

文章编号: 0253-2697(2015)10-1234-14 DOI:10.7623/syxb201510006

中非剪切带含油气盆地成因机制与构造类型

张艺琼¹ 何登发¹ 童晓光²

(1. 中国地质大学能源学院 北京 100083; 2. 中国石油天然气勘探开发公司 北京 100011)

摘要:位于非洲大陆的中非剪切带盆地群,受控于周邻板块的构造运动,盆地形态多样,多具有走滑-反转等构造样式,近年来发现了一系列大中型油气田,业已成为全球的热点勘探地区。以地震、钻井资料为基础,结合平面上的盆地形态和构造地质横剖面特征,应用构造应力场概念和构造解析方法,详细探讨了剪切带盆地的成因机制和构造类型,并进一步揭示了盆地的形成演化对油气地质条件的控制作用。研究认为,受周缘板块构造的影响,中非剪切带盆地群自早白垩世以来,发育多期叠加的构造-地层序列,经历了3幕裂谷作用:①以具右旋走滑拉张性质的第一幕最为剧烈,是盆地群的原始动力和决定性因素;②第二幕裂谷作用的影响较小,强度自东向西减弱;③裂谷期为第三幕,主要影响了东部的盆地。结合平面及剖面上的走滑应力场变化特征,将早白垩世的中非剪切带盆地群划分为3种成因类型:T-R型盆地、T-R'型盆地、S/P型盆地(其中T、R、R'、S、P分别表示张裂面、里德尔剪裂面、共轭里德尔剪裂面、挤压面及走滑低角度破裂面),整体在剪切带上组合成为一套完整、配套齐全的走滑盆地群体系。在盆地群3幕裂谷作用中,这种成因差异性的构造演化特征,发育多种圈闭类型,油气富集特色鲜明:东部盆地是最有利的油气聚集区;西部盆地中也具有广阔的油气勘探前景;中部盆地由于控盆断裂较为复杂,其潜力有待进一步揭示。

关键词:走滑断层;成因机制;构造类型;油气聚集;中非剪切带;裂谷盆地

中图分类号:TE121.1 文献标识码:A

Genetic mechanisms and tectonic types of petroliferous basins in the Central Africa Shear Zone

Zhang Yiqiong¹ He Dengfa¹ Tong Xiaoguang²

(1. School of Energy Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;
2. China National Oil and Gas Exploration and Development Corporation, Beijing 100011, China)

Abstract: The basins group, located at the Central Africa Shear Zone in African continent, shows diversified morphologies as controlled by the tectonism of surrounding plates, mainly presenting the tectonic styles such as strike-slip and reverse structures, etc. In recent years, a series of large and middle oil and gas fields have been found as the global hot spots for exploration. Based on the seismic and drilling data of petroliferous basins in Central Africa Shear Zone, in combination with the characteristics of planar basin morphology and tectonic geological cross profile, the genetic mechanism and tectonic types of these basins were deeply explored using the concept of tectonic stress field and structure analytical method, so as to further reveal the controlling influence of basin formation and evolution on hydrocarbon geological conditions. It is considered in this study that affected by the structure of surrounding plates, multi-stage superimposed tectonic-stratigraphic sequences were formed in the basins group since the Early Cretaceous, experiencing three episodes of rifting. Episode 1 shows the most intense rifting with right-lateral strike-slip tensile property, and is the original motive and decisive factor for basins group; the rifting of Episode 2 had less influence with the intensity weakened from east to west. The rifting period exists in Episode 3, and mainly has influences on the development of Eastern Basins. In combination with the variation characteristics of strike-slip stress field on the plane and profile, the Early Cretaceous basins group in Central Africa Shear Zone can be divided into three genetic types: T-R type basin, T-R' type basin and S/P type basin (T, R, R', S and P represent tension fissure plane, Riedel shear fracture plane, conjugate Riedel shear fracture plane, compressive plane and low-angle strike-slip fracture plane respectively). As a result, a set of complete strike-slip basin system with comprehensive support was created in the shear zone as a whole. In the three episodes of basin rifting, multiple trap types were developed due to the tectonic evolution with genetic differences. They have distinctive hydrocarbon enrichment characteristics, i. e., Eastern Basins are the most favorable hydrocarbon accumulation zones; Western Basins also have broad hydrocarbon exploration prospects; due to complex basin-controlling faults, the potential of Central Basins remains to be discovered further.

Key words: strike-slip fault; genetic mechanism; tectonic types; hydrocarbon accumulation; the Central Africa Shear Zone basins; rifting basin

基金项目:国家重大科技专项(2011ZX05028-003)资助。

第一作者:张艺琼,女,1990年12月生,2013年获中国地质大学(北京)资源勘查工程专业学士学位,现为中国地质大学(北京)矿产普查与勘探专业硕士研究生,主要从事石油天然气构造地质综合研究及地震解释工作。Email: cugbzyq@163.com

通信作者:何登发,男,1967年12月生,1989年毕业于西北大学地质学系,1995年获石油勘探开发科学研究院博士学位,现为中国地质大学(北京)教授、博士生导师,主要从事含油气盆地构造研究。Email: hedengfa282@263.net

引用: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.

Cite:Zhang Yiqiong,He Dengfa,Tong Xiaoguang.Genetic mechanisms and tectonic types of petroliferous basins in the Central Africa Shear Zone[J].Acta Petrolei Sinica,2015,36(10):1234-1247.

20 世纪 70 年代地质学家就认识到非洲大陆大部分地区的岩石圈板块在晚侏罗世、早白垩世至古近纪遭受了地壳的拉张作用^[1,2]。1983 年,Browne 和 Fairhead 提出“中非剪切带”是一条陆内巨型平移断层带,并推想该剪切带把苏丹的内陆裂谷盆地和发育在乍得和尼日尔的中生代—新生代裂谷盆地连接起来^[3]。中非剪切带盆地是指沿中非剪切带发育的一系列中生代—新生代裂谷盆地^[3-6],从西至东有 Bongor、Doba-Doseo、Salamat、Bagarra、Mugald、Melut 和 Khartoum 等盆地。这些盆地几乎从东到西横跨整个非洲,其形成和演化与非洲大陆不规则的差异运动和一系列的裂谷作用密切相关^[7-11]。

研究证明,世界上单位面积油气产量和储量丰富的盆地,几乎都与断裂带剪切平移运动有着密切的关系^[7]。在漫长的地质演化过程中,多旋回的构造运动使得剪切带上的盆地的油气储层形式多样,含油气条件良好,近年来由于勘探技术的提高和新油田的发现,中非剪切带周边国家的石油储量和产量不断上升,在全球能源供应格局中的地位显著提升。据 BP 统计^[12],截至 2015 年 6 月,中非剪切带周边国家的石油探明储量已达 20.41×10^8 t。无论是中非剪切带的东部盆地群如苏丹的 Muglad 盆地和 Melut 盆地,还是西部盆地群如乍得的 Bongor 盆地,油气勘探都取得了重大发现,都具有巨大的勘探开发潜力^[8-11]。

剪切带内部和附近的盆地群具有如此特殊的剪切构造特征和丰富的油气储量,一直以来就得到学者的广泛关注^[10,13-17]。但前人往往只着重于对中非剪切带上单独的某一裂谷盆地或某一次级盆地单元进行研究^[7,10,11,13-15,17-20],多数探讨盆地的成藏及油气地质特征,并将其定义为被动裂谷盆地,也有研究将其与中国的渤海湾主动裂谷盆地对比^[9,21]。但是对于中非剪切带上的盆地群来说,大部分盆地中不发育火山岩,其形成拉张裂谷作用的根源何在?其个体的形成原因之间是否存在差异性?以及其自早白垩世以来是如何演化?受到的应变分布情况有何变化?在目前看来,尚没有从整体上对中非剪切带盆地的成因机制进行解析和研究。

笔者以最新的地震、钻井等油气田地质资料为基础,结合近年来的研究成果,分析了中非剪切带盆地群构造演化的动力学背景,应用构造应力场的概念,从平面和剖面两种角度,深入剖析这种形态特殊伸展盆地群的成因机制以及油气聚集特征,并划分了成因类型,对认识剪切构造环境之下盆地的构造类型、地质结构及其

控油作用具有重要意义。同时,结合盆地群不同的成因类型和构造类型,进一步探讨了其具有差异性的构造演化历史,讨论了盆地成因对成藏的控制因素,这对于该地区油气勘探的进一步开展具有重要参考价值。

1 大地构造背景

1.1 地理位置及构造背景

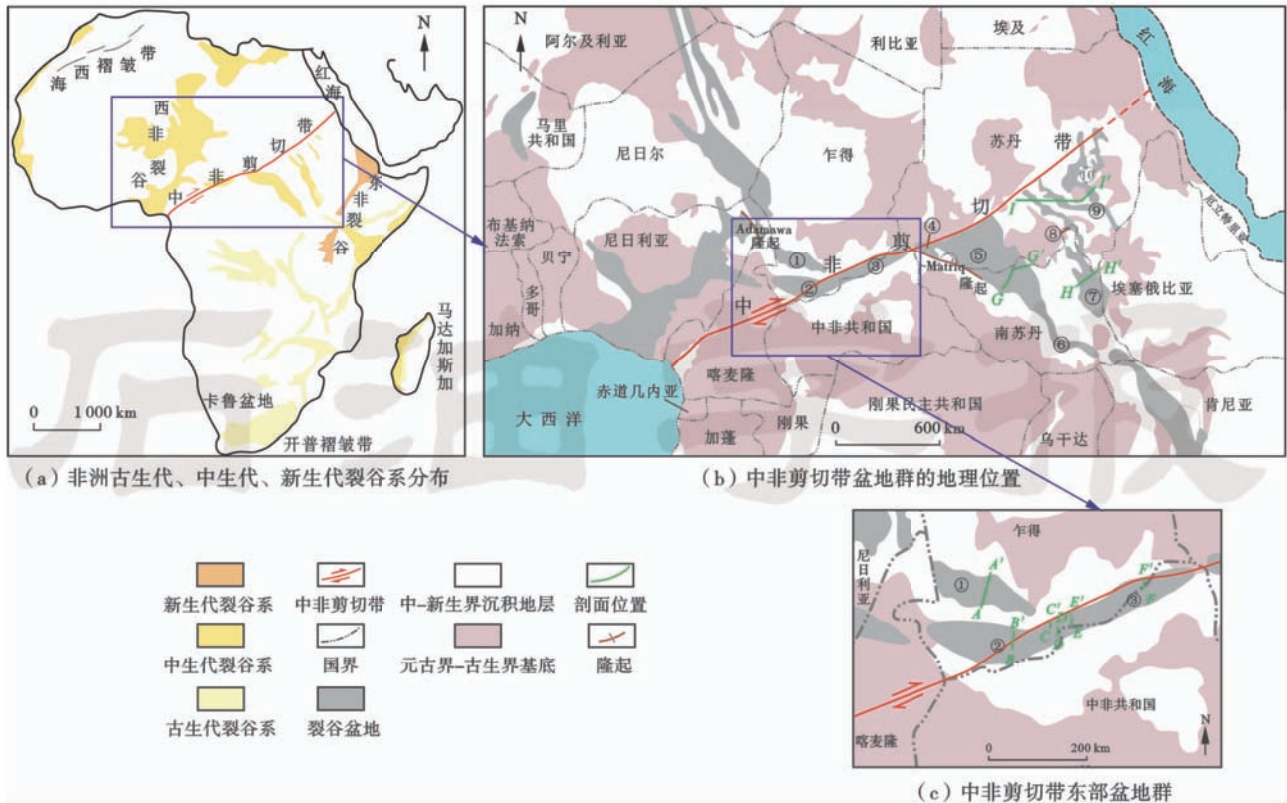
在非洲大陆,沿着克拉通之间地壳相对活动和不稳定的泛非带发育 3 大裂谷系,其分别是西非裂谷系、中非剪切带裂谷系和东非裂谷系[图 1(a)],前两者由 Adamaoua 隆起分开,而位于中非剪切带上 Muglad 盆地东南部的东非裂谷系则是在渐新世开始、至今仍在活动的现代裂谷系^[16,22]。

中非剪切带是非洲内部形成的一条 NE 向长达 2000 km 的陆内巨型剪切带,其发育自非洲西部的几内亚湾,向东穿过喀麦隆、乍得南部、中非共和国进入苏丹,是刚果克拉通与努比亚克拉通之间的泛非活动带[图 1(a)]。

在约 150 Ma,中非剪切带可能是发育在冈瓦纳大陆内不稳定地区的扭动断裂活动带,在空间上,与南美大陆巴西东北部的伯南布哥(Pernambuco)右旋剪切断裂带属于同一条断层^[1,3,23],继承了约 500 Ma 前泛非造山期形成的右旋剪切带,是一个巨大的岩石圈转换剪切带。随着冈瓦纳古大陆在中生代的解体,在非洲大陆上的中非剪切带及其盆地群发生的一系列重大地质活动都与周邻板块的运动息息相关^[2,7,10,13-17,20](图 2)。

对应于大西洋发展的分段差异扩张历史^[23,24],在早白垩世,南大西洋扩张的早中期,非洲大陆上的中非断裂带以北的块体相对向东运动,断裂带呈右行平移剪切运动,导致断裂带内走滑盆地的形成^[7],并在中非断裂东端南侧产生扩张的应力场,促使了转换型沉积盆地的形成(图 2);在晚白垩世至新生代,由于南大西洋的扩张速率大于中大西洋的扩张速率,断裂带渐转为左行平移剪切运动(图 2)^[19],造成陆上沿断裂带内分布沉积盆地的反转和萎缩^[26,27]。

在距今 130 Ma^[27],伴随东冈瓦纳大陆裂解,印度洋开始扩张^[28,29],约 90 Ma 前,印度洋快速张开,导致印度块体在晚白垩世快速北移(速率高达 17 cm/a),中非剪切带上的盆地群自东向西受到拉伸作用(图 2)^[30,31]。65 Ma 时印度板块完全脱离非洲塞舌尔群岛,向北欧亚大陆的方向运动^[32],位于肯尼亚的 Anza 盆地向 NW 向移动,形成南苏丹的裂谷系统^[30,31]。



注：①Bongor 盆地；②Doba-Doseo 盆地；③Salamat 盆地；④Bagarra 盆地；⑤Mugald 盆地；⑥Jonglei-Mongala 盆地；⑦Melut 盆地；⑧White Nile-Ruat 盆地；⑨Kost 盆地；⑩Khartoum 盆地(自西向东包括 Dongola 盆地、Blue Nile 盆地、Atbara 盆地)。

图 1 中非剪切带及主要裂谷盆地分布

Fig. 1 Distribution of the Central Africa Shear Zone and rift basins

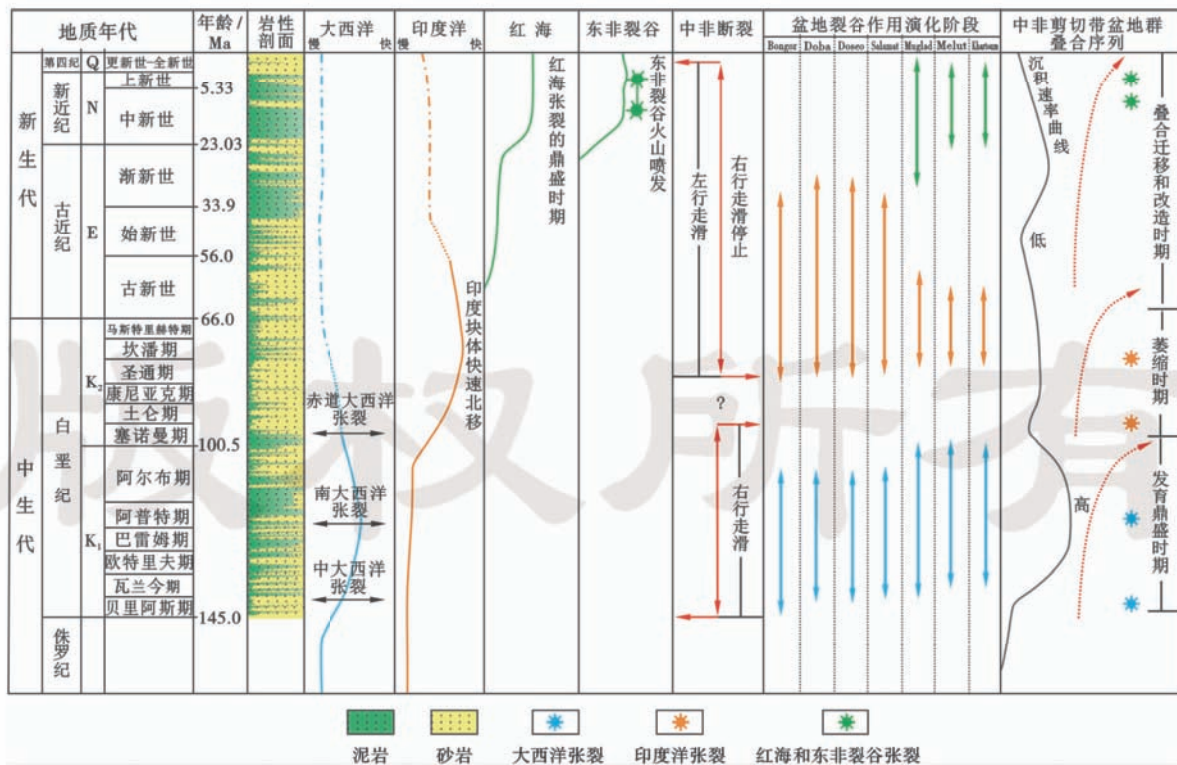


图 2 Tectonic background of the Central Africa Shear Zone basins^[10]

红海的裂谷化对其附近的苏丹裂谷盆地影响十分巨大[图 1(b)]^[4,6-11,13-17];开始于始新世,上新世发育成新生洋盆,洋壳的最大年龄为 26Ma^[32],产生的区域应力场主要表现为中非剪切带东部正断层伸展和断块翘倾作用^[8,19,20]以及东非裂谷系多期次的岩脉侵入^[33-35]。

位于 Muglad 盆地东南部的东非裂谷,火山活动在晚渐新世至中新世极其强烈,主要有裂隙式和中心式火山喷发;在上新世末期,以中心式火山喷发为主,岩浆通过管状火山通道喷出地表,这对剪切带中部盆地群的影响较大(图 2),导致了又一次的扭张拉伸作用^[35]。

1.2 构造-地层层序

根据近年来的地震、钻井、测井和古生物地层等多项研究资料揭示和证实,中非剪切带盆地主要发育前寒武系基底、下白垩统、上白垩统、古近系、新近系和第四系,为一套陆源碎屑沉积(图 3)。前寒武系为中非剪切带盆地群的基底^[36]。据统计,非洲大陆约 57% 的面积为前寒武系,岩性主要为变质程度不同的变质岩,并受到不同程度的混合岩化和花岗岩化作用。盆地群地层以白垩系为主,最大厚度可达数千米,新生界地层较薄。

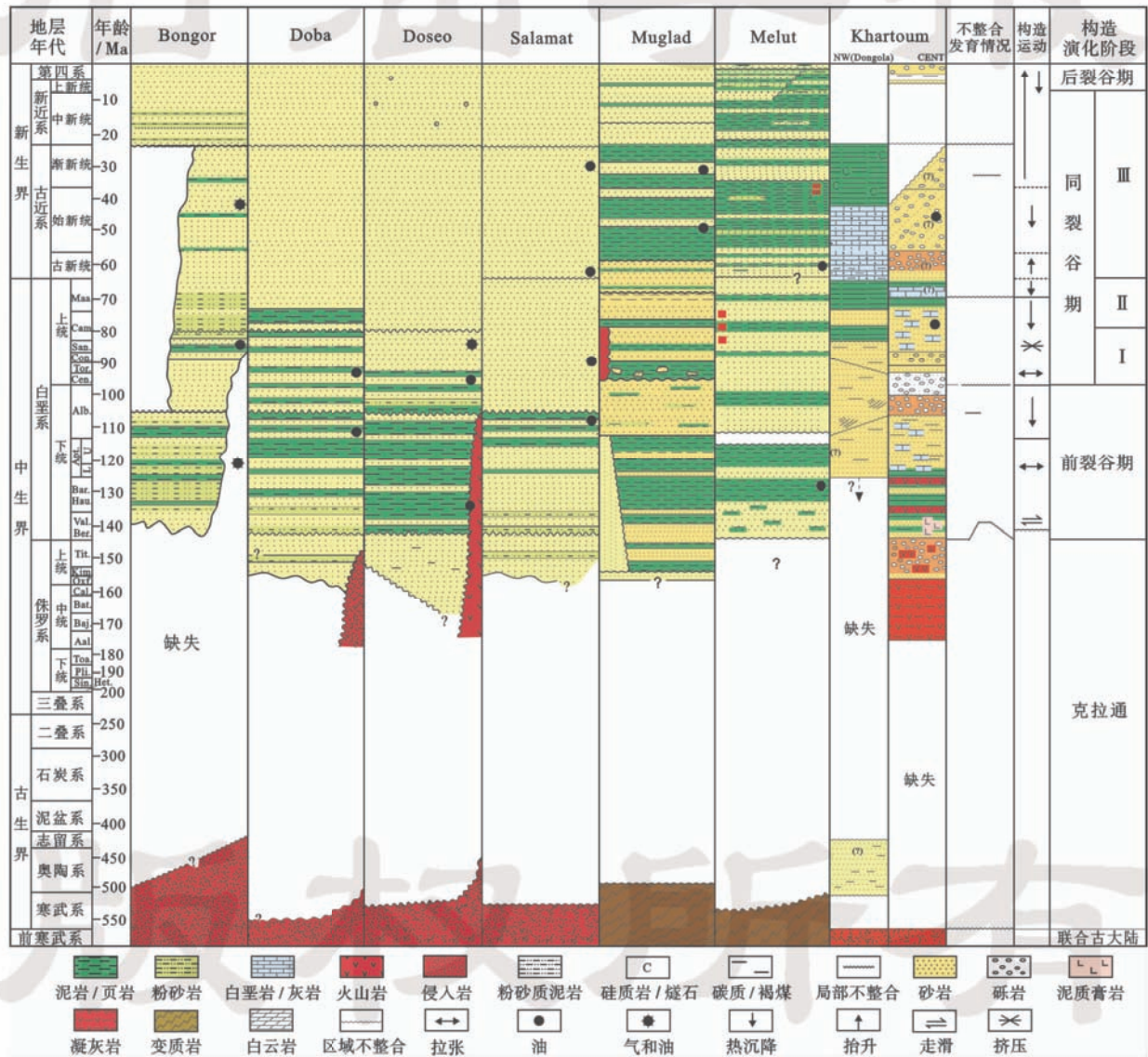


图 3 中非裂谷盆地综合地层对比

Fig. 3 Stratigraphic column of the Central Africa Shear Zone basins

中非剪切带盆地普遍存在 4 套区域性不整合:新近系中新统底部、古新统一上白垩统之间、上白垩统底部和下白垩统底部。同时,区域不整合的分布随着周邻板块运动的时空差异性而有所上下浮动。从图 3 中可以看出,与东部盆地群相比,西部的盆地群进入前裂

谷期和裂谷期的时间较早一些,反应了地层格架样式与剪切作用应力强度变化的密切关系,即主剪切带由西向东应力逐渐变小的特点。

研究认为,中非剪切带伴随着裂谷系盆地的构造演化可以划分为 3 个阶段,所形成的地层格架组成和

岩性成分独具特点。

第1阶段,距今约550~130 Ma。受泛非运动(800~540 Ma)之后的影响,非洲大陆的核心包括西非、刚果和卡拉哈里3个晚元古代前的古老基底克拉通,构造相对稳定^[37],除此之外晚元古代至早寒武世的造山带分布在其间,中非裂谷盆地群基本沿着中非剪切断裂带分布。此时前裂谷期为稳定地台沉积阶段,局部地区可能有陆相碎屑岩沉积,而大部分地区的

沉积岩与断裂活动均不发育。

第2阶段,距今130~20 Ma。自130 Ma起,冈瓦纳大陆开始解体,南大西洋和印度洋相继张开,其中,南大西洋以“三叉裂谷”的形式进行张开,“三叉裂谷”中的两支拉开最终形成了洋壳,余下一支深入非洲大陆形成“坳拉谷”,即产生了中西非裂谷的雏形。此后的活动与大西洋发展历史息息相关,最终形成了中、西非裂谷系(图4)。

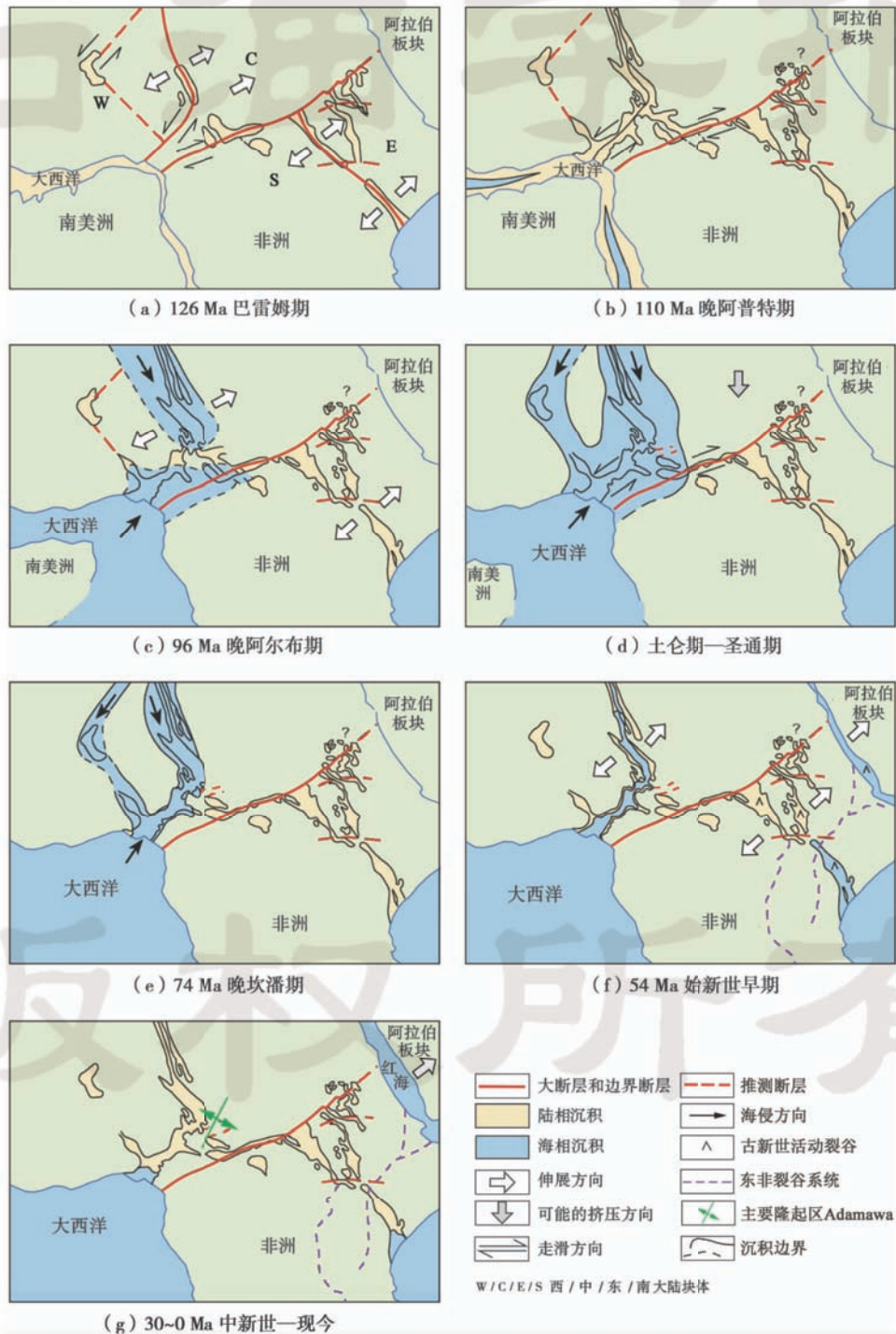


图4 中西非裂谷系统古地理演化^[8]

Fig. 4 Paleogeographic evolution of the Western and Central African System^[8]

下白垩统底部与下伏基底呈角度不整合接触。中非剪切带盆地普遍受到裂谷作用的影响,经历了早期快速沉降和晚期缓慢沉降阶段,岩性有砂泥岩、泥岩、页岩等,为烃源岩的发育创造了良好的环境,也是自生自储的储集岩层,如: Bongor 盆地^[38],从上白垩统开始,以泥岩、砂质泥岩和粉砂岩为主,属弱还原环境的沉积物;顶部为厚层块状砂岩夹薄层泥岩,顶、底部发育有泥岩段,为氧化环境。其中,上白垩统巨厚的泥页岩和高孔、高渗的砂岩是有效的储盖组合,如 Meuglad 盆地^[39]。

第 3 阶段,距今 20 Ma 至今。后裂谷作用期的地层主要反映中新世主要裂谷作用之后,随着在扩张脊上拉斑玄武岩和过渡型玄武岩喷发,红海的扩张在上新世达到鼎盛时期,使得阿拉伯板块从非洲板块中分离,东非裂谷作用发生,产生的左旋剪切作用自东南向西北减弱,对中非裂谷系前期的构造进行改造(图 4)。新近系至第四系盆地沉积地层约为 2 000 m,沉积厚度稳定,断陷活动微弱,为统一的拗陷阶段,盆地最终定型。现今的盆地群在不同应力大小的影响下呈现出不同的盆地形状、构造样式和含油气系统。

2 盆地雏形成因机制

中非剪切带在早白垩世以来,在不同时间、不同空间位置上受到了不同来源构造运动的影响,经历了多旋回、多期次的改造和演化。相应地,剪切带上盆地群

的成因与演化与在细节上的表现也有所差异(表 1)。但是在主体上,经历了大西洋的分期、分段裂开,导致巨型中非断裂带的右行走滑运动,盆地群初具雏形(图 2),走滑运动就成为早白垩世以来盆地形成演化决定性的控制因素。因此,应用 Harding^[40]的右行力偶走滑应变椭圆模型对早白垩世走滑拉分构造应力场进行分析,在平面上宏观地将盆地群的应力状态以右旋主应力轴(PDZ)为参照系进行分解,建立出两组里德尔共轭剪裂(R 和 R')、张裂(T)、压剪性破裂(P)、Y 剪切破裂(平行于主位移带)以及局部收缩变形(S)等剪切应力作用下的断裂构造要素(图 5)。这些破裂面的空间组合是盆地现今形态成因和演化的直接表现,即反映了断层的空间结构,也影响着断层的封闭性,因此要重点进行分析^[41]。

主位移带起始于地壳深部,近于直立,是一条 NE 向连续的走滑位移带,向上发散可能与浅层的各种破裂面连接在一起构成网状交织的破裂带(图 6 中 B-B' 的 Borogop 断裂带)。在平面上,由于地理位置不同,西部的盆地群组成控盆的破裂断层形态较为复杂,呈多边形,涉及到 R、R'、S、P、T 等分解的应力较多且方向较为分散;而东部的盆地,总体上为近似三角形态,表现出马尾状雁列分布,组成的大断裂应力分解较为一致,都有 R 剪裂和 T 张裂。从垂向上分析,中非剪切带盆地整体上广泛分布有正断层,为走滑拉分盆地和走滑诱导型盆地,但走滑的力学性质、大小和方向不

表 1 中非剪切带盆地的构造特征

Table 1 Structural characteristics of the Central Africa Shear Zone basins

盆地名称	Bongor 盆地	Doba 盆地	Doseo 盆地	Muglud 盆地	Melut 盆地	Khartoum 盆地
面积 / km ²	1.8 × 10 ⁴	3.6 × 10 ⁴	2.0 × 10 ⁴	11.2 × 10 ⁴	6.0 × 10 ⁴	2.0 × 10 ⁴
形态	菱形	三角形	四边形	东南窄西北宽的长三角形	三角形	多边形
剪切走滑特征						
盆地走滑类型	T-R 型	S/P 型		T-R' 型		
长轴方向	NW-SE	NW-SE	NE-SW	NW-SE	NW-SE	NW-SE
地理位置	剪切带以北	中非剪切带内		中非剪切带以南		
走向	平行+斜交	与非中非剪切带近似平行		与非中非剪切带斜交		
控凹断层特征	断面陡, 倾角多在 60° 以上			倾角多在 60° 以下		
主要构造样式	花状构造、反转构造	犁式正断块、花状构造和背斜、基底隆起断块		半地堑、地堑结构	复式半地堑、复式地堑	断背斜、地堑构造
构造反转现象	明显			不明显		
二级构造单元划分	北部斜坡、中央拗陷、南部隆起和南部拗陷	由断裂控制的 2 个拗陷	东西 2 个拗陷	“三断三拗”	“五四一凸”的构造格局	北部拗陷、中部拗陷、南部凸起
总体伸展量	20%	小于 20%	小于 20%	小于 20%	20%~50%	25%~40%
区域应力场	受中非剪切带活动控制			受中非剪切带的诱导和影响		

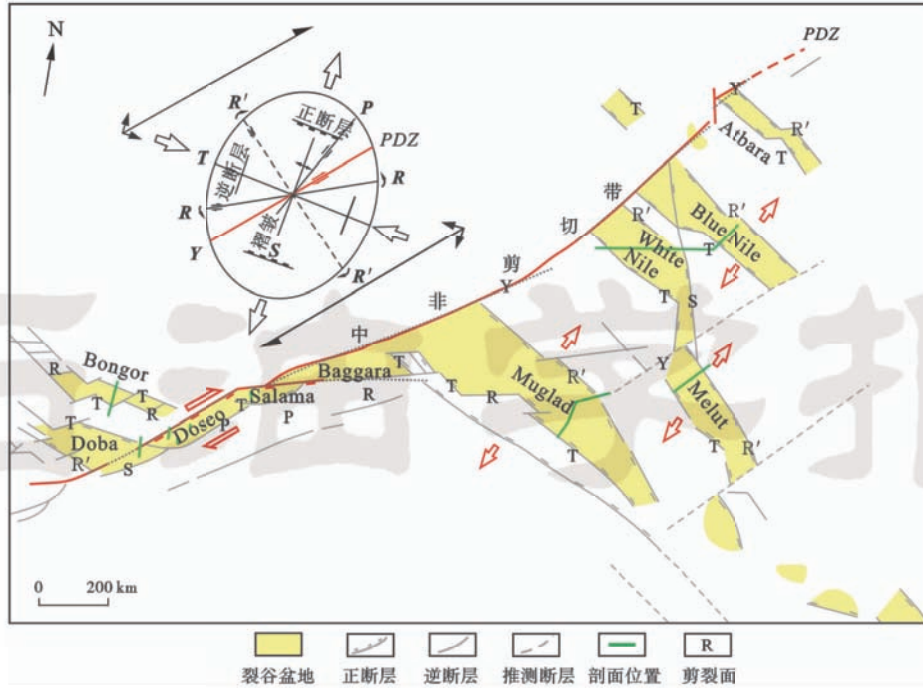


图5 中非剪切带盆地群右行走滑构造应力场分析(基础数据为地震数据解释资料,剖面具体位置见图1)
 Fig. 5 Dextral strike-slip tectonic stress field of the Central Africa Shear Zone basins

尽相同,同时,有少数的逆断层存在于盆地内部,起到了局部的调节作用(图6中E-E')。依据这种盆地群之间平面上与剖面上的剪切走滑特征的变化(图5、表1),将早白垩世中非剪切带盆地的成因机制归为3类:

(1) T-R型盆地,以Baggara盆地为例,这种类型的盆地若与主位移带的距离较近,则组成T-R-Y样式的三角形态。三角形的一边里德尔剪裂面R与主位移带PDZ呈锐角(即岩石内摩擦角的一半,一般小于15°)相交,是同向走滑断层,其锐角指向右旋的运动方向;另一边T则以产生主位移带大角度相交、延伸不长的张性正断层为特征。二者的组合使得地层内部破裂较为严重。若盆地与主位移带相隔较远,受到走滑作用的影响,就会产生此类盆地的变种:TR-TR型盆地,此类盆地形态多呈菱形或四边形,在裂谷期,盆地内部的伸展应力使得前裂谷期的地层(基底一下白垩统底部)随着上部地层发生变形沉降,多数呈铲式正断层发育,在剖面上反映出正断层组成的地堑,反转构造较为发育,为离散性走滑断层在张扭应力场中形成的构造,例如Bongor盆地(图6中B-B')。

(2) T-R'型盆地,这类盆地分布的数量最多,具代表性的有东部的White Nile盆地、Mugald盆地、Melut盆地以及Atbara盆地。其通常与主位移带的距离较近,并以主位移带为断裂边界或者具有平行于主位移带的断裂面,即含有Y剪切破裂,另外两边与主位

移带分别呈方向相反的大角度相交剪裂面(张裂T和共轭里德尔剪裂面R'),形态近似“瘦长”的三角形(图5)。平面上断层沿构造走滑带雁列式排列,是反向走滑断层。受到裂谷作用的影响,在剖面上为多为“牛头状”地堑(图6中G-G')、多米诺式断阶、铲式正断层控制的复合半地堑等样式,地层呈楔状沉积体,产状自下而上由陡倾变为平缓,表现为“断翘式”构造,结构不对称(图6中H-H'和I-I')。

(3) S/P型盆地,指含S收缩面或者P走滑低角度破裂面的控盆断层的盆地,包括T-R'-S、T-R-P型等3种或3种以上非平行于主应变轴(Y)的分解应力,盆地的平面形态多样,常表现为不规则的多边形。例如Doba盆地,经过初始的和后期的拉张阶段,盆地中主体构造样式为张性的断层和半地堑结构,由于存在局部收缩变形面(S),存在压扭作用下的一些正花状构造,角度高陡,破裂严重(图6中B-B')。而形态如Doseo盆地、Salamat盆地,所处的位置受到右行右阶张性应力作用,盐桥部位处于拉伸状态,多产生R和P剪切破裂,二者相对于主位移带对称分布,角度都很小,产生同向走滑断层和次级同向断层,受到剪切力的作用较严重,产生负花状构造(图6中D-D'和F-F'),以高角度(倾角在60°以上)断面的铲式正断层为特征(图6中C-C'和E-E'),是典型的剪切带松弛使得侧列重叠形成的拉分盆地。

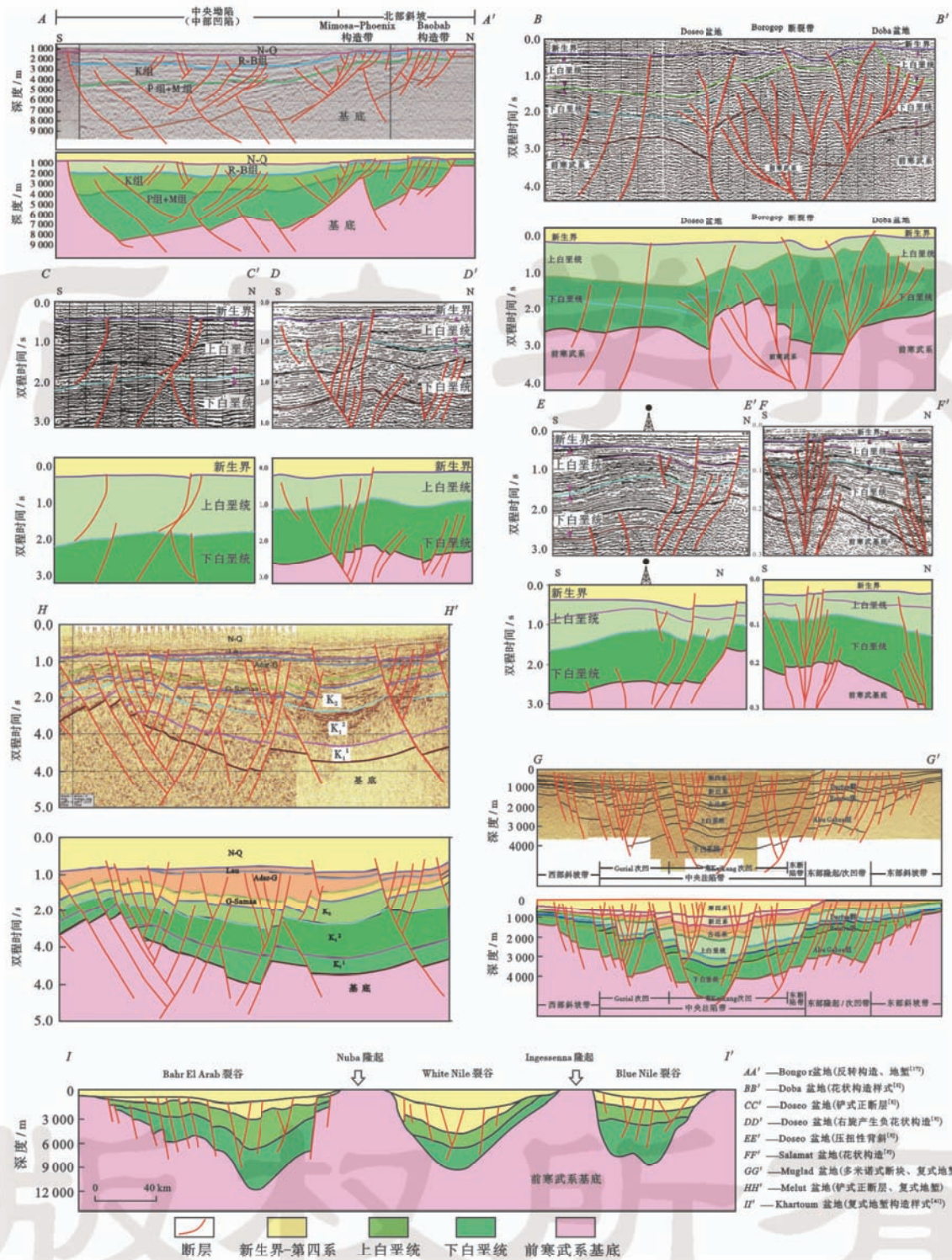


图 6 中非剪切带盆地构造地质剖面形态(剖面位置见图 1)

Fig. 6 Structural profile of the Central Africa Shear Zone basins(locations see Fig. 1)

3 盆地地质结构与演化特征

自早白垩世以来,中非剪切带演化进入了同裂谷期,这是断裂活动发育以及沉降、沉积作用发育的主要阶段,在盆地中心沉积了上万米的地层,在整体上主要经历了早白垩世最为强烈的第一幕裂陷作用^[37,38],此后为晚白垩世至古近纪、新近纪三幕裂谷作用(图 3、

图 4),不同时期区域构造环境和所形成的构造演化特征不同,伴随着西部、东部和中部的地区分异,其构造演化为:

(1) 西部盆地——以 Bongo 盆地为例(图 7)

位于中非剪切带西北侧的 Bongo 盆地的构造演化主要分为 3 个阶段,时间分别为白垩纪早期强烈断陷期、白垩纪晚期继承性断陷期和反转期、古近纪末期

微弱反转期。作为盆地主要构造活动期的断陷期，具有多期活动、强度不均的特点。

在白垩纪早期南大西洋张裂形成的“三叉裂谷”中(图4)，中非剪切带地壳强烈伸展裂陷，改变 Bongor 盆地原始的应力方向[图7(f)]，受 NE-SW 向走滑拉张作用明显[图7(e)]，将前寒武系基底断裂为数十个 NW-SE 向斜列、面积不等的箕状断陷群(图6中 A-A')，形成 TR-TR 型走滑盆地。盆地中央的断陷程度最为强烈，沉降幅度最大，伸展率达到 5.45%，断裂具有同沉积的特点，生长指数为 1.094。该时期为白垩系 Prosopis 组、Mimosa 组、Kubla 组填平补齐的快速沉积阶段[图7(c)和图7(d)]。

白垩纪晚期延续了之前的走滑拉张力学特征，盆地进一步发育，但拉张裂陷很快陆续转变为稳定而显著的构造热沉降及“圣通期挤压事件(约 85~80 Ma)”影响的区域应力反转，裂陷作用终止，盆地整体抬升，遭到显著改造，形成了区域性不整合面[图7(b)]，至晚白垩世末盆地基本定型。盆地内正花状构造和挤压反转背斜广泛发育，其中正花状构造属于基底断层在

后期挤压作用下再活化的结果，主要沿 NE 向的转换断层发育；挤压反转背斜主要呈 EW 向展布，是早期凹陷与隆起挤压的结果，如 Mimosa-Phoenix 构造带、Ronier 构造带和 Baobab 构造带等。

古近纪末期的第3期裂陷(74~31 Ma)由红海的张裂活动所引起，而 Bongor 盆地此时以幅度较小的热沉降作用为主，反转作用较弱，一直延续到后裂谷期(30~0 Ma)盆地最终定型[图7(a)]。

(2) 东部盆地——以 Muglad 盆地为例(图8)

Muglad 盆地从早白垩世至第四纪分为3个演化阶段，发育了4个区域不整合面和6套沉积构造层，平面上具有隆拗相间的构造特征。

第1阶段主要是早白垩世 Abu Gabra 期的断陷活动以及 Bentiu 期的拗陷沉积作用。早期受基底结构和 中非剪切带活动的影响，Muglad 盆地发生强烈拉张沉降活动，成为 T-R' 型走滑盆地，在基底薄弱地带发生拉张及剪切引起的裂陷沉降，发育了一系列规模不等的凹陷，Abu Gabra 组代表盆地的初始沉积[图8(d)]。

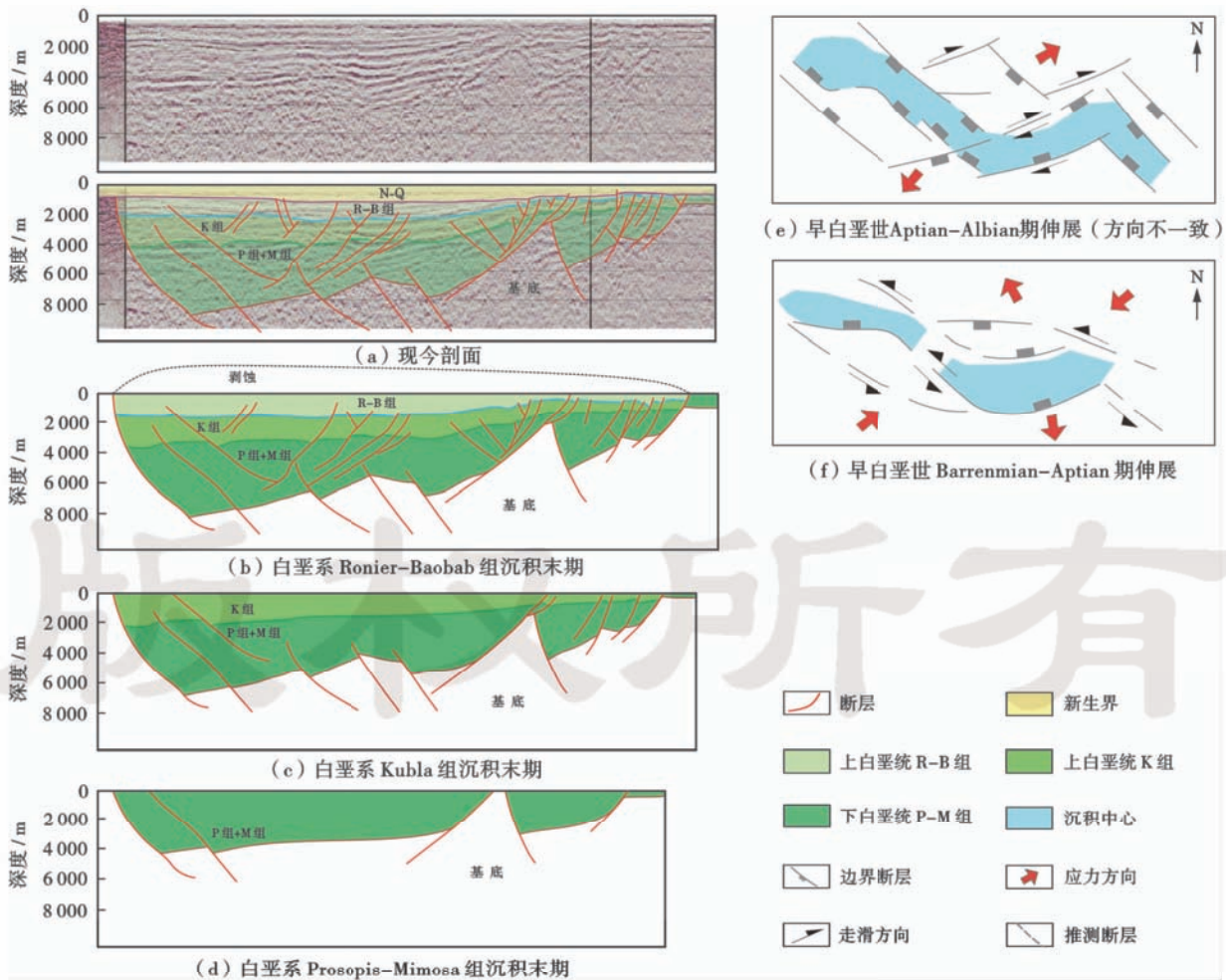


图7 中非剪切带 Bongor 盆地构造恢复剖面(剖面位置见图1中 A-A')

Fig. 7 Structural evolution of Bongor Basin in the Central Africa Shear Zone(location of the profiles is on Fig. 1 A-A')

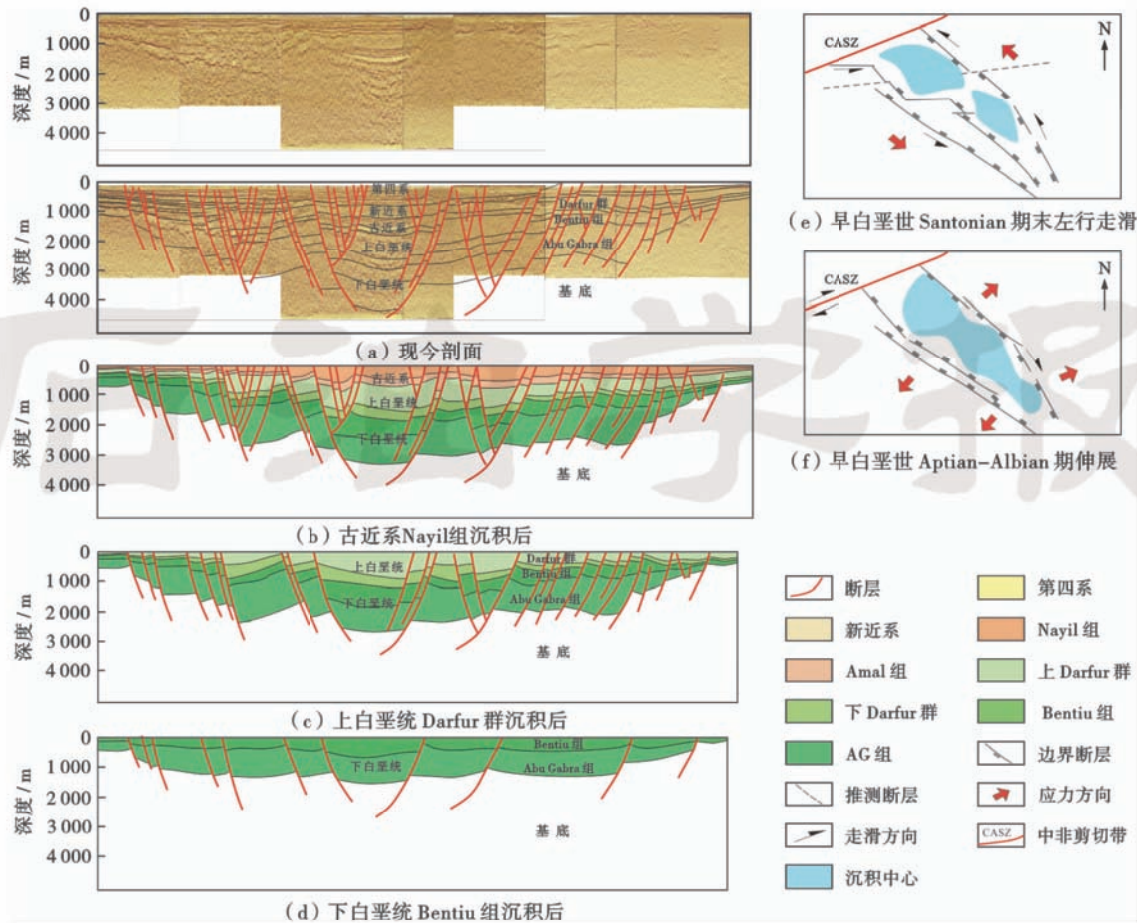


图 8 中非剪切带 Muglad 盆地构造恢复剖面(剖面位置见图 5 中 G-G')

Fig. 8 Structural evolution of Muglad Basin in the Central Africa Shear Zone(location of the profiles is on Fig. 5 G-G')

第 2 阶段为晚白垩世 Darfur 群的断陷沉积及古新统 Amal 组的坳陷沉积时期。在前一构造旋回的基础上继承发展,除前期控凹断裂被激活外,还有新断裂发育[图 8(c)和图 8(f)]。Darfur 群早期伸展断陷活动相对强烈,沉积厚度超过 500 m;Baraka-Ghazal 组的优质泥岩形成了区域性盖层,中期以砂泥岩不等厚交互沉积为特征,裂陷活动微弱,受到“圣通期挤压事件”的影响应力反转为左行走滑[图 8(e)],以振荡沉降为主;晚期的 Baraka 组地层为厚层砂岩夹薄层泥岩, Darfur 群晚期断裂活动基本停止,盆地结束第 2 期裂陷活动(图 3)。

始新统一第四系是盆地演化的第 3 个阶段,即 Nayil-Tendi 组的裂陷活动期和 Adok 组—第四系坳陷沉降期。直到古近纪,中非剪切带活动停止,但 Muglad 等盆地受红海的开裂和东非裂谷作用影响,进入了新的裂谷期,即 Muglad 盆地的第 3 次裂陷发育阶段[图 8(b)]。

(3) 中部盆地

无论是 T-R'-S 型的 Doba 盆地,或是 T-R-P 型的 Salamat 盆地,都位于中非剪切带的内部,属于走滑拉

分型盆地,所受应力较为分散,其演化程度介于前两类之间,主要也发育了 3 期构造旋回。

在早白垩世,南大西洋的裂谷作用向北传播,到达现今的尼日尔三角洲,使得非洲大陆开始板内变形,先前存在的地壳产生区域大断裂,例如 Borogop 断裂带(图 6 中 B-B')就是被再次激活的走滑断层。Borogop 断裂带在拉张后,产生了走向为 100°~120°的正断层,盆地主要的边界断层在深部可能为铲式正断层。在断裂处的运动形成了 Doba 盆地初始拉分盆地的形态, Doseo 盆地沿着现有的轮廓形成一个对称张扭裂谷盆地。

晚白垩世赛诺曼期到坎潘期为转换伸展和转换挤压作用。在 Borogop 断裂带上,主体应力方向的改变产生了右旋作用,导致了 Doba-Salamat 盆地与 Doseo 盆地的分离。在圣通期,由于非洲和欧洲板块的挤压运动^[8,15],产生了微弱的转换挤压作用,这种微弱的应力变化导致数次往复的海侵作用,产生了一些明显的反转构造现象。在一些构造高部位发现的小型不整合证实了压缩作用和右旋的张扭运动。

在白垩纪之后,裂谷作用终止,盆地进入热沉降阶

段;而在渐新世,热沉降作用被短暂的区域性抬升和剥蚀打断;在中新世,重新恢复热沉降,盆地进入衰亡期。

4 油气地质特征

中非剪切带中的盆地群在同裂谷期3幕裂陷活动中都不同程度地造成了烃源岩发育的沉积环境,如早白垩世烃源岩——湖相暗色泥岩规模最大(图3)。储集层的发育覆盖前裂谷期到后裂谷期的统一坳陷,其中占绝大部分的是碎屑岩储层。中非剪切带盆

地同裂谷期3幕裂陷活动中均有可能产生区域盖层,即下白垩统、上白垩统和古近系。在优良的生储盖匹配条件下,盆地中存在多套成藏组合(图3、图9)^[25,26,42-44],并以下白垩统自生自储型成藏组合、上白垩统成藏组合和古近系成藏组合为主。同时,经历了多期不同程度的张扭、压扭性构造运动,盆地的构造样式十分发育(图6),对应于各盆地的空间分区,所表现的石油地质特征也有所差异,使得油气藏及圈闭种类多样^[45](表2)。

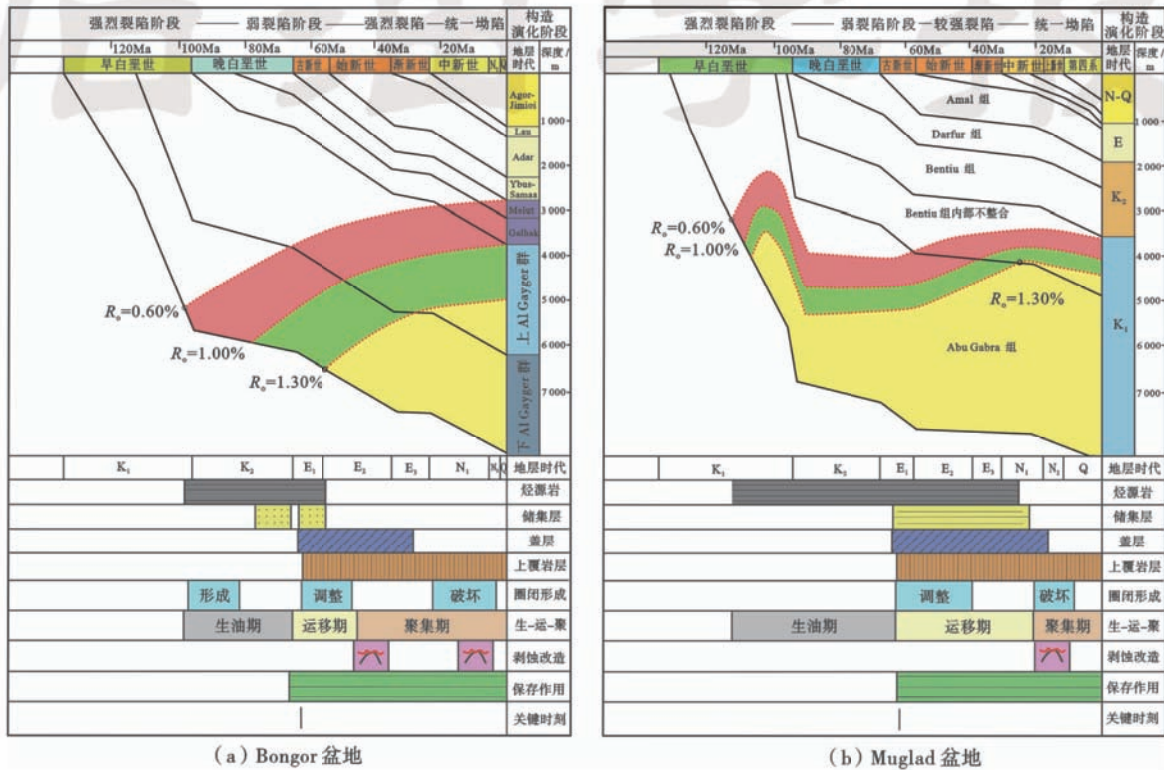


图9 东部盆地含油气系统成藏事件对比
Fig. 9 Pool-formation events of petroleum systems in Bongor Basin and Muglad Basin

(1) 西部盆地,如 Bongor 盆地(图5),其下白垩统烃源岩在盆地内广泛发育,共钻遇到下白垩统5套储层和上白垩统—古近系2套盖层,为油气的富集奠定了坚实的物质基础[图9(a)]。目前通过地震资料能够发现,在T-R剪裂面的影响下,盆地走滑作用强烈,圈闭种类较为丰富[图8(a)]:在斜坡区主要发育受反转断层控制的背斜圈闭;而在陡坡带以上部成藏组合为主要勘探目的层,圈闭类型为高角度的走滑断层控制的断鼻圈闭;有时在地质运动作用下,隆起的古地形受到剥蚀淋滤,被上覆低渗透地层所覆盖形成古潜山“新生古储”圈闭,这也是寻找非常规油气的有利地区。2013年5月,中国石油天然气集团公司的高风险勘探在Bongor盆地东北部断阶带花岗岩潜山勘探新领域获得重大突破,勘探前景广阔。

(2) 东部盆地剖面上常表现为盆地边界发育大

于60°的高角度正断层,常常组合成为旋转的断块和花状构造,伸展作用产生的影响往往大于走滑作用,可以产生不对称背斜圈闭和潜在的断层圈闭(如Muglad盆地、Melut盆地和Khartoum盆地等)[图5、图10(b)],具有形成产量十分可观的油气田潜力,是现今勘探的重点。例如,在苏丹Muglad盆地已发现的最大油田为Unity油田,主要目的层为下白垩统Bentiu组和上白垩统Darfur群[图9(b)],其形成了与裂谷作用相关的连续性张性断背斜圈闭和背斜圈闭,探明原油地质储量 1.12×10^8 t,可采储量 0.36×10^8 t;在Melut盆地中发现的Palogue大型油田,控制地质储量 3.96×10^8 t,可采储量 1.29×10^8 t,达到世界大型油田的标准,这是中国跨国勘探10年来在海外发现的最大油田。

(3) 中部盆地发育的同向走滑断裂较多,能够形

表 2 中非剪切带不同成因类型盆地石油地质特征

Table 2 Petroleum geology characteristics of different genetic basin types in the Central Africa Shear Zone

石油地质特征	西部盆地	中部盆地	东部盆地
代表性盆地	Bongor 盆地	Doba-Doseo 盆地	Muglad 盆地、Melut 盆地
烃源岩特征	下白垩统湖相碎屑岩 II 型干酪根 R_o :0.3%~1.1%	下白垩统湖相页岩 III 型干酪根 R_o :0.3% TOC: 12%	古近系:II ₁ -I 型干酪根 上白垩统:III-II ₂ 型干酪根 下白垩统:II ₁ -I 型干酪根 Abu Gabra 组主力生油岩 上侏罗统:I 型干酪根
储集层特征	下白垩统 B 组、R 组、 K 组、P 组 5 套 高孔中渗、中孔中渗 砂岩含量:49%~64%	下白垩统、上白垩统砂岩 中孔中渗	下白垩统-古新统 8 套砂岩储层 高孔高渗、中孔高渗 砂岩含量:25.5%~64%
盖层特征	古近系:区域盖层 泥岩含量:45.7% 上白垩统:局部盖层 泥岩含量:51%	下白垩统湖相页岩 区域盖层	古近系:局部盖层 上白垩统 Darfur 群区域盖层 泥岩含量:54.9%~77.5% 下白垩统:局部盖层
成藏组合	上、下白垩统成藏组合	上-下白垩统成藏组合	下白垩统、古近系成藏组合
圈闭类型	斜坡区:反转断层控制的背斜圈闭;陡坡带:断鼻圈闭	背斜圈闭、断层圈闭	断背斜圈闭、背斜圈闭
储量分布	下白垩统:100%	上白垩统:56.4% 下白垩统:43.6%	古近系:<0.5% 上白垩统:36.3% 下白垩统:62.7% 其他(包括新近系、潜山和火山岩)<0.5%
已发现储量	4.51×10^8 t	1.38×10^8 t	50×10^8 t

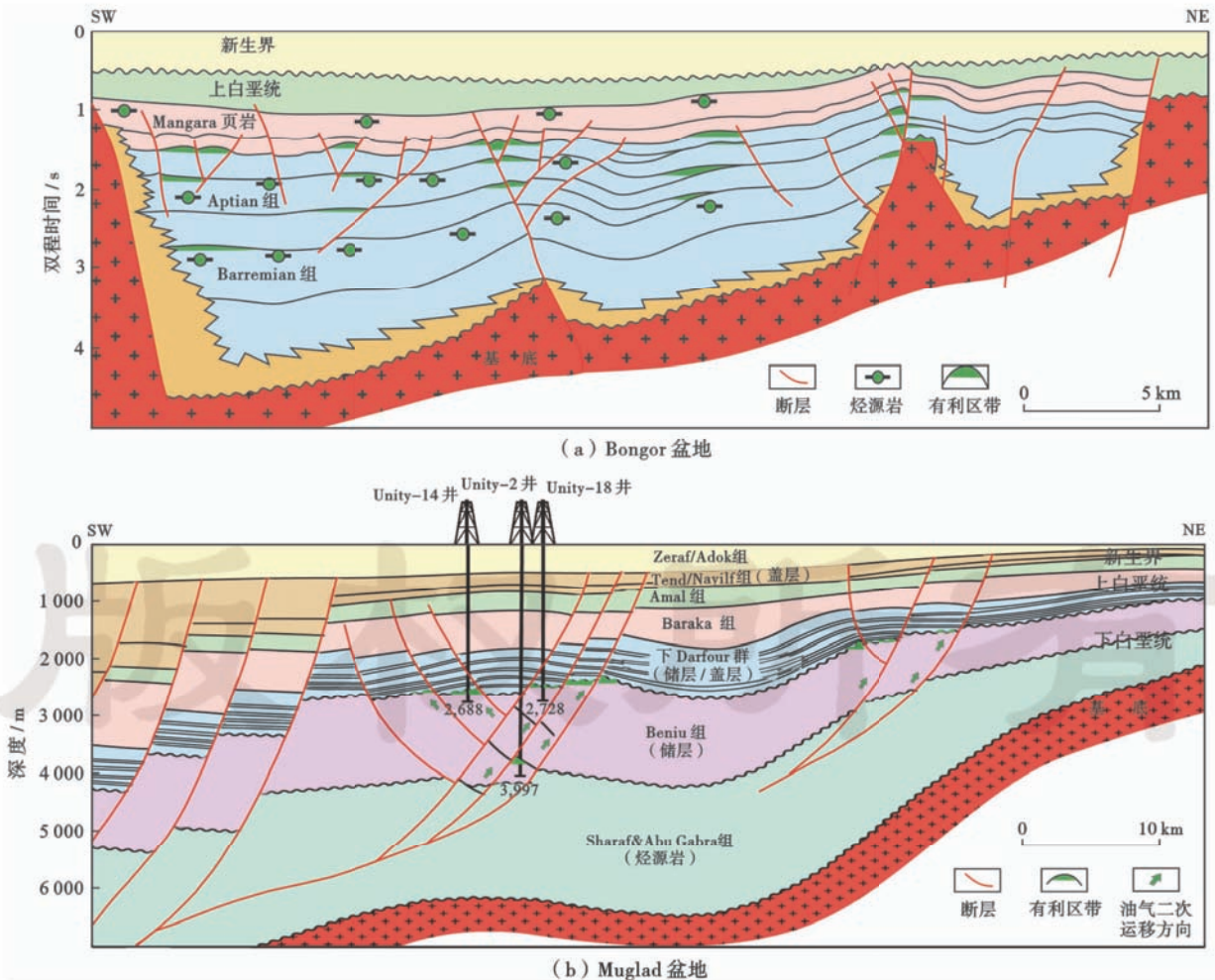


图 10 西部盆地与东部盆地油气成藏系统剖面^[26]

Fig. 10 Reservoir cross-sections of western basin(Bongor Basin)and eastern basin(Muglad Basin)^[26]

成一些断背斜、断鼻和反转断块构造,地层受到低角度的拉伸变薄,这也是寻找地层岩性圈闭等非常规油气的有利地区,例如 Doba-Doseo 等盆地(图 6 中 $B-B'$ 和 $C-C'$),然而,考虑到低品质的上白垩统一新生界盖层和大量断层的存在,目前,盆地中虽然成藏组合条件良好但还没有令人满意的勘探成果。

5 结 论

(1) 中非剪切带含油气盆地群的形成和演化与周邻的板块构造背景密不可分,伴随着大西洋的分段扩张、印度板块的分离、红海的扩张和东非裂谷的演化,中非剪切带总体上经历了 3 个前后相继的构造演化阶段:前裂谷期、同裂谷期和后裂谷期,不同演化旋回发育了多期次的构造-地层序列。在 3 幕裂谷作用中,以具右旋走滑拉张性质的第一幕最为剧烈,是盆地群的原始动力和决定性因素,为后期多阶段盆地叠加演化奠定了基础。

(2) 在对盆地内地震剖面的构造几何学与运动学解析基础上,细致分析了中非剪切带盆地群平面上和垂向上的构造应力场特征,利用应变椭球体进行构造应力解析,将中非剪切带盆地早白垩世初始成因机制归为 3 类: T-R 型盆地、T-R' 型盆地以及 S/P 型盆地。T-R 型盆地中多数发育铲式正断层和张扭应力场中反转构造; T-R' 型盆地呈雁列式排列,多为“牛头状”地堑、多米诺式断阶、铲式正断层控制的复合半地堑等样式;在 S/P 型盆地中,存在应力场反转形成的花状构造和张性半地堑结构。整体上反映出在右行走滑作用下,形成了发育完整、配套齐全的走滑盆地系。

(3) 不同空间分区的盆地具有独特的油气藏富集特征,油气藏类型多样。西部盆地存在反转背斜圈闭、地层圈闭等,具有巨大的油气勘探潜力;东部盆地发育不对称背斜和断层等类型圈闭,是最有利的油气聚集部位;中部盆地显示出良好的生-储-盖条件,但是由于控盆断裂的形态较为复杂,有待于今后的进一步勘探和研究。

参 考 文 献

- [1] Burke K, Whiteman A J. Uplift, rifting and break-up of Africa[M] // Tarling D H, Runcorn S K. Implications of continental drift to the earth sciences. London: Academic Press, 1973: 735-755.
- [2] Belousov V V, Ruditch E M, Shapiro M N. Intercontinental structural ties and mobilistic reconstructions[J]. Geologische Rundschau, 1979, 68(1): 393-427.
- [3] Browne S E, Fairhead J D. Gravity study of the Central African Rift system: a model of continental disruption 1. the Ngaoundere and abu gabra rifts[J]. Tectonophysics, 1983, 94(1/4): 187-203.
- [4] Browne S E, Fairhead J D, Mohamed I I. Gravity study of the White Nile Rift, Sudan, and its regional tectonic setting[J]. Tectonophysics, 1985, 113(1/2): 123-137.
- [5] 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(2/4): 231-249.
- [6] Jorgensen G J, Bosworth W. Gravity modeling in the central African Rift System, Sudan: rift geometries and tectonic significance[J]. Journal of African Earth Sciences, 1989, 8(2/4): 283-306.
- [7] 魏永佩, 刘池阳. 位于巨型走滑断裂端部盆地演化的地质模型: 以苏丹穆格莱德盆地为例[J]. 石油实验地质, 2003, 25(2): 129-142. Wei Yongpei, Liu Chiyang. Geological model of the Mugland basin: an identical example of basin evolution at the end of giant strike-slip faults[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2003, 25(2): 129-142.
- [8] Genik G J. Petroleum geology of Cretaceous-Tertiary rift basins in Niger, Chad, and Central African Republic[J]. AAPG Bulletin, 1993, 77(8): 1405-1434.
- [9] 窦立荣, 潘校华, 田作基, 等. 苏丹裂谷盆地油气藏的形成与分布: 兼与中国东部裂谷盆地对比分析[J]. 石油勘探与开发, 2006, 33(3): 255-261. Dou Lirong, Pan Xiaohua, Tian Zuoji, et al. Hydrocarbon formation and distribution of rift basins in Sudan: a comparative analysis of them with rift basins in East China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2006, 33(3): 255-261.
- [10] 童晓光, 窦立荣, 田作基, 等. 苏丹穆格莱德盆地的地质模式和成藏模式[J]. 石油学报, 2004, 25(1): 19-24. Tong Xiaoguang, Dou Lirong, Tian Zuoji, et al. Geological mode and hydrocarbon accumulation mode in Muglad passive rift basin of Sudan[J]. Acta Petrolei Sinica, 2004, 25(1): 19-24.
- [11] Schull T J. Rift basins of interior Sudan: petroleum exploration and discovery[J]. AAPG Bulletin, 1988, 72(10): 1128-1142.
- [12] BP. Statistical review of world energy 2015 [DB/OL]. [2015-06-30]. <http://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html>.
- [13] 吴珍云, 尹宏伟, 汪新, 等. 裂谷盆地盐构造形成演化及油气成藏地质意义: 以苏丹红海裂谷盆地为例[J]. 石油学报, 2014, 35(5): 879-889. Wu Zhenyun, Yin Hongwei, Wang Xin, et al. Simulation of salt structure formation and evaluation of its geological significance to oil-gas accumulation: a case study of the Sudanese Red Sea rift basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2014, 35(5): 879-889.
- [14] McHargue T R, Heidrick T L, Livingston J K. Tectonostratigraphic development of the interior Sudan rifts, Central Africa[J]. Geodynamics of Rifting, 1992: 187-202.
- [15] Genik G J. Regional framework, structural and petroleum aspects of rift basins in Niger, Chad and the Central African Republic(C. A. R.)[J]. Tectonophysics, 1992, 213(1/2): 169-185.
- [16] Keller G R, Wendlandt R F, Bott M H P. Chapter 13 west and central african rift system[J]. Developments in Geotectonics, 2006, 25: 437-449.
- [17] 叶先灯. 苏丹 Melut 盆地构造、沉积和油气成藏研究[D]. 广州: 中国科学院研究生院, 2006. Ye Xiandeng. Study on tectonics, sedimentology and reservoirs in Melut basin, Sudan[D]. Guangzhou: The Graduate school of the Chinese Academy of Sciences, 2006.
- [18] 窦立荣, 肖坤叶, 胡勇, 等. 乍得 Bongor 盆地石油地质特征及成藏模式[J]. 石油学报, 2011, 32(3): 379-386. Dou Lirong, Xiao Kunye, Hu Yong, et al. Petroleum geology and a model of hydrocarbon accumulations in the Bongor Basin, the Republic of Chad[J]. Acta Petrolei Sinica, 2011, 32(3): 379-386.
- [19] 魏永佩. 苏丹穆格莱德盆地构造演化及油气赋存特点[D]. 西安:

- 西北大学,1999.
- Wei Yongpei. The structure evolution and petroleum significance in Muglad,Sudan[D]. Xi'an;Northwest University,1999.
- [20] 张亚敏. 苏丹国穆格莱德盆地构造特征及演化[J]. 西安石油大学学报;自然科学版,2008,23(3):38-42.
- Zhang Yamin. Structure characteristic and evolution in Muglad Basin of Sudan[J]. Journal of Xi'an Shiyou University; Natural Science Edition,2008,23(3):38-42.
- [21] 关欣. 苏丹被动裂谷盆地与渤海湾主动裂谷盆地沉积体系对比研究[D]. 武汉:长江大学,2012.
- Guan Xin. Sedimentary System of Passive Rift Basin in Sudan and comparative study of active rift basin in Bohai Bay[D]. Wuhan;Yangtze University,2012.
- [22] Guiraud R,Bosworth W,Thierry J,et al. Phanerozoic geological evolution of Northern and Central Africa;an overview[J]. Journal of African Earth Sciences,2005,43(1/3):83-143.
- [23] Fairhead J D. Mesozoic plate tectonic reconstructions of the central south Atlantic Ocean;the role of the West and Central African rift system[J]. Tectonophysics,1988,155(1/4):181-191.
- [24] 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.
- [25] 许长春. Bongor 盆地反转构造特征及其与油气聚集关系[D]. 北京:中国地质大学(北京),2012.
- Xu Changchun. The characteristics of inversion structures in Bongor Basin and its relationship with hydrocarbon accumulation [D]. Beijing;China University of Geosciences(Beijing),2012.
- [26] Salama R B. Rift basins of the Sudan[M]// Selley R C. African Basins-Sedimentary Basins of the World. Amsterdam;Elsevier,1997:105-149.
- [27] Chatterjee S,Goswami A,Scotese C R. The longest voyage; tectonic,magmatic,and paleoclimatic evolution of the Indian plate during its northward flight from Gondwana to Asia[J]. Gondwana Research,2013,23(1):238-267.
- [28] 索艳慧. 印度洋构造-岩浆过程:剩余地幔布格重力异常证据[D]. 青岛:中国海洋大学,2014.
- Suo Yanhui. Tectonic-magmatic processes of the Indian Ocean; evidence on the residual mantle Bouguer gravity anomaly[D]. Qingdao;Ocean University of China,2014.
- [29] Royer J Y,Patriat P,Bergh H W,et al. Evolution of the Southwest Indian Ridge from the late cretaceous (anomaly 34) to the middle Eocene (anomaly 20)[J]. Tectonophysics,1988,155(1/4):235-260.
- [30] 李江海,王洪浩,李维波,等. 显生宙全球古板块再造及构造演化[J]. 石油学报,2014,35(2):207-218.
- Li Jianghai,Wang Honghao,Li Weibo,et al. Discussion on global tectonics evolution from plate reconstruction in Phanerozoic[J]. Acta Petrolei Sinica,2014,35(2):207-218.
- [31] 孙海涛,钟大康,张思梦. 非洲东西部被动大陆边缘盆地油气分布差异[J]. 石油勘探与开发,2010,37(5):561-567.
- Sun Haitao,Zhong Dakang,Zhang Simeng. Difference in hydrocarbon distribution in passive margin basins of east and west Africa[J]. Petroleum Exploration and Development,2010,37(5):561-567.
- [32] 黄宝春,陈军山,易治宇. 再论印度与亚洲大陆何时何地发生初始碰撞[J]. 地球物理学报,2010,53(9):2045-2058.
- Huang Baochun,Chen Junshan,Yi Zhiyu. Paleomagnetic discussion of when and where India and Asia initially collided[J]. Chinese Journal of Geophysics,2010,53(9):2045-2058.
- [33] Greene L C,Richards D R,Johnson R A. Crustal structure and tectonic evolution of the Anza rift,northern Kenya[J]. Tectonophysics,1991,197(2/4):203-211.
- [34] Corti G. Continental rift evolution;from rift initiation to incipient break-up in the Main Ethiopian Rift, East Africa[J]. Earth-Science Reviews,2009,96(1/2):1-53.
- [35] Chorowicz J. The East African rift system[J]. Journal of African Earth Sciences,2005,43(1/3):379-410.
- [36] Maurina 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.
- [37] 艾桂梅,曾国寿. 世界主要产油国系列资料:非洲地区[M]. 北京:中国石油天然气总公司,1996:1-14.
- Ai Guimei,Zeng Guoshou. The world's leading oil producer series data;Africa[M]. Beijing,CNPC,1996:1-14.
- [38] 宋红日,窦立荣,肖坤叶,等. Bongor 盆地油气成藏地质条件及分布规律初探[J]. 石油与天然气地质,2009,30(6):762-768.
- Song Hongri,Dou Lirong,Xiao Kunye,et al. An exploratory research on geological conditions of hydrocarbon pooling and distribution patterns of reservoirs in the Bongor Basin[J]. Oil & Gas Geology,2009,30(6):762-768.
- [39] 欧阳文生,张红胜,王彤,等. 苏丹 Muglad 盆地大型油气藏储集特征[J]. 资源和产业,2006,8(2):67-70.
- Ouyang Wensheng,Zhang Hongsheng,Wang Tong,et al. The characteristics of large scale oil reservoir of Muglad basin in Sudan[J]. Resources & Industries,2006,8(2):67-70.
- [40] Harding T P. Petroleum traps associated with wrench faults[J]. AAPG Bulletin,1974,58(7):1290-1304.
- [41] 宋到福,何登发. 断层相的概念及应用[J]. 地球科学进展,2010,25(9):907-914.
- Song Daofu,He Dengfa. Fault facies and their application[J]. Advances in Earth Science,2010,25(9):907-914.
- [42] 贾义蓉,方乐华,李碧宁,等. 中非 Muglad 盆地 1/2/4 区块白垩系构造特征与油气分布[J]. 石油物探,2012,51(3):296-303,212.
- Jia Yirong,Fang Lehua,Li Bining,et al. Structural characteristics and hydrocarbon of cretaceous at 1/2/4 blocks in Muglad Basin, Central Africa [J]. Geophysical Prospecting For Petroleum,2012,51(3):296-303,212.
- [43] Dou Lirong,Cheng Dingsheng,Li Maowen,et al. Unusual high acidity oils from the Great Palogue Field,Melut Basin,Sudan[J]. Organic Geochemistry,2008,39(2):210-231.
- [44] 吕延仓,何碧竹,王秀林,等. 中非穆格莱德盆地福拉凹陷石油地质特征及勘探前景[J]. 石油勘探与开发,2001,28(3):95-98.
- Ly Yancang,He Bizhu,Wang Xiulin,et al. Petroleum geologic characteristics and exploration prospect of Fula sub-basin in Muglad basin [J]. Petroleum Exploration and Development,2001,28(3):95-98.
- [45] 范秋海,吕修祥,李伯华. 走滑构造与油气成藏[J]. 西南石油大学学报:自然科学版,2008,30(6):76-80.
- Fan Qiuhai,Lv Xiuxiang,Li Bohua. Strike-slip fault and the hydrocarbon reservoir formation[J]. Journal of Southwest Petroleum University; Science & Technology Edition,2008,30(6):76-80.