

天然气地质学

南大西洋深水盆地的构造沉积演化及含油气系统

袁圣强^{1,2}, 吴时国^{1,3}, 马玉波^{1,2}, 付彦辉³

(1. 中国科学院海洋研究所, 中国科学院海洋地质与环境重点实验室, 山东 青岛 266071;

2. 中国科学院研究生院, 北京 100049; 3. 中国石油大学(华东), 山东 青岛 266555)

摘要:南大西洋两岸的被动大陆边缘盆地是当今深水油气勘探开发的热点区域, 其构造沉积作用及含油气条件受控于大西洋的裂开、持续扩张漂移和气候、海平面变化的影响。大西洋边缘盆地的构造演化可以分为前裂谷期、裂谷期、过渡期和漂移期(漂移期又可分为海侵和海退2个时期); 裂谷期发育陆相河流—湖泊—三角洲相沉积体系, 过渡期发育阿普第期蒸发盐岩系, 漂移期发育海相碳酸盐岩和深水碎屑岩沉积体系。以阿普第期蒸发盐岩系为界, 南大西洋深水盆地发育盐下和盐上2套含油气系统, 盐下层油气系统烃源岩为湖相泥(页)岩, 储层为河流—三角洲相及滨岸相砂岩, 盖层为阿普第期蒸发盐岩; 盐上层油气系统的主力烃源岩主要是上白垩统海相泥(页)岩, 储层以浊积砂岩储层为主, 盖层为各个时期发育的泥(页)岩。南大西洋盆地张裂过程的差异性控制了层序发育、蒸发盐岩的分布和含油气潜力。

关键词:大西洋; 深水盆地; 构造沉积演化; 张裂作用; 含油气系统

中图分类号: TE121.1

文献标识码: A

文章编号: 1672-1926(2008)02-0216-06

0 引言

南大西洋两岸的被动大陆边缘盆地是世界深水油气勘探的热点区域和油气集中发现区域^[1-3]。其深水盆地主要包括巴西大陆边缘的 Espirito Santo 盆地、Campos 盆地、Santos 盆地和西非大陆边缘的纳米比盆地、宽扎盆地、下刚果盆地、加蓬盆地、Rio Muni 盆地、杜阿拉盆地等盆地^[1,6](图1), 这些盆地在构造沉积演化和含油气性方面都有许多相似之处, 如都受控于大西洋的张裂作用和持续的漂移, 构造演化可以分为前裂谷期、裂谷期、过渡期和漂移期等4个阶段^[1]。大西洋边缘盆地发育了5个巨厚沉积层序, 即前裂谷期层序、裂谷期陆相层序、过渡期盐岩层序、漂移期海进层序和漂移期海退层序, 沉积了裂谷期湖相和漂移期海相2套烃源岩, 形成了盐上和盐下2套含油气系统^[6,8]。本文重点讨论南大西洋深水盆地的构造沉积演化及其含油气地质特征, 希望能够对我国南海深水油气勘探有所启示。

1 主要的沉积层序

大西洋大陆边缘盆地的构造演化可以分为前裂谷期、裂谷期、过渡期和漂移期^[5]。前裂谷期是指南大西洋开始裂开之前的侏罗纪末期至白垩纪早期; 裂谷期是指早白垩世至阿普第期早期大西洋的张裂阶段, 发育陆相的河流、湖泊和三角洲相沉积体系; 过渡期是阿普第期中晚期蒸发盐岩发育时期; 漂移期是指阿尔比期至今深水碎屑岩和碳酸盐岩沉积时期, 整体层序厚度由陆向海减薄(表1)。

1.1 裂谷期层序

大西洋盆地裂陷作用从早白垩世纽康姆期持续到阿普第期中期, 可分为裂陷I期、II期和III期。以西非大陆边缘盆地为例, 裂陷I期和II期之间的界面是纽康姆期中后期一次比较大的海退形成的, 而裂谷II期和III期之间有一个比较明显的区域性不整合面, 这个不整合面是因为巴列姆期晚期发生的区域性抬升剥蚀造成的(表1)。

收稿日期: 2007-11-20; 修回日期: 2008-01-06

基金项目: 中国科学院三期院创新项目“南海北部深水海域油气勘探的关键问题研究”(编号: KZCX2-YW-203); 国家重点基础研究发展计划项目研究课题“南海新生代大陆边缘沉积演化模式”(编号: 2007CB411703)联合资助。

第一作者 E-mail: yuanshq04@mails.gucas.ac.cn

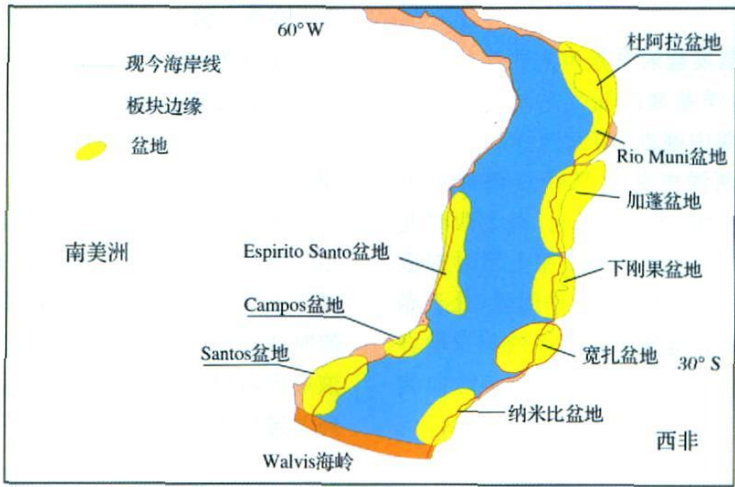


图1 南大西洋早白垩世构造古地理重建示意(据文献[6]修改)

表1 西非盆地地层及构造演化

地 层				年龄(Ma)	构造期	构造、沉积事件	
代	系	统	阶				
新 生 代	新近系	上新统		5.3	漂移期Ⅲ	隆升作用	<div>↑ 尼日尔三角洲建造 ↓ 盐运动 ↓</div>
		中新统					
	古近系	渐新统		23	漂移期Ⅱ	隆升和重力滑塌	
		始新统		33.9			
		古新统		55.8			
				65.5			
中 生 代	白垩系	上白垩统	里赫特—马斯特	70.6	漂移期Ⅰ	隆升和重力滑塌	<div>阿普第期, 发生广泛的蒸发盐沉积。</div> <div>南大西洋张裂, 非洲和南美洲开始分离, 西非海岸系列盆地处于裂谷阶段。</div>
			坎佩尼	83.5			
			桑顿—柯尼亚克	89.3			
			赛诺曼—土伦	99.6			
		下白垩统	阿尔比	112	过渡期	蒸发盐沉积 挤压抬升 抬升剥蚀	
			阿普第	125	裂谷期Ⅲ		
			巴列姆	130	裂谷期Ⅱ		
			纽康姆		裂谷期Ⅰ		
				145			
	侏罗系	上侏罗统	提通				
	前 寒 武						

南大西洋裂开略晚于北大西洋,但南大西洋裂开速率快于北大西洋^[1],在赤道附近南美和非洲接触点巨大摩擦使得南美洲顺时针旋转(图2),这直接控制了大西洋盆地的构造沉积演化^[7]。大西洋的开裂控制着盆地在早白垩世期间可容纳空间的变化,早白垩世可容纳空间和沉积物供给速率在南大西洋变化尤为明显。裂陷期南大西洋的北部地区水体相对较浅,持续的张裂和海侵使得两岸沉积物不稳定而保持较高的碎屑物供应率,张裂也增加了南大西洋裂谷期的可容纳空间,造成了沉积物的快速堆积^[8]。大西洋的裂开表现出明显的不对称和不均

一性,这使得其边缘盆地在构造沉积作用和油气分布上具有总体的相似性,又有明显的不同^[10]。

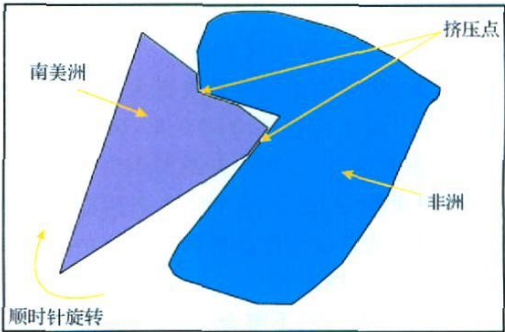


图2 南美洲和非洲分离示意(据文献[7]修改)

1.2 蒸发盐岩层序

广泛分布的巨厚蒸发盐岩系是南大西洋盆地的重要特征,它对南大西洋盆地的油气系统有明显的控制作用^[6]。阿普第期中晚期,南大西洋和北大西洋还没有连通。南大西洋中部的 Walvis 海岭对大洋海水循环具有阻隔作用(图 3),因此,南大西洋北部盆地就处于一个半封闭浅水环境,加上当时构造沉降相对缓慢、气候温暖干燥和蒸发作用强(处于赤道附近),在大西洋北部盆地发育了巨厚的蒸发盐岩沉积。盐盆从西非安哥拉岸外的 Walvis 海岭向北穿过下刚果盆地、加蓬盆地和赤道几内亚盆地,最后

消失在喀麦隆岸外的杜阿拉盆地^[11](图 1)。从南大西洋在白垩纪的构造古地理图上可以看到,在阿普第期形成的盐盆范围以内,还清晰可见安哥拉岸外的 Walvis 海岭对于南大西洋北部盆地的封闭作用(图 3a, 红色标记)。

阿普第期形成的蒸发盐岩层序是属于海陆过渡相的沉积,其分布也不均匀。整体来说盐盆中部的层序发育巨厚,两边比较薄;由陆向海方向,盐层序的厚度总体减薄趋势,直到尖灭在新生洋壳之上。该层序阻碍了下部油气向上运移,对于油气保存起到关键作用,是盐下油气系统的良好盖层。

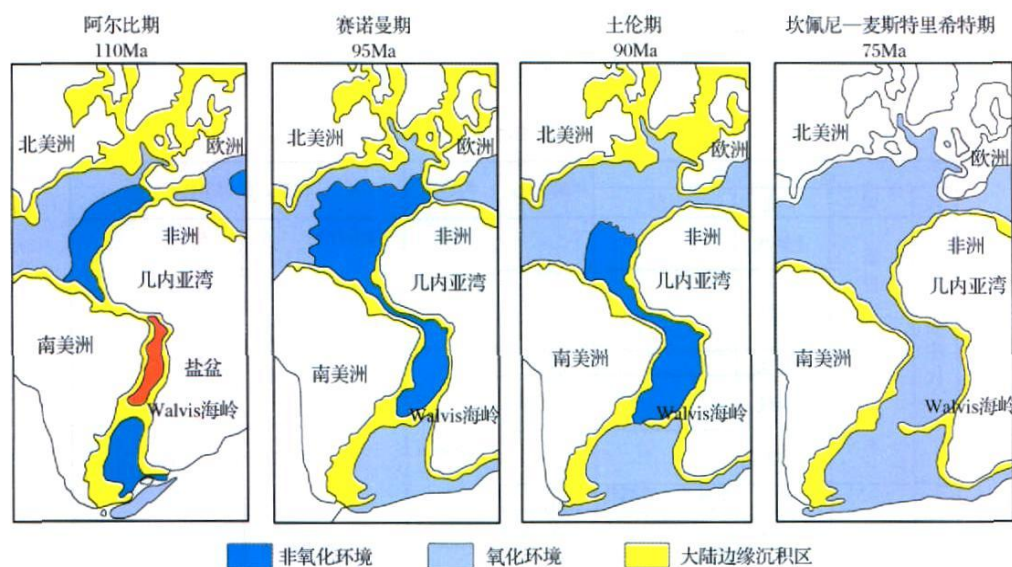


图 3 南大西洋演化示意(据文献 [13] 修改)

1.3 海相碳酸盐岩和深水碎屑岩沉积层序

在阿尔比期南大西洋的盆地演化进入漂移期,该时期一个显著的特点是在阿普第期盐层序之上发育了一套巨厚的碳酸盐岩和碎屑岩互层的层序^[9]。早白垩世晚期,南美洲和非洲完全分离,进入裂后漂移期。南美洲和非洲板块往南的漂移改变了它之前相对于赤道的位置,也改变了当时的气候条件和古海洋环境。同时,阿尔比期持续的海侵,引发了相对海平面的上升,南大西洋北部海盆处于低纬度的浅海环境,因此,从阿尔比期开始发育大规模的海相碳酸盐岩层序。由于沉积环境的变化,碳酸盐岩层序由东向西(由陆向海)方向逐渐减薄消失(图 4)。

早白垩世晚期,南美洲和北美洲西部超级地幔柱幕式作用可能造成南大西洋海盆海底的隆升和相对海平面的上升,同时使大气中二氧化碳含量迅速增加,并产生一系列的不整合^[11-12]。晚白垩世以来,南美洲和非洲板块进一步往南的漂移和南大西洋水

体加深,碳酸盐岩不再发育,取而代之是发育深水碎屑岩沉积体系。第三纪时期,由于持续的海退和物源大量的供给,在陆架边缘发育大型的进积三角洲沉积体系。

2 区域沉积的控制因素

南大西洋沉积作用的主要控制因素包括构造活动、气候的变化、海平面变化。不同的时期主控因素不同,在裂谷期构造作用占主要控制作用,过渡期和漂移期构造活动和海平面变化为主。

2.1 构造作用

构造作用贯穿了整个南大西洋的裂开及其后持续的漂移期,控制了盆地的沉降和沉积。在晚侏罗世—早白垩世,冈瓦纳大陆解体南大西洋开始裂开,南美洲和非洲之间出现了裂谷,形成了陆相湖盆。之后南美洲和西非持续的张裂增大了盆地的可容纳空间,两岸的陆缘因大量的构造剥蚀供应大量的陆

源碎屑物质, 纽康姆期到阿普第期中期, 发育了巨厚的裂谷期陆源湖相层序。在南大西洋地区共发生了 5 次明显的构造隆升剥蚀作用, 形成了几期不整合面(表 1)。巴列姆期晚期发生的构造反转产生了第 1 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; 阿普第期早期发生了第 2 期盆地挤压抬升, 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; 桑托期发生了第 3 期隆升及重力滑塌, 形成了漂移期内部的第一个区域性不整合面; 第三纪中期发生了第 4 期隆升, 引起重力滑塌; 第三纪晚期最后一期隆升作用, 引起了沉积物的变形。构造活动直接控制着洋盆可容纳空间和沉积物的供给, 控制着裂谷期陆相地层、过渡期盐层及漂移期海相地层发育的整个过程, 漂移期盐丘和岩浆活动形成了许多底辟构造, 直接控制了油气的运移、聚集和分布^[8, 13]。

2.2 海平面变化

全球海平面变化对于南大西洋的沉积层序的控制作用主要体现在过渡期和漂移期层序。白垩纪全球海平面整体是持续上升的(图 4), 在裂谷期, 南大西洋盆地内水体深度和盐度的变化反映了沉积作用过程。从已知钻井地球化学分析资料来看, 南大西洋初始裂陷形成淡水湖盆, 持续的张裂作用和全球海平面的升高, 使得其湖盆不断增大和持续沉降, 形成深湖还原环境, 为优质烃源岩沉积提供了条件。由于蒸发作用增强和持续海侵, 湖水逐渐碱化, 最后变成盐湖盆地^[9]。到阿普第期中晚期, 海平面处于相对较低的时期(图 4), 南大西洋北部盆地由于 Walvis 海岭的隔挡作用形成了半封闭盆地, 形成广泛分布的蒸发盐岩层序。从阿尔比期早期, 全球海平面持续上升, 广泛的海侵使得南大西洋盆地水深继续增加, 再加上大气圈由于火山活动造成的二氧化碳骤增、构造隆升等因素, 发育了巨厚的碳酸盐岩和碎屑岩沉积混合物。从古近纪至今是个持续的全球海平面下降时期, 物源供给充足, 深水浊积岩和远端扇发育, 三角洲也开始由陆向海推进, 尼日尔三角洲就在这个时期形成(表 1 和图 4)。全球海平面的变化在一定程度上控制了南大西洋盆地的沉积类型和分布^[15]。

3 含油气系统

阿普第期盐岩层把南大西洋盆地分为裂陷期和漂移期 2 套巨层序(表 1、图 4 和图 5), 相应的也发育了盐上、盐下 2 套含油气系统。盐下烃源岩是优

质的烃源岩, 主要是陆相深湖相、半深湖相烃源岩, 包括纽康姆统湖相泥岩、巴列姆期湖相 Lagoa Feia 和阿普第期湖相页岩和泥灰岩; 干酪根为 I—II 型; 有机质丰度高, 有机碳含量平均值为 6.1%。由于裂谷期地温梯度较高, 该烃源岩在白垩纪晚期开始大量生烃^[6, 16]。不同盆地烃源岩类型也不相同, 巴西 Campos 盆地主要烃源岩是巴列姆期湖相 Lagoa Feia 烃源岩, 而西非盆地烃源岩可以分为 2 套: 盐下为裂谷期纽康姆统湖相泥岩和阿普第期湖相页岩和泥灰岩; 盐上为海相烃源岩, 包括沉积于海相深水封闭环境的赛诺曼阶、土伦阶海相页岩及古新统海相页岩(II—II 型干酪根)。干酪根为 I 型和 II 型,

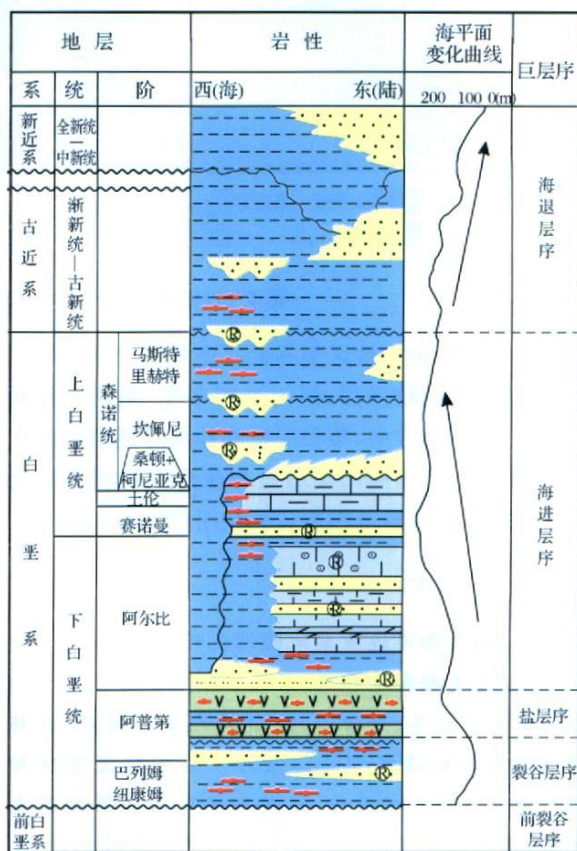


图4 西非 Rio Muni 盆地地层柱(据文献^[13]修改)

有机碳含量平均为 3%~5%。这套烃源岩在第三系中期局部成熟开始生烃。以现在钻探的烃源岩分析来看, 盐上和盐下烃源岩对于不同地区的贡献作用也不大相同, 比如在盐盆南部地区, 钻井地球化学分析发现其烃源岩主要是以陆相为主, 而盐盆北部盆地, 比如 Rio Muni 盆地, 钻井地球化学分析揭示海相烃源岩为主^[14]。湖相烃源岩和海相烃源岩对

于南大西洋两岸的总体贡献也不同,譬如在巴西海岸的石油中发现其 95% 是与湖相烃源岩有关的,而西非油气中与湖相烃源岩相关的只占 15% 左右^[9]。

阿普第期盐岩层的存在使得盐下和盐上形成了 2 套相对独立的含油气系统。在近岸相对较厚的盐岩层盆地中,由于很少有断层切穿盐层,而使得盐下和盐上含油气系统具有“自生自储”的特点,而在断裂活动较强、盐层较薄的深水盆地中,因刺穿构造使

得盐下层油气再次运移,形成“下生上储”油气系统。盐下含油气系统以湖相泥(页)岩为烃源岩,储层为河流—三角洲相及滨岸砂岩相,盖层为阿普第期蒸发岩;盐上层烃源岩为海相泥(页)岩,少数存在盐下层的烃类物质,储层以浊积砂岩储层为主,盖层为相应时期发育的泥(页)岩^[9]。

南大西洋盆地含油气系统由陆向海方向呈现规

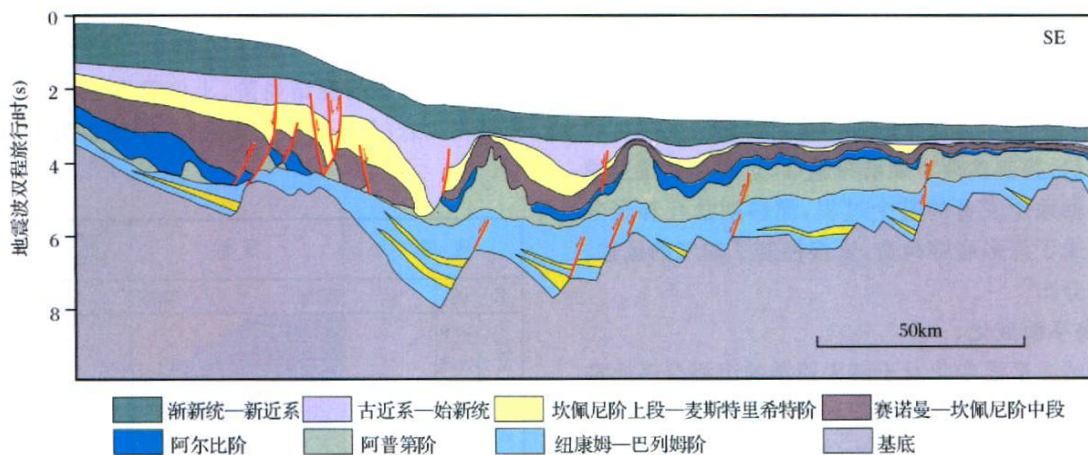


图 5 过巴西 Santos 盆地中部层序分析剖面(据文献[16]修改)

律性的变化。近岸地区裂谷期层序和过渡期盐层序发育,构造活动较强烈,圈闭类型多样,晚期三角洲比较发育;向海方向,裂谷层序和盐层序逐渐减薄直至消失,其主要的圈闭类型是与深水沉积相关的远端扇、浊积岩、水道等地层岩性圈闭(图 5)。

4 主要认识

(1)南大西洋边缘盆地的演化可分为前裂谷期、裂谷期、过渡期和漂移期(后裂谷期),在各期发育相应的前裂谷层序、裂谷层序、过渡期盐岩层序、漂移期海进层序和漂移期海退层序。裂谷期发育陆相河—湖—三角洲相沉积,过渡期发育阿普第期蒸发盐岩,漂移期发育海相碳酸盐岩和碎屑岩沉积,还发育深水远端扇、水道、浊积岩等地层圈闭。

(2)阿普第期盐层序在南大西洋边缘盆地广泛分布,具有盐盆中央厚、南北发育薄的特点,对于整个含油气系统具有明显的控制作用。

(3)不对称张裂造成南大西洋两侧油藏类型不同。巴西沿岸主要是湖相烃源岩油藏类型,而西非主要是海相烃源岩为主的油藏类型。

(4)南大西洋边缘盆地油气分布整体来看分为盐上和盐下 2 套含油气系统。但是在对该地区的地

质和油气条件认识与评价过程中必须充分考虑构造作用、造山运动、海平面变化、气候变化等重要因素,这样才能准确的把握具体的石油地质条件,最大可能地减小勘探风险。

致谢:本文在撰写时得到了中国石油杭州地质研究院吕福亮先生的指导和支持,还得到了中国石油杭州地质研究院海洋中心邵大力、徐志诚、吴敬武先生的大力协助和支持,在此表示衷心的感谢。

参考文献:

- [1] 吴时国,喻普之.海底构造学导论[M].北京:科学出版社,2006:106-133.
- [2] 吴时国,袁圣强.世界深水油气勘探进展与我国南海深水油气前景[J].天然气地球科学,2005,16(6):693-699.
- [3] 何家雄,夏斌,施小斌,等.世界深水油气勘探进展与南海深水油气勘探前景[J].天然气地球科学,2006,17(6):747-752.
- [4] 杨川恒,杜栩,潘和顺,等.国外深水领域油气勘探新进展及我国南海北部陆坡深水油气勘探潜力[J].地质前缘,2000,7(3):247-256.
- [5] 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):641-645.

[6] Kate B J Mello M R. Petroleum systems of South Atlantic

- Marginal basins-an overview[M]// Mello M R, Kate B J. Petroleum Systems of South Atlantic Margins: AAPG Memoir Tulsa, Oklahoma, USA; The American Association of Petroleum Geologists, 73, 2000; 1-13.
- [7] Szatmari P. Habitat of petroleum along the South Atlantic Margins[M]// Mello M R, Kate B J. Petroleum Systems of South Atlantic Margins: AAPG Memoir Tulsa, Oklahoma, USA; The American Association of Petroleum Geologists, 73, 2000; 69-75.
- [8] Michel Seranne, Zahie Anka. South Atlantic continental margins of Africa: A comparison Of the tectonic vs climate interplay on the evolution of equatorial West Africa and SW Africa margin[J] . Journal of African Earth Sciences, 2005, Article in Press.
- [9] Franks L A, Francis J E. Cretaceous Paleoclimates[M] . 1997.
- [10] Meters *et al.* Deep penetrating CMS imaging of the rift drift transition, offshore Dual and North Gabon basin, West Africa, 1996.
- [11] Don Ross, Noman Hempstead. Geology, hydrocarbon potential of Rio Muni area, Equatorial Guinea[J] . Oil & Gas Journal, 1993, 91(35): 96-100.
- [12] Roger L L. Mid Cretaceous superplume episode[J] . Scientific American, 1995, 272(2): 82-86.
- [13] Martin P A Jackson, Carlos Cramez, Jean-Michel Fonck. Role of subaerial volcanic rocks and mantle plumes in creation of South Atlantic margins; implications for salt tectonics and source rocks[J] . Marine and Petroleum Geology, 2000, 17: 477-498.
- [14] Michael E B, Ronald R C. Geology and Total Petroleum Systems of the West-Central Coastal Province (7203), West Africa Geology[R] . US Geological Survey Bulletin 2207-B, 2006; 1-60.
- [15] Conterill K, Tari G C, Molnar J, *et al.* Comparison of depositional sequences and tectonic styles among the West African deepwater frontiers of western Ivory Coast, southern Equatorial Guinea and northern Namibia[J] . The Leading Edge, 2002, 21(11): 1103-1111.
- [16] Harris N B *et al.* The character and origin of lacustrine source rocks in the Lower Cretaceous synrift section, Congo Basin, West Africa[J] . AAPG Bulletin, 2004, 88(8): 1163-1184.
- [17] Modica C J, Brush E R. Postrift sequence stratigraphy, paleogeography, and fill history of the deep-water Santos Basin, offshore southeast Brazil[J] . AAPG Bulletin, 88(7): 923-945.

Tectono-sedimentary Evolution and Petroleum Systems of the Deepwater Basin along South Atlantic Ocean Margin

YUAN Sheng-qiang^{1, 2}, WU Shi-guo^{1, 3}, MA Yu-bo^{1, 2}, FU Yan-hui³,

(1. Key Laboratory of Marine Geology and Environment, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3. China University of Petroleum, Qingdao 266555, China)

Abstract: The South Atlantic Margin Basins (SAMB) are the deepwater E & P hot areas of the world, whose tectono-sedimentary and hydrocarbon conditions are controlled by the rifting and continued drifting of the South Atlantic, the change of weather and the sea level fluctuation. The structure evolution of SAMB can be divided into the prerift, rift, transitional and drift periods, and the drift period can be further divided into the marine transgressive and marine retrogressive periods. The terrestrial river, lacustrine and delta depositional systems were developed in the rift period, the Aptian evaporite rock was developed in the transitional period, and the carbonate and deepwater clastic rock systems were developed in the drift period. The SAMB petroleum systems can be divided into the presalt rift and postsalt drift petroleum systems by the Aptian salt layer, the source rock of the presalt rift petroleum system is lacustrine shale, its reservoir is the river, delta and shoreland sandstone, and the transitional salt is its cap rock; the source rock of the postsalt drift petroleum system is marine shale and the secondary migration of the rift continental source rock, the turbidite is the major reservoir, the cap rock is shale, and the late Cretaceous marine source rock is dominant in this layer. The diverse rifting and drifting of the South Atlantic Ocean controls the sequence development, evaporates distribution and hydrocarbon potential of the SAMB.

Key words: Atlantic Ocean; Deepwater basin; Tectono-sedimentary evolution; Rifting; Petroleum system.