

中非剪切背景下裂陷盆地的发育机制：以 Bongor 盆地为例

肖坤叶¹, 张新顺^{1*}, 高彦杰², 王林³, 杜业波¹, 王利¹, 高华华³

1. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083;

2. 中国地质大学(武汉)构造与油气教育部重点实验室 湖北武汉 430074;

3. 中国石油天然气勘探开发公司, 北京 100034

摘要:基于地震资料精细解析和构造物理模拟实验, 本文研究了中非剪切带 Bongor 盆地独特的结构构造特征及其形成演化的动力学机制。结果显示 Bongor 盆地整体表现为南断北超箕状断陷结构, 局部发育构造转换带, 沉积中心受控于边界主干断裂, 现今保留明显的反转裂谷盆地特征, 受早白垩世两期裂陷和晚白垩世末期-古近纪挤压反转共同控制。构造物理模拟实验证实了盆地受两期裂陷及其后反转作用的控制机制, 并揭示两期裂陷伸展方向夹角为 25°~45°。研究认为: 早白垩世早期, 南大西洋初始扩张引发的南非次板块与东北非次板块间近 N-S 向拉张, 导致包括 Bongor 盆地在内的中非裂谷系盆地经历第一期近南北向伸展的裂陷作用; 早白垩世晚期, 大西洋赤道段的扩张以及特提斯洋向欧亚大陆俯冲, 导致东北非地块与南非地块之间经历近 NE-SW 向的伸展作用, 北西走向的 Bongor 经历二期裂陷作用。研究提出了 Bongor 盆地形成演化的新认识, 对指导下一步油气勘探具有重要意义。

关键词: 裂陷盆地; 剪切带; 构造物理模拟; 构造演化; Bongor 盆地

中图分类号: P541

收稿日期: 2025-07-08

Formation Mechanism of Rift Basins in the Central African Strike-Slip Tectonic Setting: A Case Study of the Bongor Basin

Xiao Kunye¹, Zhang Xinshun^{1*}, Gao Yanjie², Wang Lin³, Du Yebo¹, Wang Li¹,
Gao Huahua³

1. Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Beijing 100083, China

2. Key Laboratory of Tectonics and Petroleum Resources, Ministry of Education, China University of Geosciences,
Wuhan 430074, China

3. China National Oil and Gas Exploration and Development Corporation, Beijing 100034, China

Abstract: Integrating detailed seismic interpretation and analogue tectonic modeling experiments, this study investigates the unique structural characteristics and the dynamic formation and evolution mechanisms of the Bongor Basin in the Central African Shear Zone. Geophysical interpretation indicates that the Bongor Basin exhibits characteristics of a typical inverted rift basin. The current structural configuration was controlled by two phases rifting during Early Cretaceous and the compression in Late Cretaceous-Paleogene, with the primary rift-related structures are still clearly

基金项目: 中国石油天然气股份有限公司科技项目“海外油气地质新理论资源评价新技术与超前选区”(No. 2023ZZ07); 科学研究与技术开发项目“中西非裂谷系走滑构造数值模拟及构造变形研究”(No.YGJ2024-02)。

作者简介: 肖坤叶(1969—), 男, 教授级高级工程师, 博士, 主要从事海外油气勘探、资源评价与油气地质综合研究。E-mail: xiaokunye@petrochina.com.cn, ORCID:

identifiable. Multi-stage analogue tectonic modeling further confirm that the formation of the Bongor Basin was controlled by two early phases of rifting and subsequent inversion, with the extension directions of the two rifting stages separated by 25°–45°. Combining these results and context of regional tectonic history, a geological model of the two-phase rifting in the Bongor basin was put forward. In the early Early Cretaceous, the opening of the South Atlantic Ocean triggered near north-south stretching between the South African and the Northeast African subplate. This led to the first phase of rifting in the Central African Rift System basins, including the Bongor Basin. During the late Early Cretaceous, both the shift of the main Atlantic expansion toward the equatorial region and the subduction of the Tethys Ocean toward the Eurasian continent caused a nearly northeast-southwest extensional stress between the northeast African block and the South African block. Unlike other basins parallel to the Central African Rift System, the northwest-trending Bongor Basin underwent a second phase of rifting. The study presents new insights into the formation and evolution of the Bongor Basin, which is of great significance for guiding future oil and gas exploration

Key Words: Rift Basin; Shear Zone; Physical analog modeling; Tectonic Evolution; Bongor Basin

0 引言

中非剪切带及周缘发育的新生代陆内裂谷盆地(Dou *et al.*, 2018; 窦立荣等, 2018; 王利等, 2022), 例如乍得境内的 Doba、Bongor、Doseo 盆地, 苏丹境内的 Muglad、Melut 等盆地, 是中西非油气勘探区的重要组成部分(图 1A)。现有的研究表明, 整个中非剪切带经历白垩纪以来的多期伸展-走滑-反转作用(Lenhardt *et al.*, 2024; Dou *et al.*, 2018, 2024), 以 Doseo、Salamat、Doba 为主的位于中非剪切带及北缘的盆地具有明显走滑特征, 以 Muglad、Melut 等位于中非剪切带南缘的盆地具有明显裂陷特征(Fairhead *et al.*, 2013)。不同于 Doseo、Salamat 盆地, 中非剪切带北缘的 Bongor 盆地并未表现出明显走滑作用仅裂陷作用显著(Genik, 1993; 余朝华等, 2018; 王利和张新顺, 2022)。Genik (1993)在中西非裂谷系盆地群分类过程中将 Bongor 盆地划分为伸展主导的裂陷盆地。随着油气勘探的持续推进, 地震资料解释揭示 Bongor 盆地整体表现出南断北超及北断南超的离散箕状断陷结构, 具有明显的裂陷作用(窦立荣等, 2011; 陈志刚等, 2016)。但是, Bongor 盆地地震剖面解析发现的以挤压背斜为代表的反转构造样式(王利等, 2022)、基于泥岩声波时差法与镜质体反射率法恢复的 600-1600m 剥蚀厚度(肖坤叶等, 2014)均指示盆地晚白垩世以来经历了反转作用。整体而言, 现有的研究证实了 Bongor 盆地经历

了裂陷和反转两种构造作用的影响, 然而关于 Bongor 盆地为何不同于仅 50 公里之隔的 Doseo、Salamat 盆地, 没有经历强烈走滑作用的原因以及盆地演化过程和动力学机制等问题仍存在诸多争议。针对这些问题, 本文通过地震资料解译与构造物理模拟实验的联合分析, 进一步明确 Bongor 盆地的构造特征及演化过程, 分析其在中非剪切背景下裂陷作用的发育机制, 回答 Bongor 盆地在中非剪切环境下特殊存在的原因。

1. 区域地质背景

Bongor 盆地位于非洲中部乍得共和国的西南部, 构造上处于中非剪切带中段北侧(图 1A)。Bongor 盆地呈西宽东窄的长条状, 东西长约 280km, 东部宽约 40km, 西部宽约 80km, 面积约 $1.8 \times 10^4 \text{ km}^2$ (图 1B)。盆地由前寒武系花岗岩基底及下白垩统以来的沉积盖层组成, 发育 P 组、M 组、K 组、R 组、B 组及新生界多套陆相碎屑岩(图 1C)。

作为非洲板块的一部分, Bongor 盆地构造演化受控于非洲板块构造活动。漫长的地质历史中, 非洲板块在多板块汇聚背景下经历了复杂构造演化(Fairhead *et al.*, 2013)。寒武纪以前(750Ma–550Ma), 太古代至中元古代的大陆块体碰撞与拼合形成了冈瓦纳超级大陆, 造就了由多个克拉通及相间活动造山带共同组成的非洲地壳框架(Alkmim *et al.*, 2001)。寒武纪至侏罗纪期间(550Ma–145Ma), 作为冈瓦纳

大陆的一部分，非洲板块在冈瓦纳大陆解体过程中逐步演化为一个相对独立的板块。其中，非洲地壳克拉通间的活动造山带（构造薄弱带）为中生代非洲裂谷系的演化提供了重要条件 (Min and Hou 2019)。早白垩世期间（145Ma-84Ma），伴随着大西洋的扩张，非洲板块内构造薄弱带活化，包括 Bongor 盆地在内的中非裂谷系在此期间发育 (Moulin *et al.*, 2010; Fairhead *et al.*, 2013; Franke, 2013; Chaboureaud *et al.*, 2013)。晚白垩世中期

(~84Ma)，非洲板块与欧洲板块沿 NNW-SSE 方向挤压碰撞（桑顿期挤压事件），非洲大陆内部的中非裂谷系盆地群经历了挤压反转作用。古新世至渐新世期间（36Ma-23Ma），非洲板块整体构造稳定，包括 Bongor 盆地在内的中非裂谷系盆地稳定沉降。渐新世末期（~21Ma），非洲板块与欧洲板块的二次挤压作用中断了中非裂谷系的发育，Bongor 盆地再次经历挤压剥蚀 (Fairhead *et al.*, 2013)。

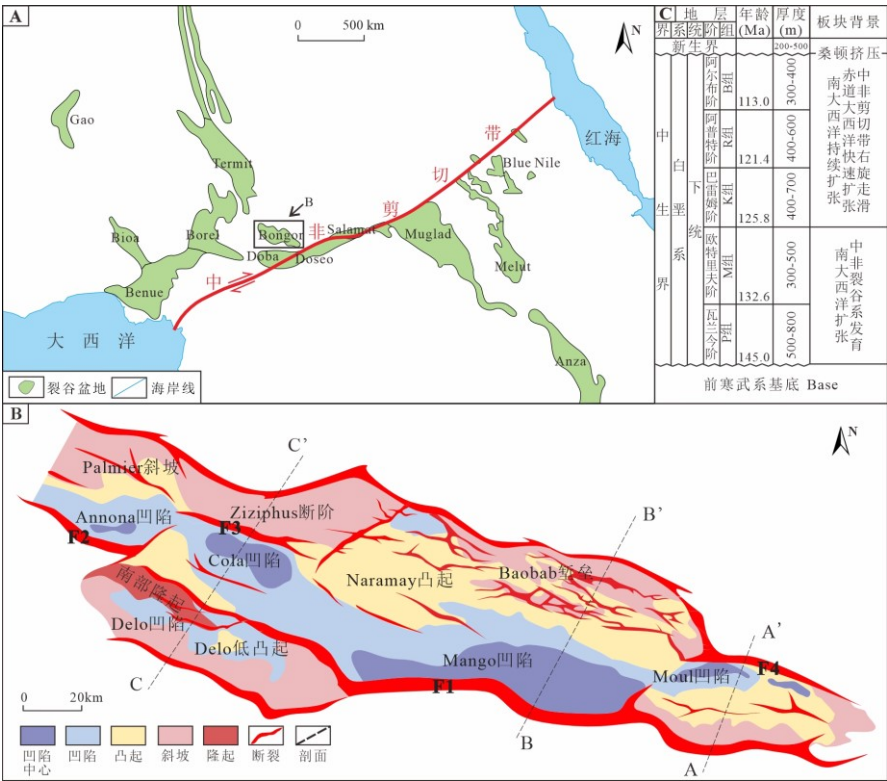


图 1 Bongor 盆地位置(A)、构造纲要(B)与地层柱状(C)图 (A. 据高华等, 2023 修改; B. 据 Dou *et al.*, 2021 修改; C. 据肖坤叶等, 2014; Dou *et al.*, 2021 修改)

Fig.1 Regional map showing the location of the Bongor Basin(A)、structure outline of the Bongor Basin(B) and stratigraphic column of the Bongor Basin(C)

2. 盆地构造特征及演化分析

对 Bongor 盆地 66 条二维地震测线的 6 个地层层位（基底、P 组、M 组、K 组、R 组、B 组）及相关断层开展了精细解析，结合钻井资料在地震剖面上识别出了白垩纪末、古近纪末两大不整合面，并编制了不同层位的顶面构

造图、构造解释剖面图、断裂体系图、典型构造样式图等用于盆地结构、构造特征分析。

2.1 构造平面特征

Bongor 盆地基底顶面构造图显示盆地整体呈南断北超箕状断陷结构，局部出现北断南超的构造转换带，位于盆地东南部的沉积中心 Mango 凹陷受主干断裂 F1 控制（图 2A）。盆地内二级断裂 F2、F3、F4 分别控制 Annona、

Cola、Moul 三个次级凹陷的发育（图 1B），横向上自东向西表现为北断南超-南断北超交替展布的结构特征。盆内断裂走向总体平行于盆地轴向，边界断裂走向 NWW，呈锯齿状；次级断裂以近 EW 向及 NWW 向断裂为主，多为波浪形，呈平行式、交叉式展布。各次级凹陷带之间由不同类型的构造转换带过渡，Moul 凹陷与 Mango 凹陷之间发育相向倾斜趋近型转换带、Mango 凹陷与 Cola 凹陷之间发育相

向倾斜叠覆型转换带、Annona 凹陷与 Cola 凹陷之间发育撕裂断层型转换带（图 2）。

Bongor 盆地上覆 K 组顶面构造图体现出较好的构造继承性，盆地的结构以及各次级凹陷间转换带的类型与基底顶面构造图一致（图 2B）。相较于基底断裂，该时期近 EW 向断裂减少，北西西向断裂更加发育且形态复杂，包括弧形、线形、波浪形、锯齿形，在平面上呈平行式、雁列式、交叉式以及羽状展布（图 2B）。

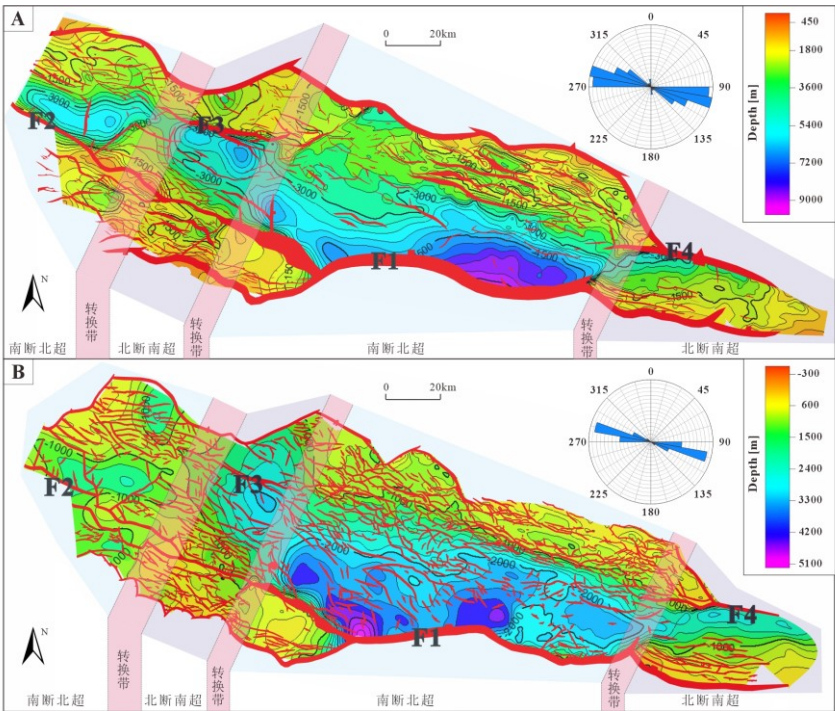


图 2 Bongor 盆地顶面构造图 ((A) 基底顶界面 (B) K 组顶界面)

Fig.2 Top Structural Diagram of Bongor Basin

2.2 构造剖面特征

Bongor 盆地东侧 A-A’剖面整体表现为北断南超的半地堑结构，北部控凹正断层产状较陡，倾角 50°~75°；南部断裂呈铲状，倾角较缓，约 30°~60°，发育北倾的分支断裂。剖面自北向南可以划分出陡坡带、凹陷带及斜坡带。其中，斜坡带上发育多级“Y”字型等张性构造样式。此外，B 组与上覆地层呈角度不整合接触，斜坡带地层在挤压作用下褶皱弯曲，B 组地层被剥蚀殆尽，剖面中部的“Y”字型断

裂扭曲，断层倾角呈上缓下陡，控坳断裂 F4 处发育反转构造（图 3A）。

剖面 B-B’位于 Bongor 盆地中部，剖面显示该部位深度达 4600 m，呈南断北超箕状断陷结构，自北向南可依次划分出陡坡带、深凹带、低凸带、斜坡带，发育上下两套张性断裂。主干断裂 F1 呈铲状，倾角 68°~85°。斜坡带上发育堑垒构造多级“Y”字型等伸展构造。剖面上反转构造发育，地层挠曲变形严重，断裂附近多发育前峰后谷或前谷后峰构造，多级“Y”字型断裂呈下陡上缓状，反转背斜叠置在基底堑

垒构造上。坳陷地层（E）与下伏地层呈角度不整合接触（图 3B）。

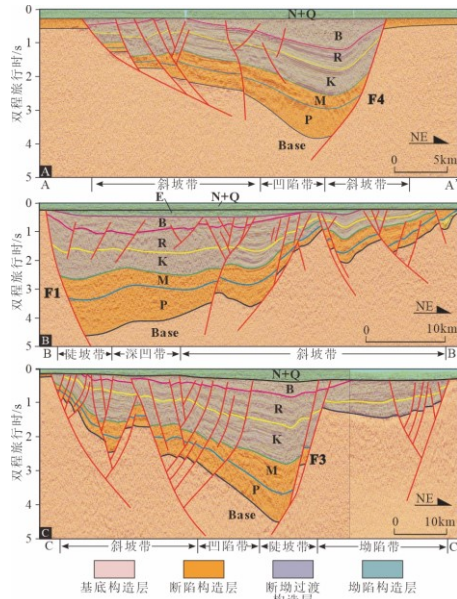


图 3 Bongor 盆地典型地震剖面及构造层划分（剖面位置见图 1）

Fig.2 Typical seismic profile and tectonic layer division in Bongor Basin

Bongor 盆地西侧的 C-C'剖面显示该部位深度达 4300 m，呈北断南超半地堑结构，北部边界断裂 F3 呈铲状，倾角 $60^{\circ}\sim 75^{\circ}$ ，其上发育一条倾向相同的分支断裂；南部边界断裂同样呈铲状，倾角 $52^{\circ}\sim 70^{\circ}$ ，其上发育主干断裂倾向相向的分支断裂。斜坡带构造发育受基底形态影响，以基底地垒为界发育两个大型的多级“Y”字型构造，断裂继承性较好。下白垩统挠曲变形严重，多级“Y”字型构造中部在挤压作用下形成小型凸起，北部边界断裂处发育前谷后峰构造，坳陷地层与下伏地层呈角度不整合接触。该断陷北部发育一个小型凹陷，凹陷北部边界断裂发育多级次分支断裂，地层在挤压作用下呈透镜状（图 3C）。

2.3 构造演化分析

2.3.1 主干断裂活动性

Bongor 盆地具有主干断裂活动性逐渐降低的特征，P 组、M 组沉积时期主干断裂的活动性明显强于 K 组、R 组、B 组沉积时期。各主干断裂活动性均呈中部大、两侧小的特征。主干断裂 F1 各时期断裂活动性均强于 F2、F3、

F4，平均活动速率为 14.08 m/Ma；F2、F3 各时期平均活动速率次之，分别为 12.30 m/Ma 与 13.47 m/Ma；F4 各时期平均活动速率最低，为 10.21 m/Ma（图 4A）。P 组和 M 组沉积时期主干断裂活动速率分别为 20.17m/Ma、16.53 m/Ma；而 K 组、R 组、B 组沉积时期主干断裂平均活动速率分别下降至 12.64 m/Ma、8.35 m/Ma、4.89 m/Ma（图 4A）。总体看来，主干断裂 F1 各时期活动性最强，控制全盆发育，F2、F3、F4 活动性次之，控制次级凹陷发育（图 4B）。P 组、M 组沉积时期，盆内构造活动强烈，K 组、R 组、B 组沉积时期盆内构造活动强度明显减弱。

2.3.2 平衡剖面及伸展量

使用 2DMove 软件制作了三条 Bongor 盆地典型地震剖面的平衡剖面。其中，白垩纪末及古近纪模剥蚀厚度来源于已发表资料(许长春, 2012; 余朝华等, 2018)。基于平衡剖面恢复结果，通过 ΔL 、R、r、v 四个参数对 Bongor 盆地伸展量进行了定量研究，其中 ΔL 为各时期伸展量；R 为各期伸展量占总伸展量的比重；r 为伸展率，即伸展量与原始剖面长度之比；v 为伸展量与伸展持续时间之比。此外，上述伸展量相关数据同时为 Bongor 盆地构造物理模拟提供实验参数。

Bongor 盆地东部平衡剖面显示 Moul 断陷在 P 组、M 组沉积时期正断层开始发育，主干断裂 F4 活动性相对较强，呈现北断南超箕状断陷的结构特征（图 5），伸展量为 1200m 左右，伸展速率为 0.1mm/a，伸展量达到总伸展量的 80%（表 1）。K 组、R 组、B 组沉积时期持续断陷，该阶段断裂活动性减弱，斜坡带上断裂增多，发育 Y 型、多级 Y 型伸展构造样式，该时期 Moul 断陷伸展量为 297.83m，伸展速率在 0.036-0.007mm/a 之间（表 1）。晚白垩世末期 Bongor 盆地经历挤压反转，地层挠曲明显，斜坡带多级次 Y 型断裂发育处在挤压作用下隆起，部分断裂在挤压作用下呈上缓下陡形态，B 组地层遭受严重剥蚀，不整合面上为坳陷构造层，无断裂发育。

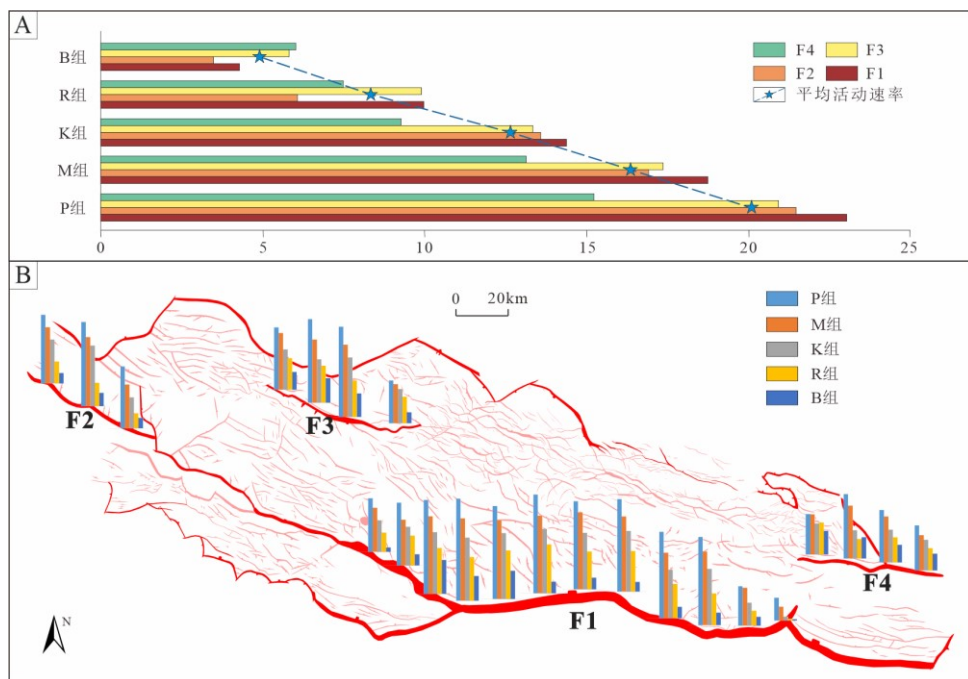


图 4 Bongor 盆地主干断裂活动速率图 ((A) Bongor 盆地各时期主干断裂活动性柱状图; (B) Bongor 盆地主干断裂活动性分布图)

Fig.4 Bongor Basin main fracture activity rate

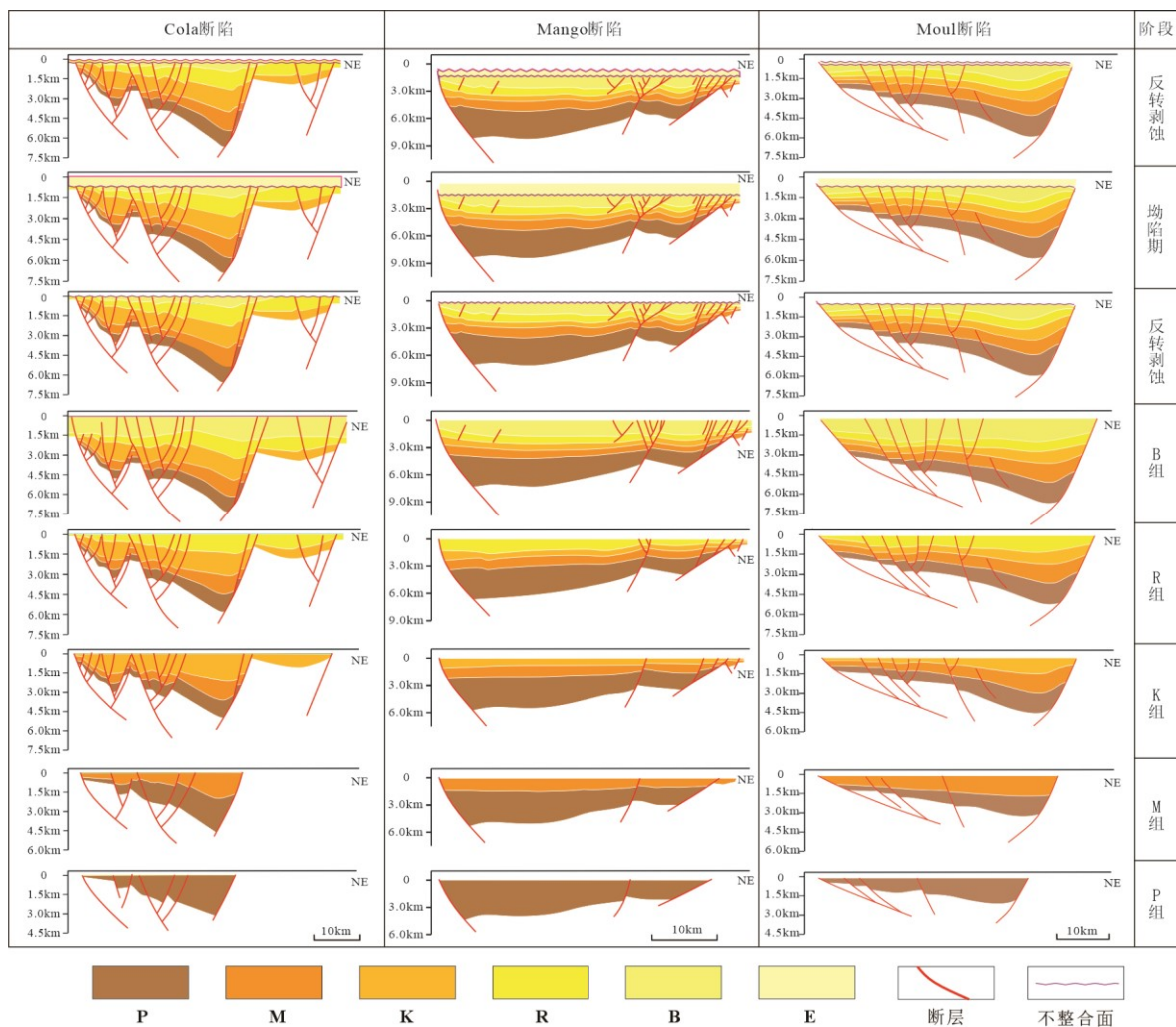


图 5 Bongor 盆地各断陷构造演化过程

Fig.5 Each depression tectonic evolution in the Bongor Basin

Bongor 盆地中部平衡剖面显示, P 组、M 组沉积时期 Mango 断陷在控盆一级断裂 F1 的控制下发育南断北超箕状断陷的结构, 为盆地主要沉积中心(图 5)。Mango 断陷伸展量达到 3000m, 伸展速率达到 0.18mm/a, 该阶段的伸展量占总伸展量的 65%以上(表 1)。K 组、R 组、B 组沉积时期, 早期正断层多数继承性发育, 顶部新生地层中发育系列张性断裂, 斜坡带上 Y 字型断裂组合逐渐发育为多级次的 Y 字型断裂组合。该时期 Mango 断陷伸展量达到 1500m, 伸展速率在 0.14-0.04mm/a 之间(表 1)。白垩纪末期 Mango 断陷遭受抬升剥蚀, 地层发生挠曲变形, 斜坡带地层变形严重。白垩纪末不整合面上发育拗陷地层, 在古近纪末遭受二次挤压剥蚀, 地层挠曲变形更加明显, F1 断裂

处发育前峰后谷反转构造, 斜坡带上一些断裂在挤压作用下表现出下陡上缓的特征。

Bongor 盆地西部平衡剖面显示(图 5), 早白垩世早期 P 组、M 组沉积时期, Cola 断陷在主干断裂 F3 的控制下呈北断南超箕状断陷结构, 斜坡带上发育多级 Y 字型构造, 伸展量达到 3000m, 伸展速率达到 0.18mm/a(表 1)。K 组、R 组、B 组沉积时期斜坡带上的 Y 字型构造继承性发育, 发育新生分支断裂, 主干断裂 F3 对地层的控制作用减弱, 地层等厚沉积。主干断裂 F3 北部发育小型拗陷, 边界处由 Y 字型断裂控制, 该时期 Cola 断陷伸展量达到 1500m, 伸展速率在 0.14-0.04mm/a 之间(表 1)。白垩纪末期 B 组顶面遭受剥蚀, 断裂发育处地层挠曲变形严重, 主干 F3 断裂处发育前谷后

峰构造，发育反转斜坡。B 组上覆地层在古近纪末期再次遭受剥蚀，反转程度进一步加深。

整体而言，Bongor 盆地 P 组、M 组沉积时期构造活动强烈、伸展量大、伸展速率快，形成倾向不同的箕状断陷；K 组、R 组、B 组沉积时期构造活动整体变弱，伸展量小、伸展速率慢，发育一系列伸展构造样式，主干断裂

对沉积的控制作用减弱，地层呈等厚沉积。此后，Bongor 盆地遭受了挤压反转作用，导致盆地上白垩统缺失，B 组地层遭受剥蚀，地层挠曲变形严重。该期挤压结束后 Bongor 盆地进入热沉降时期，不整合面上沉积了一套坳陷地层。

表 1 各断陷剖面参数统计表

Table.1 Statistical table of parameters for each depression.

剖面名称	阶段	经历时间 (Ma)	伸展量参数			
			ΔL (m)	R (%)	r (%)	v/ (mm·a-1)
TD-02-824 (Moul)	Prosopis	7.2	516.21	34.45	1.8	0.07
	Mimosa	6.83	684.28	45.67	2.4	0.10
	Kubla	4.37	156.75	10.46	0.29	0.04
	Ronier	8.4	49.64	3.31	0.1	0.01
	Baobab	12.5	91.44	6.10	0.31	0.01
TD-02-804 (Mango)	Prosopis	7.2	1719.871	36.66	3.7	0.24
	Mimosa	6.83	1406.35	29.98	2.71	0.21
	Kubla	4.37	625.92	13.34	1.17	0.14
	Ronier	8.4	429.44	9.15	0.8	0.05
	Baobab	12.5	509.44	10.86	0.94	0.04
TD-02-732 (Cola)	Prosopis	7.2	1292.79	26.38	2.7	0.18
	Mimosa	6.83	1919.59	39.17	3.9	0.28
	Kubla	4.37	187.58	3.83	0.37	0.04
	Ronier	8.4	562.74	11.48	1.1	0.07
	Baobab	12.5	937.91	19.14	1.81	0.08

3. 构造物理模拟实验及分析

3.1 实验材料及模型设计

依据 Bongor 盆地的控盆控坳断裂形态设计模型几何边界条件（图 6A）。遵循相似性准则，Bongor 盆地整个模型长 400mm，宽 159mm，厚 2mm（图 6A），故模型几何相似比为 1.46×10^{-6} ，即模型 1cm 对应自然界约 6.8km。实验材料选择上部石英砂和下部硅胶组成的脆韧性结构（图 6B），石英砂密度为 1500kg/m^3 、内摩擦系数为 0.65，硅胶密度 940kg/m^3 、粘度 $2 \times 10^4 \text{Pa} \cdot \text{s}$ （Brun, 1999）。

实验采用同沉积方法分四阶段进行，依据盆地地层厚度及岩性铺设三套 5mm 厚石英砂（最末阶段无新增地层），自下而上依次为基底层、裂隙层以及断坳转换层（图 6B）。依据盆地不同层位断裂走向统计及剖面演化伸展量确定模型各阶段动力方向以及位移量（详细参数见表 2）。阶段I在刚性底板上铺设 0.5 cm 硅胶和 0.5 cm 石英砂，NNE 向伸展 24.84 mm；阶段II在阶段I基础上铺设 0.5cm 石英砂，NNE 向伸展 24.84 mm；阶段III在阶段II基础上铺设 0.5cm 石英砂，NE 向伸展 14.9 mm；阶段IV对应盆地反转期，NS 向挤压 14.9mm。

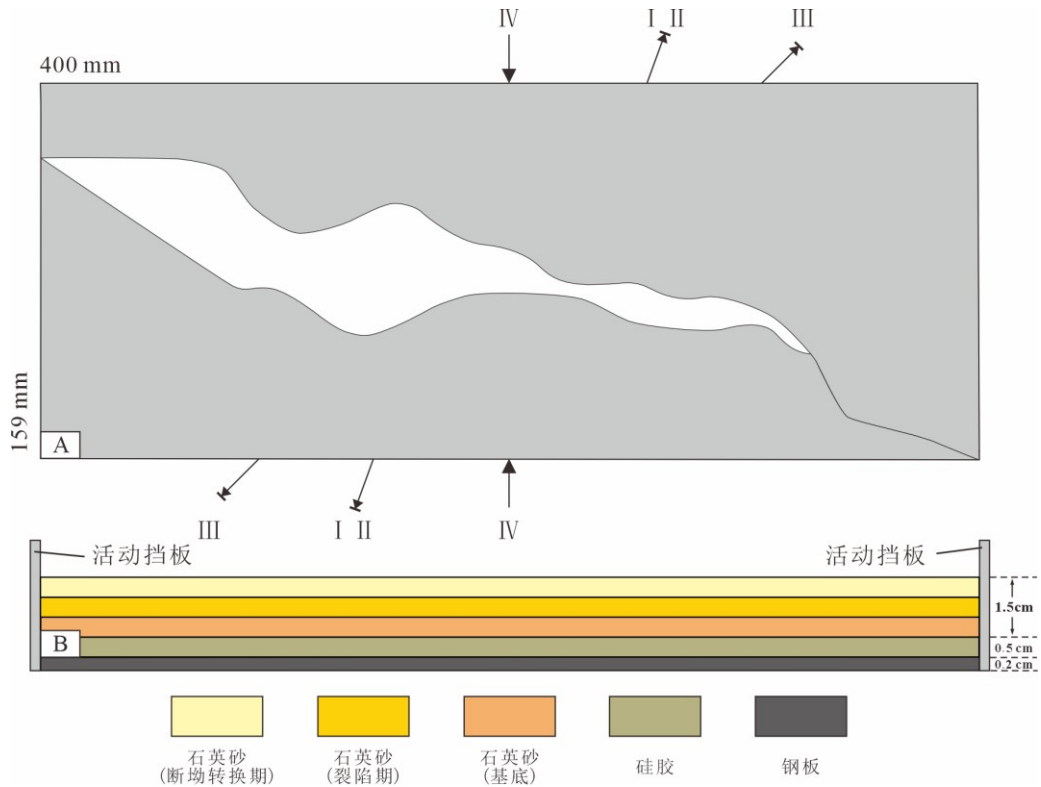


图 6 模型平面(A)与剖面(B)图

Fig.6 Top view and cross section of the model set up

表 2 实验各阶段参数设置

Table.2 Parameter settings for each stage of the experiment

阶段	硅胶厚度 (mm)	石英砂厚度 (mm)	实验时间 (s)	实验速度 (mm/s)	位移方向	位移量 (mm)
I	5	5	420	0.0276	N-S	11.59
II	5	10	900	0.0276	N-S	24.84
III	5	15	540	0.0276	NE-SW	14.9
IV	5	15	540	0.0276	N-S	14.9

3.2 实验模型相似性参数

构造物理模拟实验中，当模型与自然地质体达到几何学、运动学和动力学相似时，就可以近似代表自然过程 (Hubbert, 1951)。几 Bongor 盆地的水平方向长度约为 274 km，宽度 40~80 km，模型的长度设计为 400 mm，宽度为 159 mm，模型与实际地质体的几何学相似比 L^* 为 1.46×10^{-6} 。动力学相似性要求模型

材料与实际地质体的流变学性质具有缩放关系。本实验在常规重力场下实验完成， $g^*=1$ ，模拟材料与自然脆性层内聚力相似比为 2×10^{-6} ，韧性层应力相似比 σ^* 为 1.08×10^{-7} 。运动学相似性要求模型在变形过程中与实际地质体保持几何学相似，时间相似比 t^* 也可由 σ^* 所得，计算得到时间相似比为 9.26×10^{-7} 。实验具体模型参数及相似比见表 3。

表 3 实验材料物理参数及模型相似系数

Table.3 Analogue material properties and scaling ratios of the model

模型参数	模型	Bongor 盆地	相似比
脆性层密度 P_b , kg/m^3	1500	2600	$\rho_b^*=0.57$
内摩擦系数 μ	0.65	0.6~0.85	$\mu^*=0.76-1.08$

内聚力 c (Pa)	80	4×10^7	$c^* = 2 \times 10^{-6}$
脆性层厚度 Z , km	1.5×10^{-5}	20	$z^* = 7.5 \times 10^{-7}$
硅胶密度 ρ_d , kg/m ³	940	2200	$\rho_d^* = 0.43$
韧性层粘度 η (Pa·s)	10^3	10^{22}	$\eta^* = 10^{-19}$
韧性层厚度 Z_d , km	0.5×10^{-5}	10	$z_d^* = 2.5 \times 10^{-7}$
长度 l , m	0.4	2.74×10^5	$L^* = 1.46 \times 10^{-6}$
重力, g (m/s ³)	9.81	9.81	$g^* = 1$
时间 t , s		$t^* = 9.26 \times 10^{-7}$	
正应力 σ , kg/m ²		$\sigma^* = 1.08 \times 10^{-7}$	
应变速率 ε		$\varepsilon^* = 1.08 \times 10^{12}$	

3.3 模拟实验结果

阶段 I：伸展量 4.97mm 时，模型表面发育北西西向断裂；伸展量 8.28mm 时，部分初始断裂开始连接，盆地轮廓基本出现，盆内发育近 EW 向及 NWW 向次级断裂，次级断裂间发育趋近型转换带（转换斜坡）；伸展量 11.59mm 时，形成西宽东窄长条型盆地，盆内断裂进一步发育，断裂间由趋近型转换带发育为叠置型转换带（图 7）。

阶段 II：伸展量 14.9mm 时，模型表面出现近 EW 向及 NWW 向断裂；伸展量 19.87mm 时，盆地雏形出现，呈长条状，Moul 及 Mango 内发育近 EW 向及 NWW 向次级断裂，Mango 内断裂较多，呈平行式展布，断裂间发育同向倾斜趋近型转换带，Cola 内发育 NEE 向弧状断裂，断裂间发生错断，Annona 内发育近 EW 向平行式次级断裂；伸展量 24.84mm 时，盆地格局基本形成，呈现出明显的分段特征，盆内断裂进一步加深，部分同向倾斜趋近型转换带发育为同向倾斜叠置型转换带（图 8）。

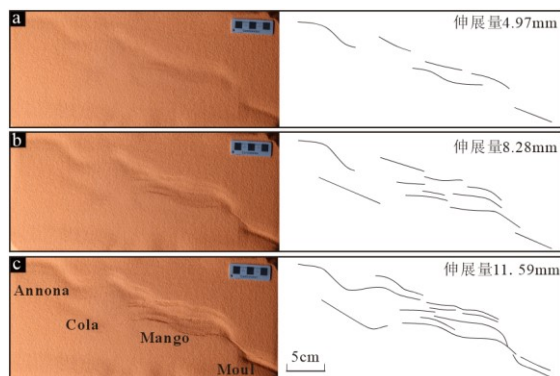


图 7 前裂陷期实验平面结果((a)伸展量 4.97mm(b)伸展量 8.28mm (c)伸展量 11.59mm)

Fig.7 Top view results of the pre-rift period

阶段 III：模型 C 裂陷期加铺石英砂后 NE-SW 向伸展，伸展量 29.80mm 时，盆地范围内开始分段发育近 EW 向及 NWW 向断裂；伸展量 34.77mm 时，盆地基本形态出现，断裂继承性发育连接，新生 NE 向断裂；伸展量 39.74mm 时，伸展阶段结束，盆地呈西宽东窄长条状形态，盆地边界呈不规则锯齿状。Moul 内发育 NWW 向断裂，Mango 内发育近 EW 向和 NWW 向断裂，局部发育具有转换性质的 NE 向断裂，Cola 与 Annona 内主要发育近 EW 向断裂，Mango 与 Cola 通过 NE 向转换断裂连接，Cola 与 Annona 通过同向倾斜趋近型转换断裂连接（图 9）。

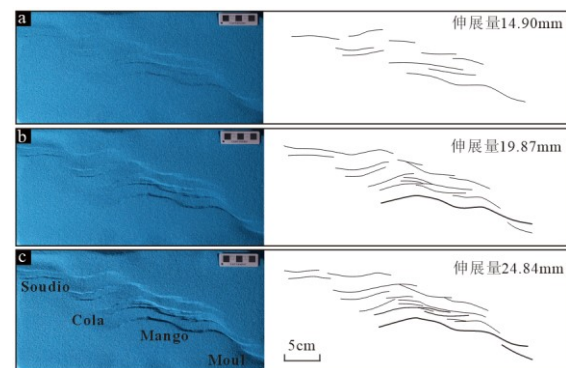


图 8 裂陷期实验平面结果((a)伸展量 14.90mm (b)伸展量 19.87mm (c)伸展量 24.84mm)

Fig.8 Top view results of the rift period

阶段 IV：盆内无新生断裂，盆地形态变窄，断裂展布更加紧凑（图 10）。

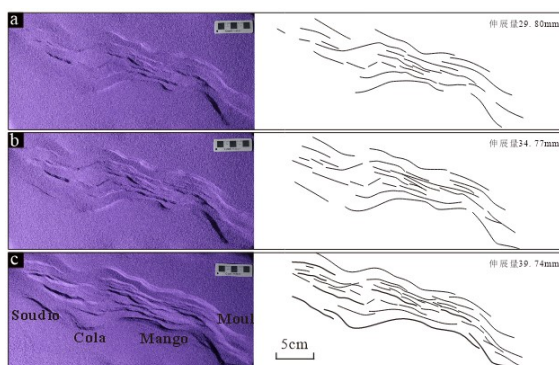


图 9 断拗转换期实验平面结果 (a) 伸展量 29.80mm
(b) 伸展量 34.77mm (c) 伸展量 39.74mm)

Fig.9 Top view results of the transition period

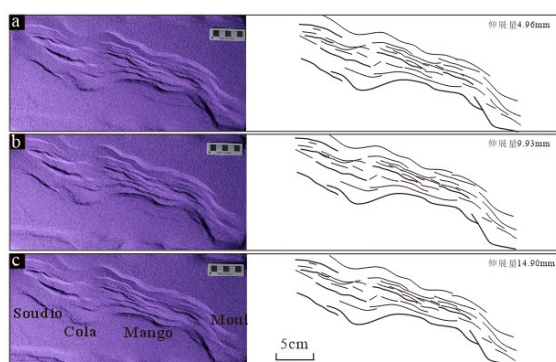


图 10 反转期实验平面结果 (a) 反转量 4.96mm (b)
反转量 9.33mm (c) 反转量 14.90mm)

Fig.10 Top view results of the inversion period

切片结果：剖面 a-a'位于盆地东侧 Moul 断陷，剖面显示 Moul 呈北断南超半地堑结构，北部边界断裂为铲式正断层，南侧发育次级分支断裂，断裂附近地层在反转作用下隆起，斜坡带地层挠曲变形明显；剖面 b-b'位于 Mango 右侧，边界断裂为铲式正断层，剖面上 Y 字形构造、反向断阶构造发育，断裂附近地层发育前谷后峰反转构造，剖面中部地层挠曲变形严重；剖面 c-c'位于 Bongor 盆地模型中部，边界断裂为铲式正断层，剖面上正断层发育，发育多级 Y 字形构造、堑垒构造、反 Y 字形构造，断裂附近地层挠曲变形严重，发育透镜状地层，南部边界处发育前峰后谷构造；剖面 d-d'位于 Cola 断陷，发育多级 Y 字形构造、堑垒构造及同向断阶构造等伸展构造样式，剖面中部发育反转隆起（图 11）。

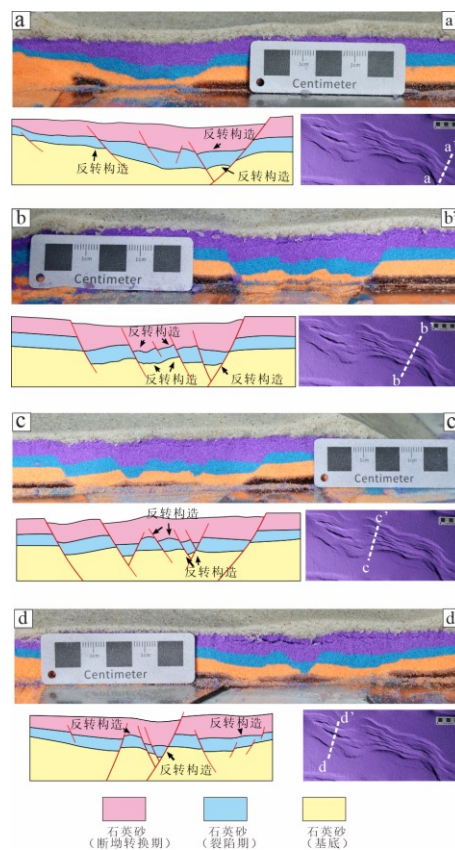


图 11 物理模拟实验切片结果

Fig.11 The cross section results of analog modeling
experiment

4. 讨论

4.1 裂隙-反转联合作用形成 Bongor 盆地构造格局

构造样式是同一期构造变形或同一应力作用下所形成的具有规律性、系统性和可预测性的地质构造组合 (Harding and Lowell, 1979)。构造样式反映了区域或局部的构造变形特征，是构造解析和地质演化研究的重要依据。Bongor 盆地地震资料解释显示伸展构造样式普遍发育（图 12）。Bongor 盆地基底顶面及 K 组构造图上主要见平行式、交叉式及网状式断裂组合（图 2）。平行式断裂组合根据断裂倾向可分为同向式、相向式、背向式组合，在剖面上分别对应同向断阶、反向断阶、堑垒等伸展构造样式（图 12）。Bongor 盆地各次级凹陷带断裂发育程度低（图 4），主要表现为单断式伸展构造。如 Mango 凹陷带以小规模、小尺度的平行式断裂组合为主，断裂延伸长度 2-8km，

剖面上表现为单一的张性断裂,断距仅 50-120 m (图 2)。各次级凹陷斜坡带上伸展构造样式丰富,如 Moul 凹陷斜坡带上以平行式断裂组合为主,剖面上对应多级“Y”字型断裂以及羽状断裂;Mango 凹陷斜坡带上以交叉式、网状式平面断裂组合为主,Cola 及 Annona 凹陷以平行式、交叉式断裂组合为主,剖面上均对应多级“Y”字型断裂(图 3)。构造转换带是传递或转换区域应力、应变的构造带(王文龙等, 2017),裂陷盆地中张性断裂的分段生长机制是导致构造转换带发育的主要机制(Segall and Pollard, 1980; Dahlstrom, 1970; Gupta Set al., 1998), Segall 和 Pollard (1980) 提出断裂的生长包括断裂孤立发育阶段、“软连接”阶段和“硬连接”阶段,当两条断裂间处于“软连接”阶段时,其“软连接”的部位即是转换带。Bongor 盆地 Moul-Mango-Cola 凹陷之间发育趋近型和叠置型转换带,当断裂发育到“硬连接”阶段时,连接两条断裂的断裂即是转换断裂(王海学等, 2013), Bongor 盆地中系列北东南西向断裂即为转换断裂(图 2)。

与地震解译结果类似,构造物理模拟实验结果同样表现出伸展构造样式、构造转换带普遍发育的特征(图 9)。模拟实验结果显示的 Moul 凹陷平面上平行式断裂和剖面上张性断裂, Mango 凹陷平面上平行式、交叉式断裂组合和剖面上“Y”字型断裂、多级“Y”字型断裂、反向断阶构造组合以及 Cola 及 Annona 凹陷平面上平行式、交叉式断裂组合和剖面上堑垒构造以及“Y”字型断裂均为典型伸展构造样式。此外,模拟实验结果显示的盆地西宽

东窄、东西分段特征,平面上 Annona-Cola-Mango 间发育北东向转换断裂, Mango-Moul 间发育转换斜坡以及剖面上自西向东表现出的南断北超-北断南超结构转换的特征均为典型的转换带构造。

反转构造是由于区域应力环境的改变导致前期构造类型向反方向转化的现象(刘和甫, 1993)。Bongor 盆地白垩纪末角度不整合(下白垩统 B 组与古近系)以及下白垩统中诸如前峰后谷、反转背斜等大量的褶皱型反转构造指示 Bongor 盆地晚白垩世之后遭受了挤压反转(图 3)。构造物理模拟切片显示断层附近出现“地层”明显挠曲变形的反转现象(图 11)。

Turner 和 Williams (2004) 提出伸展断裂在反转应力下能否重新激活是一个选择性过程,断裂的激活难易在不同区域有所差异,但主要影响因素包括:(1) 反转前断裂的倾角大小:当断层的倾角超过闭锁角度($50^{\circ} \sim 59^{\circ}$)时,可能导致断层“摩擦闭锁”(即无法再滑动)。

(2) 断裂走向与挤压应力夹角大小:当挤压应力方向与断层走向之间的夹角小于 35° 时,断裂更容易被重新激活;(3) 断面上的摩擦力大小(Collettini and Sibson, 2001; Sibson, 1985; Sibson and Xie, 1998; Turner and Williams, 2004)。Bongor 盆内断裂倾角普遍大于摩擦闭锁角度(60°),且桑顿期 NNW-SSE 向的挤压应力场与 Bongor 盆地断裂走向呈大角度相交(Fairhead *et al.*, 2013),远远大于最佳反转角度(35°),故盆内断裂难以激活反转,反转量由地层吸收,使地层发生挠曲变形,在断裂阻挡部位发育反转构造。

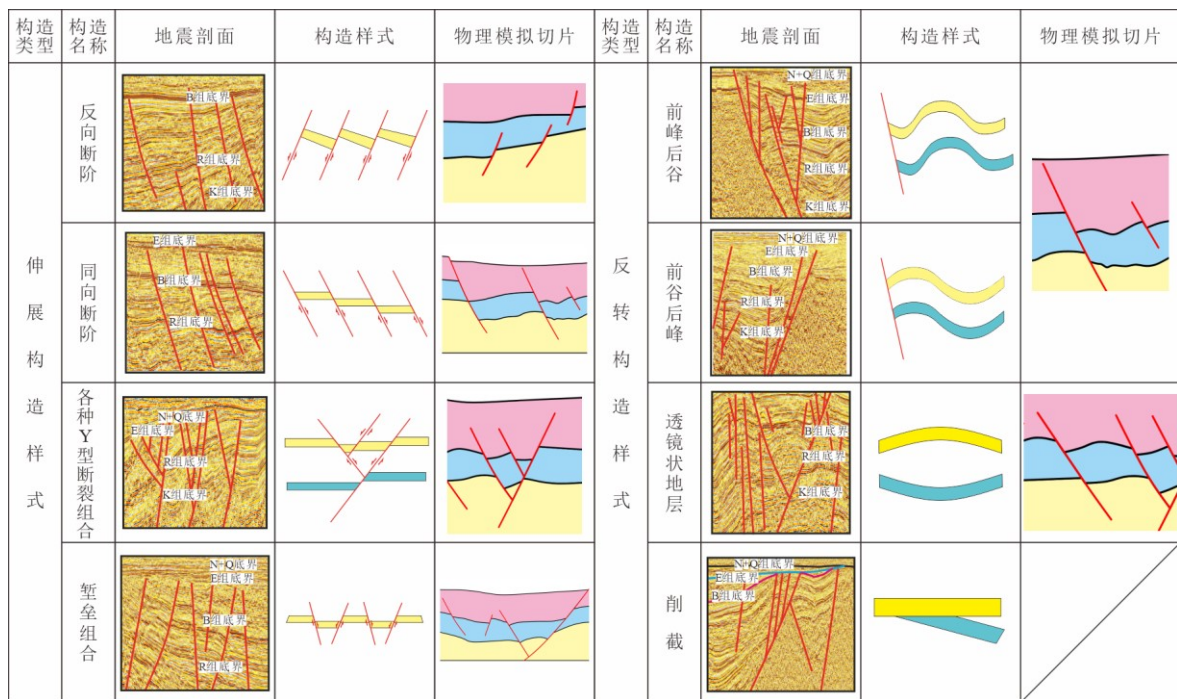


图 12 Bongor 盆地典型构造样式分类图

Fig.12 Classification of typical structural patterns in the Bongor Basin

4.2 Bongor 盆地多幕裂陷的动力学机制

4.2.1 Bongor 盆地两期裂陷活动

地震剖面显示下白垩统中发育两套张性断裂组合，P 组-M 组地层中局部发育离散的张性断裂；K 组-R 组-B 组中新生离散的张性断裂，并在 P 组-M 组地层中的张性断裂附近发育次级断裂，形成多种“Y”字型断裂组合(图 2)。系统的断层活动性分析(图 4)发现，早白垩世早期(P 组、M 组)构造活动性明显大于早白垩世晚期(K 组、R 组、B 组)。此外，Bongor 盆地平面构造图上同样显示基底顶面与 K 组顶面表现出不同的特征，基底顶面以近 EW、NWW 向断裂为主，断裂形态多为波浪形，呈平行式、交叉式展布，沉积中心位于 Mango 凹陷东部；而 K 组顶面近 EW 向断裂减少，NWW 向断裂更加发育且形态复杂，包括弧形、线形、波浪形、锯齿形，在平面上呈平行式、雁列式、交叉式以及羽状展布，沉积中心向西部偏移(图 3)。盆内断裂走向自近 EW 向转为 NWW 向，沉积中心也向东迁移，二者共同指示伸展应力由近 N-S 向顺时针偏转至 NE-SW 向，推测夹角在 $25^{\circ} \sim 45^{\circ}$ 。整体而言，Bongor 盆地 P 组-M 组沉积期与 K 组-B 组沉积期在剖面构造样式、断层活动速率和平面构造

展布方面的差异，指示白垩纪以来盆地经历两期裂陷过程。基于断层平面展布开展的构造物理模拟实验结果重现了这一过程，第一期裂陷在近 N-S 向斜交伸展应力下形成近 EW-NWW 向断裂，第二期裂陷在 NE-SW 向正交伸展应力下发育 NWW 向断裂，模拟结果与现今盆地构造格局基本一致，也印证了两期裂陷的演化模式。

4.2.2 南大西洋扩张对盆地形成的影响

南大西洋自北向南可划分为赤道段、中段、南段和福克兰段(图 13)。位于南段西侧的巴拉那大火成岩省 133-130Ma 峰值年龄(Lustrino *et al.*, 2005)、南大西洋南段古地磁数据显示的~132Ma M7 磁异常(Moulin *et al.*, 2010)以及非洲与南美洲古地磁极移曲线在~130Ma 显著分离(Fairhead 2020)等特征均指示南大西洋早白垩世早期开始扩张(Lustrino *et al.*, 2005; Frindt *et al.*, 2004; Marzoli *et al.*, 1999)。此外，磁异常条带所呈现的南大西洋洋壳年龄由南向北逐渐年轻化趋势(南段:~132Ma M9-M7 磁异常；中段:~125Ma M0 磁异常)以及南大西洋中段桑托斯地块在 130-112Ma 由南向北发生渐进式伸展特征(Moulin *et al.*, 2010)指示南大西洋初始扩张发

生于南部的福克兰段并呈现向北传播的趋势 (Chaboureaud *et al.*, 2013; Fairhead *et al.*, 2013; Min and Hou, 2019; Moulin *et al.*, 2010), 扩张速率由初期南段 5-10mm/yr 逐渐加快至中段

15-25mm/yr (Bonifacio *et al.*, 2023)。早白垩世早期, 南大西洋自南部福克兰段扩张至中部中段, Bongor 盆地 P 组-M 组裂陷沉积期与该时期大西洋扩张具有良好一致性。

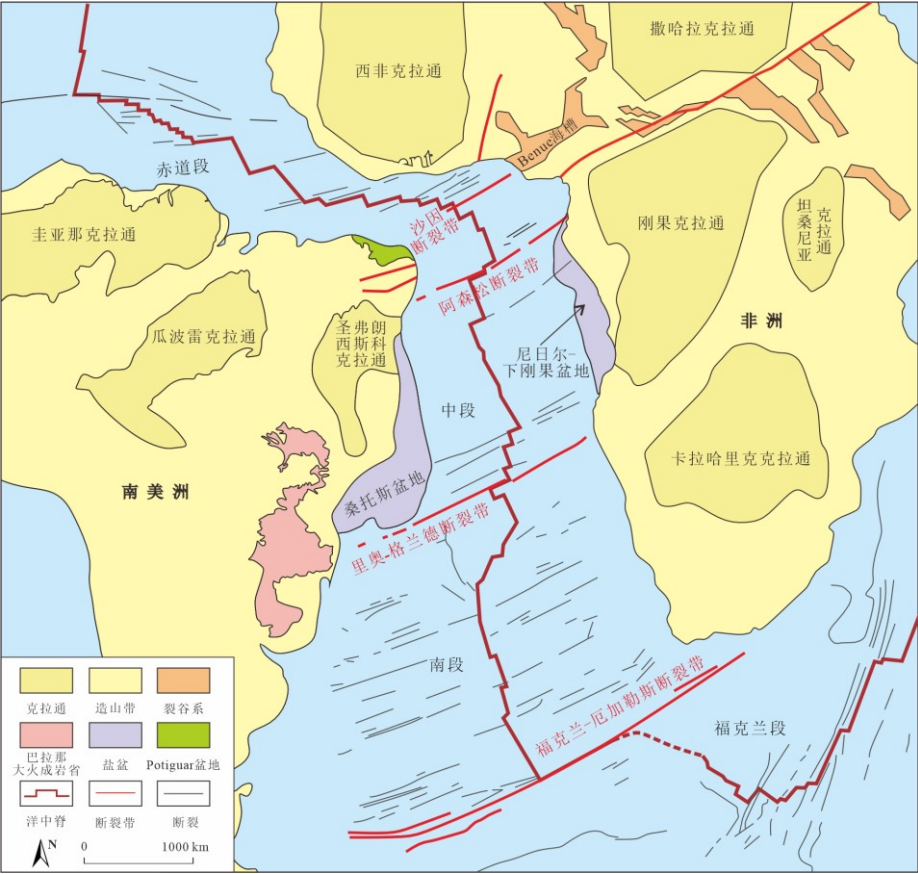


图 13 南大西洋构造纲要图 (据 Moulin *et al.*, 2010; Min and Hou, 2019 修改)

Fig.13 Structural outline map of the South Atlantic

早白垩世晚期, 南大西洋赤道段位于巴西东北侧的 Potiguar 盆地地层沉积特征表现出的沉积岩从封闭环境蒸发岩 (~112Ma) 向开放环境海相碎屑岩 (~105-100Ma) 转变特征(Eagles, 2007; Davison, 2007; Gladchenko *et al.*, 1997)指示同期南大西洋北部赤道段存在内陆海到开阔大洋的转化的趋势; 南美洲 Potiguar 盆地与非洲 Benue 海槽阿普第期盐层中均发现的北大西洋特提斯动物群(Azevedo, 2004)指示 ~112Ma 时南大西洋中段(中段)的扩张作用导致南北大西洋连通(Marzoli *et al.*, 1999; Darros De Matos, 2000; Moulin *et al.*, 2010; Matos *et al.*, 2021), 该阶段扩张速率低于 10mm/yr (Bonifacio *et al.*, 2023)。Bongor 盆地 K

组-B 组裂陷沉积期与南大西洋早白垩世晚期北向扩张至赤道段响应。

4.2.3 新特提斯洋闭合对盆地形成的影响

与南大西洋赤道段扩张同步, 非洲-阿拉伯陆块早白垩世晚期逐渐向东北方向漂移 (Moulin *et al.*, 2010; Scotese *et al.*, 2025; Fairhead, 2023; Gürer *et al.*, 2022; 朱日祥等, 2021; Fairhead *et al.*, 2013)。特提斯域班公湖-怒江缝合带中段东巧地区深成侵入蛇绿岩锆石 U-Pb 年龄(116-112Ma)(Hu *et al.*, 2022)和下地壳部分熔融的 A 型花岗岩锆石 U-Pb 结果 (115-110Ma) (Qu *et al.*, 2012)指示早白垩世晚期新特提斯洋持续往北向欧亚大陆俯冲(Hao *et al.*, 2025; Gürer *et al.*, 2022)。随着俯冲的持

续进行，特提斯洋中脊会俯冲至欧亚大陆之下，洋脊俯冲意味着俯冲带作用力可以沿大洋岩石圈传递到远端大陆，从而导致冈瓦纳大陆北缘遭受持续的拉张作用(李忠海等，2023; Yang *et al.*, 2021)。板块重建结果显示早白垩世早期 (~140Ma) 东冈瓦纳大陆紧邻特提斯俯冲带南侧边缘(Simmons *et al.*, 2015)，伴随着新特提斯

洋俯冲，冈瓦纳大陆遭受持续的拖拽作用 (Scotese, 2014; Sun *et al.*, 2018; Stampfli and Borel, 2002)，位于冈瓦纳大陆南部的非洲板块处于伸展环境中 (王二七等 2018; Güner *et al.*, 2022; Wan *et al.*, 2019)。即早白垩世晚期非洲板除受南大西洋扩张导致的拉张作用外，特提斯洋俯冲同样导致其遭受 NE-SW 向拖拽作用。

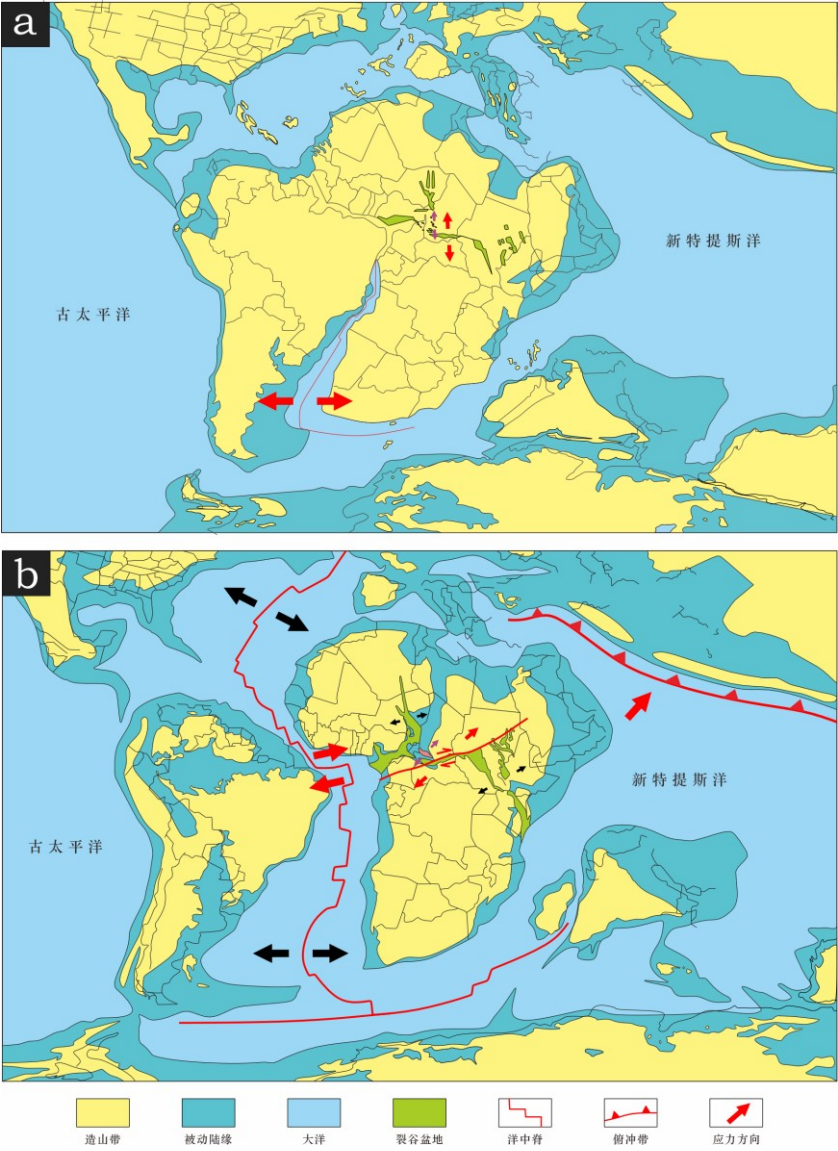


图 14 非洲板块各时期演化机制图 ((a) 早白垩世早期 (b) 早白垩世晚期)

Fig14. The evolutionary mechanisms of the African plate during different periods

4.2.4 Bongor 盆地形成的动力学机制

对比发现，Bongor 盆地两期裂陷作用与大西洋扩张作用及特提斯洋闭合导致的板块拖拽作用在时间上表现出良好的一致性。综合大西洋白垩纪以来的两期拉张作用、早白垩世晚

期特提斯大洋板片俯冲远程效应以及中非剪切带内 Bongor 盆地同期表现出的两期裂陷作用，研究提出了白垩纪以来 Bongor 盆地裂陷是大西洋扩张与特提斯拖拽双动力系统的联合响应。

(1) 早白垩世早期 (145-120Ma): 南大西洋扩张主导裂陷

早白垩世早期 (145Ma-120Ma), 南大西洋开始整体呈南快北慢特征扩张(Moulin *et al.*, 2010), 该时期非洲板块在南大西洋的推动下, 整体表现为以西北非地块为中心的逆时针的旋转, 从而造成南非地块与东北非地块间经历了近南北向的拉张作用, 中非裂谷系开始发育, Doseo、Doba、Salamat 等盆地形成(图 14a)(Moulin *et al.*, 2010; Chaboureaud *et al.*, 2013; Franke, 2013; Fairhead *et al.*, 2013)。此时期位于中非裂谷带北缘的 Bongor 盆地同样受到近南北向拉张作用力的控制, 进入第一期裂陷阶段, 在离散的北西向先存断裂的控制下, Bongor 盆地以斜交裂谷的模式发育, 在近南北向的伸展应力以及基底先存断裂的共同作用下, 盆内形发育近 EW 向及 NWW 向断裂, 其间发育构造转换带。

(2) 早白垩世晚期 (120-100Ma): 赤道大西洋扩张与特提斯拖拽联合控盆

早白垩世晚期 (120Ma-100Ma), 南大西洋赤道段开始快速扩张(田纳新等, 2023), 推动非洲板块持续向北东方向漂移旋转, 导致东北非板块相对南非板块右移(Moulin *et al.*, 2010)。与此同时, 新特提斯洋开始向欧亚大陆俯冲, 不断地把陆块从冈瓦纳大陆运向欧亚大陆(Liu *et al.*, 2016; 王二七等, 2018)。大西洋扩张的推力与新特提斯洋俯冲的远程拖拽共同影响了非洲板块的运动模式, 对非洲板块东北部施加 NE 向应力, 使东北非地块与南非地块之间产生近 NE-SW 方向应力(图 14b)。

该期近平行中非裂谷系延伸方向的作用力导致位于中非剪切带的 Doseo、Salamat 等盆地遭受了明显的走滑作用, 形成典型的走滑拉分盆地(Fairhead *et al.*, 2013)。而位于中非剪切带北缘, NW-SE 走向的 Bongor 盆地与该期 NE-SW 方向的拉张作用近似垂直, 盆地由斜交裂谷发育模式转变为正交裂谷发育模式。因此, 不同于 Doseo、Salamat 等盆地的强走滑特征, Bongor 盆地在 NE-SW 方向张应力作用下经历第二期裂陷作用。

5. 主要结论

(1) Bongor 盆地整体表现为南断北超箕状断陷结构, 局部出现北断南超的构造转换带, 各次级凹陷的沉积中心受控于边界主干断裂。断裂以近 EW、NWW 向为主, 断裂形态多为弧形、线形、波浪形、锯齿形, 在平面上呈平行式、雁列式、交叉式以及羽状展布, 剖面上发育堑垒构造、多级“Y”字型断裂组合及反转构造。

(2) Bongor 盆地在 P 组-M 组地层沉积时期构造活动强烈, 各部位伸展量大、伸展速率快, 发育倾向不同的箕状断陷。K 组-B 组地层沉积时期, 盆地仍以伸展断裂为主, 伸展量及伸展速率均变小, 主干断裂对沉积的控制作用减弱。B 组沉积结束后盆地遭受了挤压反转, 地层遭受剥蚀, 挠曲变形严重。

(3) 研究认为 Bongor 盆地为早期两期裂陷和晚期挤压联合作用下形成的反转裂谷盆地。早白垩世早期, 南大西洋扩张导致南非地块与东北非地块间近南北向拉张作用, 包括 Bongor 盆地在内中非裂谷系盆地经历初始裂陷作用。早白垩世晚期, 大西洋赤道段扩张以及特提斯洋中脊向欧亚大陆俯冲联合作用下导致东北非地块与南非地块之间近 NE-SW 方向的拉张应力, NW-SE 走向的 Bongor 盆地经历第二期裂陷作用。

(4) 地震资料解释和构造物理模拟实验综合分析很好地验证了在中非剪切背景下, Bongor 盆地裂陷作用的独特发育机制, 为 Bongor 盆地的形成演化乃至整个中非剪切带盆地群的形成提供了新的依据, 对指导中非下一步油气勘探和类似盆地的研究具有重要意义。

致谢: 本次研究受到中国石油天然气股份有限公司重大科技专项“海外油气地质新理论资源评价新技术与超前选区研究”(编号: 2023ZZ07) 和科学研究与技术开发项目“中西非裂谷系走滑构造数值模拟及构造变形研究”(编号: YGJ2024-02) 的资助, 衷心感谢所有支持和帮助。

References

- Alkmim, F.F., Marshak, S., Fonseca, M.A., 2001. Assembling West Gondwana in the Neoproterozoic: Clues from the São Francisco Craton Region, Brazil. *Geology*, 29(4): 319–322. doi:10.1130/0091-7613(2001)029<0319:AWGITN>2.0.CO;2
- Azevedo, R.L.M. de., 2004. Paleocceanografia e a Evolução do Atlântico Sul no Albiano. *Boletim De Geociências Da Petrobras*, 12(2): 231–249.
- Brun, J. P., 1999. Narrow Rifts Versus Wide Rifts: Inferences for the Mechanics of Rifting from Laboratory Experiments. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 357(1753): 695–712. doi:10.1098/rsta.1999.0349
- Bonifacio, J.F., Ganade, G.E., Santos, A.C.D., et al., 2023. Review and Critical Assessment on Plate Reconstruction Models for the South Atlantic. *Earth-Science Reviews*, 238: 104333. Doi: 10.1016/j.earscirev.2023.104333
- Chaboureau, A.C., Guillocheau, F., Robin, C., et al., 2013. Paleogeographic Evolution of the Central Segment of the South Atlantic during Early Cretaceous Times: Paleotopographic and Geodynamic Implications. *Tectonophysics*, 604: 191–223. doi:10.1016/j.tecto.2012.08.025
- Chen, Z.G., Xu, G. Wang, J.C., et al., 2016. Different Structural Characteristics in the East and West Parts, Bongor Basin, Chad, and Their Influence on Hydrocarbon Accumulation. *Oil Geophysical Prospecting*, 51(S1): 113–119, 9(in Chinese with English abstract).
- Collettini, C., Sibson, R.H., 2001. Normal Faults, Normal Friction? *Geology*, 29(10): 927–930. doi:10.1130/0091-7613(2001)029<0927:NFNF>2.0.CO;2
- Dahlstrom, C.D.A., 1970. Structural Geology in the Eastern Margin of the Canadian Rocky Mountains. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, 18(3):332-406. Doi: 10.35767/gscpgbull.18.3.332.
- Darros De Matos, R.M., 2000. Tectonic Evolution of the Equatorial South Atlantic. *American Geophysical Union (AGU)*. doi:10.1029/GM115p0331
- Davison, I., 2007. Geology and Tectonics of the South Atlantic Brazilian Salt Basins. *London, Geological Society of London*.
- Dou, L.R., Wang, J.C., Wang, R.C., et al., 2018. Precambrian Basement Reservoirs: Case Study from the Northern Bongor Basin, the Republic of Chad. *AAPG Bulletin*, 102(09): 1803–1824. doi:10.1306/02061817090
- Dou, L.R., Wang, J.C., Wang, R.C., et al., 2018. The Precambrian Basement Play in the Central African Rift System. *Earth Science Frontiers*, 25(2): 015-023(in Chinese with English abstract).
- Dou, L.R., Wang, R.C., Wang, J.C., et al., 2021. Thermal History Reconstruction from Apatite Fission-Track Analysis and Vitrinite Reflectance Data of the Bongor Basin, the Republic of Chad. *AAPG Bulletin*, 105(5): 919–944. doi:10.1306/11182019167
- Dou, L.R., Xiao, K.Y., Du, Y.B., et al., 2024. Tectonics of the West and Central African Strike-Slip Rift System. *Petroleum Science*, 21(6): 3742–3753. doi:10.1016/j.petsci.2024.11.017
- Dou, L.R., Xiao, K.Y., Hu, Y., et al., Petroleum Geology and a Model of Hydrocarbon Accumulations in the Bongor Basin the Republic of Chad. *Acta Petroleum Sinica*, 32(3): 379–386(in Chinese with English abstract).
- Eagles, G., 2007. New angles on South Atlantic Opening. *Geophysical Journal International*, 168(1): 353–361. doi:10.1111/j.1365-246X.2006.03206.x
- Fairhead, J.D., 2020. Regional Tectonics and Basin Formation: The Role of Potential Field Studies – An Application to the Mesozoic West and Central African Rift System. In: *Regional Geology and Tectonics (Second Edition)* (N. Scarselli, J. Adam, D. Chiarella, D. G. Roberts & A. W. Bally, Eds.), Elsevier: p. 541–556. doi:10.1016/B978-0-444-64134-2.00018-3
- Fairhead, J.D., 2023. The Mesozoic West and Central Africa Rift System (WCARS) and the Older Kandi

- Shear Zone (KSZ): Rifting and Tectonics of North Africa and South America and Fragmentation of Gondwana Based on Geophysical Investigations. *Journal of African Earth Sciences*, 199: 104817. doi:10.1016/j.jafrearsci.2022.104817
- Fairhead, J.D., Green, C.M., Masterton, S.M., et al. 2013. 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. *Tectonophysics*, 594: 118–127. doi:10.1016/j.tecto.2013.03.021
- Franke, D., 2013. Rifting, Lithosphere Breakup and Volcanism: Comparison of Magma-Poor and Volcanic Rifted Margins. *Marine and Petroleum Geology*, 43: 63–87. doi:10.1016/j.marpetgeo.2012.11.003
- Frindt, S., Trumbull, R.B., Romer, R.L., 2004. Petrogenesis of the Gross Spitzkoppe Topaz Granite, Central Western Namibia: a Geochemical and Nd–Sr–Pb Isotope Study, *Chemical Geology*, 206(1): 43–71. doi:10.1016/j.chemgeo.2004.01.015
- Gao, H.H., Du, Y.B., Wang, L., et al., 2023. Tectonic Features, Genetic Mechanisms and Basin Evolution of the Eastern Doseo Basin, Chad. *Petroleum Exploration and Development*, 50(5): 1003-1015(in Chinese with English abstract).
- Genik, G.J., 1993. Petroleum Geology of Cretaceous-Tertiary Rift Basins in Niger, Chad, and Central African Republic1. *AAPG Bulletin*, 77(8): 1405–1434. doi:10.1306/BDF8EAC-1718-11D7-8645000102C1865D
- Gladchenko, T.P., Hinz, K., Eldholm, O., et al. 1997. South Atlantic Volcanic Margins. *Journal of the Geological Society*, 154(3): 465–470.
- Gupta, S., Cowie, P.A., Dawers, N.H., et al., 1998. A mechanism to Explain Rift-Basin Subsidence and Stratigraphic Patterns through Fault-Array Evolution. *Geology*, 26(7): 595-598. Doi: 10.1130/0091-7613(1998)026<0595:AMTERB>2.3.CO;2.
- Gürer, D., Granot, R., Hinsbergen, D.J.J. 2022. Plate Tectonic Chain Reaction Revealed by Noise in the Cretaceous Quiet Zone. *Nature Geoscience*, 15(3): 233–239. doi:10.1038/s41561-022-00893-7
- Hao, L.L., Hu, W.L., Wang, Q., et al., 2025. Bangong-Nujiang Neo-Tethyan Ocean (Central Tibet): Geodynamics, Crustal Evolution, Metallogeny, and Linkages to the “Yanshan Movement.” *Earth-Science Reviews*, 265: 105119. doi:10.1016/j.earscirev.2025.105119
- Harding, T. P., Lowell, J. D., 1979. Structural Styles, Their Plate-Tectonic Habitats, and Hydrocarbon Traps in Petroleum Provinces. *AAPG Bulletin*, 63(7):1016-1058. doi: 10.1306/2F9184B4-16CE-11D7-8645000102C1865D
- Hu, W.L., Wang, Q., Tang, G.J., et al., 2022. Late Early Cretaceous Magmatic Constraints on the Timing of Closure of the Bangong–Nujiang Tethyan Ocean, Central Tibet. *Lithos*, 416–417: 106648. doi:10.1016/j.lithos.2022.106648
- Huang, C., Yu, Z.H., Xiao, G.J., et al. 2012. Tectonic Evolution and its Influence to Hydrocarbon Accumulation in B basin, Central and Western African System. *Science Technology and Engineering*, 12(17): 1671-1815(in Chinese with English abstract).
- Hubbert, M.K., 1951. Mechanical Basis for Certain Familiar Geologic Structures. *GSA Bulletin*, 62(4): 355–372. doi:10.1130/0016-7606(1951)62[355:MBFCFG]2.0.CO;2
- Lenhardt, N., Omietimi, E.J., Edegbai, A.J., et al., 2024. Traversing the Rift: A Review of the Evolution of the West and Central African Rift System and its Economic Potential. *Earth-Science Reviews*, 104999. doi:10.1016/j.earscirev.2024.104999
- Li, Z.H., Cui, F.Y., Yang, S.T. et al., 2023. Key Geodynamic Processes and Driving Forces of Tethyan Evolution. *Science China Earth Sciences*, 66(12): 2666–2685(in Chinese with English abstract).

- Liu, C.Z., Chung, S.L., Wu, F.Y., et al., 2016. Tethyan Suturing in Southeast Asia: Zircon U-Pb and Hf-O Isotopic Constraints from Myanmar Ophiolites. *Geology*, 44(4): 311–314. doi:10.1130/G37342.1
- Liu, H.F., 1993. Dynamic Classification of Sedimentary Basin and Their Structural Styles. *Earth Science*, 18(6):699-724+814(in Chinese with English abstract).
- Lustrino, M., Melluso, L., Brotzu, P., et al., 2005. Petrogenesis of the Early Cretaceous Valle Chico Igneous Complex (SE Uruguay): Relationships with Paraná-Etendeka Magmatism. *Lithos*, 82(3): 407–434. doi:10.1016/j.lithos.2004.07.004
- Marzoli, A., Melluso, L., Morra, V., et al., 1999. Geochronology and Petrology of Cretaceous Basaltic Magmatism in the Kwanza Basin (Western Angola), and Relationships with the Paraná-Etendeka Continental Flood Basalt Province. *Journal of Geodynamics*, 28(4): 341–356. doi:10.1016/S0264-3707(99)00014-9
- Matos, R.M.D.D., Krueger, A., Norton, I. & Casey, K. 2021, The Fundamental role of the Borborema and Benin–Nigeria provinces of NE Brazil and NW Africa during the development of the South Atlantic Cretaceous Rift system, *Marine and Petroleum Geology*, 127: 104872. doi:10.1016/j.marpetgeo.2020.104872
- Min, G., Hou, G.T., 2019. Mechanism of the Mesozoic African rift system: Paleostress field modeling. *Journal of Geodynamics*, 132: 101655. doi:10.1016/j.jog.2019.101655
- Moulin, M., Aslanian, D., Unternehr, P., 2010. A new starting point for the South and Equatorial Atlantic Ocean. *Earth-Science Reviews*, 98(1–2): 1–37. doi:10.1016/j.earscirev.2009.08.001
- Qu, X.M., Wang, R.J., Xin, H.B., et al., 2012. Age and Petrogenesis of A-Type Granites in the Middle Segment of the Bangonghu–Nujiang Suture, Tibetan Plateau. *Lithos*, 146–147: 264–275. doi:10.1016/j.lithos.2012.05.006
- Scotese, C.R., 2014. Atlas of Plate Tectonic Reconstructions (Mollweide Projection). Volumes 1–6, Paleomap Project PaleoAtlas for ArcGIS, Paleomap Project, Evanston, IL. doi:10.13140/2.1.1046.4967
- Scotese, C.R., Vérard, C., Burgener, L., et al., 2025. The Cretaceous World: Plate Tectonics, Palaeogeography and Palaeoclimate. *Geological Society, London, Special Publications*, 544(1): 31–202. doi:10.1144/SP544-2024-28
- Segall, P., Pollard, D.D., 1980. Mechanics of Discontinuous Faults. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 85(B8): 4337–4350. doi:10.1029/JB085iB08p04337
- Sibson, R.H., 1985. A Note on Fault Reactivation. *Journal of Structural Geology*, 7(6): 751–754. doi:10.1016/0191-8141(85)90150-6
- Sibson, R.H., Xie, G., 1998. Dip Range for Intracontinental Reverse Fault Ruptures: Truth not Stranger than Friction? *Bulletin of the Seismological Society of America*, 88(4): 1014–1022. doi:10.1785/BSSA0880041014
- Simmons, N.A., Myers, S.C., Johannesson, G., et al., 2015. Evidence for Long-Lived Subduction of an Ancient Tectonic Plate Beneath the Southern Indian Ocean. *Geophysical Research Letters*, 42(21): 9270–9278. doi:10.1002/2015GL066237
- Song, Y.F., Dou, L.R., Cheng, D.S., et al., 2024. Driving Mechanism of Tectonic Inversion in Intra-Plate Rift Basins and its Impact on Oil: A Case Study of the Bongor Basin in Central Africa. *Geological Review*, 70(S1): 239–240(in Chinese with English abstract).
- Stampfli, G.M., Borel, G.D., 2002. A Plate Tectonic Model for the Paleozoic and Mesozoic Constrained by Dynamic Plate Boundaries and Restored Synthetic Oceanic Isochrons. *Earth and Planetary Science Letters*, 196(1): 17–33. doi:10.1016/S0012-821X(01)00588-X
- Sun, W.D., Liu, L.J., Hu, Y.B., et al., 2018. Post-Ridge-Subduction Acceleration of the Indian Plate Induced by Slab Rollback. *Solid Earth Sciences*, 3(1): 1–7. doi:10.1016/j.sesci.2017.12.003
- Tian, N.X., Xie, X.N., Sun, Q.L., et al., 2023. Formation Evolution and Structural Architectures of

- Conjugated Continental Margin Basins in the Equatorial Segment of South Atlantic. *Earth Science*, 1-15(in Chinese with English abstract).
- Turner, J.P., Williams, G.A., 2004. Sedimentary Basin Inversion and Intra-Plate Shortening. *Earth-Science Reviews*, 65(3-4): 277-304.
doi:10.1016/j.earscirev.2003.10.002
- Wan, B., Wu, F.Y., Chen, L., et al., 2019. Cyclical One-Way Continental Rupture-Drift in the Tethyan Evolution: Subduction-Driven Plate Tectonics. *Science China Earth Sciences*, 62(12): 2005-2016.
doi:10.1007/s11430-019-9393-4
- Wang, E.Q., Meng, K., Xu, G., 2018. Cenozoic Two-Stage Obduction of the Indian Subcontinent: On the Interaction between the Indian Ocean, Tethyan and Eurasian Plates. *Acta Petrologica Sinica*, 34(7) : 1867 - 1875(in Chinese with English abstract).
- Wang, H.X., Lv, T.F., Fu, X.F., et al., 2012. Formation, Evolution and Reservoir-Controlling Mechanism of Relay Zone in Rift Basin. *Geological Science and Technology Information*, 32(4): 102-110(in Chinese with English abstract).
- Wang, L., Zhang, X.S., Xiao, K.Y., et al., 2022. Formation and Evolution of Baobab Structural Zone and Controlling Factors of Hydrocarbon Accumulation in Bongor Basin, Chad. *China Petroleum Exploration*, 27(2):84-92(in Chinese with English abstract).
- Wang, W.L., Yang, J.G., Sun, Q.Q., et al., 2017. Research Progress and Development Trends of the Transfer Zone. *Geology and Resources*, 26(2): 195-202(in Chinese with English abstract).
- Xiao, K.Y., Zhao, J., Yu, Z.H., et al., 2014. Structural Characteristics of Intensively Inversed Bongor Basin in CARS and their Impacts on Hydrocarbon Accumulation. *Earth Science Frontiers*, 21(3):172-180(in Chinese with English abstract).
- Xu, C.C., 2012. The Characteristics of Inversion Structures in Bongor Basin and its Relationship with Hydrocarbon Accumulation. Beijing, China University of Geosciences (Beijing) (in Chinese with English abstract).
- Yang, S.T., Li, Z.H., Wan, B., et al., 2021. Subduction-Induced Back-Arc Extension Versus Far-Field Stretching: Contrasting Modes for Continental Marginal Break-Up. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 22(3): e2020GC009416.
doi:10.1029/2020GC009416
- Yu, Z.H., Xiao, K.Y., Zhang, G.L., et al., 2018. Analysis on Inverted Structure Characteristics and its Forming Mechanism in the Bongor Basin, Chad. *China Petroleum Exploration*, 23(3):90-98(in Chinese with English abstract).
- Zhu, R.X., Zhao, P., Zhao, L., 2021. Tectonic Evolution and Geodynamics of the Neo-Tethys Ocean. *Science China Earth Sciences*, 52(1): 1-25(in Chinese with English abstract).
- ### 中文参考文献
- 余朝华, 肖坤叶, 张桂林, 等 2018, 乍得 Bongor 盆地反转构造特征及形成机制分析, 中国石油勘探, 23(3): 90-98.
- 宋一帆, 窦立荣, 程顶胜, 等 2024, 板内裂谷盆地构造反转驱动机制以及对油气的影响——以中非 Bongor 盆地为例, 地质论评, 70(S1): 239-240.
- 朱日祥, 赵盼, 赵亮, 2021, 新特提斯洋演化与动力过程, 中国科学: 地球科学, 52(1): 1-25.
- 李忠海, 崔峰源, 杨舒婷, 等 2023, 特提斯演化的关键动力学过程与驱动力, 中国科学: 地球科学, 53(12): 2701-2722.
- 王二七, 孟恺, 许光, 等 2018, 印度陆块新生代两次仰冲事件及其构造驱动机制:论印度洋、特提斯和欧亚板块相互作用, 岩石学报, 34(7): 1867-1875.
- 王利, 张新顺, 肖坤叶, 等 2022, 乍得邦戈盆地 Baobab 构造带形成演化及油气成藏控制因素, 中国石油勘探, 27(2): 84-92.
- 王海学, 吕延防, 付晓飞, 等 2013, 裂陷盆地转换带形成演化及其控藏机理, 地质科技情报, 32(4): 102-110.
- 窦立荣, 王景春, 王仁冲, 等 2018, 中非裂谷系前寒武系基岩油气成藏组合, 地学前缘, 25(2): 15-23.

- 窦立荣, 肖坤叶, 胡勇, 等 2011, 乍得 Bongor 盆地石油地质特征及成藏模式, 石油学报, 32(3): 379–386.
- 肖坤叶, 赵健, 余朝华, 等 2014, 中非裂谷系 Bongor 盆地强反转裂谷构造特征及其对油气成藏的影响, 地学前缘, 21(3): 172–180.
- 许长春 2012, Bongor 盆地反转构造特征及其与油气聚集关系, 北京, 中国地质大学(北京).
- 陈志刚, 徐刚, 王景春, 等 2016, 乍得 Bongor 盆地东、西部构造特征差异及其对油气富集的影响, 石油地球物理勘探, 51(S1): 113–119, 9.
- 高华华, 杜业波, 王林, 等 2023, 乍得 Doseo 盆地东部构造特征、成因机制与盆地演化, 石油勘探与开发, 50(5): 1003–1015.
- 黄超, 余朝华, 肖高杰, 等 2012, 中西非裂谷系 B 盆地构造演化及其对油气成藏的影响研究, 科学技术与工程, 12(17): 1671–1815.
- 王文龙, 杨济广, 孙乔琪, 等 2017, 构造转换带研究进展与发展趋势, 地质与资源, 26(2): 195–202.
- 刘和甫, 1993, 沉积盆地地球动力学分类及构造样式分析, 地球科学, 18(6): 699–724+814.
- 田纳新, 解习农, 孙启良, 等 2023, 南大西洋赤道段两岸共轭陆缘盆地形成演化及结构差异, 地球科学, 1–15.