

李斐, 张彪. 西非盐下裂谷构造特征及其地质意义[J]. 海洋地质前沿, 2020, 36(12): 49-55.

西非盐下裂谷构造特征及其地质意义

李斐, 张彪

(中国海洋石油国际有限公司, 北京 100027)

摘要: 西非海岸盆地盐下裂谷随着近年来油气新发现显示出巨大的勘探潜力。基于区域地震资料, 对盐下裂谷构造层系开展解释, 并对裂谷构造特征开展了深入探讨。研究表明, 西非盐下盆地具有早期裂陷、晚期拗陷的构造特征。平面上具有内裂谷带—中央隆起带—外裂谷带东西向隆拗相间的一级构造格局, 在外裂谷带又识别出了一系列凸起和凹陷二级构造单元。裂谷隆拗格局受断层控制, 具有“东西分带、南北分段”的平面特征。裂谷期构造特征指示出西非陆内裂谷作用发生具有北早南晚、持续时间北长南短板块构造意义。同时裂谷演化过程中衍生重要的含油气系统, 具有重要的油气勘探意义。

关键词: 西非海岸盆地; 盐下裂谷; 裂陷期; 拗陷期; 隆拗格局

中图分类号: P618.13

文献标识码: A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2020.046

0 引言

西非海岸盆地群由北向南包含里奥穆尼、加蓬、下刚果、宽扎盆地等多个含油气盆地, 这些盆地均为典型的裂谷和被动陆缘叠合盆地^[1-4]。盆地油气资源丰富, 勘探活动也非常活跃, 油气发现报道也屡见不鲜。近年来随着盐下地球物理技术的突破, 盐下裂谷盆地已经成为该地区油气增长新的接替领域, 涌现出像加蓬海域 Leopard 超大型气田^[5]、宽扎盆地 Cameia 和 Lontra 大型油田发现^[6]。西非盐下裂谷盆地展现出巨大的勘探潜力, 因此, 对于盐下裂谷盆地的研究具有重要意义。本文主要利用地震资料, 在重磁资料的辅助下, 开展了西非海岸盆地盐下裂谷构造层系的识别与解释, 探讨了裂谷构造特征, 阐述裂谷演化的板块构造意义与油气勘探地质意义, 以期对西非盐下裂谷构造认识提供参考。

1 盐下裂谷沉积演化阶段

在地质历史时期, 西非板块主要经历了 3 期构造演化阶段^[1-3, 7]。第 1 阶段为晚侏罗世至早白垩世裂谷演化阶段, 该阶段以陆内裂谷作用为主, 发育陆相充填体系。早白垩世末期阿普特期为海陆过渡期, 区域上沉积一套厚层状盐岩。晚阿普特期开始板块漂移演化阶段, 西非海岸盆地开始接受巨厚的海相沉积。本文重点开展盐下裂谷阶段分析。根据前人研究成果表明, 西非盐下裂谷盆地可分为 2 个充填序列^[7-9]: 早期裂陷阶段以坳陷构造、同沉积断层发育为特征的伸展期盆地充填。晚期拗陷阶段断层停止活动, 以区域整体沉降为主, 发生填平补齐作用。

2 盐下裂谷构造层特征与识别

本文以西非宽扎、下刚果、加蓬和里奥穆尼 4 个盆地为研究靶区, 在重磁资料的辅助下, 利用区域地震资料, 对盐下裂陷期与拗陷期 2 个构造层开展识别与解释。总结盐下裂谷构造层系分布特征。

2.1 裂陷期地层识别与特征

西非海岸盆地裂陷期地层以冲积扇、河流相沉积为主, 岩性主要为砂岩、砂砾岩、泥岩等组合, 地震相表现出层状、似层状, 振幅强弱变化的断续反

收稿日期: 2020-05-07

作者简介: 李斐(1981—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事海外油气勘探评价与管理研究。E-mail: lifei3@cnoc.com.cn

射。裂陷期之下为前白垩系变质基底,地震相整体表现出空白或杂乱反射特征。两者之间反射界面较为清晰,在地震剖面上能够较好的识别。结合重磁资料,对基底构造高低解释具有很好的指导意义。重力拟合的基底与地震解释的基底面变化趋势和总体格局基本具有一致性。

盐下裂陷期沉积于区域张裂构造环境中,具有

典型的半地堑结构,是构成裂陷盆地的原始“砌块”。半地堑通常被边界正断层所控制,靠近断层的陡侧基底沉降最深、沉积最厚。向远离边界断层的方向基底逐渐抬高、沉积厚度变薄并最终尖灭。空间上厚度由厚变薄,呈现出箕状形态特征。在西非盐下区域地震剖面上能够识别出明显的箕状形态特征,代表着裂陷期地层沉积(图1a)。

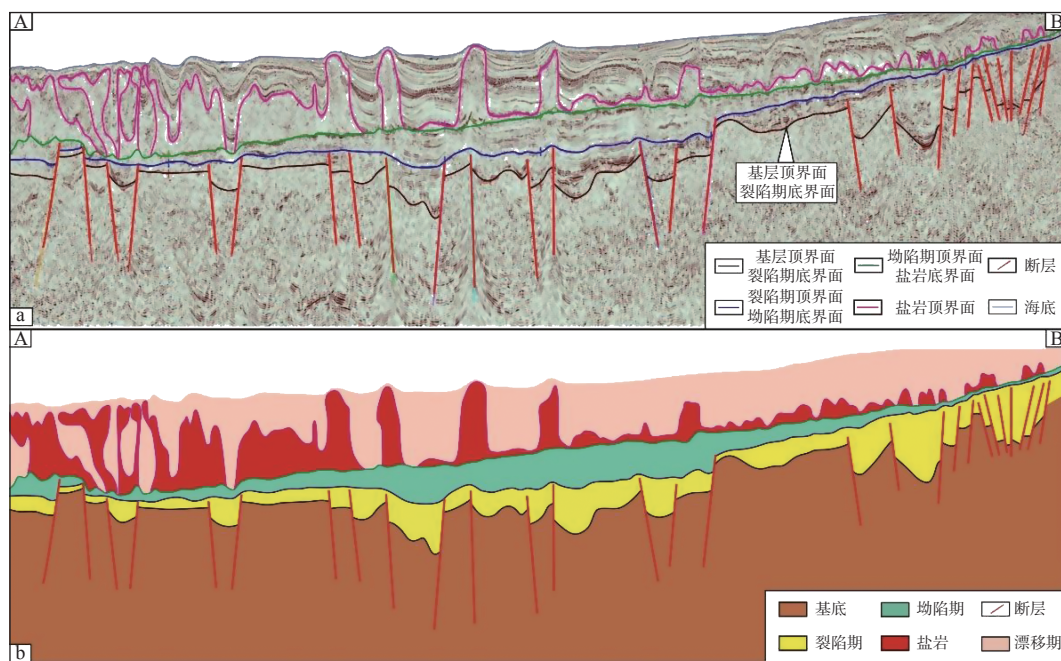


图1 西非海岸盆地区域裂谷期构造层界面识别典型剖面

Fig.1 Typical section of regional rift tectonic sequence in West Africa coastal basin

2.2 坳陷期地层与识别

裂陷作用结束后,盆地进入坳陷期,坳陷期基本是一个填平补齐的过程。受盆地整体沉降影响,由陆向海方向,地层厚度表现为由薄变厚再变薄的过程,总体呈碟状形态。在宽扎盆地北部、下刚果盆地南部的地震剖面上表现出明显的碟状地层形态,视为坳陷期地层典型特征(图1b)。

坳陷期在沉积过程中对下伏地层有削截的作用,其底界面为顶超面,下伏裂陷期地层地震反射终止于该界面上。同时坳陷内地层在充填过程中上超底界面之上。该界面表现出的“上超下截”特征成为坳陷底界面识别的重要依据。

坳陷期沉积结束后,盆地进入过渡期演化阶段。该时期西非海岸盆地区域上以厚层状盐岩沉积为主。盐岩为密度异常体,与下伏坳陷地层之间产生明显的反射界面。盐底界面或坳陷地层顶界面连

续性较好,呈现平行或似平行特点,易于识别。

3 裂谷构造特征与单元划分

根据西非盐下裂谷期不同构造层的识别特征,在区域构造背景的制约下,对宽扎、下刚果、加蓬盆地区域地震测线进行了基底顶界面(裂陷期底界面)、裂陷期顶界面(坳陷期底界面)、坳陷期顶界面(盐岩底界面)3个关键层位及断层开展解释。分析基底、裂陷期和坳陷期构造特征,并在此基础上对裂谷构造单元进行划分,进一步厘清西非盆地盐下裂谷构造格局。

3.1 裂谷构造特征

3.1.1 基底构造特征

基底构造格局对裂谷期沉积演化具有明显控制作用,一定程度上控制了裂谷沉积的空间展布^[4,9-10]。在重磁资料指导下,对基底界面进行解释成图。研

究表明西非海岸盐下盆地基底具有两隆两拗的构造格局, 平面上具有“东西分带、南北分段”的特征。东西方向上, 隆起和拗陷呈条带状展布, 不同的隆起区分隔不同的凹陷, 且隆起与拗陷均受断裂控制^[11]。南北方向上, 受 NNE 向转换断层的影响, 各盆地间又被划分为不同的块体, 又呈现出“南北分段”的构造特征(图 2a)。

3.1.2 裂陷期构造特征

裂陷沉积期, 盆地内以碎屑岩充填为主, 在不考虑地层剥蚀量的前提下, 裂陷期地层厚度一定程度上能够反映该时期的隆拗格局。宽扎至里奥穆尼盆地裂陷期地层厚度整体呈现“东西分带”的特征, 这一特征与基底隆拗格局具有一致性, 即基底的古地貌对裂陷期沉积具有明显的控制作用。由北向南厚度具有减薄的趋势, 里奥穆尼至下刚

果盆地沉积厚度较大, 反映裂陷期该地区可容纳空间大, 疑为深拗。而宽扎盆地地层厚度最薄, 代表该时期下伏基底为隆升区, 沉积作用较弱(图 2b)。

3.1.3 拗陷期构造特征

拗陷期构造格局整体表现出填平补齐的过程。其构造格局一定程度上继承了裂陷期隆拗面貌, 同时受到基底热沉降控制, 在平面沉积厚度上呈现明显差异。该时期宽扎盆地总体构造位置较高, 其南部地层普遍较薄。而下刚果盆地南部地层最厚, 为拗陷期的沉积中心。下刚果盆地北部至加蓬盆地, 拗陷期地层又有减薄趋势。总体来说, 南北方向上, 从宽扎盆地到加蓬盆地, 拗陷期厚度由薄变厚, 再变薄, 反映了裂陷期和基底古构造格局由高变低再变高的变化规律(图 2c)。

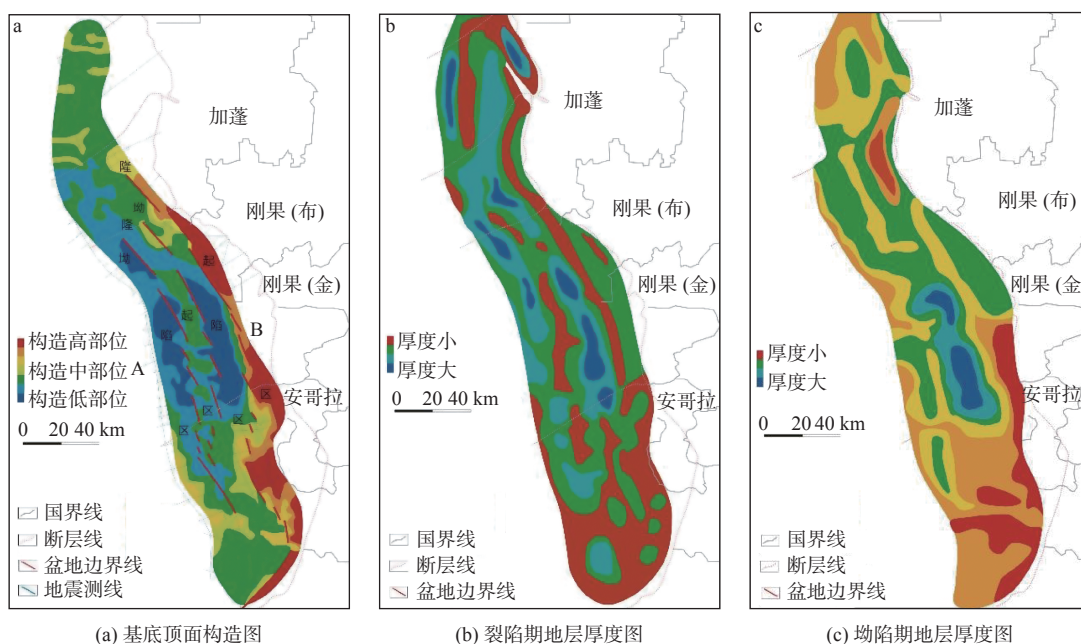


图 2 西非海岸盆地盐下裂谷构造特征图

Fig.2 Structural characteristics of pre-salt rift in West African coastal basin

3.1.4 断裂特征

裂谷演化过程中呈现不同性质和级别的断裂体系。从断裂性质角度分析, 存在 2 类性质断裂体系, 分别是控制裂陷地层展布正断层和转换断层(图 3)。转换断裂在平面上呈 NE—SW 走向, 推测是裂谷拉张演化过程中南北速度差异导致。转换断层使得基底隆拗格局平面表现出一定的断续性(图 3a)。在裂谷演化中, 发育一系列 NW—SE 向展

布的正断层。正断层又存在不同的级别, 其中一级断裂一般为向海倾斜的断层, 发育在基底隆升边缘, 控制着裂陷期地层的规模和展布。发育规模较大, 在地震剖面上易于识别。二级断裂体系一般发育在裂谷带内, 走向与一级断裂基本一致, 倾向存在向海、向陆 2 个方向。二级断裂体系控制着裂谷带内垒堑结构, 对局部地层厚度具有明显的控制作用(图 3b)。

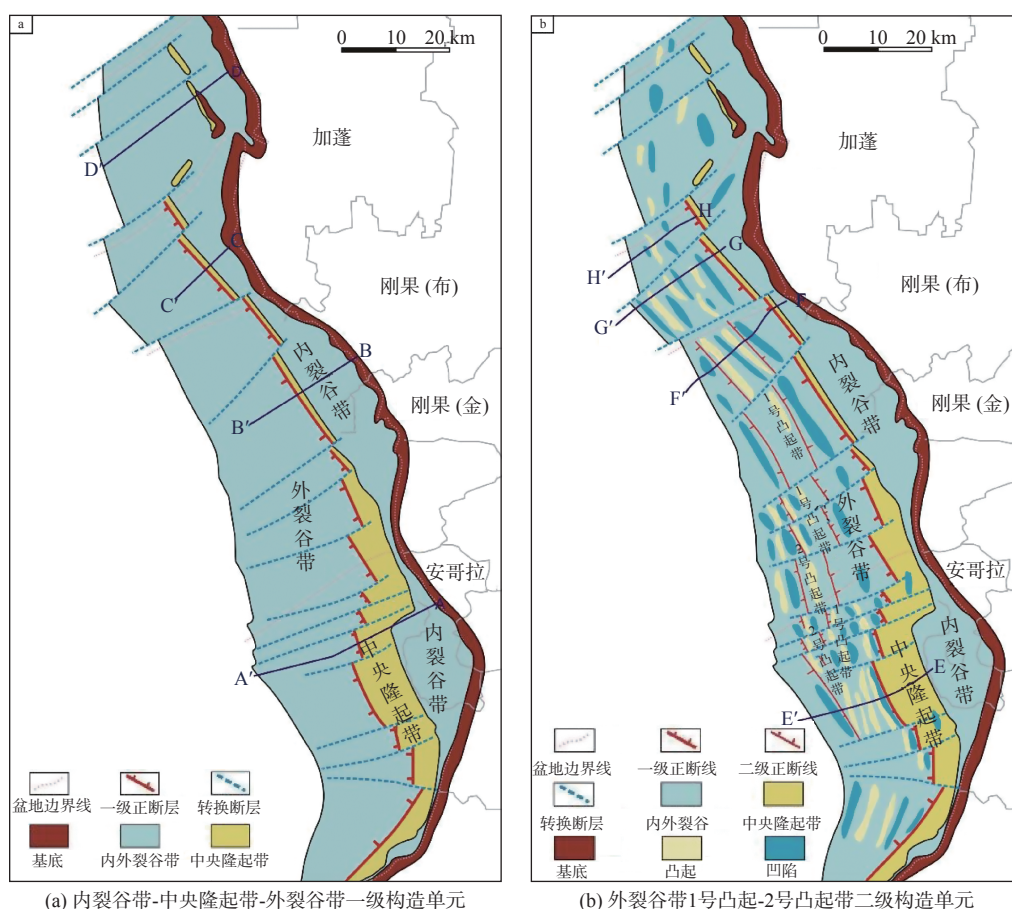


图3 西非海岸盆地裂谷平面构造单元划分

Fig.3 Structural units of syn-rift in West African coastal basin

3.2 构造单元划分

在西非盐下裂谷构造特征研究基础上,结合前人通过重磁资料对西非海岸盆地隆坳格局判定基础上,对构造单元进行进一步厘定与划分,确定西非盐下盆地基底隆坳特征,识别出基底隆起和基底坳陷。研究认为,宽扎、下刚果盆地、加蓬盆地存在一个统一的中央隆起,该隆起将盆地分为内裂谷带和外裂谷带。在外裂谷带坳陷里,又可识别出次级的凸起和凹陷,不同的凸起组合成为二级构造带。

3.2.1 一级构造单元

基底构造特征显示宽扎至加蓬盆地存在一个统一的中央隆起带,具有一致的一级构造单元特征。中央隆起带将各盆地分隔为内裂谷盆地和外裂谷盆地。形成了由“内裂谷带-中央隆起带-外裂谷带”组成的东西向隆坳相间的构造格局,平面上具有“东西分带”的特征(图3a)。

过宽扎盆地内、外裂谷带的区域剖面显示,盆地内存在1个明显的中央隆起带,即中央台地(Central Platform)(图4a)。中央台地将宽扎盆地分为外宽扎次盆和内宽扎次盆。下刚果盆地区域剖面也呈现类似特征。剖面显示出盐下3个一级构造单元,中央隆起带 Likouala 高地将2个次盆分隔开来。西南方向为下刚果深水盆地,即外裂谷盆地,与中央隆起带以深大断裂为界,发育一系列向海倾斜的正断层(图4b)。东北向陆方向为下刚果浅水盆地,即内裂谷盆地。过南加蓬盆地内外裂谷带的区域剖面显示盐下基底高地干巴地垒将加蓬盆地一分为二(图4c),向陆一侧为加蓬内次盆(维陶地堑),向海一侧为加蓬外次盆(登泰尔地堑)。北加蓬盆地区域剖面上明显呈现出兰巴雷内地垒为一级中央隆起。兰巴雷内地垒将北加蓬盆地分为内次盆和外次盆。剖面上可以看出,外次盆范围远比内次盆大的多,现今海岸线向陆一侧,至兰巴雷内地垒的坳陷部分,均属于外次盆(图4d)。

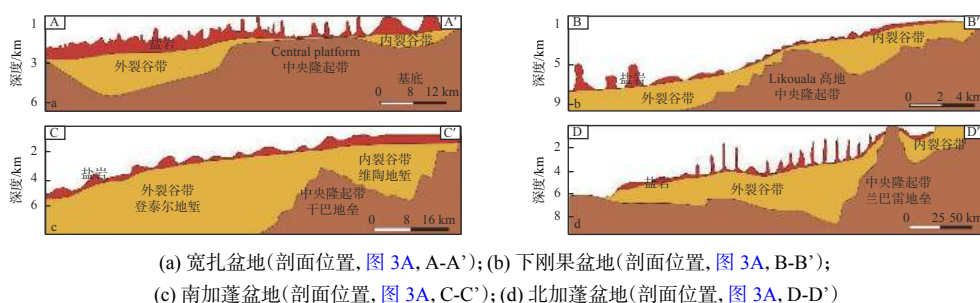


图 4 西非海岸盆地内裂谷带—中央隆起带—外裂谷带一级构造单元典型剖面

Fig.4 Typical sections of the first-order tectonic units of Inner sub-basin-Central uplift-Outer sub-basin in West African coastal basin

3.2.2 二级构造单元

在宽扎盆地、下刚果盆地、加蓬盆地外裂谷带中均可识别出 2 个次级凸起, 本文定名为①号凸起和②号凸起。凸起由北向南组合成为凸起带, 自东向西分别为①号凸起带、②号凸起带, 具有“东西分带”特征。南北方向上凸起带被区域转换断层切割, 平面上呈现“南北分段”的特征(图 3b)。

过宽扎盆地区域剖面显示, 外裂谷带内可以识别出 2 个凸起带(图 5a)。①号凸起带位于紧邻中央隆起带边界断层下降盘西侧, 其楔状地塬特征明显。紧邻断层下降盘为厚层的裂陷期地层, 向凸起带急速变薄, 古隆起特征清楚。②号凸起带位于①号凸起带以西的构造高地上, 两侧均为反射特征相对较好的深部凹陷。

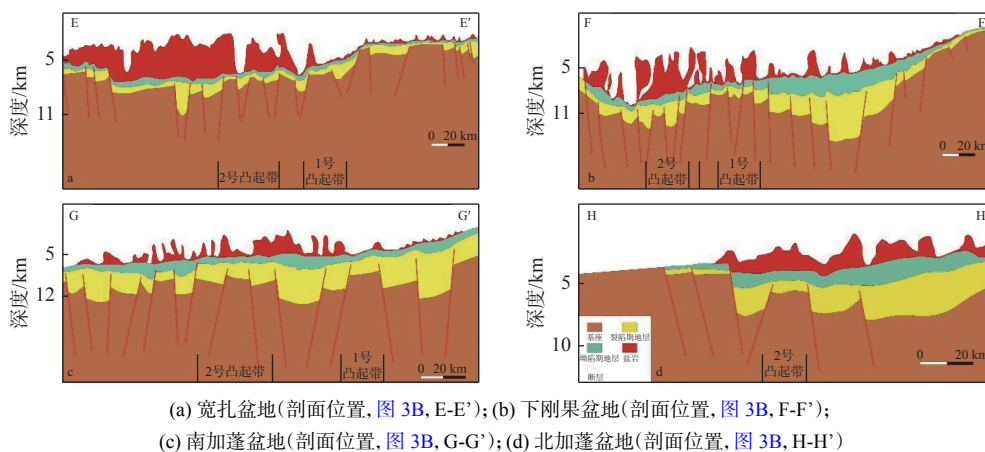


图 5 西非海岸盆地外裂谷带二级构造单元典型剖面

Fig.5 Typical sections of second-order structural units in outer sub-basin in West African coastal basin

下刚果外裂谷盆地亦存在 2 个基底凸起, 整体构造格局与宽扎盆地略有不同(图 5b)。靠近中央隆起带边界断层西侧存在一深凹陷, 在深凹陷的西侧, 裂陷期地层明显减薄, 为基底古隆起, 即①号凸起带, 该凸起带规模较大。②号凸起带位于①号凸起带西侧, 为断层控制的垒块, 该凸起规模较小, 向西以斜坡形式逐渐向洋壳过渡。

过南加蓬次盆外裂谷带测线上可识别 2 个凸起带(图 5c)。①号凸起带为断层控制的垒块, 东侧紧邻中央隆起带边界断层下降盘深凹陷, 西侧为断层控制的地塬, 上覆裂陷期地层整体厚度较两侧薄。

②号凸起带亦为一断层控制的垒块, 规模比①号凸起带更大, 地震剖面上, 该凸起带地震反射空白, 反映为基底高地。垒块两侧地震反射清楚, 为裂陷期地层。北加蓬次盆外裂谷带剖面上具有同样的二级构造格局(图 4b, 5c)。凸起均为受断裂控制的构造垒块, 基底高地特征十分清楚, 凸起两侧以斜坡形式向凹陷过渡。

4 裂谷构造沉积演化

自晚侏罗世开始, 冈瓦纳大陆南部区域开始发

生裂谷作用。该作用使得在西非海岸一侧形成一系列裂谷盆地。西非海岸盆地经历了相似的裂谷演化阶段,但是在裂谷发育规模、沉积充填仍然存在一定差异。

基底隆坳格局显示西非海岸盆地由北向南发育中央隆起带,中央隆起带将盆地分为内、外 2 个裂谷带。中央隆起带在宽扎盆地发育规模较大,其中内裂谷带为内宽扎盆地,外裂谷带为外宽扎盆地(图 3、4)。根据隆起带上地层发育特征推断,在裂谷演化早期,隆起带露地表,可提供物源,两侧的裂谷带内发育冲积扇、河流相沉积。外宽扎盆地内的次级凸起区局部构造高,为碳酸盐岩发育区,而相邻的坳陷为深湖相泥岩沉积。坳陷期地层厚度整体较薄,受裂陷期格局继承性影响,在局部高部位可能发育碳酸盐岩沉积。

在下刚果盆地,紧邻中央隆起带西侧为一深坳陷,坳陷内地层厚度大。对比西非海岸裂谷地层厚度,推测为当时的沉积中心(图 3、4)。深坳陷处发育湖相泥岩、页岩为烃源岩,斜坡与构造高部位可发育砂岩、碳酸盐岩。该盆地在坳陷期仍是当时的沉积中心,坳陷期厚度大。沉积中心以西,地层厚度在呈现一定差异,这种差异受到裂陷期隆坳格局的影响。在凸起部位地层厚度相对较薄,向凸起两侧深洼部位,厚度又呈现加大趋势。

在南加蓬次盆,中央隆起带西侧为深坳陷,发育深湖相泥页岩。外裂谷带的 2 个次级凸起规模相对较小,可能不利于高能相带的碳酸盐岩沉积。坳陷期沉积也受到裂陷期隆坳格局的影响,存在 2 个局部沉积中心,厚度较大。

北加蓬次盆内裂谷带为 2 个基底高地夹持下的坳陷,为局部沉积中心。外裂谷带沉积范围很小。坳陷期表现出一个湖盆扩张的特征,盆地西边界向深海方向扩张,沉积范围较裂陷期明显变大。沉积中心由早期的内裂谷带转移至外裂谷带。

5 地质意义

5.1 板块构造意义

西非海岸盆地盐下裂谷沉积是南段大西洋伸展构造作用的产物^[9,12]。在区域张应力作用下,岩石圈发生大规模的沉陷,形成裂谷盆地。南部宽扎

至北部里奥穆尼盆地在裂谷盆地内构造格局呈现不同的变化特征,而这些变化特征正是南大西洋裂解过程的时空差异表现。空间上沉积厚度变化受控于基底隆坳格局,地层厚度大的区域反映出古构造背景为坳陷,而坳陷是裂谷作用的产物。因此,西非盐下裂谷期地层厚度变化反映出裂谷活动的先后顺序和作用时间长短。裂陷期地层厚度由北向南呈现减薄趋势,宽扎盆地地层厚度最薄。说明裂谷作用在西非北段优先于南段发生,且持续时间较长。从时间厘定角度分析,北部裂谷活动始于纽康姆期,而南部则在巴裂姆期。裂谷活动时间也存在北长南短的特征,北部盆地经历了纽康姆和巴列姆 2 期裂陷活动,而南部盆地仅经历了巴列姆一期裂陷活动。此外,坳陷期构造格局反映出区域沉降活动规律。该时期沉积中心位于下刚果盆地,地层厚度最大,反映出下刚果盆地在坳陷期处于长期稳定的区域沉降中心。

5.2 油气地质意义

西非盐下裂谷层系已成为油气勘探的重点领域,在裂谷阶段构造演化中衍生了重要的含油气系统^[4,7,10,13-15]。首先,从圈闭类型角度来说,在裂陷期演化过程中,发育地堑—地垒系统。地堑结构与断层组合可以形成断块圈闭、滚动背斜等多样圈闭类型,通常为有利的勘探部位。其次,裂谷演化过程中能够形成良好的生储盖组合空间配置关系。在裂陷期,一级构造单元的中央隆起带常为物源供给区,在下倾低部位发育河流、三角洲等有利储层发育相带,而隆起带两侧深部坳陷区内为有利烃源岩发育区。两者在空间上容易形成旁生侧储、下生上储的油气成藏组合。此外,在外裂谷带内二级凸起区常发育高能相带的碳酸盐岩储层,可成为有利的勘探目标。在坳陷演化阶段,西非盆地区域上沉积一套深湖相泥岩、页岩,为优质烃源岩^[4,10,15],该套烃源岩通常为斜坡部位和构造高部位的砂岩、碳酸盐岩提供油源,形成有利勘探目标。

6 结论

(1) 西非盐下裂谷盆地识别出 2 个充填序列,具有早期裂陷、晚期坳陷的构造特征。基底之上的裂陷期地层呈现箕状形态,具有典型的半地堑结构,

边界正断层控制。裂陷期沉积之后进入坳陷演化阶段。该阶段表现为填平补齐过程, 断裂活动趋于停滞, 受整体沉降影响, 呈现碟状地层形态。

(2) 基底构造格局对裂谷期沉积演化具有明显控制作用, 裂陷期和坳陷期构造特征与基底呈现一致的变化特征。裂谷特征呈现隆坳构造格局, 具有内裂谷带—中央隆起带—外裂谷带东西向隆坳相间的一级构造格局, 同时在外裂谷带又识别出了一系列凸起和凹陷二级构造单元。受 NNE 向转换断层和 NNW 向正断裂控制, 平面上具有“东西分带、南北分段”的特征。

(3) 西非海岸盆地盐下裂谷构造特征指示南段大西洋伸展构造演化过程。裂谷作用在西非北段优先于南段发生, 且持续时间较长, 裂谷活动时间也存在北长南短的特征。与此同时, 盐下裂谷沉积体系衍生出重要的含油气系统, 成为油气增长新的接替领域, 具有重大的油气勘探潜力。

参考文献:

- [1] 汪伟光, 童晓光, 张亚雄, 等. 南大西洋重点被动大陆边缘盆地油气地质特征对比[J]. *中国石油勘探*, 2012, 17(3): 62-69.
- [2] 冯杨伟, 屈红军, 张功成, 等. 西非被动大陆边缘构造—沉积演化及其对生储盖的控制作用[J]. *海相油气地质*, 2010, 15(3): 45-51.

- [3] 熊利平, 王骏, 殷进垠, 等. 西非构造演化及其对油气成藏的控制作用[J]. *石油与天然气地质*, 2005, 26(5): 641-646.
- [4] 孙自明, 何治亮. 裂谷与被动陆缘叠合盆地的盐构造与油气成藏: 以西非下刚果—刚果扇盆地和宽扎盆地为例[J]. *石油实验地质*, 2016, 38(3): 287-292.
- [5] 崔早云, 吴培康, 柳永杰. 中国海油海外勘探“十二五”进展与“十三五”展望[J]. *中国石油勘探*, 2016, 21(4): 13-18.
- [6] 朱伟林, 崔早云, 吴培康, 等. 被动大陆边缘盆地油气勘探新进展与展望[J]. *石油学报*, 2017, 38(10): 1099-1109.
- [7] 冯国良, 徐志诚, 靳久强, 等. 西非海岸盆地群形成演化及深水油气田发育特征[J]. *海相油气地质*, 2012, 17(1): 23-28.
- [8] 鲁宝亮, 王万银, 杜向东, 等. 西非陆缘盆地中南段构造与沉积研究[J]. *海洋科学进展*, 2015, 33(3): 414-428.
- [9] 刘亚雷, 刘迎斌, 李雷, 等. 西非下刚果盆地、加蓬盆地裂陷期构造特征对比研究[J]. *世界地质*, 2019, 38(2): 389-396.
- [10] 孙自明. 裂谷与被动陆缘叠合盆地的盐构造与油气成藏[C]// 中国石油地质年会. 2013.
- [11] 潘冬, 陈孝端, 张金龙. 加蓬盆地盐下断裂构造样式及展布特征[J]. *科技资讯*, 2014, 12(27): 244-246.
- [12] 张庆莲, 侯贵廷, 潘校华. 中西非裂谷系形成的动力学机制[J]. *地质力学学报*, 2018, 24(2): 29-36.
- [13] 田作基, 潘校华, 黄先雄, 等. 中西非被动裂谷盆地石油地质特征及勘探实践[C]// 成都: 跨国油气勘探开发国际研讨会, 2005.
- [14] 李旭. 西非地区的石油地质特征[J]. *石油天然气学报(江汉石油学报)*, 2006(3): 230-231.
- [15] 刘亚雷, 柳永杰, 李梅, 等. 西非宽扎盆地盐下构造特征及成藏条件分析[J]. *断块油气田*, 2017, 24(1): 1-4.

STRUCTURAL CHARACTERISTICS OF WEST AFRICA IN PRE-SALT RIFT STAGE AND THEIR GEOLOGICAL SIGNIFICANCE

LI Fei, ZHANG Biao

(CNOOC International Ltd., Beijing 100027, China)

Abstract: Recent hydrocarbon discoveries have proved that the pre-salt rift stage of the West Africa coastal basin has great oil and gas potential. Based on the data from the regional seismic surveys, this paper made a detailed study on the structural patterns of pre-salt rift. It shows that the pre-salt rift in West Africa is composed of two stages: early rift stage and later depression stage. On the plane, several first-order tectonic units, such as the Inner sub-basin, the Central uplift and the Outer sub-basin, are identified. Within the outer sub-basin, there occur alternated secondary tectonic units, which includes uplifts and depressions under the control of faulting and the pattern of east-west zonation and north-south segmentation are rather clear. The structural patterns of pre-salt rift stage indicate that the rifting started earlier and lasted longer in the north comparing to the south. The evolution of rifting has great significance to the generation of petroleum system and the pre-salt-rift stage is a favorable target for hydrocarbon exploration.

Key words: West Africa coastal basin; pre-salt rift; syn-rift stage; depression stage; structural characteristic