

DOI: 10.12401/j.nwg.2023113

西非北部塞内加尔盆地油气富集规律与勘探方向

王大鹏, 殷进垠*, 田纳新, 田琨, 宫越

(中国石化石油勘探开发研究院, 北京 102200)

摘要: 西非北部塞内加尔盆地是位于前寒武系—古生界结晶基底之上的巨型裂谷—被动陆缘叠合盆地。笔者基于地震、典型钻井、测井资料及国际油气商业数据库和勘探的最新成果, 结合区域地质背景和盆地构造沉积演化特征, 分析盆地油气成藏条件、成藏特征和富集规律, 并预测未来勘探方向。研究表明, 盆地经历前裂谷、同裂谷和被动陆缘 3 期构造演化阶段, 盆地结构呈“北缓南陡”形态, 具体表现为“北部窄陆架缓陆坡、南部宽陆架陡陆坡”特征。盆地发育裂陷期湖相和被动陆缘期海相两套烃源岩, 裂陷期烃源岩对盆地深水区白垩系成藏具有重大贡献, 被动陆缘期烃源岩在上覆地层较厚时才成熟。盆地可划分为 3 种油气成藏模式。①陆架区下生上储, 断层沟通不整合, 陆架三角洲前缘浊积砂岩成藏模式。②斜坡坡脚区下生上储、断砂配置输导、近源供烃成藏模式。③深水—超深水区下生上储, 垂向运移, 构造—地层型浊积砂岩成藏模式。陆架边缘三角洲前缘砂体、斜坡坡脚处的浊积水道和海底扇、深水区浊积水道和浊积扇是塞内加尔盆地重点勘探领域, 深水区大型构造—地层圈闭为盆地最重要的勘探目标。

关键词: 油气地质特征; 富集规律; 主控因素; 勘探方向; 塞内加尔盆地

中图分类号: P618.130.1

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2023)05-0061-11

Hydrocarbon Accumulation Characteristics and Future Exploration Direction in Senegal Basin, Northwest Africa

WANG Dapeng, YIN Jinyin*, TIAN Naxin, TIAN Kun, GONG Yue

(Petroleum Exploration & Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 102200, China)

Abstract: The Senegal basin in Northwest Africa is a giant rift—passive margin superimposed basin floored by the Precambrian—Paleozoic crystalline basement. Based on combinations of seismic, drilling, well logging data and the latest international commercial petroleum databases and exploration results, along with understanding of regional geological history (tectono—sedimentary evolutions), this study was focused on hydrocarbon accumulation conditions and patterns and enrichment rules of hydrocarbons, and predicted the future direction of exploration in the Senegal basin. The study shows that the basin experienced three tectonic evolution stages: pre—rift, syn—rift, and passive margin. The current structure of the basin is characterized by “a gentle northern slope and a steep southern slope”, specifically, the narrow continental shelf and gentle continental slope in the north the wide shelf and steep slope in the south. The basin has lacustrine source rocks deposited during the rifting period

收稿日期: 2023-02-23; 修回日期: 2023-05-08; 责任编辑: 吕鹏瑞

基金项目: 国家科技重大专项(2016ZX05033-001)和中国石化集团科技部项目(P17062-3、P22085、P22086)联合资助。

作者简介: 王大鹏(1984—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事国外含油气盆地油气地质综合研究。E-mail: wangdp.syky@sinopec.com。

* 通讯作者: 殷进垠(1963—), 男, 博士, 正高级工程师, 主要从事国外含油气盆地综合分析构造地质研究。E-mail: yinjin.syky@sinopec.com。

and marine source rocks deposited in the passive margin period. The lacustrine source rocks have a more significant contribution to petroleum accumulations in the Cretaceous reservoirs in deepwater areas. Marine source rocks became mature until the thicker overlying sediments deposited. Three types of hydrocarbon accumulation models were recognized: ① lower-generation and upper-storage in the continental shelf area characterized by delta-front turbidite sandstones charged through unconformity and faults. ② lower-generation and upper-storage at the foot of the continental slope dominated by near-source fault-sandstones configuration. ③ lower-generation and upper upper-storage in deepwater and ultra-deepwater areas dominated by structural-stratigraphic turbidite trap through vertical migration. The shelf-margin delta-front sandstones, turbidite channels and submarine fan lobes at the slope foot, turbidite fan in the deepwater areas are favorable targets for exploration. Large structural-stratigraphic traps in deepwater areas are the most important exploration target in the Senegal basin.

Keywords: hydrocarbon geological characteristics; hydrocarbon accumulation pattern; controlling factor; exploration direction; Senegal basin

近年来,西非北部塞内加尔盆地在深水区白垩系不断获得重大发现,油气勘探活动十分活跃,成为全球油气勘探开发的热点地区。截至2022年底,盆地已发现探明和控制石油、天然气和凝析油可采储量分别为1.1亿t、1.6万亿m³和0.7亿t,合计14.6亿t油当量,油气类型以天然气为主,占比87.9%。自2014年以来,盆地连续获得Sne、Fan、Tortue、Yakaar等多个油气发现(IHS, 2023)。2019年, BP公司发现的Orca大气田为当年全球最大水深、储量最大的气田,进一步证实了盆地深水区巨大的勘探潜力。在这些新发现的带动下, Total、Shell和ExxonMobil等国际大型油公司争先布局塞内加尔盆地。2020年初,塞内加尔政府发布了第10轮海域区块招标,使得该盆地再次成为全球油气勘探的焦点。

虽然国内外学者已针对塞内加尔盆地的构造演化、沉积充填以及油气成藏条件等方面进行研究(Labails et al., 2010; 冯杨伟等, 2010; Villeneuve et al., 2015; Ye et al., 2017; 孙涛等, 2017a; Yannick et al., 2018; Sayers et al., 2018),但大多针对盆地局部地区或次盆开展研究,而关于盆地整体的成藏条件、成藏特征、油气主控因素和富集规律等方面论述较少(Davison, 2005; 熊利平等, 2010; 刘延莉, 2014; 徐汉梁等, 2014; Ndiaye et al., 2016; 王大鹏等, 2017; 孙涛等, 2017b; 朱伟林等, 2017; 王宏语等, 2020),对于盆地成藏缺乏规律性认识,未来勘探方向尚不清晰。笔者基于地震、典型钻井、测井资料及最新的国际油气商业数据库和勘探成果,结合区域地质背景和盆地构造沉积演化特征,分析盆地油气成藏条件、油气分布主控

因素,总结盆地不同成藏区带油气成藏特征及差异性富集规律,预测未来勘探方向。研究成果可为中国油公司的海外战略选区和新项目勘探开发提供借鉴和参考。

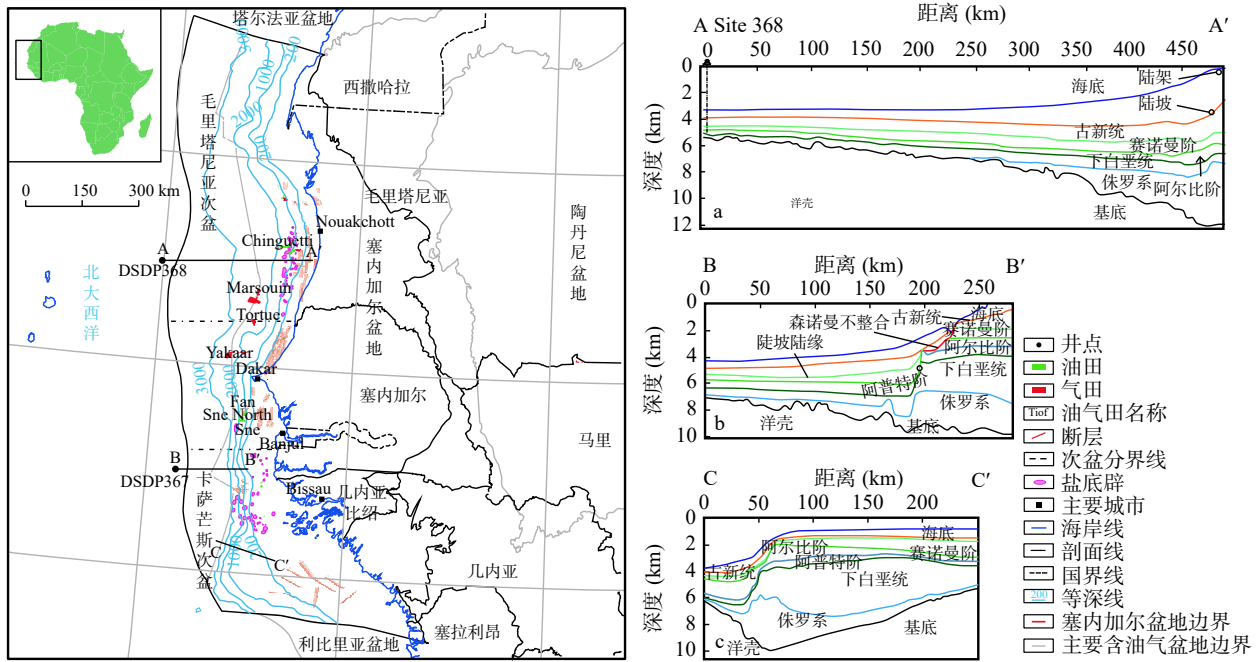
1 盆地地质特征

1.1 盆地概况

塞内加尔盆地是位于前寒武系—古生界结晶基底之上的巨型裂谷—被动陆缘叠合盆地,盆地海域面积较大,根据大型转换断层位置,从北向南划分为毛里塔尼亚次盆、北部次盆和卡萨芒斯次盆,盆地总面积为 93.9×10^4 km²,是西非面积最大的含油气盆地(图1)。盆地油气勘探经历从陆上、浅水陆架向深水—超深水区的转移,2014年之前主要勘探目标为陆上和浅水陆架的上白垩统海相砂岩,发现的油气规模较小,大多尚未开发。2014年以来,在Kosmos、Cairn能源等独立石油公司和国际大型油公司带动下(Kosmos, 2021),勘探领域逐渐从陆架区向深水—超深水区下白垩统阿尔必阶和上白垩统赛诺曼阶浊积砂岩领域扩展,先后发现Sne、Fan、Tortue、Yakaar和Orca等一系列大型油气田(图1)。目前,油气发现主要位于毛里塔尼亚次盆和北部次盆,但盆地整体勘探程度仍较低,探井密度为5 869 km²/口,深水区钻井仅为40口。

1.2 构造沉积演化

伴随冈瓦纳大陆和劳亚古陆开裂以及新特提斯洋的开启,盆地形成演化与中大西洋晚三叠世—早侏罗世裂开以及非洲与北美板块的分离密切相关,主要



a. 盆地北部结构; b. 盆地中部结构; c. 盆地南部结构

图 1 塞内加尔盆地位置、构造分区和地质剖面图(剖面见 A-A'、B-B'和 C-C')

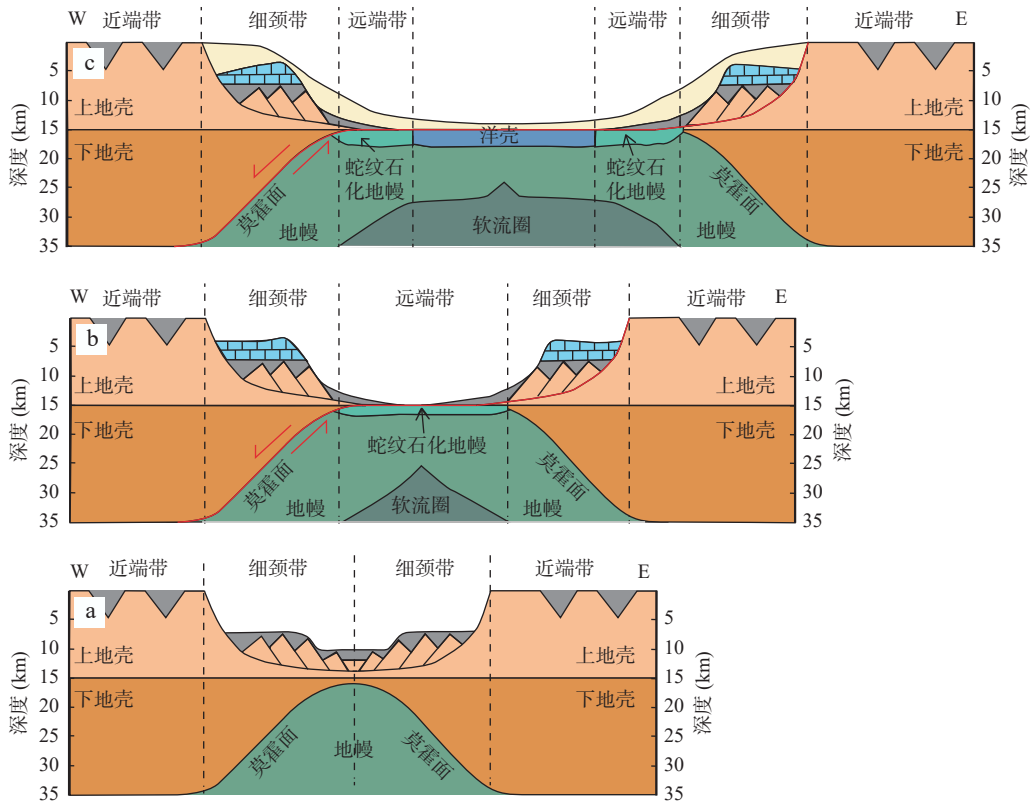
Fig. 1 Maps showing the location, tectonic domains and geological sections of the Senegal basin

经历了二叠纪挤压和三叠纪末之后持续拉张,其裂开时间早于北大西洋和赤道大西洋(Withjack et al., 1998; Bird et al., 2007; Golonka, 2007)。塞内加尔盆地靠近陆地一侧为未减薄的陆壳,地壳拉伸减薄不明显,为早期裂陷及沉积地层发育区;地壳减薄带,强烈拉伸,成为盆地构造沉降和热沉降的中心,是盆地晚期裂陷、翘倾掀斜和被动陆缘期沉积的重要区域,也是大陆架和斜坡主要发育带(图 2)。盆地演化历史相对较长,盆地呈“北缓南陡”结构形态,具体表现为“北部窄陆架缓陆坡、南部宽陆架陡陆坡”特征,形成从陆架边缘三角洲、斜坡复合水道、坡脚滑塌体到深水扇为主的陆架-陆坡沉积体系(王宏语等, 2020; Casson et al., 2020; 宫越等, 2020)。塞内加尔盆地主要经历了古生代早期—中石炭世前裂谷、晚三叠世—早侏罗世同裂谷、中侏罗世—现今被动陆缘 3 期构造演化阶段。晚白垩世,盆地整体进入沉降阶段,伊比利亚板块与非洲板块碰撞以及新生代阿特拉斯造山运动导致盆地局部发生一定程度的构造反转(Ellouz et al., 2003),地层高差变大,陆架区物源供应变强,沉积物充填下切沟谷并覆盖于原陆架-陆坡之上,地层沉积厚度向海域快速增厚,古近纪后,盆地宽缓的大陆沉积斜坡已基本定型。盆地被动陆缘层系较厚,沉积地层以中新界为主,沉积中心最大厚度可达 14 km(图 3)。

前裂谷期,盆地处于西冈瓦纳北部,整体构造环

境稳定,沉积特征与北非类似,以志留系和泥盆系海相碎屑岩沉积为主,但后期受华力西构造影响,抬升和剥蚀作用强烈,现以残留沉积为特征(Ye et al., 2017),由于地层埋深较深,盆地的油气勘探暂未钻遇。同裂谷期,伴随中大西洋早期裂解和区域强烈拉张,地壳明显减薄,沉积充填主要发育于陆架下部或陆架边缘断裂带附近的凹槽内,伸展断裂形成一系列北东向正断层及狭长的地堑和半地堑,以三叠系湖泊、河流和三角洲等陆相沉积为主,深盆区沉积湖相富有机质页岩,后期受北部裂谷作用及新特提斯海水从北向南入侵,盆地水体处于干旱蒸发环境,稳定封闭、半封闭的厌氧环境下沉积了厚层上三叠统—下侏罗统盐岩(Martin et al., 2010; IHS, 2023)。

被动陆缘期,盆地由东向西形成了从陆架区、陆架边缘碳酸盐岩台地到斜坡、深海盆底区浊积水道和浊积扇的沉积体系。被动陆缘早期中侏罗世—早白垩世阿普特期,裂谷作用减弱,差异热沉降作用下,现今陆架外缘及其附近发育碳酸盐岩台地和碳酸盐岩斜坡沉积,陆架边缘发育碳酸盐岩建造,半深海—深海区以泥岩沉积为主。阿普特末期至阿尔比期,持续拉张背景下中、南大西洋完全连通,全球性缺氧条件下沉积了阿尔比-土伦阶区域性富有机质海相页岩(Moulin et al., 2010),受海平面上升及陆架沉积压沉作用影响,近陆架方向发育多级断裂坡折,局部发生



a. 晚三叠世—早侏罗世同裂谷期； b. 中侏罗世—早白垩世被动陆缘早期； c. 阿尔比期至今被动陆缘晚期

图2 中大西洋两岸盆地构造沉积演化模式图

Fig. 2 Maps showing tectonic sedimentary evolution pattern on both sides of the central Atlantic ocean

掀斜和翘倾,随着差异剥蚀作用增强,碎屑物源供给速率变化,陆架边缘附近发育三角洲、下切谷、浊积水道和斜坡滑塌体,深水碎屑岩沉积体系广泛发育,逐渐由浊积扇向深海泥岩沉积转变(图2)。

2 油气地质特征

塞内加尔盆地油气成藏条件优越,受大陆裂解、岩石圈减薄、全球缺氧事件、物源供应及后期构造运动影响,盆地发育多套生储盖组合和多种圈闭类型,为油气运聚提供了良好的保障条件(图3)。

2.1 烃源岩

塞内加尔盆地发育裂谷期湖相和被动陆缘期海相两套烃源岩。裂谷期烃源岩为沉积于地堑、半地堑内的富含陆相有机质的湖相页岩,受裂陷控制分布于近陆架边缘和陆架下部,向海方向变薄,埋深较大,已达高成熟,以生气为主(Yannick et al., 2018)。盆地深水勘探初期,在靠近裂陷附近发现多个大型天然气田,而之后向外扩展勘探。由于距离裂陷烃源岩较远,被动陆缘期烃源岩尚未成熟,导致多口勘探井失利

(Sayers et al., 2018; Kosmos, 2021)。受盆地勘探程度制约,裂谷期烃源岩钻遇探井较少、资料缺乏,尚无确定的油源对比数据,但通过与北美东部共轭盆地对比研究和最新的油气勘探实践成果研究,推测盆地发育裂谷期烃源岩(图1)。

基于白垩纪古气候、古洋流以及盆地所处位置,阿普特-阿尔必期和赛诺曼-土伦期和森诺期盆地发生过多次大洋缺氧事件(Kuhnt et al., 1995; Lüning et al., 2004; Nzoussi-Mbassani et al., 2005),在上升洋流低氧带和有机质高产富集等多因素叠加条件下,盆地发育下白垩统阿普特-阿尔必阶和上白垩统赛诺曼-土伦阶海相烃源岩(孙涛等, 2017a; Sebastien et al., 2018),烃源岩在晚白垩世开始排烃,中新世以后进入生烃高峰。被动陆缘期的海相烃源岩主要发育于斜坡和坡脚区(Erlich et al., 2003; Sebastien et al., 2018),在上覆地层较厚时,该套烃源岩才能进入生油窗,局部地温梯度较高情况下,可进入生气窗(图1)。通过对盆地陆架附近深水典型钻井的烃源岩地球化学分析及油源对比研究表明,前者干酪根类型为II、III型,沉积环境为海陆过渡相或浅海陆架三角洲相,热演化程度

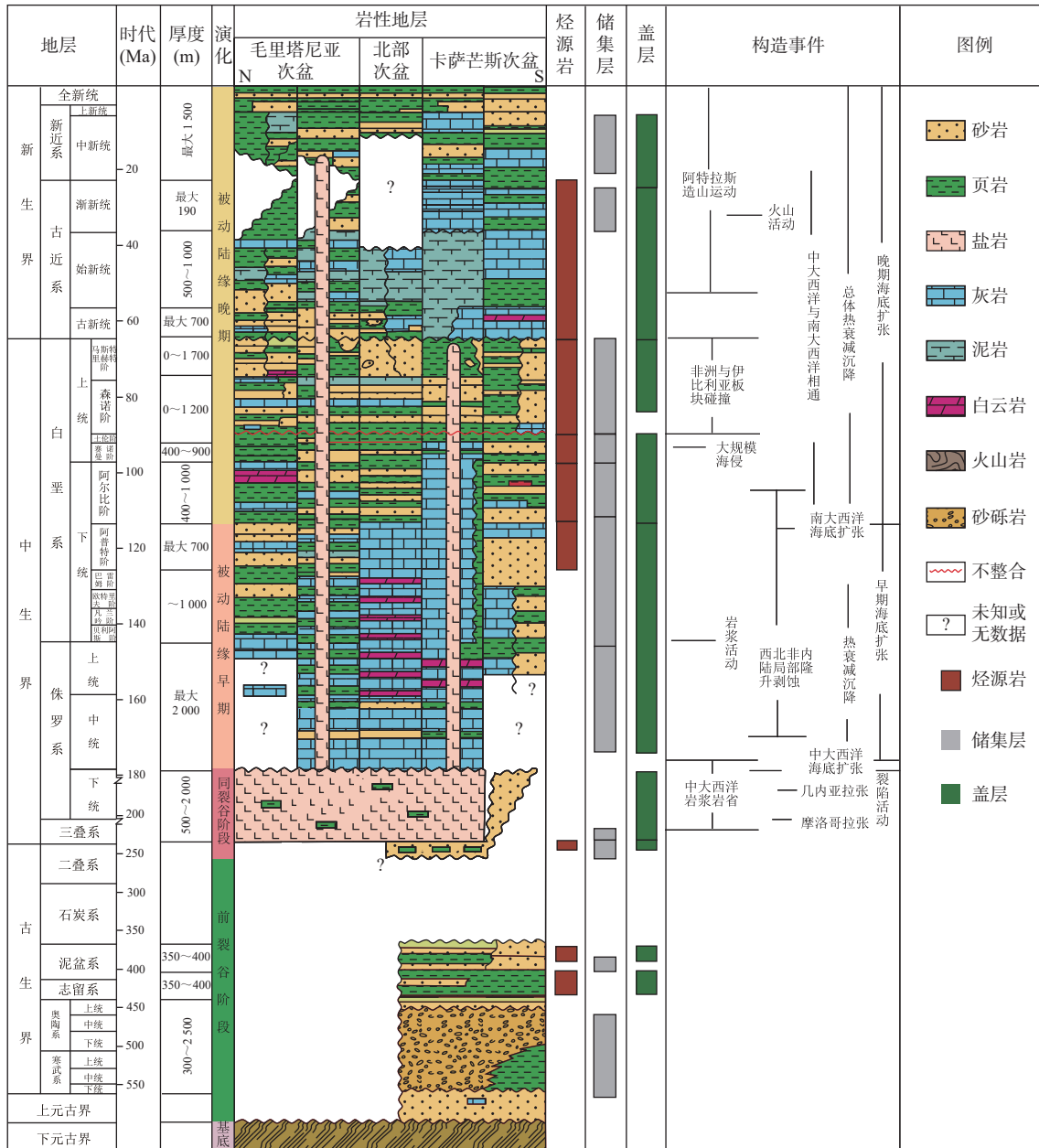


图 3 塞内加尔盆地综合地质柱状图(据 IHS, 2023 修改)

Fig. 3 Generalized stratigraphic chart in the Senegal basin

为成熟-高成熟阶段, 岩石热解参数 S_2 为 2~7 mg HC/g 岩石, 生烃潜力中等-好, 倾油和气, 局部可能处于生气阶段; 后者形成于最大海侵时期的厌氧环境, 岩性为黑色富有机质页岩, TOC 值为 3.0%~10.0%, 厚度为 50~150 m, 局部达 490 m, 生烃潜力为 3.0~75.0 g HC/kg, 有机质丰度高、分布范围广, 为陆架和斜坡区油气田主要的烃源岩(图 4)。超深水区被动陆缘期烃源岩资料来源于深海大洋钻探, DSDP 367 井赛诺曼-土伦阶烃源岩的 TOC 值达 40%, 氢指数(HI)值为 300~900 mg HC/TOC, 虽然深海区比陆

架环境沉积速率低、有机质丰度高、保存条件好, 但生烃潜力和成熟度相对较低。

2.2 储集层

盆地发育三叠系至中新统多套储层, 以下白统阿尔比阶和上白垩统赛诺曼阶浊积砂岩为主力储层, 次要储层为中新统、森诺阶和马斯特里赫特阶相砂岩, 侏罗系一下白垩统阿普特阶台缘生物礁和岩溶体为潜在储层。白垩纪, 在温暖潮湿向干旱过渡的古气候以及陆架向大陆方向迁移、内陆隆升等构造因素影响下(Macgregor, 2010), 盆地发育冈比亚河、塞

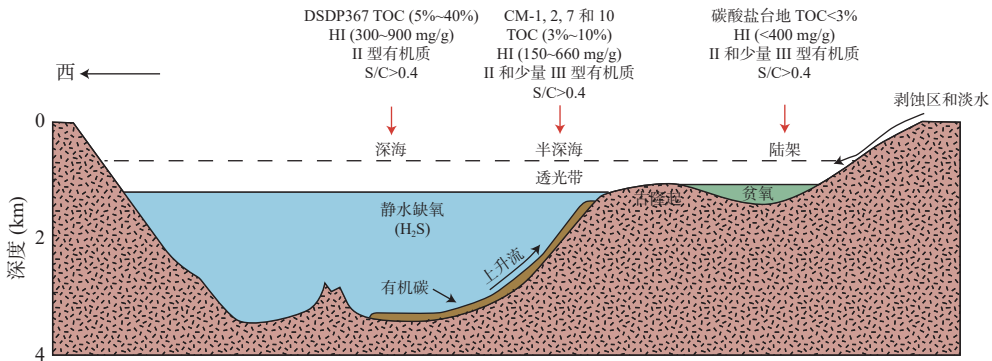


图4 塞内加尔盆地被动陆缘期海相烃源岩发育模式图(据孙涛等, 2017a 修改)

Fig. 4 Schematic diagram of marine source rocks at passive margin period in the Senegal basin

内加尔河和努瓦克肖特河等中小型古水系,其沉积充填受海平面升降、物源供给速率和古地貌影响,陆架边缘附近、斜坡区和深水区形成一定规模的砂体,砂体的展布特征主要受控于沉积物供应速率、断裂活动和陆架坡折演化,砂体规模与扇体展布范围比高供给体系的刚果扇要小很多(图5)。沉积物负载导致盆地差异沉降,陆架边缘三角洲前缘砂体发育过程中不断向陆坡方向搬运,随坡度和可容空间的变化,在一定的滑塌动力和触发机制可越过碳酸盐台地和陆架坡折堆积于斜坡和深水区(Zavala et al., 2017),形成斜坡浊积水道和坡脚滑塌体、深水浊积水道和浊积扇(图6)。

下白垩统阿尔比阶和上白垩统赛诺曼阶储层,在陆架边缘以三角洲前缘砂体为主,斜坡区陡坡坡脚处为滑塌体、缓坡区可形成面积较大的斜坡扇,深水区过渡为浊积水道和多层叠置复合扇体(图6a、图6b)。Sne 油田储层为陆架三角洲阿尔必阶前缘砂体,可分为上、下两段。下段以前缘水道和朵叶体为主,储层厚度大、分布稳定,泥质含量低,孔隙度为 23.0%~27.0%,平均渗透率达 $455 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,连通性好,为优质储层;随着坡度变缓,物源供应减少,上段转变为复合水道和溢岸沉积,分布范围广,泥质含量增大,主要为泥质粉砂岩,孔隙度为 16.0%~21.0%,非均质性强(图7)。Fan 油田储层为近陆缘经断坡快速堆积于斜

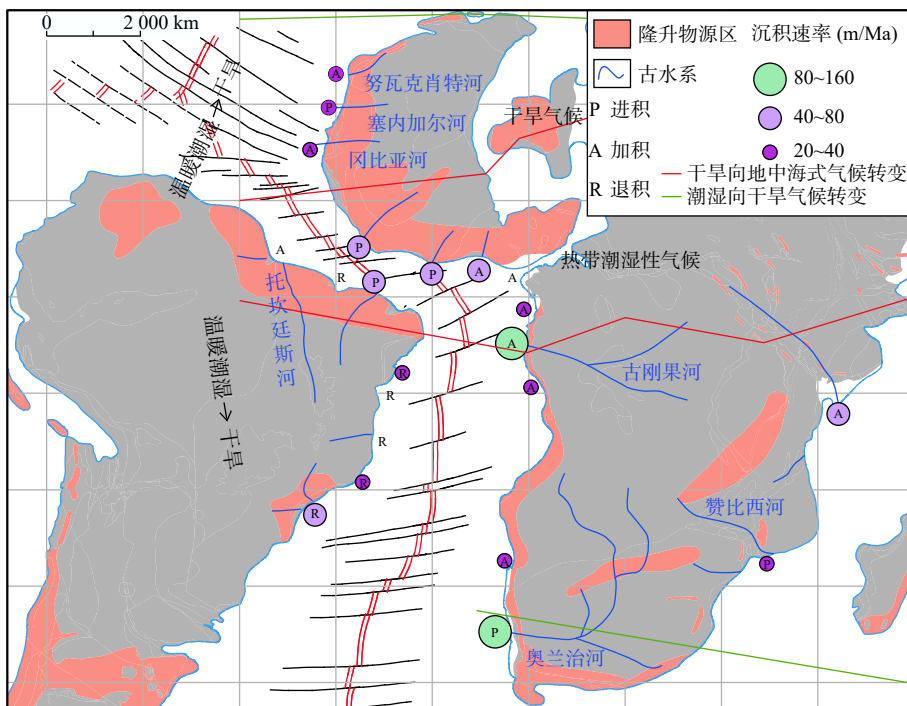
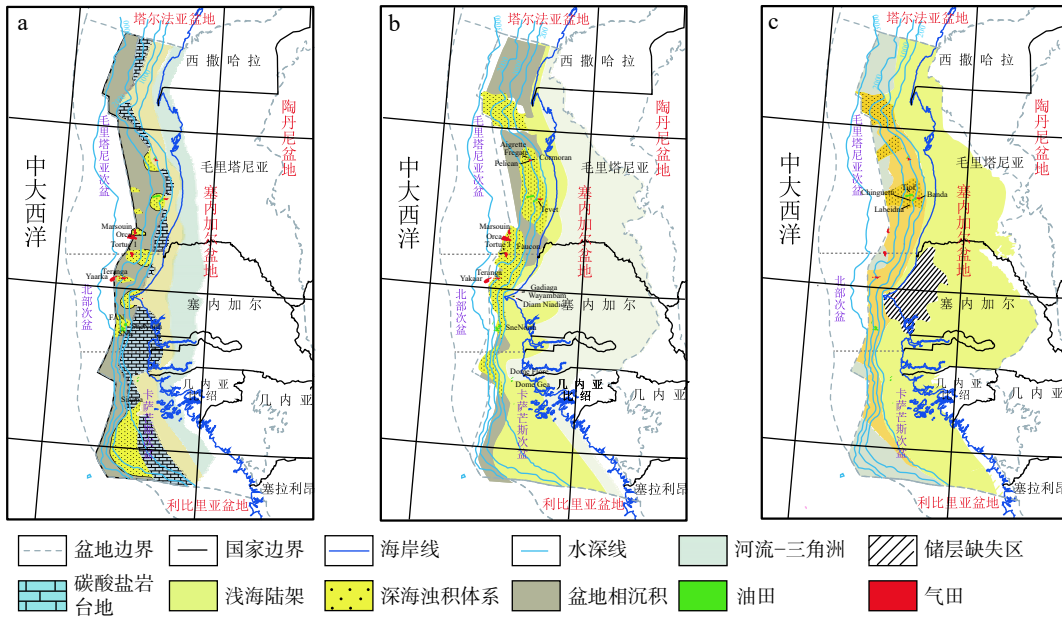


图5 西非晚白垩世古气候与古河流沉积位置图(据 Macgregor, 2010 修改)

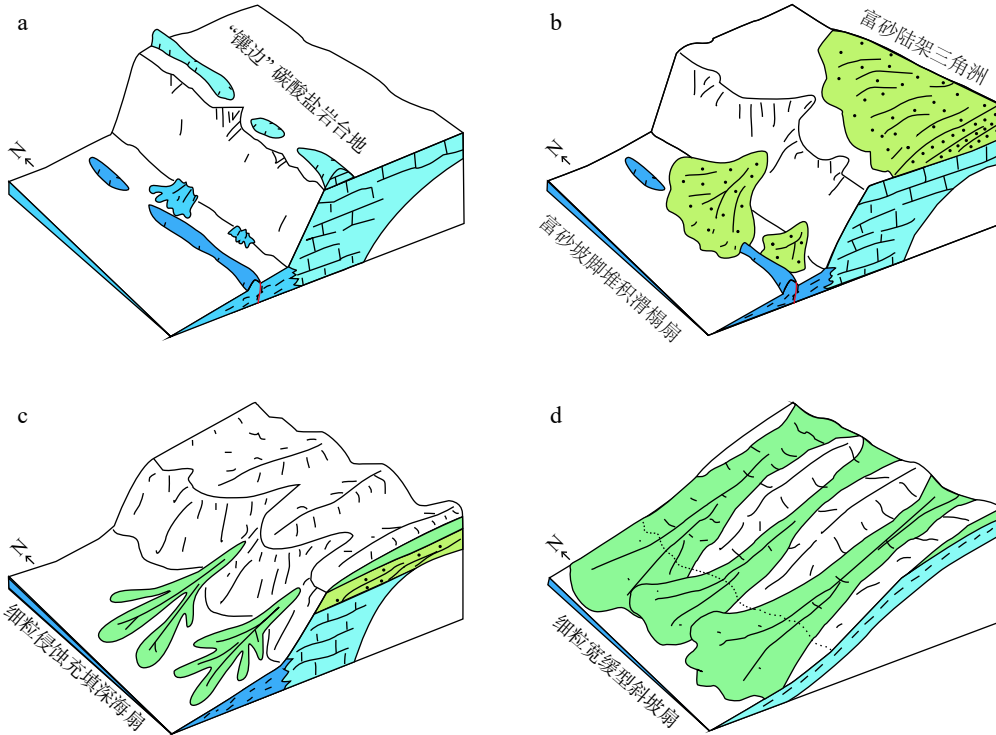
Fig. 5 Map showing paleoclimate and paleo-fluvial sedimentary location of the Late Cretaceous in the West Africa



a. 下白垩统储层分布图; b. 上白垩统储层分布图; c. 中新世储层分布图

图 6 塞内加尔盆地储层分布图

Fig. 6 Maps showing reservoir distribution for Lower Cretaceous, Upper Cretaceous and Miocene in the Senegal basin



a. 阿普特阶; b. 阿尔比阶; c. 赛诺曼阶-康尼亚克阶; d. 圣通阶-马斯特里赫特阶

图 7 塞内加尔盆陆缘沉积演化模式(据宫越等, 2020 修改)

Fig. 7 Development and evolution patterns of the passive margin in the Senegal basin

坡脚处的阿尔比阶滑塌体砂岩, 与陆架边缘沟谷具较好的对应关系, 厚度大、面积小, 粒度较粗。Tortue 大气田储层主要是深水区缓坡环境下的阿尔比阶、赛诺曼阶的浊积水道和浊积扇复合体, 受坡度和地貌形

态控制, 距离陆架边缘和斜坡有一定距离, 与近陆缘区相比, 分布范围广, 多期叠置发育, 物性好, 平均孔隙度达 25.0%。

中新统、森诺阶和马斯特里赫特阶储层, 沉积于

海相三角洲和浅海陆架环境,盆地北部浊积水道和浊积扇发育,南部主要沉积海相砂岩。Chinguetti 油田、Labeidna 油田和 Banda 气田已钻遇这套储层,储层物性较好,孔隙度为 15.0%~35.0%,平均渗透率为数百 md,但储层净厚度较薄,平均厚度小于 20 m,油气藏规模一般不大,普遍小于 6.8 百万吨油当量(图 6c)。

侏罗系—下白垩统阿普特阶储层,以台缘生物礁和岩溶体为主,由于埋藏深,盆地内钻遇该套储层的探井较少。目前只有 VR-1 井钻遇碳酸盐岩储层顶部,孔隙度为 5.0%~9.0%,虽有油气显示,但相对致密。通过与北美东海岸共轭盆地对比,陆架边缘的断裂带附近通常裂缝系统较发育,可改善储集条件,局部可形成较好的储层,这套储层可能具有较好物性,孔隙度为 10.0%~23.0%,由于侏罗纪—阿普特期早期盆地沉积环境稳定,陆源物质供应少,阿普特期末期盆地局部掀斜,具备台缘礁、岩溶体发育的条件,陆架边缘附近局部生物礁储层仍有一定的勘探潜力。

2.3 盖层

盆地盖层包括同裂谷期上三叠统—下侏罗统区域性盐岩、被动陆缘期阿普特阶—土伦阶泥页岩和中新统泥页岩两套盖层。晚三叠世—早侏罗世是盆地重要的成盐期,其沉积与中大西洋扩张和新特提斯洋海水入侵相关(Rowan, 2014),距物源区较远及循环受

限的条件下,形成了巨厚的盐岩盖层,为下部油气免于逸散和过早成熟提供重要保障,对后期深水区油气成藏至关重要。阿普特阶—土伦阶泥页岩多以互层形式存在,其中最大海侵时沉积的赛诺曼阶顶部泥页岩是最重要的区域性盖层,有效地封堵白垩系储层的大部分油气。中新统泥页岩与紧邻的中新统、森诺阶储层侧向或垂向接触,形成良好的直接盖层和层间盖层。

2.4 圈闭

塞内加尔盆地圈闭形成受基底性质、古地貌和后期阿特拉斯造山运动引起的构造反转和褶皱作用等多重因素控制,不同构造部位圈闭类型不同,单一构造圈闭较少,以构造—地层圈闭为主,盐岩发育区可形成盐相关构造—地层圈闭(C&C, 2022)。同裂谷期受断裂带控制,早期构造活动强烈,以断块圈闭为主,晚期由于地壳薄化及强烈伸展作用,形成不整合、古潜山和河谷充填等类型。被动陆缘期陆缘区受构造抬升影响可形成与不整合相关或沿断裂带发育的岩溶体等构造—地层圈闭,斜坡和深水区在后期构造反转背景下,晚期陆架边缘断裂转换带附近基底断层活动沟通深部生烃洼陷内裂陷期烃源岩,生成的油气聚集于低幅宽缓的扭动背斜等构造—地层复合圈闭中成藏(图 8)。

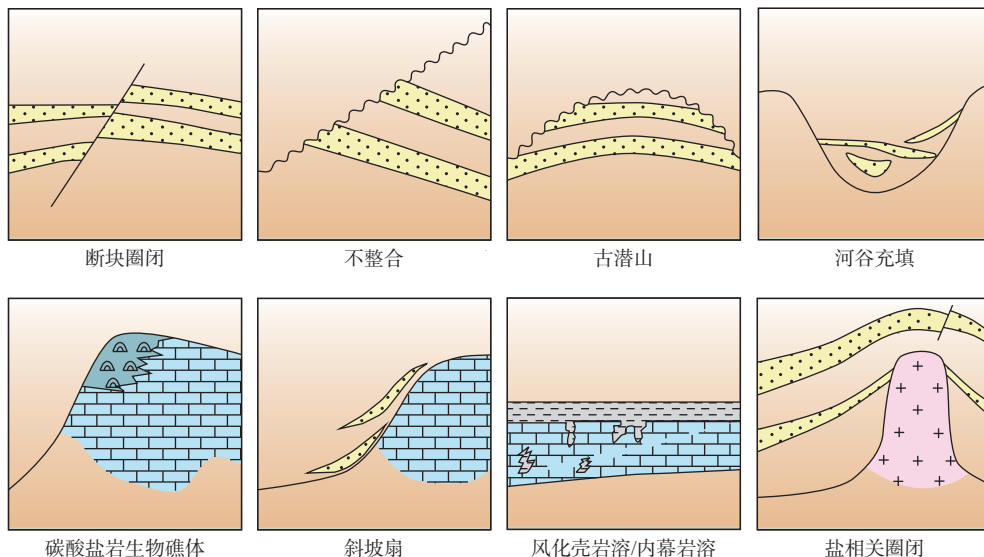


图 8 塞内加尔盆地主要油气圈闭类型示意图

Fig. 8 Schematic diagram of the main trap types in Senegal basin

3 油气富集规律

烃源岩晚期大量生烃为油气聚集提供了丰富的

物质基础,规模发育的优质储层和后期构造反转形成的大型圈闭为油气的大量聚集提供了有利条件。不同部位有效烃源岩发育、砂体规模和后期构造活动形成的圈闭控制了盆地油气的分布和富集。

3.1 油气成藏模式

考虑砂体规模、油气运移距离、圈闭大小和油气藏类型等特征,盆地可划分为陆架区、斜坡坡脚区和深水盆底区 3 个成藏区带。陆架区多为中小型油气藏,斜坡坡脚区主要为油藏,深水盆底区多为大型气藏。不同位置油气聚集模式在成藏过程中存在较大差异,可划分为 3 种油气成藏模式。①陆架区下生上储、断层沟通不整合、陆架三角洲前缘浊积砂岩成藏模式,即坡脚处附近的裂陷期和被动陆缘期烃源岩生成的油气沿断层顺斜坡不整合垂向和侧向运移,在陆架区陆架三角洲前缘砂体的构造-地层

圈闭中成藏,如 Sne 油田。②斜坡坡脚区下生上储、断砂配置输导、近源供烃成藏模式,即坡脚处被动陆缘期烃源岩在上覆地层埋深较厚时成熟,坡脚处断层沟通下伏被动陆缘期烃源岩,油气不需要经过长距离的运移在临近的坡脚处滑塌体、浊积扇砂体内聚集成藏,如 Fan 油田。③深水盆底区成藏模式为下生上储、垂向运移、构造-地层型浊积砂岩成藏,即晚期基底断层活化沟通深部裂陷期烃源岩,油气沿断层向上运移至深水-超深水低幅宽缓的浊积砂岩背斜圈闭中成藏,如 Tortue 气田、Orca 气田等(图 9)。

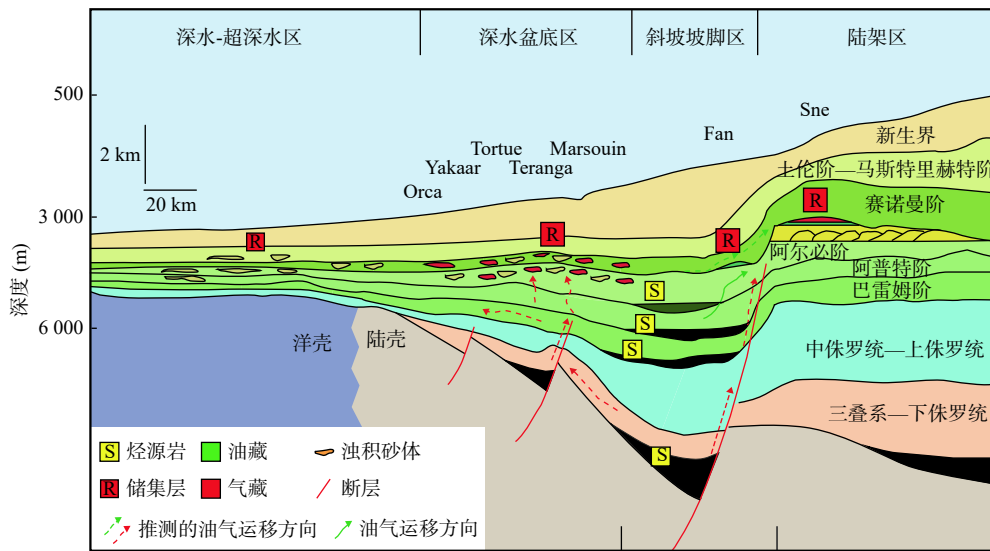


图 9 塞内加尔盆地油气成藏模式和典型油气田位置图

Fig. 9 Hydrocarbon accumulation pattern and typical oil and gas fields location in the Senegal basin

3.2 成藏主控因素

塞内加尔盆地范围大,构造演化时间长,考虑已发现油气藏构造位置、类型和规模特征,研究认为陆架边缘区、斜坡坡脚区和深水区的成藏主控因素不同,裂陷期烃源岩对盆地深水区油气成藏至关重要,被动陆缘期烃源岩在上覆地层较厚时才可为有效烃源岩,为斜坡坡脚区和陆架区圈闭供烃,具体表现为陆架边缘区三角洲前缘砂体随坡度和物源供应变化在陆架区发育,其油气成藏主要受控于斜坡坡脚处被动陆缘期和裂陷期烃源岩能否有效运移至圈闭之中,由于后期陆架边缘遭遇存在剥蚀,上覆盖层质量品质较好时才能成藏;斜坡坡脚区位于烃源灶附近,是砂体沉积的有利部位,可近源成藏,但砂体规模通常较小,内部岩性混杂,此外该区通常断层活动强烈,在较强应变下,应力集中,油气容易突破盖层逸散,保存条件

是关键。随着坡度变缓,沉积物只有经过长距离运移才能在较远的深水区沉积下来,在距离裂谷期烃源岩较近的地区且同时存在沟通源储断层,油气才能在低幅狭长型扭动背斜之上的浊积砂体中成藏,如距离断层太远,砂体减薄明显,断层通常不发育,即使圈闭发育也未必成藏,勘探实践已证实(图 9)。

4 油气勘探方向

基于盆地构造沉积演化、油气地质特征及富集规律研究,对盆地有利的勘探领域进行了分析,认为陆架边缘三角洲前缘砂体、斜坡浊积水道和坡脚海底扇以及深水区浊积水道和浊积扇是重点勘探领域,陆架边缘附近的台缘生物礁、岩溶和断溶体是潜在勘探领域,超深水属于前沿勘探领域。其中,深水区浊积

水道和浊积扇最具勘探潜力。

陆架边缘三角洲前缘砂体,斜坡浊积水道和坡脚海底扇,台缘生物礁、岩溶和断溶体主要发育于盆地南部陡坡陆架边缘,受多期断裂演化及坡度变化影响,陆架上发育多期叠置水道,向斜坡不断搬运,在陆架边缘沉积三角洲前缘砂体、物源供应充足条件下,在坡脚处堆积成厚层砂体。陆架边缘西部遭受后期剥蚀作用强烈,油气运移和保存存在风险。盆地被动陆缘早期具备台缘生物礁发育的地质条件,台缘生物礁沿陆架边缘呈条带状分布,古陆架边缘受后期构造运动和剥蚀影响下可发育与不整合相关的岩溶储层,但该类储层受后期沉积成岩和改造作用强烈,多为台地残留或生物泥丘沉积。目前,该类储层尚未发现油气,是潜在的勘探领域。盆地北部缓坡深水区浊积水道和浊积扇相对发育,三角洲前缘沉积物通过陆架区水动力可直接跨过陆架坡折进入缓坡深水区,形成分布广泛的浊积水道和浊积扇复合体和较大规模构造—地层圈闭,是盆地油气勘探的最重要目标。超深水区由于距离物源区较远,砂体厚度减薄,裂谷期烃源岩不发育、被动陆缘期烃源岩较薄、埋藏浅,主要风险为油气充注和运移通道,成藏风险较大,属前沿勘探领域。

5 结论

(1)塞内加尔盆地经历古生代早期—中石炭世前裂谷、晚三叠世—早侏罗世同裂谷、中侏罗世—现今被动陆缘3期构造演化阶段,演化历史时间长,盆地结构呈“北缓南陡”形态,具体表现为“北部窄陆架缓陆坡、南部宽陆架陡陆坡”特征。

(2)盆地发育裂陷期湖相和被动陆缘期海相两套烃源岩。裂陷规模控制了裂陷期烃源岩的发育,分布于近陆架边缘和陆架下部,向海方向变薄,埋深较大,已达高成熟,以生气为主,对深水区白垩系浊积砂岩成藏具有重大贡献。被动陆缘期烃源岩主要分布于斜坡和坡脚区,在上覆地层较厚时才成熟。

(3)盆地可划分为3种成藏模式,分别为陆架区下生上储、断层沟通不整合、陆架三角洲前缘浊积砂岩成藏模式,斜坡坡脚区下生上储、断砂配置输导、近源供烃成藏模式,深水—超深水区下生上储、垂向运移、构造—地层型浊积砂岩成藏模式。不同部位有效烃源岩发育、砂体规模和后期构造活动形成的圈闭控制了盆地油气的分布和富集。

(4)陆架边缘三角洲前缘砂体、斜坡坡脚处的浊积水道和海底扇、深水区浊积水道和浊积扇是盆地重点勘探领域,陆架边缘附近的台缘生物礁、岩溶和断溶体是潜在勘探领域,超深水区属于前沿勘探领域。盆地深水区勘探程度低,砂体分布广,构造—地层圈闭规模大,为盆地最重要的勘探目标。

参考文献(References):

- 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.
- FENG Yangwei, QU Hongjun, ZHANG Gongcheng, et al. Tectonic-Sedimentary Evolution and its Control on Source-Reservoir-Cap Rocks in Passive Continental Margin, West Africa[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2010, 15(3): 45-51.
- 宫越,冯志强,邬长武,等.塞内加尔盆地白垩系陆源碎屑沉积体系及控制因素[J].石油与天然气地质,2017,38(10):1099-1109.
- GONG Yue, FENG Zhiqiang, WU Changwu, et al. Sedimentary system of the Cretaceous terrigenous clastics and its controlling factors in Senegal Basin, northern West Africa[J]. Acta Petroleum Sinica, 2017, 38(10): 1099-1109.
- 刘延莉.塞内加尔盆地油气地质特征及勘探潜力[J].地质与资源,2014,23(2):197-201.
- LIU Yanli. The petroleum geology and prospective analysis of the Senegal Basin[J]. Geology and Resource, 2014, 23(2): 197-201.
- 孙涛,王建新,孙玉梅,等.西非塞内加尔盆地海相优质烃源岩控制因素讨论[J].海洋石油,2017a,37(4):41-52.
- SUN Tao, WANG Jianxin, SUN Yumei, et al. Discussion on Controlling Factors of Excellent Marine Source Rocks in Senegal Basin, West Africa[J]. Offshore Oil, 2017a, 37(4): 41-52.
- 孙涛,王建新,孙玉梅.西非塞内加尔盆地深水区油气地球化学特征与油气成藏[J].沉积学报,2017b,35(6):1284-1292.
- SUN Tao, WANG Jianxin, SUN Yumei. Petroleum Geochemical Characteristics and Accumulation in Offshore of Senegal Basin[J]. Acta Sedimentology Sinica, 2017b, 35(6): 1284-1292.
- 王大鹏,殷进垠,田纳新,等.塞内加尔盆地成藏组合划分与资源潜力评价[J].现代地质,2017,(6):1201-1213.
- WANG Dapeng, YIN Jinyin, TIAN Naxin, et al. Division and Resources Evaluation of Hydrocarbon Plays in the Senegal Basin, West Africa[J]. Geoscience, 2017, (6): 1201-1213.
- 王宏语,张峰,蔡雨薇.塞内加尔盆地北部次盆被动大陆边缘沉积演化特征与控制因素[J].海洋地质与第四纪地质,2020,10(4):67-77.
- WANG Hongyu, ZHANG Feng, CAI Yuwei. Sedimentary evolution of the passive continental margin of the north sub-basin, Senegal Basin and its controlling factors[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2020, 10(4): 67-77.
- 熊利平,刘延莉,霍红.西非海岸南、北两段主要含油气盆地油

- 气成藏特征对比[J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(4): 410–419.
- XIONG Liping, LIU Yanli, HUO Hong. Comparison of the hydrocarbon accumulation patterns of petroliferous basins between the north and south parts of the West African coast[J]. *Oil & Gas Geology*, 2010, 31(4): 410–419.
- 徐汉梁, 单玄龙, 高璇, 等. 西非塞内加尔盆地重油成藏条件及富集规律[J]. 科学技术与工程, 2014, 14(16): 211–215.
- XU Hanliang, SHAN Xuanlong, GAO Xuan, et al. Heavy Oil Accumulation Condition and Enrichment Regularity of Senegal Basin in West Africa[J]. *Science Technology and Engineering*, 2014, 14(16): 211–215.
- 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.
- ZHU, Weilin, CUI Hanyun, WU Peikang, et al. New development and outlook for oil and gas exploration in passive continental margin basins[J]. *Acta Petroleum Sinica*, 2017, 38(10): 1099–1109.
- Bird D E, Hall S A, Burke K, et al. Early Central Atlantic Ocean seafloor spreading history[J]. *Geosphere*, 2007, 3(5): 282–298.
- C&C Reservoirs. Chinguetti Field Mauritanian Salt Basin, Mauritania, Field Evaluation Report[DB/OL]. [2022-05-10]. <http://www.ccrepositories.com/>.
- Casson M, Calvès G, Redfern J, et al. Cretaceous continental margin evolution revealed using quantitative seismic geomorphology, offshore northwest Africa[J]. *Basin Research*, 2020, 20(4): 1–25.
- Davison I. Central Atlantic margin basins of North West Africa: Geology and hydrocarbon potential (Morocco to Guinea)[J]. *Journal of African Earth Sciences*, 2005, 43(1-3): 254–274.
- Ellouz N, Patriat M, Gauier J P, et al. From rifting to Alpine inversion: Mesozoic and Cenozoic subsidence history of some Moroccan basins[J]. *Sedimentary Geology*, 2003, 156: 185–212.
- Erlich N, Villamil T, Keens-Dumas J. Controls on the Deposition of Upper Cretaceous Organic Carbon-rich Rocks from Costa Rica to Suriname[J]. In: Bartolini C, Buffler R, and Blickwede J, ed. AAPG Studies in Geology No. 40: Paleogeography, Paleoclimate, and Source Rocks. Tulsa: The Circum-Gulf of Mexico and the Caribbean: Hydrocarbon habitats, basin formation, and plate tectonics[C]. AAPG Memoir 79, 2003: 1–45.
- Golonka J. Late Triassic and Early Jurassic palaeogeography of the world[J]. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 2007, 244(1): 297–307.
- IHS Energy Group. International petroleum exploration and production database [DB/OL]. [2023-01-20]. <http://www.ih.com/products/oil-gas-information/data-access/geophysical-surveys/index.aspx>.
- Kosmos Energy. Investor Presentation[DB/OL]. [2021-06-13]. <http://www.kosmosenergy.com/>.
- Kuhnt W, Wiedmann J. Cenomanian-Turonian Source Rocks: Paleobiogeographic and Paleoenvironmental Aspects[J]. In: Huc A Y, ed. AAPG Studies in Geology No. 40: Paleogeography, Paleoclimate, and Source Rocks. Tulsa[C]. The American Association of Petroleum Geologists, 1995: 213–231.
- Labails C, Olivet J, Aslanian D, et al. An alternative early opening scenario for the Central Atlantic Ocean[J]. *Earth and Planetary Science Letters*. 2010, 297: 355–368.
- Lüning S, Kolonic S, Belhadj E M, et al. Integrated depositional model for the Cenomanian–Turonian organic-rich strata in North Africa[J]. *Earth-Science Reviews*, 2004, 64(1-2): 51–117.
- Macgregor D. Understanding African and Brazilian Margin Climate, Topography and Drainage Systems, Implications for Predicting Deepwater Reservoirs and Source Rock Burial History: Search and Discovery Article#10270. 2010 [DB/OL]. [2021-05-23]. <http://www.searchanddiscovery.com>.
- Martin L, Effimoff I, Medou J, et al. Hydrocarbon Prospectivity of Offshore Senegal—Unlocking the Door to a New Deepwater Petroleum Province: Search and Discovery Article#10278. 2010 [DB/OL]. [2020-05-21]. <http://www.searchanddiscovery.com>.
- Moulin M, Aslanian D, Untermeier P. A new starting point for the South and Equatorial Atlantic Ocean[J]. *Earth-Science Reviews*, 2010, 98(1–2): 1–37.
- Ndiaye M, Ngom P M, Gorin G, et al. A new interpretation of the deep-part of Senegal-Mauritanian Basin in the Diourbel-Thies area by integrating seismic, magnetic, gravimetric and borehole data: Implication for petroleum exploration[J]. *Journal of African Earth Sciences*, 2016, 121: 330–341.
- Nzoussi-Mbassani P, Khamli N, Disnar J R, et al. Cenomanian–Turonian organic sedimentation in North-West Africa: A comparison between the Tarfaya (Morocco) and Senegal Basins[J]. *Sedimentary Geology*, 2005, 177(3–4): 271–295.
- Rowan M G. Passive-margin salt basins: Hyperextension, evaporite deposition, and salt tectonics[J]. *Basin Research*, 2014, 26(1): 154–182.
- Sayers B, Cooke R. Seismic Foldout: MSGBC - Where is the next success?[J]. *GeoExpro*, 2018, 5(15): 20–24.
- Sebastien F, Carine L, Vanessa L. Paleooceanographic significance of cerium anomalies during the OAE 2 on the NW African margin[J]. *Journal of Sedimentary research*, 2018, 88: 1284–1299.
- Villeneuve M, Fournier F, Cirilli S, et al. Structure of the Paleozoic basement in the Senegalo-Mauritanian basin (West Africa)[J]. *Bulletin De La Societe Geologique De France*, 2015, 186(2): 195–206.
- Withjack M O, Schlische R W, Olsen P E. Diachronous rifting, drifting, and inversion on the passive margin of central eastern North America: An analog for other passive margins[J]. *AAPG Bulletin*, 1998, 82(2): 817–835.
- Yannick M, Calvès G, Cliff P, et al. Seismic stratigraphy of Cretaceous eastern Central Atlantic Ocean: Basin evolution and paleoceanographic implications[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2018, 499: 107–121.
- Ye J, Chardon D, Rouby D, et al. Paleogeographic and structural evolution of northwestern Africa and its Atlantic margins since the early Mesozoic[J]. *Geosphere*, 2017, 13(4): 1254–1284.
- Zavala C, Arcuri M. Intrabasinal and extrabasinal turbidites: Origin and distinctive characteristics[J]. *Sedimentary Geology*, 2017, 337: 36–54.