关系,为研究裂谷系内油气成藏与分布规律奠定基础。

## 1 中-西非裂谷系中生代构造演化历史

中生代以来,非洲大陆先后经历了6期区域性的构造活动,包括:①石炭纪—三叠纪,冈瓦纳大陆开始破裂,中大西洋和特提斯洋广泛发育裂谷和岩浆活动;②晚侏罗世—早白垩世,南大西洋裂谷开始,影响中非剪切带和北非陆缘发育裂谷系;③阿普特—阿尔必期,大西洋赤道段张开,裂谷活动集中于中-西非裂谷系西非分支和利比亚北部等区域,Benue槽岩浆活动开始;④圣通期大

西洋赤道段张开使非洲板块运动方向突变,西北非开始与欧亚板块碰撞挤压;⑤始新世是非洲板块和欧亚板块的主碰撞期(比利牛斯期),在中-西非裂谷系和北非陆缘形成区域性挤压反转;⑥晚始新世—渐新世,东非大裂谷发育,伴随强烈的岩浆活动。其中,中-西非裂谷系的发育起始于晚侏罗世,在早白垩世与南大西洋同步张裂。中生代裂谷系经历了两期裂谷和一期反转,位置与规模基本确定。

整个早白垩世中-西非裂谷系周缘板块的运动状态可划分为两个阶段。其中,纽康姆期到早阿普特期,南大西洋Walvis—Rio Grande海岭以南段张开,安哥拉—刚果段裂谷发育,北喀麦隆陆上N—S向拉张形成E—W走向半地堑系。此时N—S走向的跨撒哈拉断裂带发育左旋走滑运动和E—W向的挤压作用<sup>[21]</sup>(图2(a)),形成裂谷系西非分支的雏形;阿拉伯—努比亚板块整体向北运动,导致中非剪切带发育白垩纪第一期裂谷。

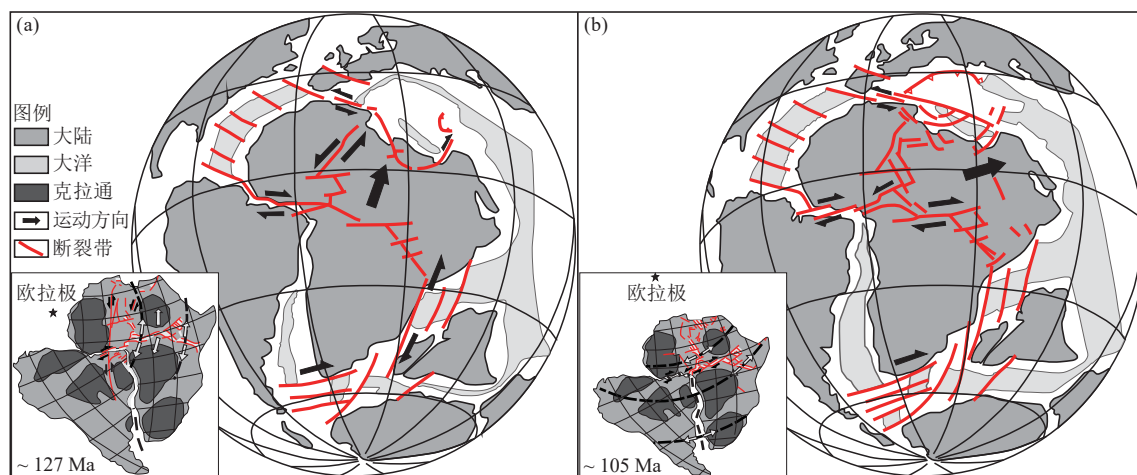


图2 早白垩世两期板块运动方向与欧拉极恢复图(据文献[19-20]修改)

Fig. 2 Constructions of plate movement direction and Euler pole of in two stages of Early Cretaceous (modified after references [19-20])

中晚阿普特期到阿尔必期,由于欧拉极位置的突变<sup>[19-20]</sup>,中-西非裂谷系周缘板块的运动方向发生显著变化(图2(b)),沿NW—SE走向出现广泛的拉张机制,应力方向为NE—SW。具体表现为阿拉伯—努比亚板块向NE向运动,使裂谷系西非分支发育第二期裂谷作用,中非剪切带则发育右旋走滑剪切,形成拉分盆地(图3(b))。由于中非剪切带与赤道转换断层相连,此时大西洋赤道段张开并发育右旋走滑剪切作用。

阿尔必期末,裂谷作用停止。晚白垩世赛诺曼期构造活动非常微弱,是主要的热沉降期,盆地规模扩大,并由几内亚湾沿NE向发育广泛海侵,在Benue槽形成6 km厚的海相沉积<sup>[23]</sup>。晚白垩世圣通期(Santonian)中-西非裂谷系以NW—SE向的构造挤压为主(图3(c)),海侵在挤压作用下终止。这种构造挤压在北非陆缘<sup>[1]</sup>和中-西非裂谷系各盆地(如Benue、Yola、Bornu、南Termit和Bongor盆地)都造成了显著的构造反转,

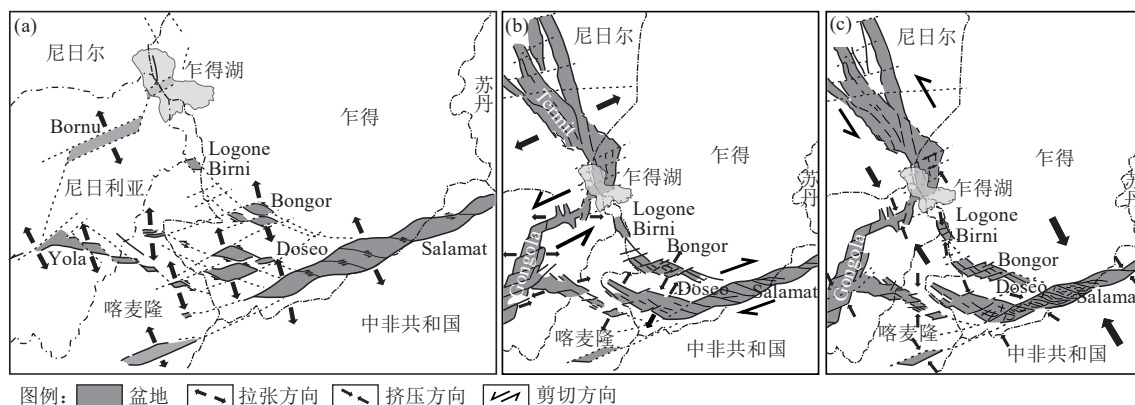


图3 中-西非裂谷系巴列姆期 (a)、阿普特—阿尔必期 (b) 和圣通期 (c) 构造应力分布图 (据文献 [22] 修改)

Fig. 3 Tectonic stress distribution of WCARS in Barremian (a), Aptian-Albian (b) and Santonian (c) (modified after reference [22])

形成大规模褶皱和花状构造<sup>[7, 24]</sup>, 代表西北非陆块与欧亚板块碰撞的开始, 和北部新特提斯陆缘阿尔卑斯运动的开始有关<sup>[19]</sup>。

概括而言, 新生代以来, 在与东非大裂谷张开相关的新生代地幔上涌、北非—欧亚板块间碰撞挤压, 以及周缘大西洋、印度洋扩张远程挤压的共同作用下, 非洲板块整体表现为“三面挤压, 中心热隆”的应力发育机制。这些应力在不同盆地同时发生, 主要造成裂谷系内部盆地间的差异演化<sup>[24]</sup>, 对中-西非裂谷系整体的位置、规模和走向影响有限。

## 2 基底薄弱带对裂谷发育的影响

基底构造薄弱带和板块边界控制了中-西非裂谷系的发育位置<sup>[25-27]</sup>。非洲大陆基底由西非、刚果、撒哈拉和卡拉哈里4个克拉通, 以及围绕其间泛非期为主的活动带拼合而成, 形成西非、阿拉伯—努比亚和南非3个次级板块, 板块间有限的相对运动形成了一定的伸展或挤压带, 与中-西非裂谷系的位置高度吻合 (图4)。另外, Kandi剪切带自南向北穿过尼日利亚、尼日尔和阿尔及利亚, 南北走向的跨撒哈拉断裂系从阿尔及利亚向南穿过尼日尔<sup>[21]</sup>。中-西非裂谷系是在泛非期糜棱岩剪切带和前泛非期缝合带的位置上发育的, 其中, 裂谷系西非分支受控于跨撒哈拉活动带<sup>[23]</sup>, 中非分支则受控于中非剪切带。

## 3 中-西非裂谷系构造应力来源

中-西非裂谷系的发育一方面取决于下伏构造薄弱带的分布范围, 具有一定的继承性。在此基

础上, 中生代以来非洲大陆周缘不同来源的构造应力则是两个裂谷分支形成的外部条件。其中, 影响裂谷系形成的构造应力可能来自周缘洋/海盆扩张对非洲陆缘的远程挤压、热点活动产生的垂向挤压、北部新特提斯洋裂谷作用产生的水平拉张, 以及欧亚—非洲板块初始碰撞产生的水平挤压等方面。不同类型构造应力的时空组合共同控制了中-西非裂谷系的形成。

### 3.1 相邻大洋的挤压应力

相邻洋/海盆的扩张导致板块分离, 应力通过刚性岩石圈或地幔对流传递至非洲板块被动陆缘, 表现为挤压性质的远程效应<sup>[36]</sup>。这种挤压应力不仅导致对应被动陆缘盆地基底的活化抬升, 产生大规模海底重力流沉积, 也推动非洲内部的相邻板块, 促使古老活动带 (图4) 复活和中-西非裂谷系发育。

其中, 约160 Ma时, 马达加斯加微板块与非洲大陆分离, 形成印度洋西索马里海盆, 推动阿拉伯—努比亚板块向北运动 (图2 (b)), 直接造成了裂谷系最东端Anza裂谷的形成<sup>[37-38]</sup>, 导致中非剪切带N—S向拉张, 裂谷系西非分支左旋剪切。非洲—南美洲板块的分裂和南大西洋的张开过程则主要影响非洲西侧陆缘, 及西非和南非克拉通, 推动非洲大陆开启了一定程度的逆时针旋转<sup>[3, 22]</sup>。

相邻大洋扩张产生的挤压应力对中-西非裂谷系形成的控制作用直接体现在裂谷系内部沉积不整合的时间分布上 (图5 (a))。一方面, 周缘洋/海盆的扩张速率控制了中-西非裂谷系的发育演化, 依据非洲大陆东西两侧洋/海盆扩张速率演

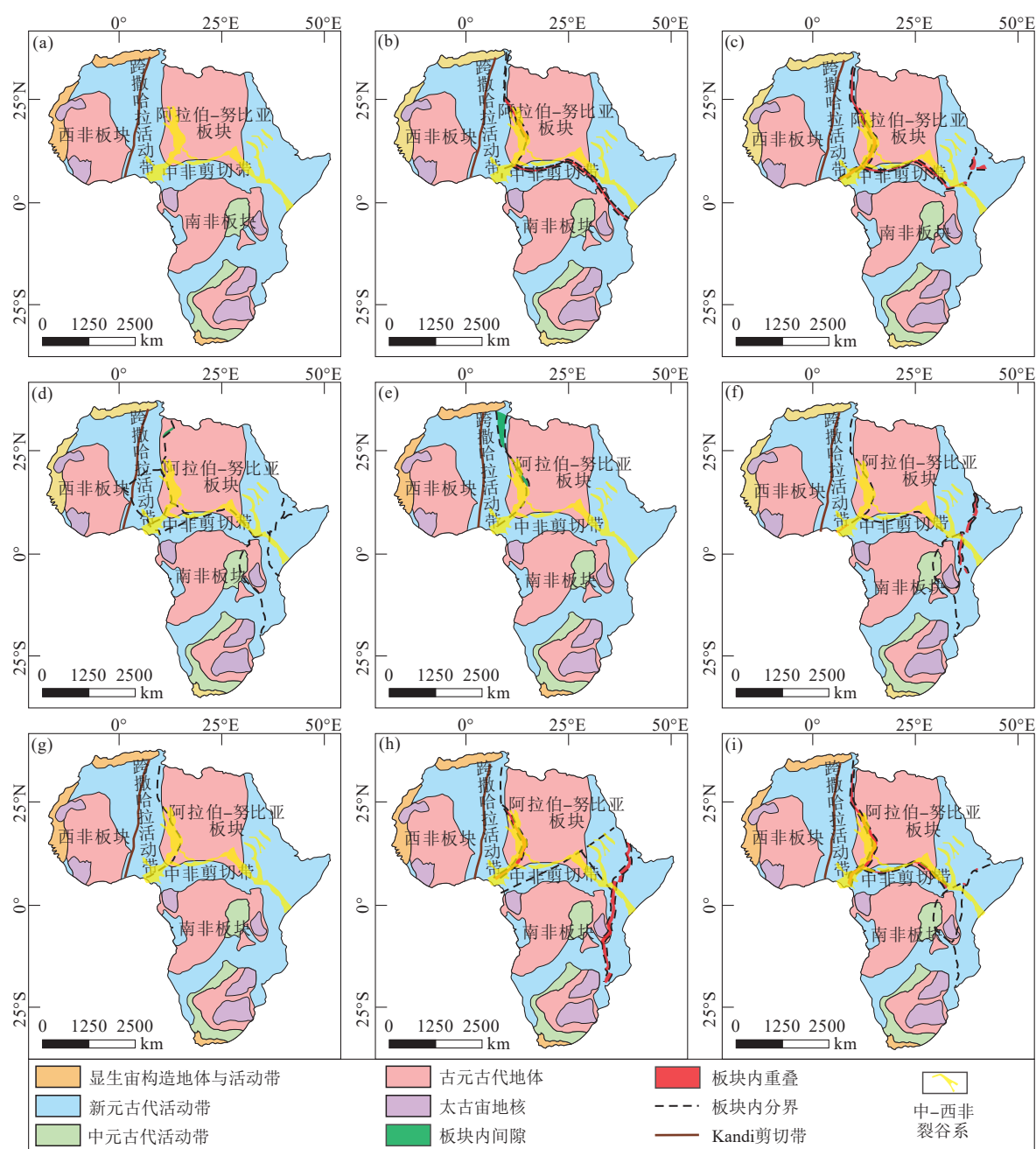


图4 早白垩世(约130 Ma)非洲大陆构造恢复结果与基底类型汇编((a-i)分别据文献[28, 6, 29-35]修改)

Fig. 4 Compilation of tectonic reconstructions and basement distributions of Africa in Early Cretaceous (ca. 130Ma) ((a-i) modified after references [28, 6, 29-35] respectively)

化历史, 扩张速率的跃升直接导致了对陆缘挤压应力的增加, 从而在裂谷系盆地群内发育对应时间的沉积不整合。其中, 西索马里海盆的初始扩张对应了Anza裂谷的张开, 132~127 Ma期间扩张速率的陡增对应了Muglad等盆地的沉积不整合(图5(b)); 对于南大西洋南段来说, 可识别出6期扩张速率突增, 其中4期明确对应了中-西非裂谷系内部盆地的沉积不整合, 分别为圣通期、晚白垩世末、始新世末和早中新世不整合(图5(c));

对于南大西洋中段来说, 初始张开对应阿普特早期不整合, 此外其扩张历史中的3期速率陡增中有2期分别对应了晚白垩世末和早中新世沉积不整合(图5(d))。

另一方面, 周缘洋/海盆的扩张方向也对中-西非裂谷系发育演化有控制作用。洋壳断裂带走向记录了扩张方向, Fairhead<sup>[22]</sup>选取中大西洋Kane等4条主要断裂带, 通过对断裂带进行年代标定和走向追踪, 获得4条断裂带走向随时间的变

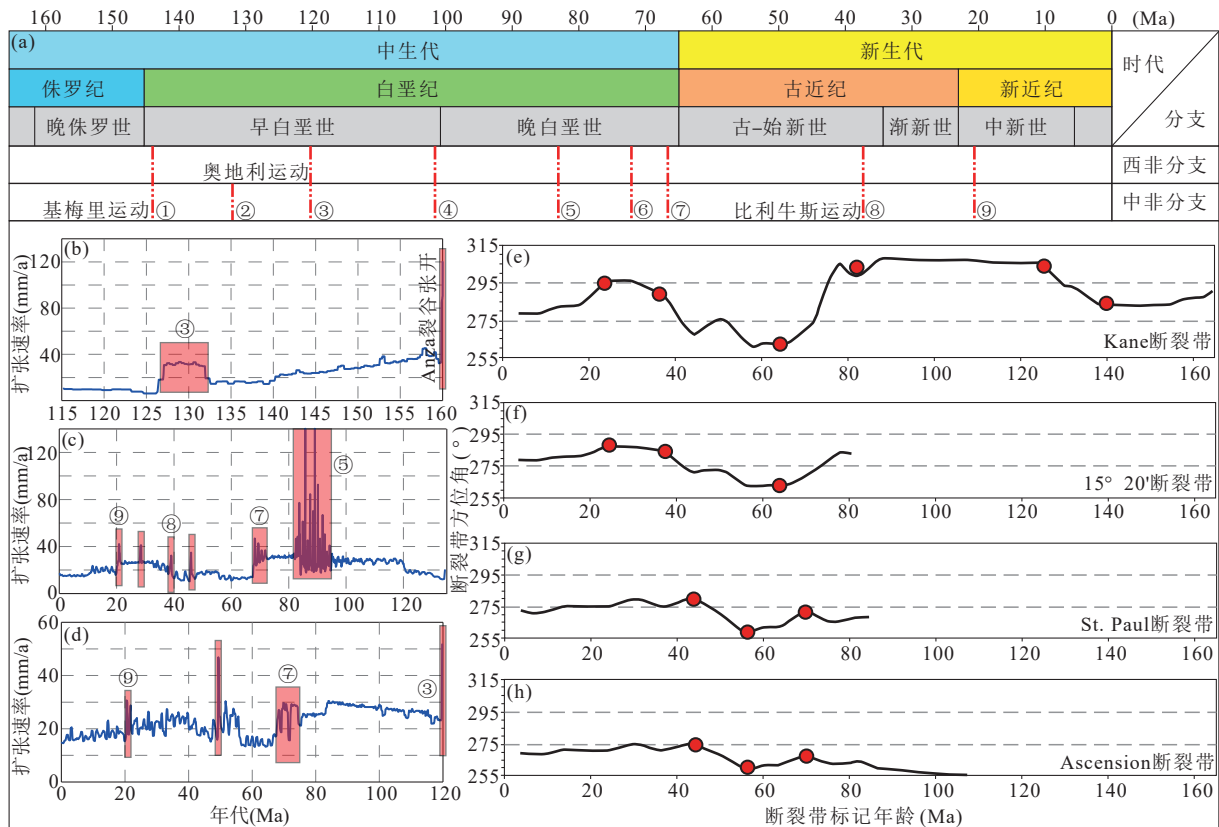


图5 非洲大陆周缘洋/海盆扩张对中-西非裂谷系发育历史的影响

Fig. 5 The impact of seafloor spreading around African continent on the development of WCARS

(a) 中生代以来中-西非裂谷系沉积不整合时间分布; (b-d) 西索马里海盆、南大西洋南段和中段扩张速率演化史 (扩张速率数据来自文献[39]); (e-h) 中大西洋 Kane (e)、15° 20' (f)、St. Paul (g) 和 Ascension (h) 断裂带非洲侧走向统计<sup>[20]</sup>

化规律 (图 5 (e-h))。以标记结果最完整的 Kane 断裂带为例, 中-西非裂谷系内部的沉积不整合时代与断裂带走向, 即洋/海盆扩张方向的转折基本吻合 (图 5 (e)), 侧面验证了周缘洋/海盆扩张对裂谷系发育演化的影响。

### 3.2 热点活动影响

中-西非裂谷系内部火山岩分布相对有限, 导致对其发育演化过程中热点影响范围仍存在一定争议<sup>[40-41]</sup>。前人研究<sup>[42]</sup>表明, 位于几内亚湾的 Benue 槽与 St. Helena 热点同时活动, 远早于大西洋赤道段扩张, 且 St. Helena 热点相较于南侧的 Tristan 热点更冷、更弱<sup>[43]</sup>, 影响范围可能局限于 Benue 槽附近<sup>[44-45]</sup>。

在中-西非裂谷系及南大西洋张裂的过程中, St. Helena 热点同步活动<sup>[43]</sup>, 其影响范围涉及中-西非裂谷系、南大西洋中段与赤道段, 以及南美板块 (图 6)。与 St. Helena 热点活动相关的岩浆作用, 形成了喀麦隆火山链, 虽然其现今的分布位置与裂谷系的对应关系不明显, 但古地磁揭示

80 ~ 70 Ma 期间非洲大陆在逆时针旋转的大趋势下也发生过约 7° 的顺时针旋转<sup>[46]</sup>, 这导致火山链与现今中-西非裂谷系 Benue 槽的相对位置出现偏差 (图 6 (a))。经校正的火山岩位置与“Y”型的 Benue 槽高度吻合 (图 6 (c)), 且火山岩符合幔源的地球化学特征<sup>[47]</sup> (图 6 (d))。另外, Benue 槽内部发育明显的布格重力正异常, 也揭示深部可能存在岩浆物质。

热点活动势必会提供来自深部垂向上的挤压应力, 由此将在热点活动区域附近产生水平方向上的被动拉张应力, 从而使 Benue 槽相较于中-西非裂谷系其他盆地规模明显更大, 并发育大量火山活动, 与前人模拟结果一致<sup>[48]</sup>。

### 3.3 新特提斯洋裂谷张应力

在中-西非裂谷系发育演化的过程中, 北部新特提斯洋发育了多期裂谷作用, 为邻近的阿拉伯—努比亚板块提供了一定的拉张应力。新特提斯洋盆的开裂从侏罗纪开始, 并在侏罗纪晚期至白垩纪早期达到鼎盛。受新特提斯洋盆中生代张裂应力的影

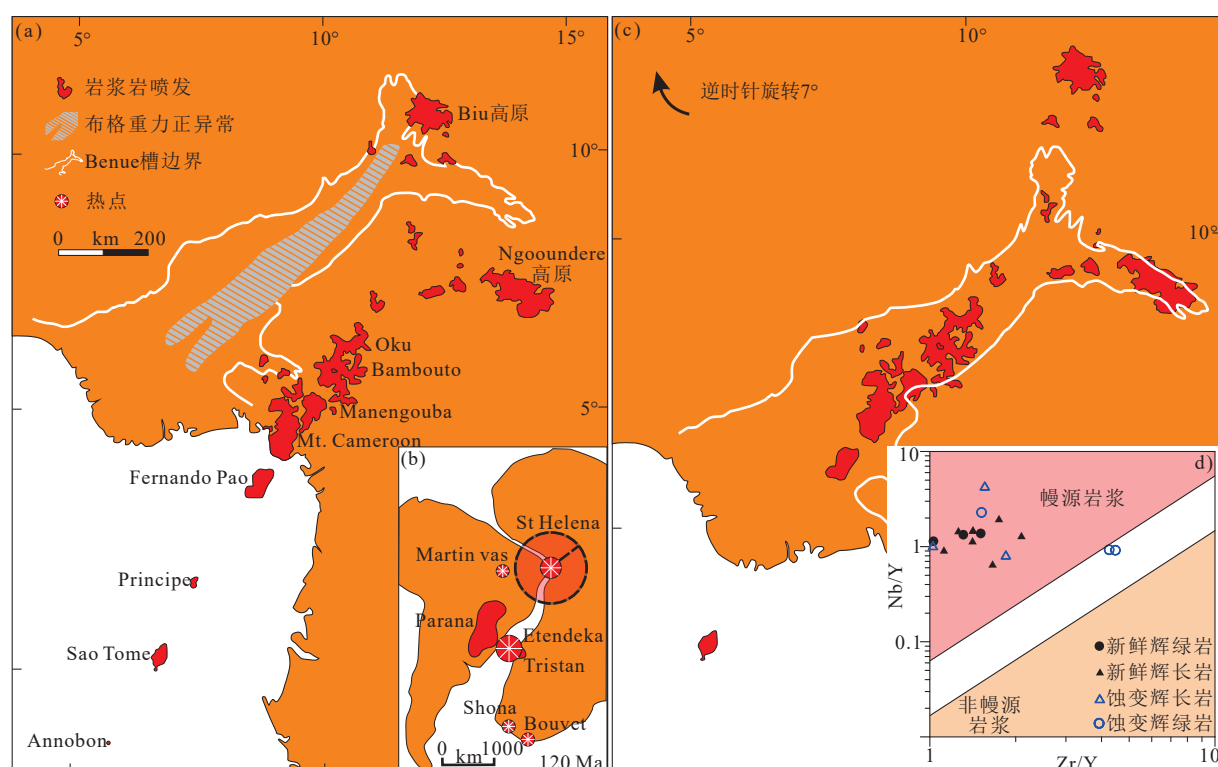


图6 中-西非裂谷系Benue槽与其周缘火山岩匹配关系(据文献[46-47]修改)

Fig. 6 Matching relationship between Benue Trough of WCARS and surrounding volcanics (modified after references [46-47])

(a) Benue槽周缘火山岩分布图; (b) St. Helena热点影响范围示意图; (c) 旋转校正后Benue槽与周缘火山岩的匹配关系; (d) Benue槽周缘火山岩Zr-Nb投图

响,北非阿拉伯—努比亚板块产生了对应方向的运动,并对中-西非裂谷系的发育产生影响。

其中,侏罗纪—早白垩世新特提斯洋N—S向的裂谷活动促使阿拉伯—努比亚板块向北漂移(图7(a)),加剧了裂谷系中非分支N—S向裂谷作用和西非分支的左旋剪切(图2(a))。这种N—S向的拉张也直接体现在新特提斯洋南岸各盆地内中生界沉积层序中,如西沙漠盆地(图1)中生代断裂走向为E—W向和ENE—WSW向<sup>[49, 51-52]</sup>(图7(b))。早白垩世裂谷持续时间约14Ma,至阿普特—阿尔必期,拉张方向转变为NE—SW向<sup>[50, 53]</sup>,与之对应的是阿拉伯—努比亚板块NE向漂移,以及裂谷系中非分支产生右旋剪切的运动分量(图2(b)),并在邻近盆地产生NW—SE向的正断裂<sup>[52]</sup>(图7(c))。

新特提斯洋中生代两期裂谷活动<sup>[54]</sup>产生的张应力符合中-西非裂谷系构造活动期次,这虽无法证明二者间的直接关系,但至少揭示出新特提斯洋裂谷张应力对中-西非裂谷系发育演化的潜在影响。

### 3.4 欧亚板块—非洲板块初始碰撞挤压应力

早白垩世末期大西洋赤道段的张开使非洲板块运动方向突变,具体表现为非洲、欧亚两个板块由原来N—S向的离散运动开始转变为NW—SE向轻微的斜向汇聚。这种突变导致圣通期(约80 Ma)非洲板块与欧亚板块发生初始碰撞,代表了西北非陆块与欧亚板块西南部碰撞的开始(图8),欧亚板块开始逆时针旋转。

板块碰撞造成圣通期持续的区域挤压<sup>[22]</sup>(持续时间约5 Ma),在整个中北非地区,尤其是中-西非裂谷系和北非陆缘形成反转构造,其中,在裂谷系Benue槽、Yola、Bornu、Termit和Bongor等盆地内形成NE—SW、E—W和ENE—WSW走向的褶皱,指示NW—SE向的构造挤压作用。此时NW—SE走向的裂谷盆地仍在活动,西非裂谷系或发育右旋走滑<sup>[1]</sup>(图2(c))。

挤压反转期不仅是构造圈闭的主要形成时期<sup>[55]</sup>,也会改变油气运移通道。如圣通期之前,北非西沙漠盆地南高北低,这段时间的油气运移表现为从侏罗系烃源岩向南上倾运移;圣通期后,

Fig. 8 Schematic diagram of tectonic compression during the Santonian (a) and the resulting inversion structures in Western Desert basin ( (b) ), modified after reference [51] )

开始南低北高，盆地南倾，运移方向转变为向北<sup>[52]</sup>。因此，欧亚板块—非洲板块初始碰撞挤压应力不仅是中-西非裂谷系发育演化的主控应力之一，同时也深远影响了中北非中生代裂谷盆地的成藏历史。

## 4 讨论

### 4.1 不同时期构造应力对中-西非裂谷系盆地结构的差异影响

不同时期的构造应力（图9）共同启动了中-西非裂谷系。其中，晚侏罗世西索马里海盆N—S向扩张率先推动阿拉伯—努比亚板块向北运动，形成中-西非裂谷系内最古老的Anza裂谷。早白垩世南大西洋向北“拉链式”张开<sup>[56-59]</sup>，对南非板块形成向东的挤压应力<sup>[48]</sup>，并自南向北逐步减弱。在两侧海底扩张远程挤压的基础上，叠加北部新特提斯裂谷的拉张影响，在中非剪切带的薄弱基底上形成近N—S向的最大拉张主应力（ $\sigma_1$ ），在跨撒哈拉活动带的薄弱基底上则主要形成左旋的剪切应力。在上述应力联合作用的基础上，中-西非裂谷系逐步发育。随后St. Helena热点开始发育，熔融物质向上隆升，对中-西非裂谷系Benue槽形成垂向的挤压应力，并在周缘形成了规律展布的火山岩（图6）。

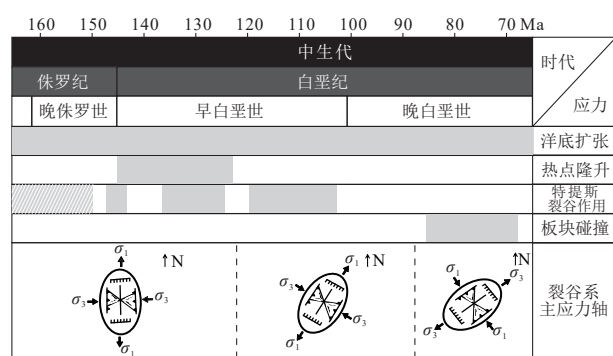


图9 中生代各类构造应力的出现顺序与持续时间

Fig. 9 The sequence and duration of all tectonic stresses in Mesozoic

阿普特—阿尔必期非洲两侧大洋基本成型，挤压趋于平稳，此时主要受新特提斯裂谷的影响，形成NE—SW向最大拉张主应力（ $\sigma_1$ ），阿拉伯—努比亚板块转为NE向运动<sup>[19]</sup>，在裂谷系西非分支和北非地区形成NW—SE走向的盆地群，并在裂谷系中非分支发育右旋剪切。圣通期后由于大西洋赤道段的张开使非洲板块运动方向突变<sup>[21]</sup>，

开始与欧亚板块碰撞，NW—SE向最大挤压主应力（ $\sigma_1$ ）由北非陆缘向南传递至中-西非裂谷系，形成广泛的挤压反转，并使裂谷系西非分支发育右旋走滑（图3（c））。而受到最小拉张主应力（ $\sigma_3$ ）的影响，裂谷系西非分支NW—SE走向的裂谷盆地仍在活动。至此，中-西非裂谷系基本形成。

上述构造应力出现顺序的不同使裂谷系不同分支存在明显结构差异。其中最早出现的构造应力为西索马里海盆扩张产生的N—S向挤压应力，之后由于早白垩世南大西洋开始自南向北扩张，非洲西侧陆缘的挤压应力表现为自南向北逐步减小。在两侧洋/海盆扩张挤压的合力作用下，非洲大陆整体表现出一定程度的逆时针旋转，裂谷系中非分支整体拉张，西非分支则表现为“南部拉张，北部挤压，整体左旋走滑”的特征。在这种应力背景下，裂谷盆地发育有限，仅在西非分支南端有所分布，而在中非分支广泛发育。阿普特—阿尔必期，随着北部新特提斯洋裂谷拉张应力加入，形成区域上NE—SW向的拉张合力，在裂谷系两个分支都产生相应拉张，是西非分支裂谷盆地的主要发育时期。综合早白垩世两期拉张的影响，西非分支往往形成“北窄深，南宽缓”的裂谷盆地<sup>[12]</sup>（如Termit盆地）。

这种差异也体现在盆地结构上，以中非分支的Doseo盆地和西非分支的Termit盆地为例，前者早白垩世受到两期不同方向的拉张应力，分别形成近E—W（图10（a））和NW—SE（图10（b））走向的两套断裂系统，揭示早白垩世期间拉张应力从N—S向NE—SW的转变。与之不同的是，Termit盆地由于位于西非分支的南部，在早白垩世早期构造合应力的影响下以左旋走滑为主，正断裂发育有限，因此其内部早白垩世的断裂系统仅记录了早白垩世晚期NE—SW向的拉张应力（图10（c））。虽然中生代区域构造应力场的变化并非单个盆地形成的唯一原因，如两个盆地都受控于早白垩世泛非期构造薄弱带的活化，且新生代构造活动也对其产生了不同程度的影响，但盆地结构变化与区域应力场间较好的对应关系指示后者是两个盆地形成的重要条件。

### 4.2 主要构造应力的有效影响范围

4类构造应力不仅在时间上存在先后顺序，其各自影响范围也存在差异。来自东西两侧的洋/海

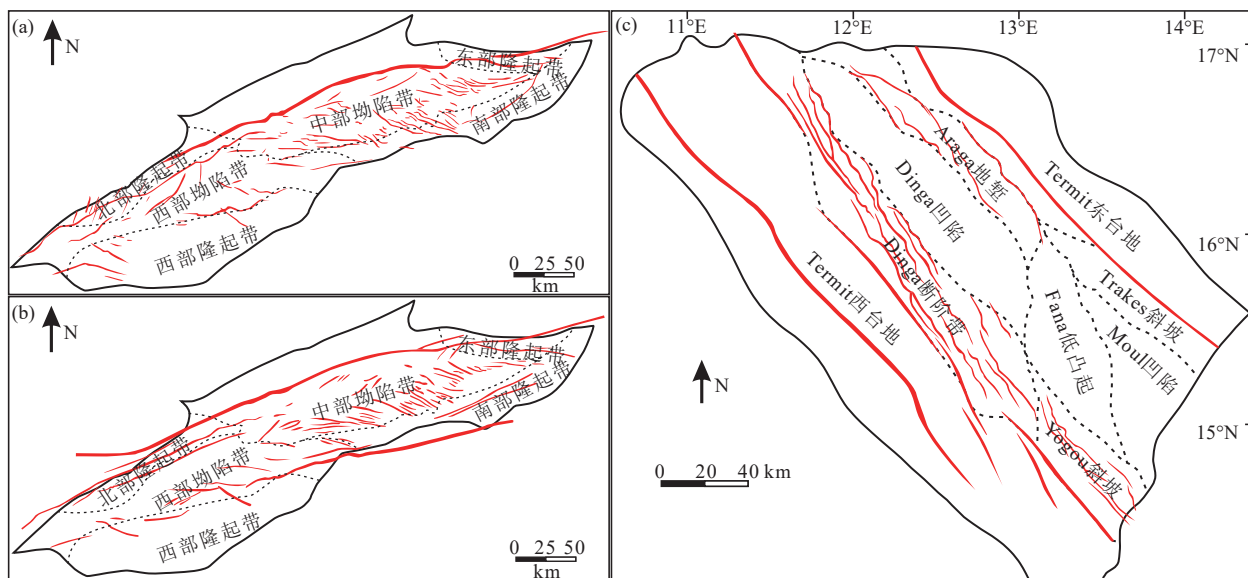


图 10 中-西非裂谷系两分支典型盆地下白垩统断裂展布图

Fig. 10 Distribution of Lower Cretaceous faults in typical basins of two branches of WCARS

Doseo 盆地下白垩统中部 (a) 与顶部 (b) 断裂展布图 (据文献[8]修改); (c) Termit 盆地下白垩统断层展布图 (据文献[60]修改)

底扩张挤压应力, 以及来自北部新特提斯裂谷的拉张应力, 从三个方向在中-西非裂谷系汇聚。其中, 西索马里海盆向北的挤压应力和北部新特提斯洋裂谷张应力共同控制阿拉伯-努比亚板块的运动, 影响范围包含裂谷系中非分支 Benue 槽以东和整个西非分支; 南大西洋扩张表现为向东的区域性挤压应力, 影响范围涉及整个中-西非裂谷系。

来自 St. Helena 热点垂向挤压应力的影响范围相对局限, 只存在于 Benue 槽, 体现在周缘局部发育的热点相关火山岩上。晚白垩世圣通期, 非洲大陆西北缘板块碰撞导致的挤压应力向 SE 传播, 使裂谷系内部盆地发育显著的构造反转与沉积不整合<sup>[22]</sup>, 这种构造挤压的效果在中-西非裂谷系内部表现为自北向南, 自东向西逐步减弱的规律。以裂谷系中非分支为例<sup>[55]</sup>, 在圣通期挤压事件中, 其西部盆地 (如 Bongor 盆地) 表现为明显的构造抬升, 中部盆地 (如 Doseo 盆地) 产生了局部的沉积不整合, 而东部盆地 (如 Muglad 盆地) 的影响则微乎其微。

总体来说, 4 类构造应力各自的影响范围虽无法明确划定, 但其空间展布在中-西非裂谷系的位置表现为明显的重合和叠加影响 (图 11)。各类应力相互协同, 共同塑造了中生代中-西非裂谷系的规模与形态。

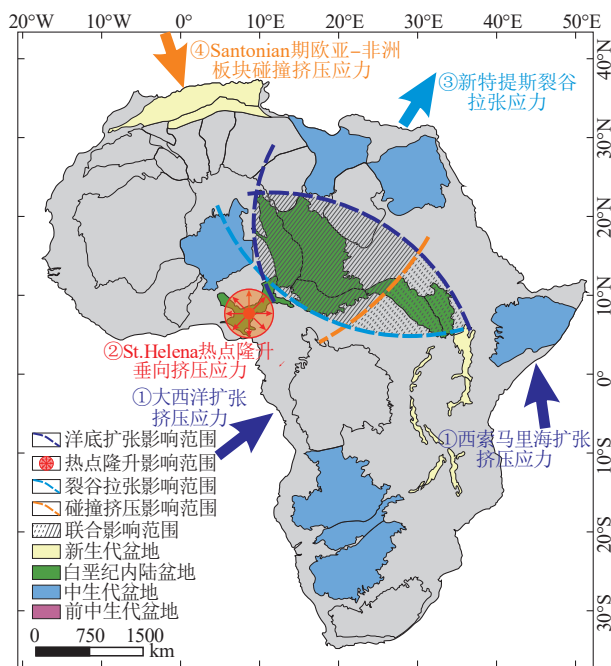


图 11 中-西非裂谷系各类构造应力影响范围示意图

Fig. 11 Schematic map of the impact range of all tectonic stresses in WCARS

## 5 结 论

(1) 基底构造薄弱带及板块边界控制中-西非裂谷系发育位置, 在此基础上, 周缘大洋扩张的远程挤压效应、热点隆升垂向挤压应力、新特提斯裂谷拉张应力和非洲-欧亚板块碰撞挤压应力共同塑造了中-西非裂谷系的规模与形态。

(2) 周缘洋/海盆扩张产生的挤压应力主要来自非洲大陆西侧大西洋和东侧西索马里海盆, 与扩张速率和扩张方向紧密相关, 地质历史上扩张速率和扩张方向的突变直接导致中-西非裂谷系内部产生对应的沉积不整合。

(3) 中生代不同时期的构造应力对中-西非裂谷系两分支及内部盆地结构的影响具有明显差异, 中非分支盆地完整记录两期不同方向的拉张作用和一期构造反转, 而西非分支盆地则主要记录第二期NE—SW向拉张和圣通期构造反转。

(4) 不同方向的构造应力在中-西非裂谷系汇聚, 西索马里海盆扩张挤压应力和新特提斯裂谷拉张应力主要影响西非分支和中非分支Benue槽以东, 南大西洋扩张挤压应力影响全局, 圣通期挤压应力集中作用于西非分支和中非分支中西部, 热点活动影响范围则局限于Benue槽。

#### 参考文献:

- [1] BUMBY A J, GUIRAUD R. The geodynamic setting of the Phanerozoic basins of Africa[J]. *Journal of African Earth Sciences*, 2005, 43(1/2/3): 1–12.
- [2] BINKS R M, FAIRHEAD J D. A plate tectonic setting for Mesozoic rifts of West and Central Africa[J]. *Tectonophysics*, 1992, 213(1/2): 141–151.
- [3] GUIRAUD R, MAURIN J C. Early Cretaceous rifts of Western and Central Africa: an overview [J]. *Tectonophysics*, 1992, 213(1/2): 153–168.
- [4] FAIRHEAD J D. Geophysical controls on sedimentation within the African rift systems[J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 1986, 25(1): 19–27.
- [5] BASILE C, MASCLE J, GUIRAUD R. Phanerozoic geological evolution of the Equatorial Atlantic domain[J]. *Journal of African Earth Sciences*, 2005, 43(1/2/3): 275–282.
- [6] MOULIN M, ASLANIAN D, UNTERNEHR P. A new starting point for the South and Equatorial Atlantic Ocean [J]. *Earth-Science Reviews*, 2010, 98(1/2): 1–37.
- [7] 余朝华, 肖坤叶, 张桂林, 等. 乍得Bongor盆地反转构造特征及形成机制分析[J]. *中国石油勘探*, 2018, 23(3): 90–98.
- [8] 李希元. 中非裂谷系Doseo盆地构造特征及成因演化数值模拟[D]. 长江大学, 2024.
- [9] 饶勇, 程涛, 杨松岭, 等. 中非Doseo盆地油气地质条件及成藏控制因素分析[J]. *地质与勘探*, 2023, 59(5): 1117–1127.
- [10] 李庆哲, 刘大文, 王京彬, 等. 中非铜钴成矿带地质特征及铜钴矿床资源量分析[J]. *地质与勘探*, 2023, 59(2): 451–464.
- [11] 肖洪, 李美俊, 程顶胜, 等. 中非Muglad盆地晚白垩世海侵及其对油气勘探的意义[J]. *地学前缘*, 2024, 31(3): 352–359.
- [12] 王涛, 袁圣强, 李传新. 西非裂谷系Termit裂谷盆地地质结构及成因机制[J]. *石油勘探与开发*, 2022, 49(6): 1157–1167.
- [13] 庞思晨, 李传新, 毛凤军, 等. 西非裂谷系Grein坳陷构造几何学与运动学特征[J]. *现代地质*, 2023, 37(2): 328–339.
- [14] 姜军胜, 胡鹏, 张海坤, 等. 西非铁矿资源特征及成矿规律[J]. *地质通报*, 2023, 42(8): 1276–1290.
- [15] FAIRHEAD J D. Regional tectonics and basin formation: the role of potential field studies—an application to the Mesozoic West and Central African Rift System[M]//*Regional geology and tectonics*; Elsevier, 2020: 541–556.
- [16] BONIFACIO J F, GANADE C E, DOS SANTOS A C, et al. Review and critical assessment on plate reconstruction models for the South Atlantic[J]. *Earth-Science Reviews*, 2023, 238: 104333.
- [17] DALY M C, CHOROWICZ J, FAIRHEAD J D. Rift basin evolution in Africa: the influence of reactivated steep basement shear zones[J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 1989, 44(1): 309–334.
- [18] MAURIN J C, BENKHELIL J, ROBINEAU B. Fault rocks of the Kaltungo lineament, NE Nigeria, and their relationship with Benue Trough tectonics[J]. *Journal of the Geological Society*, 1986, 143(4): 587–599.
- [19] MAURIN J C, GUIRAUD R. Basement control in the development of the Early Cretaceous West and Central African rift system[J]. *Tectonophysics*, 1993, 228(1/2): 81–95.
- [20] FAIRHEAD J D, GREEN C M, MASTERTON S M, et al. The role that plate tectonics, inferred stress changes and stratigraphic unconformities have on the evolution of the West and Central African Rift System and the Atlantic continental margins [J]. *Tectonophysics*, 2013, 594: 118–127.
- [21] GUIRAUD R E N É, MAURIN J C. Le Rifting en Afrique au Cretace inferieur; synthese structurale, mise en evidence de deux etapes dans la genese des bassins, relations avec les ouvertures oceaniques peri-africaines [J]. *Bulletin de la Société géologique de France*, 1991, 162(5): 811–823.
- [22] FAIRHEAD J D. The Mesozoic West and Central Africa Rift System and the older Kandi Shear Zone: rifting and tectonics of North Africa and South America and fragmentation of Gondwana based on geophysical investigations[J]. *Journal of African Earth Sciences*, 2023, 199: 104817.
- [23] GHOMSI F E K, TENZER R, NJINJU E, et al. The crustal configuration of the West and Central African Rift System from gravity and seismic data analysis[J]. *Geophysical Journal International*, 2022, 230(2): 995–1012.
- [24] 张光亚, 黄彤飞, 刘计国, 等. 中西非叠合裂谷盆地形成与演化[J]. *岩石学报*, 2022, 38(9): 2539–2553.
- [25] HEINE C, BRUNE S. Oblique rifting of the Equatorial Atlantic: why there is no Saharan Atlantic Ocean [J]. *Geology*, 2014, 42(3): 211–214.
- [26] CHENIN P, MANATSCHAL G, LAVIER L L, et al. Assessing

- the impact of orogenic inheritance on architecture, timing and magmatic budget of the North Atlantic rift system: a mapping approach[J]. *Journal of the Geological Society*, 2015, 172(6): 711 – 720.
- [27] BRUNE S, CORTI G, RANALLI G. Controls of inherited lithospheric heterogeneity on rift linkage: Numerical and analog models of interaction between the Kenyan and Ethiopian rifts across the Turkana depression[J]. *Tectonics*, 2017, 36(9): 1767 – 1786.
- [28] BULLARD E, EVERETT J E, GILBERT SMITH A. The fit of the continents around the Atlantic[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 1965, 258: 41 – 51.
- [29] SETON M, MULLER R D, ZAHIROVIC S, et al. Global continental and ocean basin reconstructions since 200 Ma[J]. *Earth-Science Reviews*, 2012, 113(3/4): 212 – 270.
- [30] HEINE C, ZOETHOUT J, MULLER R D. Kinematics of the South Atlantic rift[J]. *Solid Earth*, 2013, 4(2): 215 – 253.
- [31] PINDELL J, DEWEY J F. Permo-Triassic reconstruction of western Pangea and the evolution of the Gulf of Mexico/Caribbean region[J]. *Tectonics*, 1982, 1(2): 179 – 211.
- [32] MULLER R D, ZAHIROVIC S, WILLIAMS S E, et al. A global plate model including lithospheric deformation along major rifts and orogens since the Triassic[J]. *Tectonics*, 2019, 38(6): 1884 – 1907.
- [33] NURNBERG D, MULLER R D. The tectonic evolution of the South Atlantic from Late Jurassic to present[J]. *Tectonophysics*, 1991, 191(1/2): 27 – 53.
- [34] SCHETTINO A, SCOTESE C R. Apparent polar wander paths for the major continents (200 Ma to the present day): a palaeomagnetic reference frame for global plate tectonic reconstructions[J]. *Geophysical Journal International*, 2005, 163(2): 727 – 759.
- [35] TORSVIK T H, ROUSSE S, LABAILS C, et al. A new scheme for the opening of the South Atlantic Ocean and the dissection of an Aptian salt basin [J]. *Geophysical Journal International*, 2009, 177(3): 1315 – 1333.
- [36] 成秋明. 洋中脊动力学与俯冲带地震-岩浆-成矿事件远程效应[J]. *地学前缘*, 2024, 31(1): 1 – 14.
- [37] REEVES C V, KARANJA F M, MACLEOD I N. Geophysical evidence for a failed Jurassic rift and triple junction in Kenya [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1987, 81(2/3): 299 – 311.
- [38] BOSWORTH W, MORLEY C K. Structural and stratigraphic evolution of the Anza rift, Kenya [J]. *Tectonophysics*, 1994, 236(1/2/3/4): 93 – 115.
- [39] SETON M, MULLER R D, ZAHIROVIC S, et al. A global data set of present-day oceanic crustal age and seafloor spreading parameters [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2020, 21(10): 1 – 15.
- [40] PLOMEROVA J, BABUSKA V, DORBATH C, et al. Deep lithospheric structure across the Central African shear zone in Cameroon [J]. *Geophysical Journal International*, 1993, 115(2): 381 – 390.
- [41] FAIRHEAD J D, GREEN C M. Controls on rifting in Africa and the regional tectonic model for the Nigeria and East Niger rift basins[J]. *Journal of African Earth Sciences*, 1989, 8(2/3/4): 231 – 249.
- [42] WILSON M, GUIRAUD R. Magmatism and rifting in Western and Central Africa, from Late Jurassic to Recent times[J]. *Tectonophysics*, 1992, 213(1/2): 203 – 225.
- [43] WILSON M. Magmatism and continental rifting during the opening of the South Atlantic Ocean; a consequence of Lower Cretaceous super-plume activity [J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 1992, 68(1): 241 – 255.
- [44] HOUSEMAN G A. The triple-junction structure of mantle plumes and continental rifting [J]. *Exploration Geophysics*, 1991, 22(1): 195 – 198.
- [45] KOPTEV A, BUROV E, GERYA T, et al. Plume-induced continental rifting and break-up in ultra-slow extension context: Insights from 3D numerical modeling [J]. *Tectonophysics*, 2018, 746: 121 – 137.
- [46] FITTON J G. The Cameroon line, West Africa: a comparison between oceanic and continental alkaline volcanism [J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 1987, 30(1): 273 – 291.
- [47] OBIORA S, CHARAN S N. Geochemical constraints on the origin of some intrusive igneous rocks from the Lower Benue rift, Southeastern Nigeria [J]. *Journal of African Earth Sciences*, 2010, 58(2): 197 – 210.
- [48] MIN G, HOU G. Mechanism of the Mesozoic African rift system: Paleostress field modeling [J]. *Journal of Geodynamics*, 2019, 132: 101655.
- [49] ABDEL-FATTAH M I, ATTIA T E, ABD EL-AAL M H, et al. Seismic interpretation of the Late Albian-Early Cenomanian Bahariya reservoirs of Burg El Arab oil field for tectonic evaluation; a case study from Western Desert, Egypt [J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2021, 14(5): 1 – 11.
- [50] BOSWORTH W, TARI G. Hydrocarbon accumulation in basins with multiple phases of extension and inversion: examples from the Western Desert (Egypt) and the western Black Sea [J]. *Solid Earth Discussions*, 2020: 1 – 31.
- [51] SARHAN M A. Wrench tectonics of Abu Gharadig Basin, Western Desert, Egypt: a structural analysis for hydrocarbon prospects[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2017, 10: 1 – 14.
- [52] YOUSEF M, YOUSEF M, SEHIM A. Structural style and evolution of inversion structures of Horus field, Alamein Basin, northern Western Desert of Egypt [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2019, 110: 55 – 72.
- [53] KITCHKA A A, ARKHIPOVA S L, BEZKHYZHKO O M, et al. Tectonisedimentary evolution of the Abu Gharadig basin and exploration challenges for the Western Desert province, Egypt [C]//14th EAGE International Conference on Geoinformatics-Theoretical and Applied Aspects. European Association of Geo-

- scientists and Engineers, 2015, 2015(1): 1 – 5.
- [54] KEELEY M L, WALLIS R J. The Jurassic System in northern Egypt: II. Depositional and tectonic regimes [J]. *Journal of Petroleum Geology*, 1991, 14(1): 49 – 64.
- [55] 张艺琼, 何登发, 童晓光. 中非剪切带含油气盆地成因机制与构造类型[J]. *石油学报*, 2015, 36(10): 1234 – 1247.
- [56] 杨雄兵, 王宏语, 苏玉山, 等. 南大西洋下刚果盆地烃源岩特征与成藏贡献[J]. *现代地质*, 2023, 37(5): 1369 – 1384.
- [57] 田纳新, 解习农, 李军, 等. 岩石圈破裂过程与被动陆缘盆地地层样式[J]. *现代地质*, 2025, 39(4): 857 – 870.
- [58] 田纳新, 吴高奎, 刘静静, 等. 中大西洋被动陆缘盆地结构特征与勘探领域[J]. *石油实验地质*, 2023, 45(3): 486 – 496.
- [59] 曹书缘, 李江海, 王志琛. 下地壳非均质性对裂谷构造演化的影响——以南大西洋中段裂谷盆地为例[J]. *断块油气田*, 2024, 31(5): 795 – 801.
- [60] LAI H, LI M, LIU J, et al. Organic geochemical characteristics and depositional models of Upper Cretaceous marine source rocks in the Termit Basin, Niger[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2018, 495: 292 – 308.