

DOI: 10.13745/j.esf.sf.2018.4.41

南大西洋两岸被动陆缘盆地结构差异与大油气田分布

温志新¹, 吴亚东², 边海光¹, 王兆明¹, 贺正军¹, 宋成鹏¹

1. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083

2. 中国石油天然气勘探开发公司, 北京 100034

WEN Zhixin¹, WU Yadong², BIAN Haiguang¹, WANG Zhaoming¹, HE Zhengjun¹,
SONG Chengpeng¹

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

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

WEN Zhixin, WU Yadong, BIAN Haiguang, et al. Variations in basin architecture and accumulation of giant oil and gas fields along the passive continent margins of the South Atlantic. *Earth Science Frontiers*, 2018, 25(4): 132-141

Abstract: In this study, based on plate tectonic evolution and using seismic and geological data, formation and evolution of prototype basins on the conjugated passive continental margins of the South Atlantic were studied, and ancient sedimentary environment and its controls on the forming conditions of large oil and gas fields were compared segment-wise according to variations in basin architecture, and finally the passive continental marginal basins were divided into “three segments” and “four types” to reveal the accumulation law of giant oil and gas fields. As our study showed, the “four types” of basins on “three segments” had gone through three prototype stages: early intra-continental rifting, intermediate inter-continental rifting, and late drifting passive continental margin. In the southern segment, thin sediments in the “rift-type” basin that formed in the drifting stage, developed into the large “rift structural-stratigraphic” oil and gas fields. In the middle segment, the “salty-rift-depression-type” basins were filled with inter-continental rift salt rocks in the intermediate stage; and upper and lower sections are marine and lacustrine sediments from the drifting and rifting stages, respectively, possibly of high-quality. Utilizing salt rock and marine shale as caprocks, the giant oil and gas fields of “pre-salt carbonate and post-salt turbidity sands” were developed. Finally, in the northern segment, thick marine sediments in the drifting stage in the “depression-type” basin, affected by “narrow shelves” and “steep slopes” and controlled by the transform fault, developed into the large “deep-water turbidity fan group” oil and gas fields on the basin margin. Our study further showed in the Niger high-constructive “delta-type” basin, unique delta-gravity flow sandstone reservoirs have been formed, and giant oil and gas fields are identified in the inner-ring rollover anticline delta sandstone, the middle mud diapir and the outer-ring thrust crust.

Key words: South Atlantic; passive continental margin basin; prototype basin; basin architecture; giant oil and gas fields

摘要:以板块构造演化为基础,利用地震、地质等资料,再现南大西洋两岸共轭型被动陆缘盆地原型盆地形成演化过程。首次依据盆地结构差异及沉积充填特征,将研究区被动陆缘盆地进一步划分为“三段”“四类”;结合对已发现大油气田的解剖,搞清了每类盆地大油气田成藏规律,并分别建立了其大油气田成藏模式。认为两岸“三段”“四类”盆地都经过了早期陆内裂谷、过渡期陆间裂谷及漂移期被动陆缘三个原型阶段。南段为下伏裂谷层系比较发育的“断陷型”盆地,上覆拗陷沉积厚度较薄,仅作为区域盖层,形成“裂谷层系构造-地

收稿日期:2018-01-05;修回日期:2018-03-23

基金项目:国家油气重大科技专项(2016ZX05029001)

作者简介:温志新(1968—),男,博士,高级工程师,主要从事全球油气资源评价与海外新项目评估工作。E-mail: wenzhixin@petrochina.com.cn

层型”大油气田。中段为裂谷、拗陷层系都比较发育且过渡阶段有盐的“含盐断拗型”盆地,以过渡期陆间裂谷盐岩充填为特征,其上、下的漂移期海相及裂谷期湖相页岩均可形成有效烃源岩,海相页岩及盐岩分别作为优质盖层,形成了“盐下碳酸盐岩-盐上重力流扇体型”大油气田。北段为裂谷层系分布范围小、拗陷沉积范围广且厚度大的“拗陷型”盆地,受“窄”陆棚、“陡”陆坡控制,拗陷层系重力流扇体自始至终比较发育,源于拗陷层系下部海相页岩中的油气直接充注于本身内部裙边状分布的重力流复合扇体之中,形成“漂移期重力流扇体群型”大油气田。另外,研究区还发育尼日尔、福斯杜亚马逊、佩罗塔斯三个具有独特构造-沉积特征的“三角洲型”被动陆缘盆地,其特殊性体现在三角洲层系由于沉积速率极高,从陆向海形成生长断裂带-泥岩底辟带-逆冲断裂褶皱带-平缓斜坡带四大环状构造带。除了前三角洲层系可以作为有效烃源岩之外,本身也可以形成自生自储自盖型组合,形成独特的“四大环状构造带型”大油气田,即在由陆向海生长断裂带-泥岩底辟带-逆冲断裂褶皱带-平缓斜坡带四大环状构造带上都可以形成大油气田。

关键词:南大西洋;被动陆缘盆地;原型盆地;盆地结构;大油气田

中图分类号:P618.130.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-2321(2018)04-0132-10

0 引言

Mann^[1]在2003年对全球877个大油气田(2P可采储量大于5亿桶油当量)的构造背景分析发现,有304个大油气田位于被动陆缘盆地,已证实被动陆缘盆地是油气最富集的含油气盆地类型之一。近年来随着深海勘探理论及技术的不断提高,被动陆缘盆地深水区域^[2]油气发现越来越多,特别是南大西洋两岸。南大西洋两岸共发育25个被动陆缘盆地(图1),总沉积面积为386.07万km²,其中海上315.84万km²且80%为深水^[3-4]。截至目前,已发现大油气田111个,累计可采储量2558.78亿桶油当量^[5](图1),占全球被动陆缘已发现油气当量的70%以上。多名学者运用两岸对比的方法对南大西洋两岸盆地构造、沉积特征及含油气系统等方面进行了研究^[6-10]。本文以板块构造演化为基础,利用地震、地质等资料,研究南大西洋两岸共轭型被动陆缘盆地原型盆地形成演化过程,首次分段对比了其盆地结构及沉积充填差异,进一步将研究区划分为“三段”“四类”,结合已发现大油气田解剖,查明了其大油气田成藏规律,明确了各类盆地的有利成藏组合,为超前选区与新项目评价夯实了地质基础。

1 原型盆地及岩相古地理重建

南大西洋两岸被动陆缘盆地具有明显的共轭性,是中生代-新生代随着西冈瓦纳裂解、南大西洋的形成而伴生的系列盆地^[11-14]。其原型盆地经历了早期陆内裂谷、过渡期陆间裂谷和漂移期被动陆缘三个原型演化阶段,两岸分别充填了湖泊相、潟湖相

及海相沉积体系(图2)。受成盆动力学机制及古地理环境控制,其沉积充填明显具有分段性,从南至北分别以里奥格兰德转换断裂带和阿斯康斯昂转换断裂带为界划分为三个阶段(图2)^[14-15]。

1.1 早白垩世巴雷姆期

这个时期,南大西洋两岸“三段”均为陆内裂谷盆地,以陆相沉积体系为主,但南段逐渐过渡为海相沉积。

拉张伸展作用首先从西冈瓦纳大陆南端即现今的南非西海岸开始,受特里斯坦热幔柱事件影响,裂谷作用由南向北展开,受近南北向主张性断裂控制,形成近南北走向的狭长裂谷带,其间以近东西向走滑断层形成调接带相隔形成多个次级断陷^[14,16]。裂谷中充填主要为湖泊、河流及三角洲等陆相沉积体系,钻井及露头显示,该套地层在现今的南大西洋两岸大陆架及大陆坡下伏裂谷层系中广泛发育^[3-4]。该阶段晚期再一次发生了强烈的伸展,南段南部与印度洋海水沟通,形成海相沉积体系;南段北部仍为陆相沉积,形成了深湖相的泥岩沉积。北段东西向的伸展量转换为近东西走向的阿斯康斯昂及罗曼彻转换断裂带滑移量^[15],发育窄而深、分布范围小的拉分裂谷盆地,以陆相碎屑岩沉积为主。

1.2 早白垩世阿普特期

早白垩世阿普特期,两岸“三段”均为过渡期陆间裂谷盆地,南段沉积了海相硅质碎屑岩,中段主要为潟湖相碳酸盐岩及盐岩沉积,北段以湖相碎屑岩沉积为主。

阿普特早中期,随着“窄”初始洋壳从南向北形成^[14],南部印度洋海水大范围侵入,形成了一套海侵型砂砾岩体,标志早期裂谷阶段结束^[3-4],进入陆间裂谷阶段。伴随着强烈的岩浆活动,在现今的中

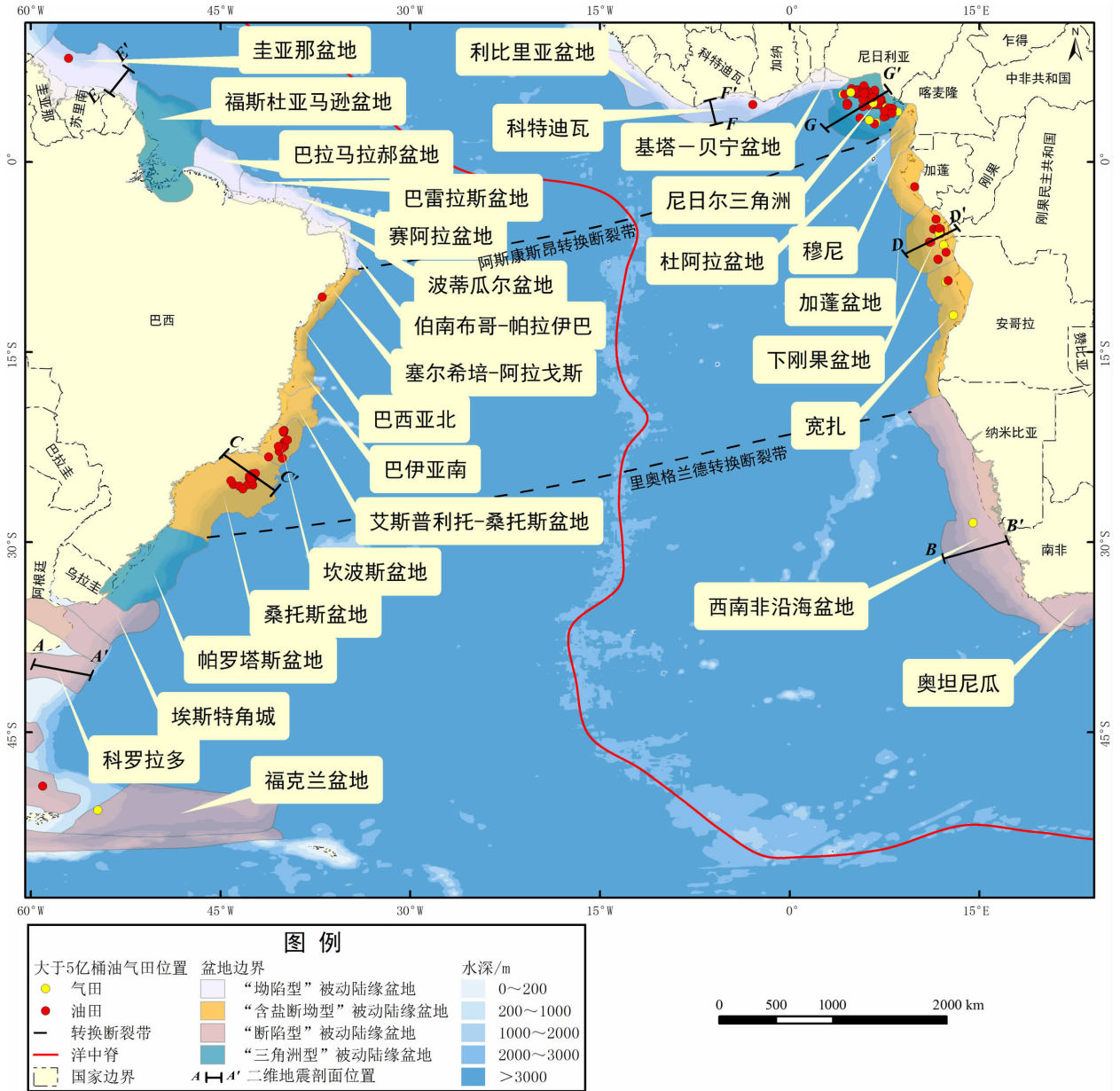


图1 南大西洋两岸被动陆缘盆地及大油气田位置分布图

Fig.1 The distribution of passive continental margin basins and giant oil and gas fields in South Atlantic

段形成了近东西向的里奥格兰德隆起—琼鱼山脉火山岩高地,受其横向阻挡控制,在中段近南北向狭长裂陷区形成了海水循环受限的局限潟湖沉积环境,由于窄洋壳出现,地温梯度增高明显,陆间裂谷两侧边界断块出现热膨胀翘倾作用,缺乏碎屑岩供给,靠近赤道,蒸发量大,形成一套分布广泛的碳酸盐岩沉积^[14]。北段近东西向张扭断裂带控制的裂谷层系发育规模较小,相对封闭,仍以湖相碎屑沉积为主。南段由于该时期与印度洋相连,海水循环畅通,形成滨浅海相碎屑沉积^[15]。

阿普特晚期,随着海水蒸发持续进行,中段盆地

形成由盐岩、硬石膏组成的蒸发岩层系^[14],其中以盐岩为主,总面积接近 100 万 km²,最大厚度都超过 4 000 m^[3-4]。北段转换型盆地由于拉分裂谷发育范围有限,南部海水尚未进入,仍以湖相碎屑沉积为主。南段两岸各盆地依然为海相碎屑盐沉积。

1.3 早白垩世阿尔布期至今

早白垩世阿尔布期以来,两岸“三段”均为漂移期被动陆缘盆地海相沉积,但沉积厚度差异明显^[3-4,15]。从阿尔布早期开始,海底洋壳不断扩张,向两侧带动岩石圈运动,形成开阔的新生大洋,两侧洋壳趋于变冷,从两岸向洋中脊发生对称的沉降拗

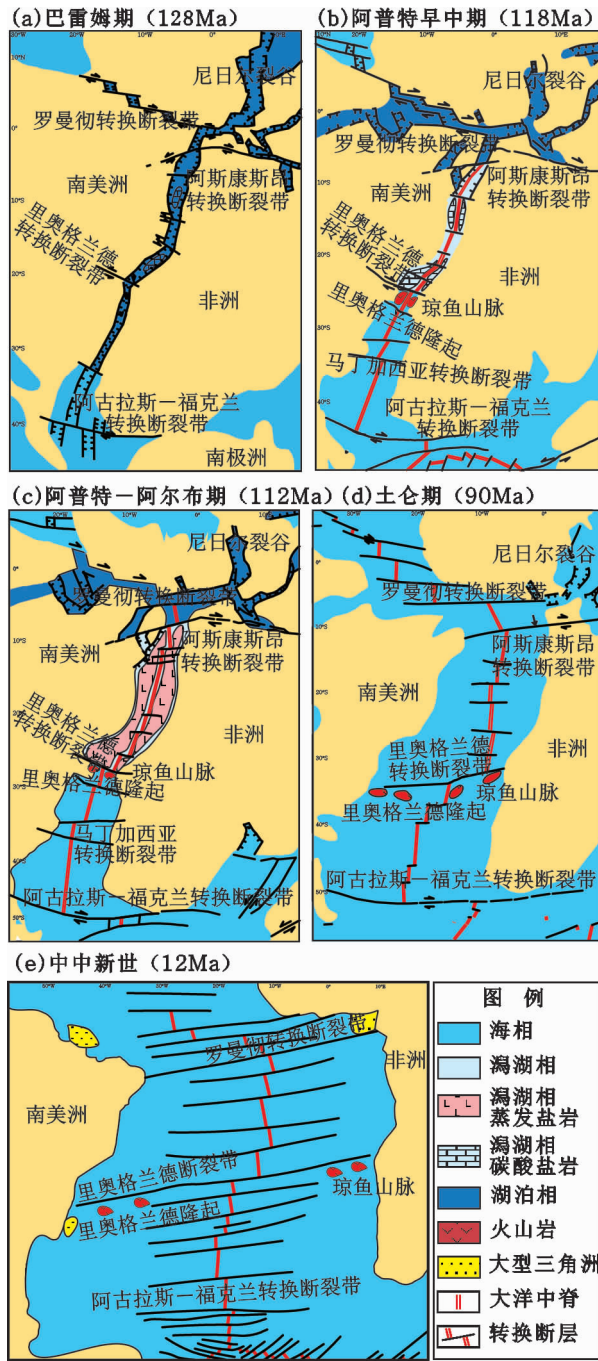


图2 南大西洋两岸被动陆缘盆地构造演化及岩相古地理重建图 (据文献[14-15]修改)

Fig.2 The tectonic evolution and the reconstruction of paleogeography along the passive continental margin basins in the South Atlantic

陷作用,在陆壳及过渡带上,形成了漂移状态的被动陆缘沉积楔状体。此时由于海水大量进入,蒸发岩沉积结束,伴随着全球性海平面上升与下降,从下至上,漂移期经历了一个大的海侵、海退旋回,即下部海侵层系和上部海退层系。

海侵层系(阿尔布阶到马斯特里赫特阶),由早期浅海至晚期深海沉积组成。南段以海相碎屑岩沉积为主。中段由早期滨海海碳酸盐岩过渡到碎屑岩沉积。北段此时由于南美板块沿转换断层向西移动的同时,向南运动,沟通了北部中大西洋海水,被海相碎屑沉积充填。赛诺曼期到土仑期为最大海泛期,在中段和北段形成一套缺氧环境黑色页岩^[3-4]。值得注意的是,北段海相重力流扇体最多。由于北段受陡倾角的转换断裂控制形成的被动陆缘具“窄”陆架、“陡”陆坡特征,大量被河流搬运至岸边砂体容易受洪水、地震等阵发性因素影响,沿较陡陆坡滑塌形成重力流沉积体系。它们对斜坡或者沟谷产生垂向和侧向上的侵蚀,往往在陆棚及上斜坡上形成彼此平行的海底峡谷或补给水道,这些负载沉积物的密度流失去动力后卸载,在下斜坡和陆隆上形成海底扇群等重力流沉积体系。

海退层系(古新世至今),受全球海平面持续下降影响,两岸物源供给充足,砂体向海进积,三角洲-深水重力流沉积体系普遍发育(图2),形成尼日尔、福斯杜亚马逊及佩罗塔斯等大规模高建设性三角洲盆地。

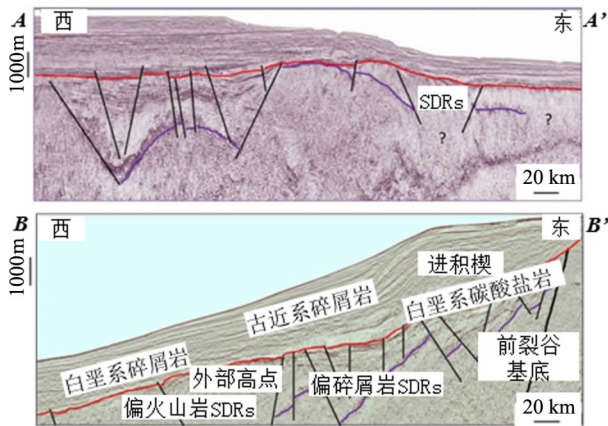
2 盆地结构差异及分段对比

地震地质综合对比解释发现,南、中、北三段盆地及尼日尔等大型三角洲盆地结构差异明显。基于此,首次以盆地结构中的主力层系,即盆地演化过程中的优势原型阶段为依据划分为南段断陷型、中段含盐断拗型、北段拗陷型和尼日尔等三角洲型4个亚类(图1)。其中通过类比发现,裂谷层系和拗陷层系(含三角洲层系)地温梯度分别平均约为4.0 °C/100 m和3.0 °C/100 m^[17]。裂谷层系如果具有形成大油气田资源基础,烃源岩必须经过生排烃高峰期,沉积厚度一般需要大于3 500 m,而拗陷层系一般为4 500 m以上。因此,将裂谷层系和拗陷层系沉积充填厚度分别大于3 500 m和4 500 m设定为优势原型阶段的一般标准。当然受古地温梯度及有机质类型影响,这两个划分优势原型盆地厚度标准上下会有所浮动。

2.1 南段“断陷型”被动陆缘盆地

南段“断陷型”被动陆缘盆地,呈“下断上拗”结构,其典型特征是下伏裂谷层系较厚(沉积中心厚度一般大于3 500 m)、上覆拗陷层系较薄(沉积中心

厚度一般小于 4 000 m) 的盆地结构(图 3), 其中裂谷层系属于优势原型阶段。多用户地震数据证实, 整个南段盆地中, 除了佩罗塔斯盆地发育一个大规模三角洲外, 其余均属于断陷型盆地(图 1), 发育地垒和地堑相间构造特征的下伏裂谷层系。钻井揭示上段为陆相河流-冲积扇-湖相沉积体系, 下段主要为火山岩充填^[18], 向海方向 SDR 现象明显增多。上覆拗陷层系“楔型”特征明显, 断裂不发育, 与下伏地层呈区域性角度不整合接触关系, 底部为一组连续强反射, 厚度几十米到一百米不等, 为过渡期陆间裂谷阶段海侵砂砾岩沉积。拗陷层系下部地震呈弱振幅近空白反射特征, 以海侵期较深水细粒沉积为主; 中、上部地层从陆坡向海底平原, 呈多套小型楔型地震反射特征, 属于小型三角洲-深水重力流沉积体系。

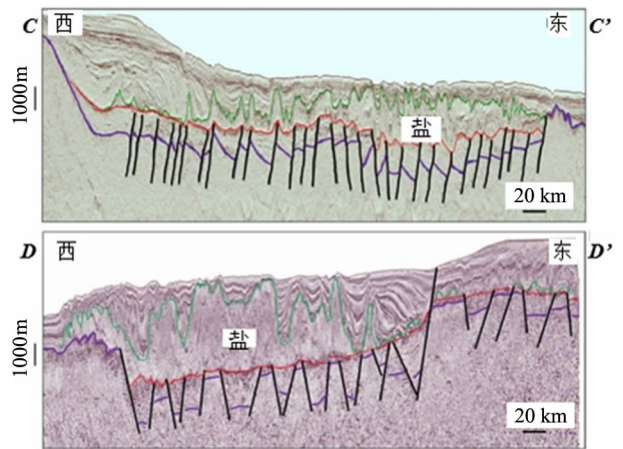


测线位置见图 1。

图 3 南大西洋南段两岸“断陷型”被动陆缘盆地地震剖面
Fig.3 Seismic sections showing the Rift-Type passive continental margin basins in the southern segment of the South Atlantic

2.2 中段“含盐断拗型”被动陆缘盆地

中段“含盐断拗型”被动陆缘盆地与南段“断陷型”盆地相比, 除了下伏裂谷层系属于优势原型阶段外, 上覆拗陷层系也属于优势原型阶段, 且过渡阶段盐岩发育, 具体有 3 点不同(图 4): (1) 整体厚度大, 沉积中心厚度均超过 5 000 m; (2) 下部过渡期从下至上发育潟湖相碳酸盐岩和蒸发盐岩沉积建造, 前者主要分布在现今的桑托斯、坎波斯、宽扎、下刚果等两岸盆地, 最大厚度超过 1 000 m, 后者分布范围广, 涵盖中段两岸所有盆地, 近 100 万 km², 向海方向厚度增大, 最厚超过 4 000 m; (3) 盐构造发育且盐上新世反映深水沉积体系的楔型/透镜状强反射结构期次增多、规模变大, 与当时全球海平面处于下降旋回相一致。



测线位置见图 1。

图 4 南大西洋中段两岸“含盐断拗型”被动陆缘盆地地震剖面

Fig.4 Seismic sections through the Salty-Rift-Depression-Type passive continental margin basins in the middle segment of the South Atlantic

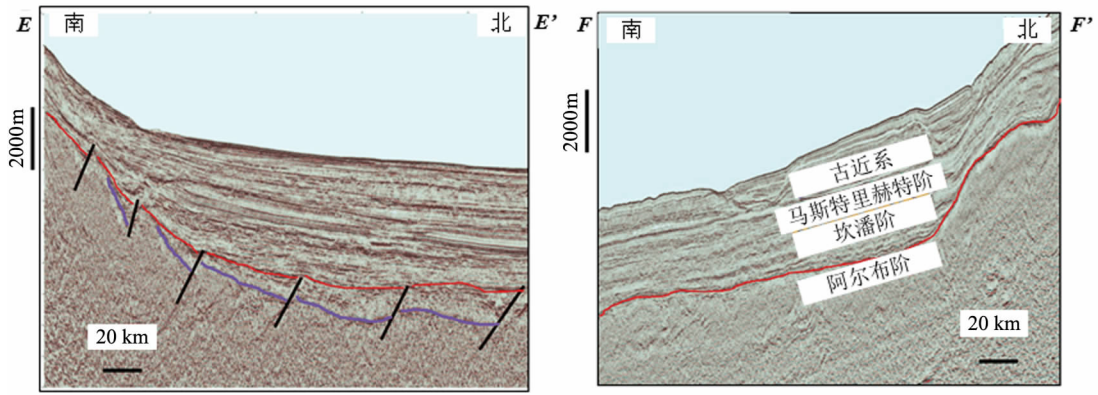
2.3 北段“拗陷型”被动陆缘盆地

北段“拗陷型”被动陆缘盆地结构独特(图 5), 只有拗陷层系属于优势原型阶段, 具体体现在: (1) 裂谷层系分布范围小, 仅赛阿拉等少数盆地发育, 因为早期裂谷属于陡断层控制的走滑拉分裂谷盆地, 分布范围窄; (2) 拗陷层系厚度大(大于 5 000 m)且重力流扇体发育, 因为“窄”陆架、“陡”陆坡型盆地沿岸砂体容易受洪水、地震等阵发性因素影响, 沿较陡陆坡滑塌, 在下斜坡和陆隆上形成海底扇群等重力流沉积体系, 其中该段尼日尔和福斯杜亚马逊两大水系形成了后面述及的三角洲型盆地。

2.4 “三角洲型”被动陆缘盆地

该类盆地是指, 中新世以后能够发育高建设性三角洲层系的盆地。其不仅沉积厚度大(中新世以来沉积厚度大于 4 500 m), 自身层系能够形成独立构造-沉积特征, 且改造了原来的盆地结构, 属于优势原型阶段。根据多用户地震资料, 南大西洋两岸发育尼日尔、福斯杜亚马逊和佩罗塔斯“三角洲型”被动陆缘盆地(图 6、7)^[19]。

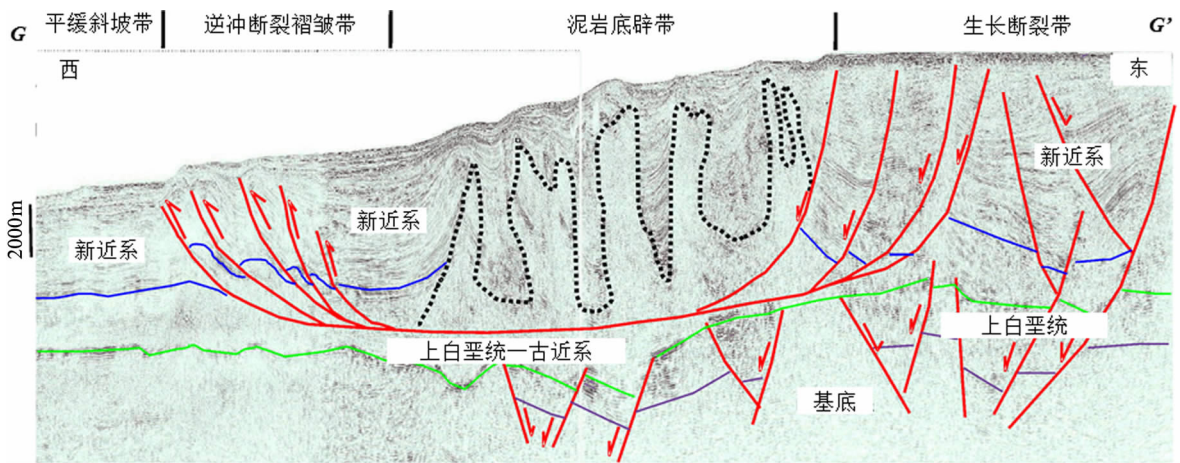
以尼日尔三角洲盆地为例, 该类盆地“垂向分层, 横向分带”特征明显(见图 6、7)。垂向分为 3 套层系, 即下部裂谷层系、中部拗陷层系和上部(三角洲)改造层系。前两个层系地震反射、沉积充填与断拗型盆地基本一致, 由于上部自中新世以来高建设三角洲层系发育, 受重力均衡、泥底辟和重力流等作用, 三角洲层系由陆向海形成了生长断裂带-泥岩底辟带-逆冲断裂褶皱带-平缓斜坡带 4 大环状构



测线位置见图 1。

图 5 南大西洋北段两岸“拗陷型”被动陆缘盆地地震剖面

Fig.5 Seismic sections through the depression-type passive continental margin basins in the northern segment of the South Atlantic



测线位置见图 1。

图 6 南大西洋南段两岸“三角洲型”被动陆缘盆地地震剖面

Fig.6 Seismic section showing the delta-type passive continental margin basins in the South Atlantic

造带。生长断裂带发育大规模三角洲前缘亚相砂体, 泥岩底辟带、逆冲断裂褶皱带和平缓斜坡带上主要为重力流成因的滑塌体、水道及海底扇。

3 大油气田形成与分布

基于“三段”“四类”盆地结构差异及沉积充填特征, 结合已发现大油气田解剖, 查明了每类盆地大油气田的成藏规律。

3.1 南段“裂谷层系构造-地层型”大油气田

南段“断陷型”被动陆缘盆地形成“裂谷层系构造-地层型”大油气田(图 8)。该类盆地由于拗陷层系沉积厚度一般小于 4 000 m, 受地温梯度低(一般小于 3.0 °C/100 m)影响, 海相页岩未达到生排烃高峰期, 不具备形成大油气田资源基础, 只能作为区域盖层。裂谷层系由于地温梯度高(平均 4.0 °C/100 m), 再加上上覆拗陷层系, 北部巴雷姆阶湖相和南部海相泥页岩都经过生排烃高峰期, 具备形成大油气田资源基础。目前, 西南非沿海 Kudu 大型气田已证

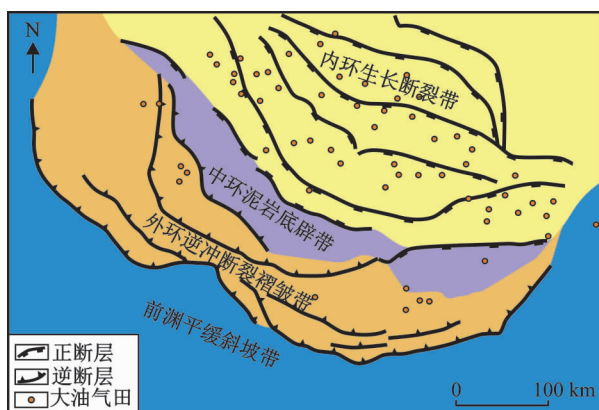


图 7 尼日尔“三角洲型”被动陆缘盆地构造单元划分图 (据文献[19]修改)

Fig.7 Structural outline map of the Nigeria delta-type passive continental margin basins

实烃源岩为巴雷姆阶湖相页岩^[18], TOC 含量平均为 10%, 氢指数最高达 600 mg HC/g TOC, 生烃潜力一般为 9~11 mg HC/g 岩石, 最高达 57 mg HC/g 岩石。南美东海岸的北福克兰盆地 Logigo 气田和 Sealion 油田烃源岩均为巴雷姆阶海相页岩^[3]。该套烃源岩在古近纪末开始进入生烃窗^[20-21], 沿着断裂垂向运移至裂谷层系顶部重力流或海侵砂砾岩体之中, 形成类似 Kudu、Sealion 一样的大型构造-地层油气藏。

3.2 中段“含盐断坳型”盆地形成“盐下碳酸盐岩-盐上重力流扇体型”大油气田

中段“含盐断坳型”盆地形成“盐下碳酸盐岩-盐上重力流扇体型”大油气田(图 9)。中段两岸发现大油气田较多, 共 47 个^[5], 其中巴西东海岸的桑托斯、坎波斯及圣埃斯皮里图等盆地 26 个, 西非下刚果盆地、宽扎盆地及加蓬沿海盆地 21 个。研究发现, 盐下大油气田储层以下伏碳酸盐岩为主, 盐上大油气田则以重力流扇体为主。

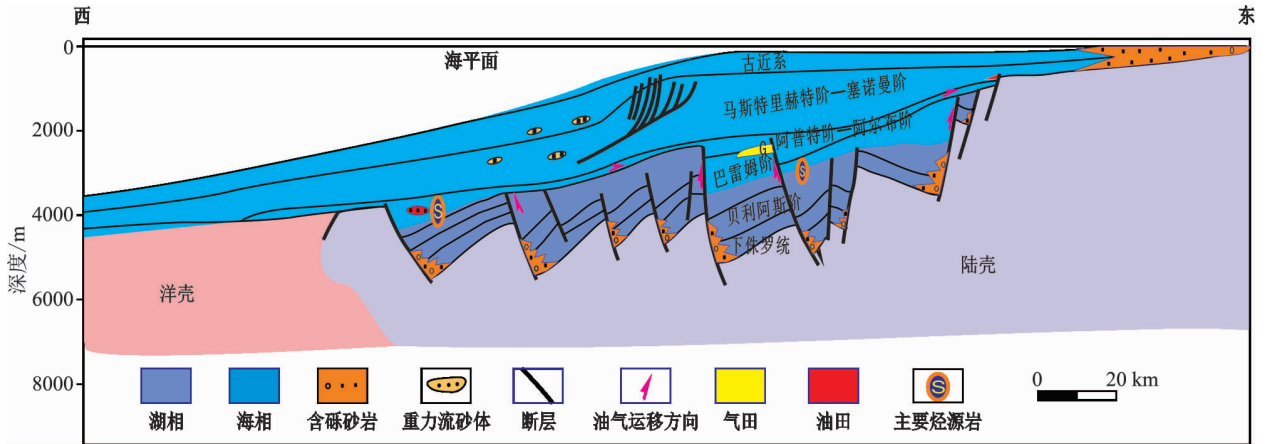


图 8 南段“断陷型”被动陆缘盆地大油气田成藏模式图
 Fig.8 The profile showing the accumulation of giant oil and gas fields in the “rift-type” passive continental margin basins in the southern segment

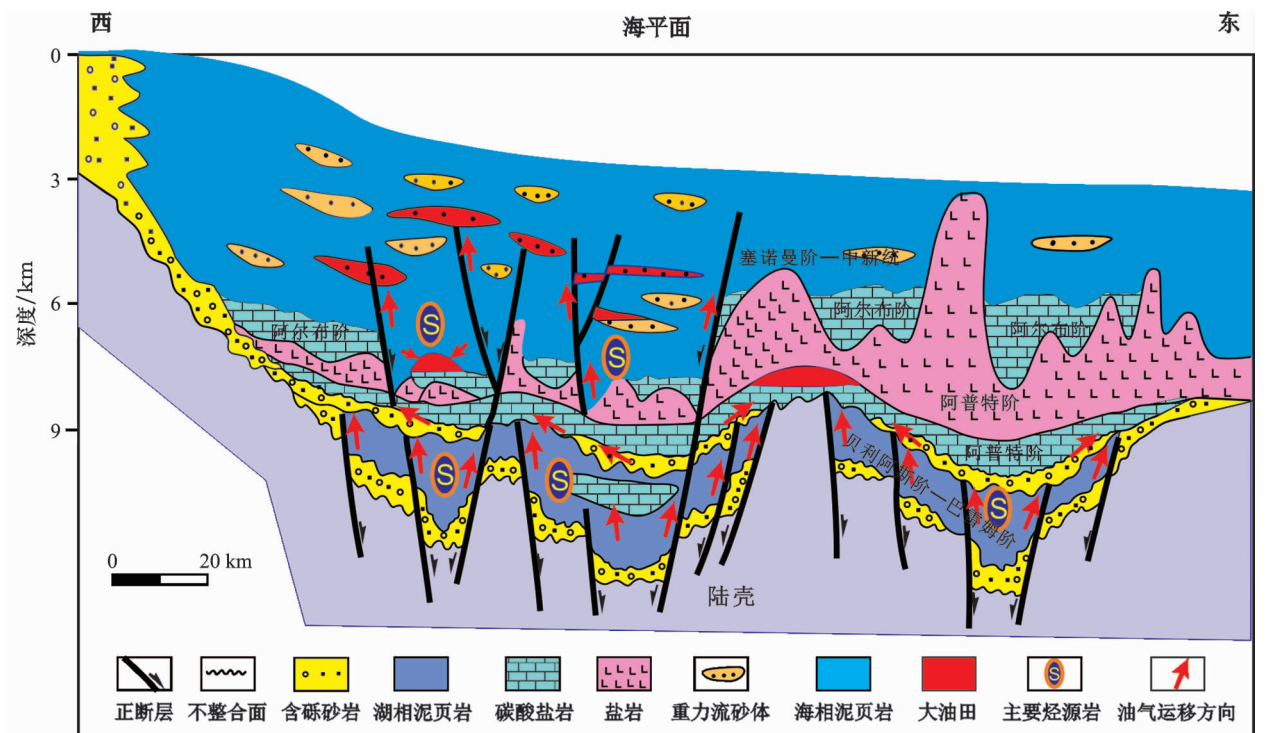


图 9 中段“含盐断坳型”被动陆缘盆地大油气田成藏模式图
 Fig.9 The profile showing the accumulation of giant oil and gas fields in the “salty-rift-depression-type” passive margin basins in the middle segment

两岸盐下大油气田形成条件具有明显的一致性,这是由于两岸盆地当时属于一个狭长且封闭的陆内断陷湖盆到陆间潟湖相沉积环境。其主力烃源岩形成于陆内裂谷阶段的湖相沉积。坎波斯盆地已证实烃源岩为下白垩统拉格非群(Lagoa Feia)湖相黑色钙质页岩^[22],干酪根类型为I型^[10],TOC含量一般为2%~6%,氢指数高达900 mg HC/g TOC,生烃潜力超过10 mg HC/g岩石。该套页岩在目前两岸盆地的许多地堑中都很发育^[23],沉积厚度一般介于100~400 m,大约在中新世达到生油高峰,受顶部厚层盐岩热传导作用影响,现在大部分仍处在生油窗内。如果盐窗不发育,纵向上经过裂谷期断裂系统,横向上通过海侵型不整合面,运移至上覆的阿普特阶盐下碳酸盐岩中,聚集在背斜构造圈闭中,这些背斜往往是断陷之间的古隆起或者垒式断块上所形成的孤立碳酸盐岩台地,发育介壳及微生物两类优质储层。其中,巴西东海岸的桑托斯盆地发现盐下碳酸盐岩大油气田9个,坎波斯发现3个,而西非在宽扎盆地发现3个。另外,加蓬盆地还发现了1个盐下砂岩大油气田。区域盖层均为直接覆盖在碳酸盐岩或者砂砾岩之上的分布范围广(约100万km²)、厚度大(100~2500 m)^[3-4]的盐岩,只要不发育盐窗,就可以形成高效封堵。

两岸盐上大油气田形成条件中储层均以重力流扇体为主,另有少量盐上碳酸盐岩,盖层全部为海侵期页岩,只有烃源岩供给不完全相同。由于盐上层系两岸已经属于两个盆地,受物源供给等影响,两岸之间、两岸不同盆地之间及同一盆地不同单元之间,拗陷期沉积厚度差别大,从而影响有效烃源岩的分布范围。由于漂移期形成楔形拗陷沉积体,下陆坡折带沉积厚度最大,一般大于4000 m,其下段证实赛诺曼—土伦阶海侵缺氧性页岩干酪根以II型为主,TOC含量一般为2%~5%,最高达10%,达到了生排烃高峰期^[23-24],具备大油气田资源基础。下刚果盆地由于刚果河充足物源供给,盆地整体上沉积厚度较大,渐新统以来的最大沉积厚度达到6000 m^[3],除了下段赛诺曼—土伦期海阶页岩之外,上段局部以渐新统为主的海相泥页岩也进入生烃门限,有机质以II型为主,TOC含量最高达14.4%^[3],同样具有优质烃源岩条件。同时,薄的拗陷期沉积地层也能形成大油气田。以坎波斯盆地为例,由于盐岩后期活动强烈,油气则通过盐窗向上运移至漂移期海相重力流扇体中,纵向运移距离有长有短,最短运移至

盐上下白垩统阿尔布阶,最长至中新统成藏。由于盐活动在重力流扇体沉积之前和之后都有发生^[3-4],可以形成两类相关的圈闭类型:一类是位于盐枕之上的海底扇形成的岩性圈闭;另一类是靠岩性尖灭及断层共同遮挡形成的复合圈闭。由于重力流扇体多为多期次形成的复合砂体,再加上断层对运移和遮挡条件的影响,同一个大油气田往往具有多个油水界面,油水关系极其复杂。

3.3 北段“拗陷型”盆地形成“重力流扇体群型”大油气田

北段“拗陷型”盆地形成“重力流扇体群型”大油气田(图10)。该段盆地下部拉分裂谷窄而深,分布范围小;上部漂移期拗陷层系沉积厚度大(大于5000 m),且以碎屑沉积充填为主,且重力流扇体普遍发育。

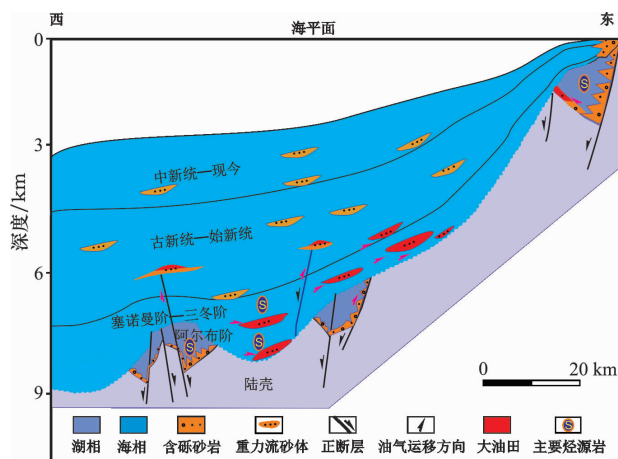


图10 北段“拗陷型”被动陆缘盆地大油气田成藏模式图
Fig.10 The profile showing the accumulation of giant oil and gas fields in the “depression-type” passive margin basins in northern segment

以科特迪瓦盆地为例说明其大油气田成藏特点^[3]。2007年之前,科特迪瓦盆地发现了油气田39个,储量规模为中小型,但随着钻井水深越来越大,发现油田规模也随之变大,2007年5月最大水深的M-1井(水深1322 m)发现了规模最大(11.66亿桶)的Jubille大油田,储层为土伦阶重力流复合砂体,油层有效厚度97.25 m,单层厚度2~36 m,孔隙度平均为22%。2010年5月,在Jubille油田东北高部位部署的Teak-1井,发现了油层总厚度71.7 m的重力流扇体成藏组合,除了钻遇土伦阶重力流扇体油藏之外,又在坎潘阶钻遇了一套重力流扇体油藏。由于漂移期海相深水沉积速度快、厚度大,拗陷下段土伦—赛诺曼阶全球性“缺氧性”海相页岩现今都已经

过了生排烃高峰期, 油气可以一次运移聚集于页岩既作为源岩又作为盖层的重力流扇体之中形成地层圈闭, 也可以经过断层或不整合面向上运移至浅层重力流扇体之中。地震揭示整个拗陷层系从下至上在下斜坡和陆隆处发育多期次的“裙边状”海底扇。继 2007 年在塔诺次盆土伦期发现 Jubille 大油田之后, 在其北侧的利比里亚盆地和对岸的圭亚那盆地深水上白垩统重力流扇体中不断有所发现, 其中圭亚那深水 Liza 大发现, 可采储量达到 12 亿桶, 表明北段“拗陷型”被动陆缘盆地重力流扇体最有利(图 10)。

3.4 “三角洲型”被动陆缘盆地形成“四大环状构造带型”大油气田

三角洲盆地属于特殊的被动陆缘盆地, 其特殊性体现在三角洲层系不仅沉积厚度大, 而且能够形成独立构造-沉积特征, 即由陆向海形成了生长断裂带-泥岩底辟带-逆冲断裂褶皱带-平缓斜坡带四大环状油气富集构造带(图 11)。

尼日尔三角洲盆地勘探程度相对最高, 以其为例说明大油气田成藏特点。尼日尔三角洲最大沉积厚度约 12 000 m, 形成了典型的自生自储自盖型组合^[19]。主要烃源岩为前三角洲亚相的阿卡特组页岩、三角洲前缘亚相的阿戈巴达组泥页岩, TOC 含量为 1.4%~1.6%, 最高可达 14.4%, 有机质类型为 II、III 型^[3-4]。由于新生代以来的高沉积/沉降速度, 阿卡特组前三角洲亚相的大套泥页岩在渐新世以来就开始进入生油窗, 通过系列生长断层及逆冲断层向上运移, 分别通过与之接触的三角洲和重力流扇体发生短距离侧向运移, 最终形成了生长断裂带-泥岩底辟带-逆冲断裂褶皱带-平缓斜坡带四大环状油气富集区(图 7)。生长断裂带储层主要为阿戈

巴达组及阿卡特组三角洲前缘亚相水下分流河道及河口坝砂岩, 孔隙度为 25%~35%, 渗透率达 2~3 D; 中泥页岩底辟带、外环逆冲断裂褶皱带及平缓斜坡带上主要为重力流成因的滑塌体、水道及海底扇。目前该三角洲已发现 61 个大油气田, 其中 49 个为生长断裂带上的滚动背斜, 泥岩底辟带带、逆冲断裂褶皱带和平缓斜坡带勘探程度低, 也分别发现了 2 个、9 个和 1 个大油田。

巴西东北海岸的福斯杜亚马逊^[25]和佩罗塔斯两个盆地也具有类似的盆地结构特征, 推测具有较好的油气勘探潜力。

4 结论

(1) 南大西洋两岸被动陆缘盆地具有明显的共轭性质, 是伴随着南美洲与非洲分开、南大西洋的形成而产生的。两岸盆地都经历了陆内裂谷(早白垩世巴雷姆期)、陆间裂谷(阿普特期)、被动陆缘(阿尔布期以来)三个原型阶段。盆地据结构差异及沉积充填特征, 可分为“三段”“四类”被动陆缘盆地: 南段为裂谷层系发育的“断陷型”盆地, 中段为裂谷及拗陷层系都比较发育且过渡阶段有盐的“含盐断拗型”盆地, 北段为以拗陷沉积为主的“拗陷型”盆地; 另外还发育尼日尔、福斯杜亚马逊等具有独特构造-沉积特征的“三角洲型”被动陆缘盆地, 独特的三角洲层系从陆向海形成生长断裂带-泥岩底辟带-逆冲断裂褶皱带-平缓斜坡带四大环状构造带。

(2) 两岸“三段”“四类”盆地结构及沉积充填的差异性, 决定了其大油气田成藏规律明显不同。南段“断陷型”盆地, 油气主要来源于裂谷层系, 上部拗陷

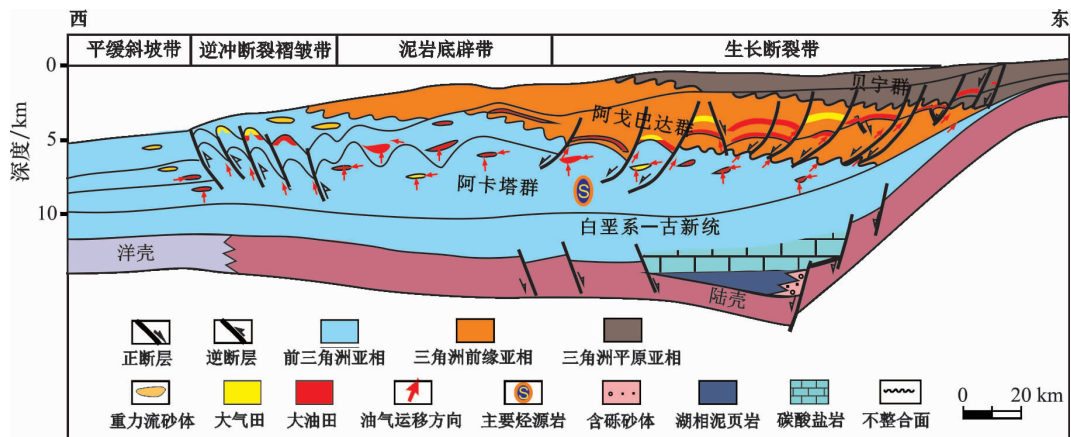


图 11 尼日尔“三角洲型”被动陆缘盆地大油气田成藏模式图

Fig.11 The profile showing the accumulation of giant oil and gas fields in the “delta-type” passive margin basins

期海相页岩作为优质区域盖层, 油气富集于裂谷层系顶部构造-地层成藏组合之中, 形成构造-地层型大油气藏。中段“含盐坳型”盆地, 以岩盐为界: 盐下盐窗不发育, 源于裂谷层系烃源岩被过渡阶段晚期盐岩高效封盖富集于过渡阶段早期的潟湖相碳酸盐岩之中; 盐上, 源于盐上坳陷层系海相页岩中的油气或者盐窗发育带源于裂谷层系湖相烃源岩油气, 经过断层垂向运移聚集于坳陷层系海相重力流扇体之中, 形成盐下碳酸盐岩-盐上重力流扇体大油气藏。北段“坳陷型”盆地, 源于坳陷层系海相页岩中的油气直接充注于本身内部裙边状分布的重力流复合扇体群之中, 形成“漂移期重力流扇体群型”大油气田。尼日尔高建设三角洲型盆地, 本身可以形成自生自储自盖型组合, 形成独特的“四大环状构造带型”大油气田, 即由陆向海生长断裂带-泥岩底辟带-逆冲断裂褶皱带-平缓斜坡带四大环状构造带上油气富集。

参考文献

- [1] MANN P. Tectonic setting of the world's giant oil and gas fields[J]. Bulletin of the Houston Geological Society, 2004, 47: 21-36.
- [2] PAUL W, ROGER M S. Introduction to the petroleum geology of deep water settings[J]. AAPG Memoir, 2010, 85: 1-13.
- [3] IHS Energy. Basins monitor studies[DB/OL]. (2015-07-08) [2018-01-01]. <https://pgeps.ihsenergy.com/GEPS/Display/14514866-4e74-4b8f-af22-bf4ff1e861af>.
- [4] IHS Energy. Geological background[DB/OL]. (2011-07-08) [2018-01-01]. <https://pgeps.ihsenergy.com/GEPS/Display/8ffcc5a3-6c7d-4941-9a44-b602d6814f17>.
- [5] IHS Energy. Field reserve history[DB/OL]. (2017-12-22) [2018-04-01]. <https://pgeps.ihsenergy.com/RegionalData/search#pg=1>.
- [6] BLAICH O A, FALEIDE J I, TSIKALAS F. Crustal breakup and continent-ocean transition at South Atlantic conjugate margins[J]. Journal of Geophysical Research, 2011, 116(1402): 1-38.
- [7] EDWARDS J D, SANTOGROSSI P A. Divergent/passive margin basins[J]. AAPG Memoir, 1989, 48: 1-252.
- [8] KATZ B J, MELLO M R. Petroleum systems of South Atlantic marginal basins: an overview[J]. AAPG Memoir, 2000, 73: 1-13.
- [9] SCHIEFELBEIN C F, ZUMBERGE J E, CAMERON N C, et al. Geochemical comparison of crude oil along the South Atlantic margins[J]. AAPG Memoir, 2000, 73: 15-26.
- [10] SZATMARI P. Habitat of petroleum along the South Atlantic margins[J]. AAPG Memoir, 2000, 73: 69-75.
- [11] WEGENER A. Die entstehung der kontinente und ozeane [J]. Friedrich Vieweg & Sohn Braunschweig, 1915, 23: 94.
- [12] BALLY A W, SNELSON S. Realms of subsidence[J]. Canadian Society of Petroleum Geologists Memoir, 1980, 6: 9-94.
- [13] BRADLEY D C. Passive margins through earth history[J]. Earth-Science Reviews, 2008, 91: 1-26.
- [14] TORSIK T H, ROUSSE S. A new scheme for the opening of the South Atlantic Ocean and the dissection of an Aptian salt basin[J]. Geophysical Journal International, 2009, 177: 1315-1333.
- [15] RUPKE L H, SCHMID D W. Basin modeling of a transform margin setting: structural, thermal and hydrocarbon evolution of the Tano Basin, Ghana[J]. Petroleum Geoscience, 2010, 16: 293-298.
- [16] BROWNFIELD M E, CHARPENTIER R R. Geology and total petroleum systems of the west-central coastal province (7203), West Africa[J]. US Geological Survey Bulletin, 2006, 22(7): 1-42.
- [17] WEN Z X, XU H, WANG Z M, et al. Classification and hydrocarbon distribution rules of passive continental margin basins[J]. Petroleum Exploration and Development, 2016, 43(5): 678-688.
- [18] FRANKE D, NEBEN S, LADAGE S, et al. Margin segmentation and volcano-tectonic architecture along the volcanic margin off Argentina/Uruguay, South Atlantic [J]. Marine Geology, 2007, 244: 46-67.
- [19] HAACK R C, MAY E D, SUNDARARAMAN P, et al. Niger delta petroleum system, Nigeria [J]. AAPG Memoir, 2000, 73: 213-231.
- [20] MELLO M R, FILHO N C A, ANDRE A B, et al. The Namibian and Brazilian southern Atlantic petroleum systems: are they comparable analogues? [J]. Geological Society, London, Special Publications published online, 2012, 369: 1-18.
- [21] BUSHNELL D C, BALDI J E, BETTINI F H, et al. Petroleum system analysis of the eastern Colorado Basin, offshore Northern Argentina[J]. AAPG Memoir, 2000, 73: 403-415.
- [22] GUARDADO L R, MELLO M R, SPADINI A R, et al. Petroleum system in Campos Basin, Brazil [J]. AAPG Memoir, 2000, 73: 317-324.
- [23] HARRIS N B. Taca carbonate, Congo Basin; response to an evolving rift lake[J]. AAPG Memoir, 2000, 73: 341-360.
- [24] MOHTICK W U, BASSETTO M, MELLO M R, et al. Crustal architecture, sedimentation, and petroleum system in the Sergipe-Alagoas Basin, Northeastern Brazil [J]. AAPG Memoir, 2000, 73: 273-300.
- [25] GONZAGA F G, COUTINHO L F C, GONCALVES F T T. Petroleum geology of the Amazonas Basin, Brazil: modeling of hydrocarbon generation and migration[J]. AAPG Memoir, 2000, 73: 159-178.