

doi: 10.12029/gc20210108

洛怡, 李江海, 杨梦莲. 2021. 南大西洋西非岸盆地群构造、沉积演化对比[J]. 中国地质, 48(1): 120–128.

Luo Yi, Li Jianghai, Yang Menglian. 2021. A comparative study of tectonic and sedimentary evolution of West African coastal basins in the south Atlantic Ocean region[J]. *Geology in China*, 48(1):120–128(in Chinese with English abstract).

南大西洋西非岸盆地群构造、沉积演化对比

洛怡, 李江海, 杨梦莲

(造山带与地壳演化教育部重点实验室, 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871)

摘要:非洲西部海岸盆地群经历了裂谷期、同裂谷期和漂移期构造演化阶段, 构造演化和沉积充填有一定的相似性, 但是由于后期局部构造和差异沉积的影响, 现今盆地发育的构造样式和沉积建造有一定区别, 导致勘探效果有较大的差异。本文通过对比南大西洋赤道段转换型、中段含泥型、中段含盐型和南段火山型盆地的综合柱状图, 加上对尼日尔三角洲盆地和下刚果盆地进行平衡剖面恢复, 探讨西非岸三段四类盆地的特征, 以求对盆地的勘探工作有所帮助。赤道段转换型盆地在阿普特期和阿尔比期的裂谷阶段完成了湖泊、河流等陆相沉积到浅海碳酸盐岩沉积的转换, 未发育盐岩。中段含泥盆地巨厚的新生代阿ката组泥岩为滑脱层, 在差异负载作用下, 泥岩层发生变形。中段含盐盆地在阿普特期, 由陆相沉积过渡为浅海碳酸盐岩沉积。阿普特期盐岩层在差异负载和重力滑脱作用下流动变形, 形成了伸展、底辟和挤压构造带。南段火山型盆地以裂谷期发育的溢流相玄武岩和凝灰岩为特征, 发育典型的向海倾斜反射体。

关键词:南大西洋; 构造沉积演化; 被动大陆边缘; 平衡剖面恢复

中图分类号: TE121 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000–3657(2021)01–0120–09

A comparative study of tectonic and sedimentary evolution of West African coastal basins in the south Atlantic Ocean region

LUO Yi, LI Jianghai, YANG Menglian

(Key Laboratory of Orogenic Belts and Crustal Evolution, Ministry of Education, School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: Basins along West African coast have certain similarities in structure and evolution since they have all experienced pre-rift, rift and drift period, but there also exist differences in present tectonic and sedimentary patterns due to the influence of local events, which leads to different exploration results. In order to summarize characteristics of these basins, the authors compared the comprehensive lithologic column diagrams and restored balanced cross-sections of Niger delta basin and lower Congo basin. The results are as follows. 1) Basins in the equatorial segment have transferred from continental facies such as lacustrine facies and fluvial facies to neritic facies, and there exist no salt deposits in this kind of basins. 2) Niger delta basin is characterized by thick Cenozoic Akata Formation, which is a detachment layer and has been deformed under differential load. 3) The salt-bearing basins

收稿日期: 2018–09–21; 改回日期: 2019–04–11

基金项目: 国家科技重大专项“南大西洋两岸盆地分析与油气资源评价”(2016ZX05033–002, 2016ZX05033–001)资助。

作者简介: 洛怡, 女, 1995年生, 博士生, 地质学专业; E-mail: yi.luo@pku.edu.cn。

in central segment experienced a transition period in Aptian stage, within which sedimentary environment transferred from continent to marine environment. The Aptian salt rocks migrated under the differential load and gravity slippage and divided whole basin into three domains, i.e., extensional domain, salt diapir and contractional domain. 4) The volcanic type in the southern segment is characterized by intense volcanism and extensive development of SDRs.

Key words: south Atlantic; tectonic and sedimentary evolution; passive continental margin; Balanced cross-section

About the first author: LUO Yi, female, born in 1995, doctor candidate, majors in geology; E-mail: yi.luo@pku.edu.cn.

Fund support: Supported by National Science and Technology Major Project (No. 2016ZX05033-002, No. 2016ZX05033-001).

1 引言

近些年来,南大西洋两岸一直是油气勘探的热点,南美东侧陆缘的大坎坡斯盆地以及西非岸的尼日尔三角洲、下刚果等盆地持续获得世界级的勘探成果(陶崇智等,2015)。非洲西岸典型的被动陆缘盆地,从北到南依次是利比里亚盆地、科特迪瓦盆地、杜阿拉盆地、穆尼盆地、尼日尔三角洲盆地、加蓬盆地、下刚果盆地、宽扎盆地、纳米比亚盆地和西南非洲沿海盆地。伴随着南大西洋的开裂,该盆地群经历了裂谷期、同裂谷期和漂移期等构造演化阶段,发育相似的沉积相(裂谷期湖相和漂移期海相),具有相似的生储盖条件。但是由于后期局部构造和差异沉积的影响,现今盆地发育的构造样式和沉积建造有一定区别,形成了不同的成藏组合,致使不同盆地的勘探效果有较大差异。前人对该区域盆地的研究主要集中在单个或者单类盆地沉积、构造及油气成藏特征的研究,缺乏从盆地群尺度上的对比和总结。本文以前人对南大西洋西非岸各盆地的研究为参考,根据综合柱状图和平衡剖面恢复结果,将南大西洋西非岸三段四类被动陆缘盆地:赤道段转换型盆地、中段含泥型盆地、中段含盐型盆地、南段火山型盆地中典型盆地的构造、沉积特征以及演化史进行对比,以求对盆地的勘探工作有所帮助。

本文主要运用平衡剖面技术来反演各盆地演化史。平衡剖面技术的基本原理是物质守恒(Bally et al., 1983; Elliott et al., 1983),以剖面上的地形变形符合平面应变条件为前提,按照面积不变或者长度不变的几何学平衡原则进行恢复(Woodward et al., 1963; Dahlstrom et al., 1969)。自从1969年被Dahlstrom成功应用于阿尔伯特油田以来,经过不断的发展,目前已成功被推广至逆冲推覆、伸展、反转和盐底辟构造的形成演化中(范增辉等,2018)。本

文选取了南大西洋中段尼日尔三角洲盆地和下刚果盆地中与构造走向垂直的剖面进行构造重建,通过弯滑机制去断距、厚度趋势法剥蚀补偿、去压实矫正等步骤,利用2Dmove软件对盆地中的挤压区、底辟区和伸展区的构造进行反演,分析研究各个时期构造运动应力强弱、构造复合叠加、盐岩相关构造发育变形以及其对构造格局、沉积控制作用。

2 南大西洋开裂背景

南大西洋北起10°N 马拉松断裂带,南至布韦三联点,中间发育24个大的转换断层,从北向南可分为四段:赤道段、中段、南段以及福克兰段。赤道段和中段之间以罗曼什断裂带为界,中段延伸至沃尔维斯和里奥格兰德火山岩带,南段以福克兰—厄加勒斯断裂带为界与福克兰段相隔(Moulin et al., 2010)。不同段发育有不同类型的被动陆缘盆地。赤道段转换型盆地包含利比里亚盆地和科特迪瓦盆地;中段含泥型盆地以尼日尔三角洲盆地为代表;中段含盐型盆地是油气勘探的重点区域,包括加蓬盆地、下刚果盆地和宽扎盆地。南段火山型盆地以西南非洲海岸盆地为代表(图1)。

190 Ma,南美洲和非洲还是一个统一的整体——前裂谷克拉通,之后最南端的福克兰段开始发育裂谷,并向北迁移。约150 Ma,裂谷迁移至南段。大约130 Ma,裂谷向北延伸至沃尔维斯海岭和里奥格兰德海岭的南部,在Tristan地幔热柱的影响下,爆发了大规模的岩浆活动——Parana-Etendeka的岩浆活动,形成了沃尔维斯脊和里奥格兰德脊火山岩带(Torsvik et al., 2009)。南大西洋持续开裂,到104 Ma,张裂一直向北扩张至贝宁海槽,南美洲和非洲大陆最终破裂,南大西洋完全张开。阿普特早期,由于南大西洋和北大西洋还没有连通,受沃尔维斯脊和里奥格兰德脊的阻隔,南大西洋中段处于一个局限沉积环境,沉积了一套分布范围大、沉积厚度大

的蒸发岩层,对该区构造变形起到重要作用。

3 盆地群构造、沉积演化特征

3.1 赤道段转换型盆地

利比里亚盆地和科特迪瓦盆地基底为前寒武纪西非克拉通,基底表现为地堑-地垒相间分布。之后,拉张应力作用下,在前寒武基底上发育了一系列伸展地堑结构。阿普特期,南大西洋由南向北扩张于赤道段,裂谷作用增强,同沉积生长断层发育,盆地可容纳空间增加。阿尔比期,盆地基底加速沉降,海水开始入侵。直到晚白垩世森诺曼期,南大西洋完全裂开,进入漂移阶段。之后,盆地受到热沉降的作用,大陆边缘向海方向倾斜(Séranne et al.,2005)。

利比里亚盆地和科特迪瓦盆地后期由于局部应力的改造,呈现一些不同的构造特征。前者在侏罗纪末,盆地基底上升遭剥蚀,形成一广泛分布的区域不整合面,先于科特迪瓦盆地进入前裂谷发育阶段。后者在阿尔比期,由于南美、非洲板块应力方向由NE-SW向变为EWE-WSW向,形成了阿尔比-森诺曼之间的区域不整合面,产生了一些高角度正断层、右旋走滑断层、断块和半地堑,形成了不同时期的地层和构造圈闭。

赤道段转换型盆地在寒武基底上接受古生界地层沉积。随着裂谷作用增强,沉积环境逐渐由河流、三角洲、湖泊相过渡为海陆交互相。同裂谷期,海水开始入侵,盆地逐渐被浅海环境覆盖,砂岩和泥页岩相间分布。随着海底扩张作用的不断进行,盆地的沉积环境由局限海变为半局限-开阔海,沉积了浅水碳酸盐岩和海相页岩。马斯特里赫特期后,随着上覆地层负荷增加,盆地压实沉积作用增强,沉积地层不断由陆向海推进,展现出海退和进积的构造样式,使深海浊积扇成为了该类盆地的主要勘探目标。

3.2 中段含泥型盆地

尼日尔三角洲盆地的基底是由西非前寒武系以及古生界的火成岩和变质岩组成。早白垩世贝利阿斯期-阿尔比期,整体呈现砂泥岩交互的浅海沉积。从晚白垩世开始,进入漂移期。漂移期又分为两个阶段:晚白垩世-古新世为第一阶段,海水逐渐加深,沉积一套厚度在2500 m左右的海陆交互

地层(三角洲、滨海相、浅海相)和半深海-深海相地层(王颖等,2012);始新世以来为第二阶段,尼日尔河向南汇合流入大西洋,携带大量碎屑物质和有机质,形成巨大浪控型进积三角洲(Jolly et al.,2017)。始新统、渐新统、中新统及第四纪地层按岩性分为阿卡特组(Akata)、阿格巴达组(Agbada)和贝宁组(Benin),均为穿时地层单元(Corredor et al.,2005)。构造发育具有明显的分带性,从陆到海分别是:薄皮伸展构造区、泥底辟构造区和前缘逆冲构造区(邓荣敬等,2008)。阿卡特组主要为大陆架、大陆坡的前三角洲半深海-深海厚层泥页岩沉积,富含有机质,具有较大生烃潜力,是该盆地主要的烃源岩层和滑脱层。阿格巴达组为进积的三角洲前缘、斜坡沉积,由多个退覆沉积韵律组成,其三角洲砂体和海底扇砂体是区域储层。贝宁组为陆相河流及沼泽沉积,主要岩性为砂砾岩,与下伏阿格巴达组呈平行不整合接触。

由于泥岩的欠压实和烃类的形成作用,阿卡特组沉积后处于超压状态(陈书平等,2013)。阿格巴达组早期沉积后,盆地在挤压应力作用下明显收缩,同时由于重力影响,沿大陆坡向下滑动,在伸展带和底辟区分别形成少量正断层和逆冲断层,对泥岩造成轻微扰动,而挤压区的逆冲断裂切穿阿卡特组,导致泥岩扰动明显(Rouby et al.,2011)。阿格巴达组中期沉积后,断层规模、数量都明显增强,并伴生一定的滚动背斜,泥岩由于局部超压垂直上拱。阿格巴达组晚期沉积末,伸展区滚动背斜核部进一步被泥岩充填。由于伸展区的泥岩进一步向边缘流动,底辟带和挤压带的泥岩上拱、变形程度进一步加强,挤压区开始出现逆冲褶皱带,整个作用一直持续至贝宁组沉积后。由于前缘挤压的褶皱作用导致的地层缩短和伸展作用导致的地层拉长相互补偿和平衡,盆地并未出现明显的长短伸缩变化(图2)。

3.3 中段含盐盆地

晚侏罗世之前,南大西洋中段构造环境总体比较稳定,间或隆升剥蚀和火山作用。早白垩世,南美和西非板块开始分离,南大西洋中段形成了一系列沿现今海岸线分布的地堑。随着南大西洋的进一步开裂,地堑进一步下切、拉伸,张性断裂形成的伸展断陷发育,在盆地中形成了沉积中心,比如:加

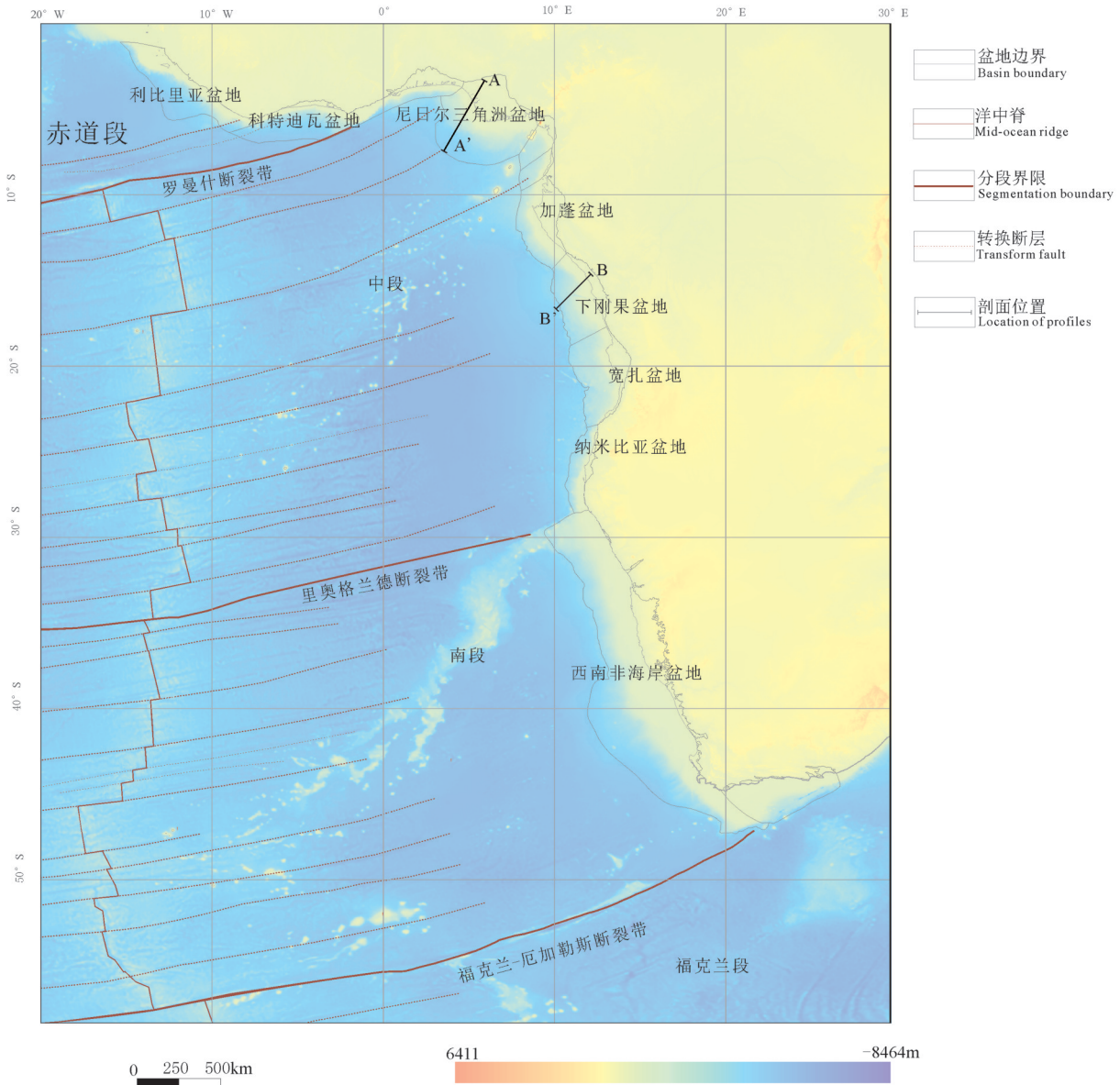


图1 南大西洋西非岸盆地分布及剖面位置图

注:地形数据 Weatherall et al. (2015);参考坐标系:GCS_WGS_1984

Fig.1 The sketch map of passive-margin basins in West Africa of South Atlantic region and section location of the study area

蓬盆地的内陆次盆和南加蓬次盆;下刚果盆地的西北和中部凹陷。早阿普特期,早期的断陷作用转化为与断陷有关的拗陷作用。到中阿普特期时,区域构造应力转化为挤压应力,裂谷作用结束,盆地抬升至反转,导致了短暂的地层侵蚀和准平原化作用,形成了一个平行不整合面,构成了阿普特盐岩的底面。阿普特期盐岩是南大西洋中段盆地群中广泛分布的、沉积厚度大的蒸发岩层,对中段盆地群的构造变形以及油气成藏有着非常重要的作

用。阿尔比期时,由于热沉降和海平面上升,盆地继续接受碳酸盐岩沉积,在差异热沉降和重力作用下,盆地向海倾斜,盐岩流动,最终尖灭于外部高地带和洋陆边界上。在后期的改造作用下,盐构造具有明显的分带性,从陆到海依次为伸展带、过渡带和挤压带。

简而言之,晚侏罗世之前,南大西洋盆地群局部接受陆内拗陷型沉积。进入裂谷期之后,沉积一套河流、湖泊泥岩、砂岩陆相地层。早裂谷期,主要

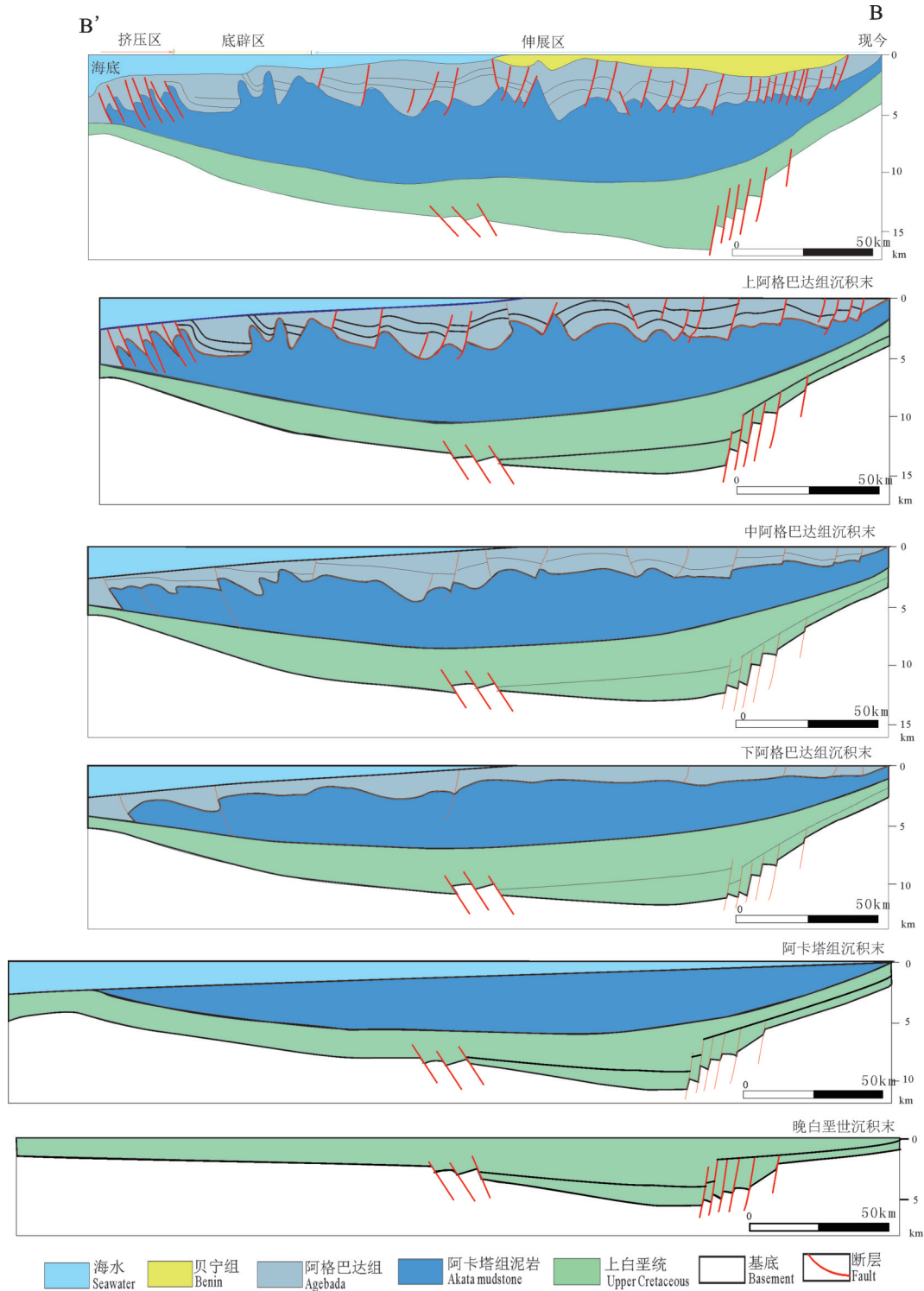


图2 尼日尔三角洲盆地平衡剖面恢复图
 Fig.2 Restoration of balanced cross-section of Niger delta basin

沉积陆源碎屑岩和黑色富有有机质的页岩, 夹杂凝灰岩和玄武岩; 晚裂谷期, 主要为灰岩、砂岩、粉砂岩等滨浅湖相沉积。阿普特期是中段盆地群由陆

相向海相转化的过渡时期。此时, 赤道段的南大西洋还未完全开裂, 中段的南美和西非之间是一个狭海, 由于沃尔维斯海岭和里奥格兰德脊的阻隔, 在

局限海环境下,沉积了一套广泛分布的、沉积厚度可达上千米的蒸发岩,夹白云岩、灰岩层以及硬石膏,后期变形改造,形成了不同的盐构造样式。

不同含盐盆地盐岩流动的驱动力和变形时期不同。加蓬盆地是在区域应力作用下,盐岩发生流动变形。在漂移早期,在右旋拉张应力的影响下,盆地西缘快速沉降,形成了北东-南西向和北西-南东向的断层斜坡带和西低东高的地势,盐岩层上也发育了张扭性断裂,盐岩沿断层流动。晚始新世—早渐新世,区域构造应力由拉张变为挤压,引起了构造反转,加蓬盆地沉积作用停止,被抬升剥蚀。盆地西缘的一些碎屑沉积被陆架和大陆坡之间的深峡谷带入南大西洋,一些与挤出作用相关的盐构造就在这个时期发育(Chen et al., 2013)。短时间的构造倒转之后,在晚渐新世,构造应力又转化为拉张应力。盆地西部平稳下沉,之后盐岩、河流、三角洲和滨岸沉积都向海加积。

下刚果盆地和宽扎盆地的盐岩流动和变形是由差异负载和重力滑塌引起的。下刚果盆地从阿尔比期进入漂移期,沉积了浅海碳酸盐岩和半深海、深海海相地层和向陆一侧的陆相碎屑地层,经历了两期重力滑脱冲断构造:阿尔比期—渐新世早期重力滑脱和中新世至今的晚期重力滑脱(李涛等, 2012)。阿普特期到阿尔比期,在上覆地层持续沉积的压力下,盐岩向陆内流动,在重力滑脱伸展区发育伸展的正断裂,重力滑脱底辟区发育幅度较小的轻微丘状底辟。之后,由于盐岩流动时在伸展区收到的摩擦力逐渐增大,变形相对减弱。到中新世时盆地西部沉降,东部陆上隆升,导致上覆地层差异负载进一步增大,原来变形程度低的丘状盐岩进一步变形,形成了一系列刺穿幅度较高的盐株等构造。同时,冲断带的断裂作用不断增强,在中部和远洋区形成多个褶皱—冲断带,为一系列同生盐构造(盐丘、盐墙等)等的形成提供了源动力。挤压区盐岩受到上覆地层的影响,在洋陆分界线处停止移动,形成盐岩推覆体(图3)。

宽扎盆地从晚白垩世森诺曼期到渐新世构造都比较稳定,盐岩流动速度较低。进入中新世,在差异热沉降的作用下,构造活动又开始活跃起来,陆架基底再次隆起,加大了地形坡度,盐岩向西流动,产生了一系列伸展型生长断层和挤压型生长褶

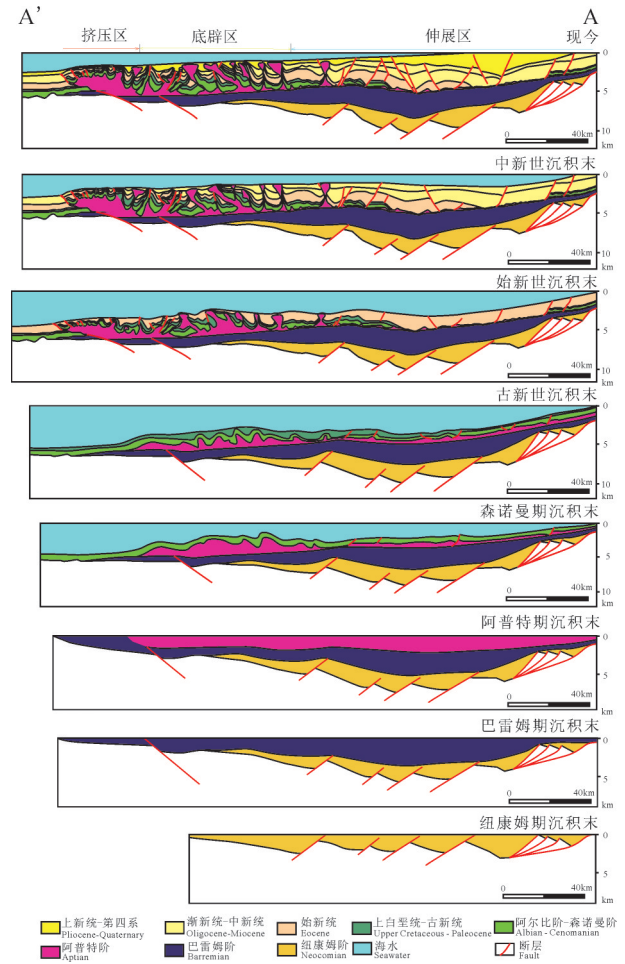


图3 下刚果盆地平衡剖面恢复图(现今剖面据 Marcano et al., 2013)
Fig. 3 Restoration of balanced cross-section of Lower Congo basin
(present cross-section after Marcano et al., 2013)

皱,形成盐滚、盐枕等盐构造,同时由盐岩推覆体前进引起下倾端缩短(Hudec, 2004)。晚中新世—全新世,盐岩变形主要集中在弯曲褶皱、挤压底辟和逆冲推覆带。

3.4 南段火山型盆地

由于南大西洋裂开南早北晚,所以南段的西南非海岸盆地从晚三叠世就进入了前裂谷期。晚侏罗世之前,西南非海岸盆地处于前裂谷期,沉积地层为陆相碎屑岩。晚侏罗世进入裂谷期,在酸性、中性火山作用下,区域抬升、地块旋转,发育区域不整合面(Strozyket al., 2016)。裂谷期的半地堑地层,前期主要发育火成岩、火山碎屑岩和向海倾斜反射体(SDRs),后期主要沉积粗碎屑或者粉砂岩、泥岩,并未发育湖相泥页岩。从巴雷姆期晚期开始,进入

过渡期。但是南段火山型盆地过渡期并未像中段一样,发育大规模阿普特期厚层盐岩,而是由裂谷过渡到热沉降阶段。从阿尔比期到现今,盆地一直处于热沉降阶段,经历了多次海侵、海退旋回,广泛发育海相页岩、泥灰岩和浊积砂岩,并且随着沉积中心向海迁移,陆架边缘垮塌(Maystrenko et al., 2013)。

4 三段四类盆地沉积、构造差异性对比

南大西洋西非岸的被动大陆边缘盆地随着南大西洋由南向北张开,经历了4次明显的构造抬升剥蚀作用和裂谷期、同裂谷期、漂移期3个构造阶段。巴雷姆期晚期发生的构造反转产生了第一次区域性抬升,形成了西非沿岸裂谷盆地的区域不整合和抬升剥蚀(Gabriela et al.,2013);阿普特期早期,盆地再一次挤压抬升,发生准平原化作用,形成了裂谷期和过渡期之间的不整合面;始新世发生了第三期隆升,引起重力滑塌,尼日尔三角洲盆地的阿卡特组泥岩以及下刚果盆地的阿普特期盐岩都在重力作用下流动变形,形成了伸展、底辟和挤压带;中新世最后一期隆升作用,引起了上覆沉积物的变形,基本形成当今的盆地格局(冯国梁等,2012)。

中段盆地在阿普特期,由于沃尔维斯海岭和里奥格兰德海岭的阻隔形成的局限海环境,广泛沉积了一套过渡期盐岩,并在不同的动力驱动下流动变形,对盆地的差异构造演化起着非常重要的作用(Beniast et al.,2017;Kukla et al.,2018)。裂谷期广泛发育的湖相泥岩和漂移期受缺氧事件形成的海相泥页岩是该区域主要的烃源岩层,阿普特期和阿尔比期盐岩是最主要的区域性盖层(图4)。

赤道段转换型盆地基底被马拉松、罗曼什等转换断裂带控制,具有拉分盆地的特点,陆棚较窄(Lépinay et al., 2016)。在阿普特期和阿尔比期的裂谷阶段完成了湖泊、河流等陆相沉积到浅海碳酸盐岩沉积的转换。由于边缘脊的限制,使漂移期的厚层沉积物由陆向海厚度增加,油气资源多集中在深水浊积扇。中段含泥盆地巨厚的新生代阿卡特组泥岩为滑脱层,并未发育阿普特期盐岩,在差异负载作用下,泥岩层发生变形,形成了伸展带、泥底辟带和挤压带。中段含盐盆地基底岩浆活动较弱、伸展作用较强,发育大量向海倾斜正断层。后期沉积以阿普特期盐岩为界,分为盐下层、盐岩层和盐上层。裂谷期的贝利亚斯阶到早巴雷姆阶,发育湖泊黑色页岩沉积、浊积岩沉积,成为主要的烃源岩

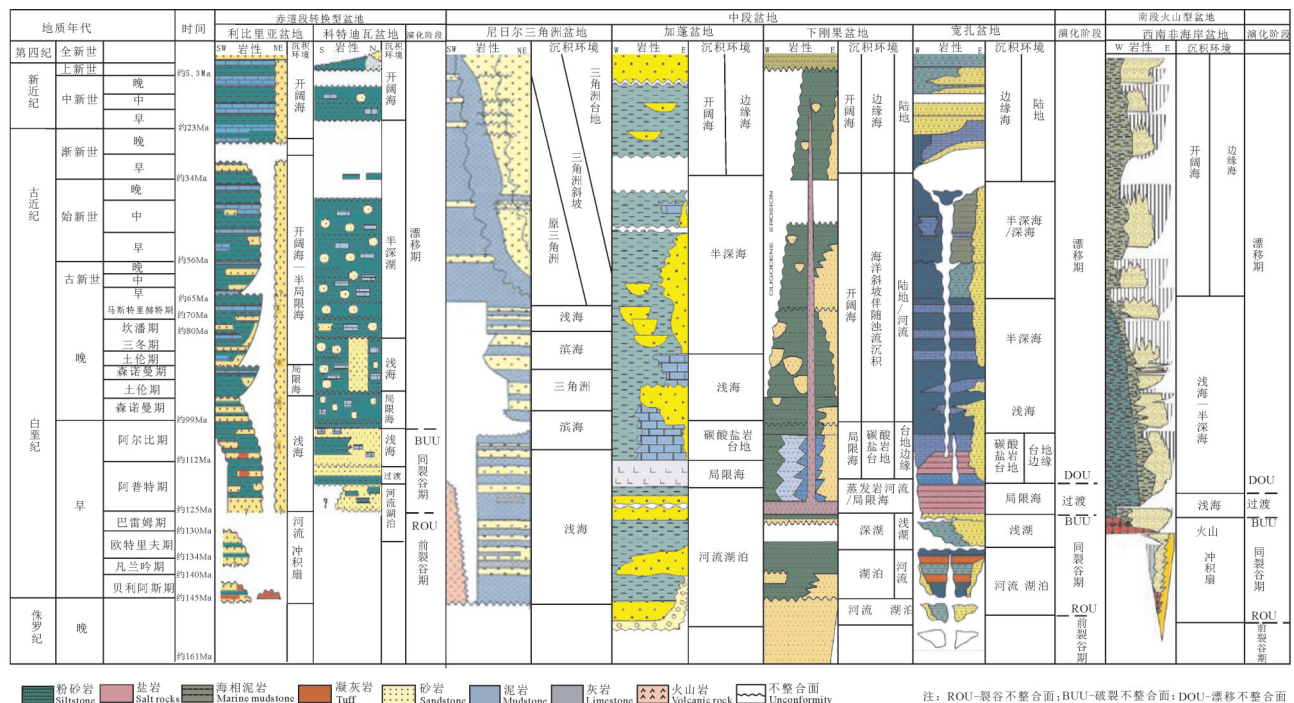


图4 西非岸盆地群综合柱状图(部分岩性柱据 IHS,2009)

Fig. 4 Comprehensive lithologic column diagram of basins along west Africa (Part of lithologic column after IHS, 2009)

层。阿普特期,盆地由陆相沉积过渡为浅海碳酸盐岩沉积,发育一套区域性盖层。漂移期由于海平面的升降,海相地层与陆相地层交互,盐岩层在差异负载和重力滑脱作用下流动变形,形成了伸展、底辟和挤压构造带,陆相泥页岩和砂岩交互形成了盐上的含油气系统。南段是典型的火山型被动大陆边缘,陆缘比较狭窄,裂谷期地层薄、分布局限,同时又邻近 Tristan 和 Karoo,受地幔柱的影响,裂谷期火山活动剧烈,发育由大量溢流相玄武岩和凝灰岩组成的厚层岩浆地壳,向海倾斜反射体广泛发育(Frank,2013;Paton et al.,2017)。该类盆地过渡期并未发育厚层盐岩,而是以泥页岩沉积为主;阿普特期之后,进入热沉降漂移期,经历了多次海侵、海退旋回,广泛发育深海相页岩、泥灰岩和浊积砂岩。

不同段之间的构造格局以及沉积充填类型造就了不同的油气成藏组合。赤道段走滑型盆地具有“深水浊积扇控位,断层控层”的特点,主要发育构造圈闭及与褶皱作用相关的岩性圈闭。中段盆地由于泥、盐的变形,形成了多种圈闭类型,同时由于其阻隔作用,形成了盐上盐下“双源双盖型”成藏模式;南段火山型盆地油气主要被漂移期海相页岩直接封堵于裂谷期构造成藏组合之中。

5 结 论

(1)南大西洋西非岸的被动大陆边缘盆地随着南大西洋由南向北张开,经历了4次明显的构造抬升剥蚀作用和裂谷期、同裂谷期、漂移期3个构造阶段。中段盆地在阿普特期,广泛沉积了一套过渡期盐岩。

(2)赤道段转换型盆地在阿普特期和阿尔比期的裂谷阶段完成了湖泊、河流等陆相沉积到浅海碳酸盐岩沉积的转换,未发育盐岩。中段含泥盆地巨厚的新生代阿卡塔组泥岩为滑脱层,并未发育阿普特期盐岩,在差异负载作用下,泥岩层发生变形。阿普特期,中段含盐盆地由陆相沉积过渡为浅海碳酸盐岩沉积,阿普特期盐岩层在差异负载和重力滑脱作用下流动变形,形成了伸展、底辟和挤压构造带。南段火山型盆地以裂谷期发育的溢流相玄武岩和凝灰岩为特征,发育典型的向海倾斜反射体。

(3)赤道段走滑型盆地具有“深水浊积扇控位,断层控层”的特点,主要发育构造圈闭及与褶皱作

用相关的岩性圈闭;中段盆地由于泥、盐的变形和阻隔,形成了盐上盐下“双源双盖型”成藏模式;南段火山型盆地油气主要被漂移期海相页岩直接封堵于裂谷期构造成藏组合之中。

References

- Bally A W. 1983. Seismic expression of structural styles[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 3: 13–18.
- Beniest A, Koptev A, Burov E. 2017. Numerical models for continental break-up: Implications for the South Atlantic[J]. *Earth & Planetary Science Letters*, 461:176–189.
- Chen Shuping, Wang Chunxiu, Xiao Hua, Zhang Lanying, Han Xu. 2013. Folding of the Niger Delta in the Cenozoic and its related traps [J]. *Geological Journal of China Universities*, (2):355–363(in Chinese with English abstract).
- Chen A, Jin C, Lou Z, Xu S, Huang K. 2013. Salt tectonics and basin evolution in the Gabon Coastal Basin, West Africa[J]. *Journal of Earth Science*, 24(6):903–917.
- Corredor F, Shaw J H, Bilotti F. 2005. Structural styles in the deep-water fold and thrust belts of the Niger Delta[J]. *Aapg Bulletin*, 89(6):753–780.
- Dahlstrom C D A. 1969. Balanced cross section[J]. *Canadian Journal of Geosciences*, 6: 743–757.
- Deng Rongjing, Deng Yunhua, Yu Shui, Hou Dujie. 2008. Hydrocarbon geology and reservoir formation characteristics of Niger Delta Basin [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 35(6):755–762(in Chinese with English abstract).
- Elliott D. 1983. The construction of balanced cross section[J]. *Journal of Structural Geology*, 5(2): 101.
- Fan Zenghui, Liu Shugen, Fan Cunhui, Hu Linhui, Li Wenjia, Mi Hong, Han Chong, Han Xiaojun. 2018. Analysis of typical seismic profile and balanced cross-section recovery and tectonic evolution in the Longmenshan fold-thrust belt [J]. *Geological Review*, 64(2): 347–360(in Chinese with English abstract).
- Feng Guoliang, Xu Zhicheng, Jin Jiuqiang, Fan Guozhang. 2012. Basin evolution and development characteristics of deepwater oil and gas fields in coastal basins, West Africa [J]. *Marine petroleum Geology*, 17(1):23–28(in Chinese with English abstract).
- Franke D. 2013. Rifting, lithosphere breakup and volcanism: Comparison of magma-poor and volcanic rifted margins[J]. *Marine & Petroleum Geology*, 43(3):63–87.
- Gabriela Marcano, Zahie Anka, Rolando di Primio. 2013. Major controlling factors on hydrocarbon generation and leakage in South Atlantic conjugate margins: A comparative study of Colorado, Orange, Campos and Lower Congo basins[J]. *Tectonophysics*, 604: 172–190.
- Hudec M R, Jackson M P A. 2004. Regional restoration across the

- Kwanza Basin, Angola: Salt tectonics triggered by repeated uplift of a metastable passive margin[J]. *Aapg Bulletin*, 88(7):971–990.
- Jolly B A, Anyiam O A, Omeru T. 2017. Structural controls on channel-related seismic facies distribution in the toe-thrust of deepwater Niger Delta[J]. *Journal of African Earth Sciences*, 125: 151–165.
- Kukla P A, Strozyk F, Mohriak W U. 2018. South Atlantic salt basins – Witnesses of complex passive margin evolution [J]. *Gondwana Research*, 53: 41–57.
- Lépinay M M D, Loncke L, Basile C. 2016. Transform continental margins – Part 2: A worldwide review[J]. *Tectonophysics*. doi: 10.1016/j.tecto.2016.05.038
- Li Tao, Hu Wangshui, He Yaoyao, Chen Chuan, Zhao Yun, Rao Yong. 2012. Developing characteristics and evolution pattern of the gravitational décollement structures in the Lower Congo Basin [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 36(2):197–203(in Chinese with English abstract).
- Maystrenko Y P, Scheck-Wenderoth M, Hartwig A, Anka Z, Watts A B, Hirsch K K. 2013. Structural features of the Southwest African continental margin according to results of lithosphere-scale 3D gravity and thermal modelling[J]. *Tectonophysics*, 604(5):104–121.
- Marcano G, Anka Z, Primio R D. 2013. Major controlling factors on hydrocarbon generation and leakage in South Atlantic conjugate margins: A comparative study of Colorado, Orange, Campos and Lower Congo basins[J]. *Tectonophysics*, 604(5):172–190.
- Moulin M, Aslanian D, Unternehr P. 2010. A new starting point for the South and Equatorial Atlantic Ocean[J]. *Earth-Science Reviews*, 98 (1/2):1–37.
- Paton D A, Pindell J, Mcdermott K, Bellingham P, Horn B. 2017. Evolution of seaward-dipping reflectors at the onset of oceanic crust formation at volcanic passive margins: Insights from the South Atlantic[J]. *Geology*, 45(5).doi: 10.1130/G38706.1
- Rouby D, Nalpas T, Jermannaud P, CécileRobin, Stéphane Raillard. 2013. Gravity driven deformation controlled by the migration of the delta front: The Plio-Pleistocene of the Eastern Niger Delta[J]. *Tectonophysics*, 513(1):54–67.
- Séranne M, Anka Z. 2005. South Atlantic continental margins of Africa: A comparison of the tectonic vs climate interplay on the evolution of equatorial West Africa and SW Africa margins[J]. *Journal of African Earth Sciences*, 43(1):283–300.
- Strozyk F, Back S, Kukla P A. 2016. Comparison of the rift and post-rift architecture of conjugated salt and salt-free basins offshore Brazil and Angola/Namibia, South Atlantic[J]. *Tectonophysics*, 716.
- Tao Chongzhi, Yin Jinyin, Lu Hongmei, Wang Yifan, Liu Junlan, Niu Xinjie. 2015. Impact of salt on hydrocarbon accumulation in South Atlantic passive margin basins [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 37(5):614–618 (in Chinese with English abstract).
- Trond H. Torsvik, Sonia Rousse, CinthiaLabails. 2009. A new scheme for the opening of the South Atlantic Ocean and the dissection of an Aptian salt basin[J]. *Geophysical Journal International*, 177(3): 1315–1333.
- Wang Ying, Lu Ming, Wang Xiaozhou, Xie Xiaojun. 2012. High-resolution sequence stratigraphy and sedimentary facies: A case study of the block M in the Niger delta, Nigeria [J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 31(4):11–19(in Chinese with English abstract).
- Weatherall P, Marks K M, Jakobsson M, Schmitt T, Wigley R. 2015. A new digital bathymetric model of the world's oceans[J]. *Earth & Space Science*, 2(8): 331–345.
- Woodward N B. 1963. Thrust fault geometry of the Snake River Range, Idaho and Wyoming[J]. *Geological Society of America Bulletin*. <https://ihsmarkit.com/index.html>

附中文参考文献

- 陈书平, 王春修, 肖华, 张兰英, 韩煦. 2013. 尼日尔三角洲新生代褶皱作用及相关的油气圈闭[J]. *高校地质学报*, (2):355–363.
- 邓荣敬, 邓运华, 于水, 侯读杰. 2008. 尼日尔三角洲盆地油气地质与成藏特征[J]. *石油勘探与开发*, 35(6):755–762.
- 范增辉, 刘树根, 范存辉. 2018. 龙门山褶皱冲断带典型地震剖面平衡剖面恢复及构造演化分析[J]. *地质论评*, 64(2):347–360.
- 李涛, 胡望水, 何瑶瑶, 陈川, 赵芸, 饶勇. 等. 2012. 下刚果盆地重力滑脱构造发育特征及演化规律[J]. *大地构造与成矿学*, 36(2):197–203.
- 陶崇智, 殷进垠, 陆红梅, 王一帆, 刘君兰, 牛新杰. 2015. 南大西洋被动陆缘盆地盐岩对油气成藏的影响[J]. *石油实验地质*, 37(5): 614–618.
- 王颖, 吕明, 王晓州, 谢晓军. 2011. 尼日尔三角洲高分辨率层序地层及沉积相研究——以尼日利亚M区块为例[J]. *沉积与特提斯地质*, 31(4):11–19.