

西非海岸盆地油气成藏组合及资源潜力

王红平^{1,2}, 徐志诚¹, 于兴河², 刘艳红¹,
闫春¹, 吕福亮¹, 范国章¹, 张勇刚¹

1 中国石油杭州地质研究院; 2 中国地质大学(北京)能源学院

摘要 在研究西非海岸盆地形成演化的基础上,总结各盆地石油地质特征,划分各盆地成藏组合并评价资源潜力,最终提出了油气勘探方向。西非海岸17个盆地从北往南可分为5段:北段盐盆、中段盆地、尼日尔三角洲、中南段盐盆和南段盆地,其形成演化可分为前裂谷、同裂谷和后裂谷3个阶段,总体发育6套储盖组合。以储盖组合为核心,在西非海岸17个盆地中共划分出27个成藏组合。以成藏组合为资源评价基本单元,采用类比法、发现过程法和主观概率法,计算和预测西非17个盆地待发现常规油气可采资源量为146 175 MMBOE。待发现常规油气资源在平面上主要分布于中南段盐盆和尼日尔三角洲,纵向上主要位于白垩系、古近系和新近系。西非海岸17个盆地按勘探潜力从大到小分为I、II、III类,应重点选择I、II类盆地开展勘探活动。西非重点勘探目标为深水浊积岩和盐下碳酸盐岩,每个盆地主力成藏组合叠合最多的区域就是该盆地最有利的勘探区带。

关键词 成藏组合;资源潜力;深水浊积岩;盐下碳酸盐岩;被动陆缘;西非

中图分类号:TE155 文献标识码:A

西非是非洲大陆主要油气富集区之一,北至摩洛哥,南抵南非,共发育杜卡拉、索维拉、塔尔法亚、塞内加尔等17个主要沉积盆地^[1-3]。这些盆地基本上沿海岸跨海陆分布,一般称其为海岸盆地或海岸盆地群,是油气集中发现区域和勘探热点区域。国外对于西非海岸盆地的研究起步较早,研究重点为尼日尔三角洲盆地、里奥穆尼盆地、加蓬海岸盆地和下刚果盆地的构造演化、含油气系统和典型油气田特征^[4-10]。美国地质调查局(USGS)以总含油气系统为单元对西非部分盆地的常规油气资源进行了评价^[11-14]。国内的研究主要集中在西非构造演化和油气地质特征上^[15-23]。总体来看,国内外对于西非海岸盆地的成藏组合及资源潜力的研究不够全面和深入。近年来,随着西非深水浊积岩及盐下碳酸盐岩油气勘探不断获得大发现^[24-29],针对西非海岸盆地资源潜力的评价变得日益重要。本文在深入剖析西非海岸盆地形成演化和石油地质特征的基础上,以成藏组合为基本单元评价西非各盆地待发现常规油气资源潜力,并提出下一步油气勘探方向,以期为我国海外油气发展战略的制定及

新项目获取提供依据。

1 区域地质特征

1.1 盆地分段特征

西非海岸盆地的形成和演化与中生代以来大西洋张裂和后期持续扩张作用有关,是非洲板块与北美洲板块、南美洲板块分离和大西洋扩张形成的大陆裂谷与被动大陆边缘2种类型相叠合的盆地^[1-3]。根据盆地形成演化过程和地质特征,西非海岸17个沉积盆地从北往南可细分为5段:北段盐盆、中段盆地、尼日尔三角洲、中南段盐盆和南段盆地(图1)。北段盐盆包括杜卡拉盆地、索维拉盆地、苏斯盆地、塔尔法亚盆地和塞内加尔盆地等共5个盆地,形成演化与非洲板块和北美洲板块分离及北大西洋扩张相关,发育三叠系—侏罗系盐岩;中段盆地包括塞拉利昂—利比里亚盆地、科特迪瓦盆地、盐池盆地和贝宁盆地等共4个盆地,形成演化与非洲板块和南美洲板块分离及中大西洋扩张相关,大陆裂解时受转换断层控制明显,不发

收稿日期: 2019-04-24; 改回日期: 2019-06-11

本文受国家科技重大专项“全球剩余油气资源研究及油气资产快速评价技术”下属课题“全球常规油气资源潜力分析与未来战略选区”(编号:2011ZX05028-001)与中国石油集团重大专项“全球油气资源评价研究”下属课题“全球常规油气资源评价与有利区优选”(编号:2013E-05-01)资助

第一作者:王红平,硕士,高级工程师,2008年毕业于中国石油大学(北京),主要从事海外油气综合研究。通信地址:310023 浙江省杭州市西溪路920号杭州地质研究院;E-mail:wanghp_hz@petrochina.com.cn



图1 西非海岸盆地位置分布图

育盐岩;尼日尔三角洲属大型三角洲盆地,其形成演化主要与始新世以来三角洲进积过程有关;中南段盐盆包括杜阿拉盆地、里奥穆尼盆地、加蓬海岸盆地、下刚果盆地、宽扎盆地和纳米贝盆地等共6个盆地,形成演化与非洲板块和南美洲板块分离及南大西洋扩张相关,发育下白垩统阿普特阶盐岩;南段盆地只包括非洲西南海岸盆地这1个盆地,形成演化与非洲板块和南美洲板块分离及南大西洋扩张相关,不发育盐岩。

1.2 盆地形成与演化

西非沿海各盆地在结构和演化上具有一定的相似性,总体上可以分为前裂谷、同裂谷和后裂谷3个演化阶段^[4-6,11-14]。前裂谷层序主要分布于西非北段

盐盆及中段盆地,主要为内克拉通碎屑岩沉积。在北段塞内加尔盆地,前裂谷层序包括前寒武系—泥盆系沉积,厚度达5 000 m以上^[12]。在中段盐池盆地和贝宁盆地,前裂谷层序包括奥陶系—侏罗系沉积,厚度可达2 000 m^[14](图2)。

同裂谷阶段的演化受控于中生代非洲板块与北美洲板块、南美洲板块的分离及大西洋的张裂。由于北大西洋的张裂早于南大西洋的张裂,因此,北段盐盆同裂谷阶段演化早于其他各段盆地;另外由于南大西洋是从南向北逐渐张裂的,所以南段盆地同裂谷阶段的演化早于中南段盐盆和中段盆地。北段盐盆同裂谷阶段从晚二叠世持续到早侏罗世;晚二叠世—早三叠世主要沉积了一套河流相—边缘海相碎

屑岩;中三叠世—早侏罗世则沉积了巨厚的盐岩,如塞内加尔盆地盐岩厚度可达2 000 m^[12]。南段盆地和中南段盐盆同裂谷阶段从晚侏罗世持续至早白垩世阿普特期,而中段盆地同裂谷阶段从早白垩世持续到阿尔布期,这些盆地在裂谷期沉积了一套河流相—湖相—边缘海相碎屑岩,其中下白垩统湖相页岩构成南段盆地和中南段盐盆同裂谷阶段非常重要的一套烃源岩,如非洲西南海岸盆地巴雷姆阶湖相页岩和下刚果盆地贝里阿斯阶—欧特里夫阶的湖相页岩。同裂谷阶段,由于受基底断裂和转换断裂的控制,西非海岸盆地内发育一系列断陷、断垒及次级盆地。

西非海岸盆地后裂谷阶段的构造背景相似,以被动大陆边缘沉积为主,但在发育时间和沉积特征上存在差异。北段盐盆后裂谷阶段从中侏罗世开始,后裂谷早期的海侵导致北段盐盆沉积了巨厚的海相碳酸盐岩层序,在塞内加尔盆地碳酸盐岩厚度可达2 300~3 200 m^[12]。南段盆地、中南段盐盆的后裂谷阶段从早白垩世阿普特晚期开始,中段盆地后裂谷阶段从早白垩世阿尔布期晚期开始,在这些盆地后裂谷早期也发生海侵,但碳酸盐岩欠发育,分布范围和厚度都相对较小。另外,中南段盐盆在后裂谷早期(阿普特期)发育一套分布广泛的盐岩,对油气成藏具有重要意义。晚白垩世早期(塞诺曼期—土伦期)整个西非海侵达到最大,盆地内普遍发育一套黑色富有机质页岩,形成西非海岸盆地后裂谷阶段的一套主要烃源岩。从晚白垩世圣通期开始,整个西非开始发生海退,西非海岸盆地普遍发育三角洲和海底扇等碎屑岩沉积,在这些沉积物中聚集了西非绝大多数的油气。

2 成藏组合分析

2.1 成藏组合划分原则

成藏组合指相似地质背景下的一组远景圈闭或油气藏,它们在油气充注、储盖组合、圈闭类型、结构等方面具有一致性。成藏组合划分的核心为储盖组合,其次是特定的圈闭类型,共同的烃源岩不是划分成藏组合的必须条件^[30-32]。结合西非各盆地实际情况及资料掌握程度,制定了西非海岸盆地成藏组合的划分原则:①纵向上,根据储盖组合特征,结合盆地构造演化阶段、圈闭类型和油气富集程度等来划分,同一套成藏组合内主要储层的岩性和沉积相相

同或相近。②平面上,根据主要储层与区域性盖层分布范围的交集,结合已发现油气藏的平面分布来确定成藏组合展布范围。③盆地内成藏组合数量主要根据储盖组合数量确定,但单个盆地内成藏组合数量不宜过多;如果盆地内多个储盖组合已被证实,成藏组合数量以3~5个为宜;如果被证实的储盖组合较少,或尚未有油气发现,成藏组合数量以1~2个为宜。

2.2 盆地储盖组合特征

受盆地形成和演化的控制,西非海岸盆地总体发育6套储盖组合,按地质年代从老到新依次为:①上三叠统—下侏罗统储盖组合,仅在北段盐盆发现,储层为上三叠统河流相砂岩(表1),区域性盖层为上三叠统—下侏罗统盐岩。②上侏罗统储盖组合,仅在北段盐盆发现,储层为牛津裂缝型白云岩,区域性盖层为上侏罗统海相页岩。③下白垩统贝利阿斯阶—阿普特阶储盖组合,主要发育于中南段盐盆和南段盆地。在中南段盐盆,储层主要为贝利阿斯阶—阿普特阶河流—三角洲相砂岩和湖相碳酸盐岩,区域性盖层为阿普特阶盐岩;在南段盆地,储层主要为巴雷姆阶风成相砂岩,盖层则为同期发育的泥岩。④下白垩统阿尔布阶储盖组合,在北段盐盆、中段盆地、中南段盐盆和南段盆地均有发育,储层以深水浊积砂岩为主,其次为海相碳酸盐岩和滨岸相砂岩,盖层为同期发育的海相泥岩。⑤上白垩统储盖组合,在北段盐盆、中段盆地和中南段盐盆均有分布,储层以深水浊积砂岩为主,其次为滨岸相砂岩,盖层为同期发育的海相泥岩。⑥古近系—新近系储盖组合,主要分布于尼日尔三角洲盆地、中南段盐盆和北段盐盆。在尼日尔三角洲盆地储层以三角洲相砂岩为主,在中南段盐盆和北段盐盆储层则以深水浊积砂岩为主,盖层为同期发育的海相泥岩。

2.3 成藏组合划分结果

根据成藏组合划分原则,以储盖组合为核心,综合分析盆地构造演化、沉积特征、圈闭特征和油气田发育特征等,对西非各盆地成藏组合进行了划分,在西非海岸17个盆地共划分出27个成藏组合(表2)。北段盐盆的5个盆地共划分出7个成藏组合,油气发现最多的成藏组合为盐上上白垩统一新近系浊积岩成藏组合。中段盆地的4个盆地共划分出5个成藏组合,

表1 西非海岸盆地主要储层特征统计表

盆地分段	盆地名称	地质年代	储层层位	主要储层类型	孔隙度/ %	渗透率/ 10 ⁻³ μm ²
北段 盐盆	索维拉盆地	J ₃	牛津阶	裂缝型白云岩	5~20	2~80
		T ₃	上三叠统	河流相砂岩	7~20	
	塔尔法亚盆地	J ₃	牛津阶	碳酸盐岩礁滩	7~25	
	塞内加尔盆地	E ₃	渐新统	浊积砂岩	15~35	2~80
中段 盆地	塞拉利昂— 利比里亚盆地	K ₂	土伦阶—马斯特里赫特阶	浊积砂岩	12~24	36~1 030
		K ₁	阿尔布阶	浊积砂岩		
	科特迪瓦盆地	K ₂	土伦阶—马斯特里赫特阶	浊积砂岩	16~24	166~500
		K ₁	阿尔布阶	滨岸相/浊积砂岩	17~28	100~2 000
	盐池盆地	D—C	石炭系—泥盆系	滨岸相砂岩		
	贝宁盆地	K ₂	土伦阶—马斯特里赫特阶	滨岸相砂岩	15~25	20~5 000
		K ₁	阿尔布阶	河流相/滨岸相砂岩	11~20	1~300
	尼日尔 三角洲	尼日尔三角洲盆地	E—N	古近系—新近系	三角洲相/滨岸相/浊积砂岩	22~32
中南段 盐盆	杜阿拉盆地	E ₃ —N ₁	渐新统—中新统	浊积砂岩	20	1 000
		K ₂	圣通阶—马斯特里赫特阶	浊积砂岩	12~25	5~115
		K ₁	阿普特阶—阿尔布阶	浊积砂岩	16~35	5~600
	里奥穆尼盆地	E	古近系	浊积砂岩		
		K ₂	圣通阶—马斯特里赫特阶	浊积砂岩	20~30	100~1 000
		E	古新统—始新统	浊积砂岩		
	加蓬海岸盆地	K ₂	圣通阶—马斯特里赫特阶	浊积砂岩	25~30	300~800
		K ₁	阿尔布阶	海相碳酸盐岩		
		K ₁	贝里阿斯阶—阿普特阶	河流相/三角洲相砂岩	20~30	100~5 000
	下刚果盆地	E ₃ —N ₁	渐新统—中新统	浊积砂岩	16~33	0.4~4 000
		K ₂	上白垩统	滨岸相砂岩	20~35	500~1 500
		K ₁	阿尔布阶	海相碳酸盐岩	10~20	10~20
		K ₁	贝里阿斯阶—阿普特阶	河流相/三角洲相砂岩	10~30	10~700
	宽扎盆地	N ₁	中新统	三角洲相/滨岸相砂岩	4~25	18~37
K ₁		阿普特阶—阿尔布阶	海相碳酸盐岩	2~14	0.1~100	
K ₁		巴雷姆阶	湖相碳酸盐岩	20		
南段 盆地	非洲西南海岸盆地	K ₁	阿尔布阶	海相砂岩	9~26	79~296
		K ₁	巴雷姆阶	风成相砂岩	1~20	0.1~767

油气发现最多的成藏组合为上白垩统浊积岩成藏组合。尼日尔三角洲盆地共划分出2个成藏组合,油气发现最多的成藏组合为古近系—新近系碎屑岩成藏组合。中南段盐盆的6个盆地共划分出12个成藏组合,油气发现最多的成藏组合为盐上渐新统—中新统浊积岩成藏组合。非洲西南海岸盆地划分出1个成藏组合——下白垩统碎屑岩成藏组合。

3 资源潜力评价

3.1 评价方法优选

油气资源评价方法可以划分为4大类20余种不同类型,包括类比法、成因法、统计法和专家综合法^[33-34]。本文以成藏组合作为油气资源评价的基本单元,根据

表2 西非海岸17个盆地主力成藏组合和资源评价方法统计表

盆地分段	盆地名称	盆地成藏组合划个数	盆地主力成藏组合名称	主力成藏组合内已发现油气田个数	资源评价方法
北段盐盆	杜卡拉盆地	1	盐上侏罗系碳酸盐岩	0	类比法
	索维拉盆地	2	盐上侏罗系碳酸盐岩	6	类比法
	苏斯盆地	1	盐上侏罗系碳酸盐岩	0	类比法
	塔尔法亚盆地	2	盐上侏罗系碳酸盐岩	1	类比法
	塞内加尔盆地	1	盐上上白垩统—新近系浊积岩	23	主观概率法
中段盆地	塞拉利昂—利比里亚盆地	1	上白垩统浊积岩	7	发现过程法
	科特迪瓦盆地	2	上白垩统浊积岩	19	发现过程法
	盐池盆地	1	白垩系碎屑岩	0	类比法
	贝宁盆地	1	上白垩统碎屑岩	9	类比法
尼日尔三角洲	尼日尔三角洲盆地	2	古近系—新近系碎屑岩	890	发现过程法
中南段盐盆	杜阿拉盆地	1	盐上下白垩统—新近系浊积岩	24	发现过程法
	里奥穆尼盆地	1	盐上下白垩统—新近系浊积岩	13	发现过程法
	加蓬海岸盆地	2	盐上下白垩统—新近系碎屑岩	111	发现过程法
	下刚果盆地	4	盐上新新统一中新统浊积岩	126	发现过程法
	宽扎盆地	3	盐下下白垩统碳酸盐岩	15	类比法
	纳米贝盆地	1	盐上下白垩统—新近系碎屑岩	0	类比法
南段盆地	非洲西南海岸盆地	1	下白垩统碎屑岩	9	发现过程法

成藏组合的勘探程度及资料掌握程度的不同而采用不同的评价方法,所有评价方法的参数选取均以综合的地质评价为基础。对于高勘探程度评价单元,采用发现过程法进行评价;对于中等勘探程度评价单元,采用基于地质分析的主观概率法评价;对于没有油气发现或资料掌握程度低的评价单元,采用体积类比法评价(表2)。最后采用蒙特卡罗模拟法将不同评价方法和不同评价单元的评价结果进行加和计算。评价的结果采用不确定性的表达方式,置信程度由高到低分别采用95%、50%、5%和期望值表示^[35-37]。

3.2 资源评价结果

应用上述方法,对西非海岸17个盆地、27个成藏组合的待发现常规油气可采资源量进行了计算和预测。在27个成藏组合中,有14个应用发现过程法计算,1个应用主观概率法计算,12个应用体积类比法计算。预测西非海岸17个盆地待发现常规油气可采资源量为146 175 MMBOE (1MMBOE = 0.14×10⁶t),其中石油资源量为86 264 MMbbl,占59%;凝析油资源量为6 505 MMbbl (1MMbbl = 0.14×10⁶t),占4.5%;天然气资源量为320 428 bcf (1bcf = 0.283 2×10⁸m³),占36.5%(表3)。总体上,西

非沿海盆地待发现常规油气资源潜力巨大。

从平面分布来看,中南段盐盆待发现常规油气可采资源量为69 938 MMBOE,占47.8%;尼日尔三角洲待发现常规油气可采资源量为52 754 MMBOE,占36.1%;北段盐盆待发现常规油气可采资源量为14 307 MMBOE,占9.8%;中段盆地待发现常规油气可采资源量为6 862 MMBOE,占4.7%;南段盆地待发现常规油气可采资源量为2 314 MMBOE,占1.6%。

从层系分布来看,下白垩统待发现常规油气可采资源量为50 086 MMBOE,占34.2%;新近系待发现常规油气可采资源量为44 686 MMBOE,占30.6%;古近系待发现常规油气可采资源量为33 428 MMBOE,占22.9%;上白垩统待发现常规油气可采资源量为15 050 MMBOE,占10.3%;侏罗系及更老储层待发现常规油气可采资源量为2 924 MMBOE,占2%。

3.3 油气勘探方向

本次资源评价结果表明,平面上,中南段盐盆和尼日尔三角洲是西非最具有勘探潜力的区域,中南段盐盆待发现常规油气可采资源量占西非总量的47.8%,尼日尔三角洲待发现常规油气可采资源量

表3 西非海岸17个盆地待发现常规油气可采资源量统计表

序号	盆地名称	预测待发现可采资源量(均值)			
		石油/MMbbl	凝析油/MMbbl	天然气/bcf	油气当量/MMBOE
1	尼日尔三角洲盆地	25 960	3 871	137 535	52 754
2	下刚果盆地	29 320	421	33 994	35 408
3	宽扎盆地	13 187	439	46 891	21 441
4	塞内加尔盆地	2 527	746	49 324	11 494
5	加蓬海岸盆地	8 095	24	4 813	8 921
6	科特迪瓦盆地	2 086	142	5 504	3 145
7	杜阿拉盆地	587	473	12 053	3 069
8	塔尔法亚盆地	723	232	8 923	2 442
9	非洲西南海岸盆地	0	25	13 732	2 314
10	塞拉利昂—利比里亚盆地	2 035	0	1 620	2 305
11	贝宁盆地	762	100	2 638	1 302
12	里奥穆尼盆地	834	0	1 223	1 038
13	索维拉盆地	61	20	748	206
14	杜卡拉盆地	34	10	673	155
15	盐池盆地	51	0	356	110
16	纳米贝盆地	0	1	361	61
17	苏斯盆地	2	1	40	10
合计		86 264	6 505	320 428	146 175

占西非总量的36.1%。此外,北段盐盆和中段盆地目前勘探程度还比较低,近几年在北段塞内加尔盆地和中段科特迪瓦盆地获得多个油气发现,表明这些盆地具备形成大油气田条件,也有比较好的勘探前景。纵向上,西非最重要的勘探层系包括白垩系、古近系和新近系,这3个层系待发现常规油气可采资源量占西非总量的98%。

以盆地待发现常规油气资源量为基础,结合盆地资源丰度、已发现油气储量、油气资源类型和石油地质特征等因素,对西非海岸17个盆地的勘探潜力进行了综合评价,并按勘探潜力从大到小分为I、II、III类。I类盆地包括尼日尔三角洲盆地、下刚果盆地和加蓬海岸盆地;II类盆地包括宽扎盆地、科特迪瓦盆地、塞内加尔盆地、塞拉利昂—利比里亚盆地、杜阿拉盆地、里奥穆尼盆地、贝宁盆地和非洲西南海岸盆地;III类盆地包括塔尔法亚盆地、盐池盆地、索维拉盆地、杜卡拉盆地、纳米贝盆地、苏斯盆地。I类盆地可以作为西非油气勘探的首选盆地,II类盆地可以作为积极准备介入的盆地,III类盆地暂不考虑进入。

盆地内有利勘探区带和勘探目标都可以通过成

藏组合分析来确定。总体上,每个盆地成藏组合叠合最多的区域就是该盆地最有利的勘探区带,但由于每一个成藏组合待发现可采油气资源量是不同的,因此要综合考虑不同成藏组合在叠合时的权重,主力成藏组合要重点考虑。此外,还要综合考虑勘探程度、成藏模式等要素。与此相似,每个盆地内的主力成藏组合就代表该盆地主要的勘探目标。综合分析各盆地成藏组合特征后发现:西非地区未来最重要的勘探目标为后裂谷阶段发育的深水浊积岩,其次为同裂谷阶段发育的(盐下)碳酸盐岩以及碎屑岩;其中,北段盐盆主要勘探目标为盐上上白垩统一新近系深水浊积岩,中段盆地主要勘探目标为上白垩统深水浊积岩,尼日尔三角洲盆地主要勘探目标为古近系—新近系深水浊积岩,中南段盐盆主要勘探目标包括盐上下白垩统一新近系深水浊积岩和盐下下白垩统碳酸盐岩,南段盆地主要勘探目标为下白垩统碎屑岩。

4 结论

(1)西非海岸17个盆地从北往南可细分为5段:

北段盐盆、中段盆地、尼日尔三角洲、中南段盐盆和南段盆地,盆地形成演化总体上可以分为前裂谷、同裂谷和后裂谷等3个阶段。

(2)西非海岸17个盆地总体发育6套储盖组合,以储盖组合作为成藏组合划分的基础,在西非17个盆地中划分出27个成藏组合。

(3)以成藏组合作为资源评价的基本单元,优选发现过程法、主观概率法和体积类比法等3种方法开展资源评价,预测西非海岸17个盆地待发现常规油气可采资源量为146 175 MMBOE,资源潜力巨大;待发现常规油气资源平面上主要分布于中南段盐盆和尼日尔三角洲,纵向上主要位于白垩系、古近系和新近系。

(4)西非海岸17个盆地按勘探潜力从大到小分为I、II、III类,应重点选择I、II类盆地开展勘探活动;西非海岸重点勘探目标为深水浊积岩和盐下碳酸盐岩,每个盆地内主力成藏组合叠合最多的区域就是该盆地最有利的勘探区带。

参考文献

- [1] 童晓光,关增森.世界石油勘探开发图集(非洲地区分册)[M].北京:石油工业出版社,2002.
- [2] 李国玉,金之钧.新编世界含油气盆地图集[M].北京:石油工业出版社,2005.
- [3] 关增森,李剑.非洲油气资源与勘探[M].北京:石油工业出版社,2007.
- [4] EDWARDS J D, SANTOGROSSI P A. Divergent/ passive margin basin[J]. AAPG memoir, 1990, 48: 3-791.
- [5] TURNER J P. Gravity-driven structures and rift basin evolution: Rio Muni Basin, offshore equatorial West Africa[J]. AAPG bulletin, 1995, 79(8): 1138-1158.
- [6] KATZ B J, DAWSON W C, LIRO L M, et al. Petroleum systems of the ogooué delta, Offore Gabon[G]// MELLO M R, KATZ B J. Petroleum systems of South Atlantic margins: AAPG memoir 73. Tulsa: The American Association of Petroleum Geologists, 2000: 247-256.
- [7] LAWRENCE S R, MUNDAY S, BRAY R. Regional geology and geophysics of the eastern Gulf of Guinea (Niger Delta to Rio Muni)[J]. The leading edge, 2002, 21(11): 1112-1117.
- [8] GILL J, CAMERON D. 3D revives an old play: an Aptian subsalt discovery, Etame field, offshore Gabon, West Africa[J]. The leading edge, 2002, 21(11): 1147-1151.
- [9] DAILLY P, LOWRY P, GOH K, et al. Exploration and development of Ceiba field, Rio Muni Basin, Southern Equatorial Guinea[J]. The leading edge, 2002, 21(11): 1140-1146.
- [10] REECKMANN S A, WILKIN K S, FLANNERY J W, et al. A deep-water giant field, Block 15 Angola[G]//HALBOUTY M T. Giant oil and gas fields of the decade 1990-1999: AAPG memoir 78. Tulsa: The American Association of Petroleum Geologists, 2003: 1990-1999.
- [11] TUTTLE M L W, CHARPENTIER R R, BROWNFIELD M E. The Niger Delta petroleum system: Niger Delta Province, Nigeria, Cameroon, and Equatorial Guinea, Africa[R]. Denver: U.S. Geological Survey, 1999: 1-64.
- [12] BROWNFIELD M E, CHARPENTIER R R. Assessment of the undiscovered oil and gas of the Senegal Province, Mauritania, Senegal, the Gambia, and Guinea-Bissau, Northwest Africa[J]. U.S. Geological Survey bulletin 2207-A, 2003: 1-25.
- [13] BROWNFIELD M E, CHARPENTIER R R. Geology and total petroleum systems of the West-Central Coastal Province(7203), West Africa[J]. U.S. Geological Survey bulletin 2207-B, 2006: 1-60.
- [14] BROWNFIELD M E, CHARPENTIER R R. Geology and total petroleum systems of the Gulf of Guinea Province of West Africa [J]. U.S. Geological Survey bulletin 2207-C, 2006: 1-32.
- [15] 应维华,潘校华.非洲苏尔特盆地和尼日尔三角洲盆地[M]//国外含油气盆地勘探开发丛书编委会.国外含油气盆地勘探开发丛书.北京:石油工业出版社,1998.
- [16] 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].地学前缘, 2000, 7(3): 247-256.
- [17] 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.
- [18] 袁圣强,吴时国,马玉波,等.南大西洋深水盆地的构造沉积演化及含油气系统[J].天然气地球科学,2008,19(2): 216-221.
- [19] 刘剑平,潘校华,马君,等.西部非洲地区油气地质特征及资源概述[J].石油勘探与开发,2008,35(3): 378-384.
- [20] 林卫东,陈文学,熊利平,等.西非海岸盆地油气成藏主控因素及勘探潜力[J].石油实验地质,2008,30(5): 450-455.
- [21] 邓荣敬,邓运华,于水,等.西非海岸盆地群油气勘探成果及勘探潜力分析[J].海洋石油,2008,28(3): 11-18.
- [22] 张树林,杜向东.西非油气富集的关键地质因素及勘探战略部署建议[J].中国石油勘探,2012,17(3): 70-77.
- [23] 张光亚,温志新,梁英波,等.全球被动陆缘盆地构造沉积与油气成藏:以南大西洋周缘盆地为例[J].地学前缘, 2014, 21(3): 18-25.
- [24] 吕福亮,贺训云,武金云,等.安哥拉下刚果盆地吉拉索尔深水油田[J].海相油气地质,2007,12(1): 37-42.
- [25] 吕福亮,徐志诚,范国章,等.赤道几内亚里奥穆尼盆地石油地质特征及勘探方向[J].海相油气地质,2011,16(1): 45-50.
- [26] BRYANT I, DAILLY P, DRIBUS J R, et al. Basin to basin: plate tectonics in exploration[J]. Oilfield review, 2012, 24(3): 38-57.
- [27] 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.

- [28] 徐志诚,吕福亮,范国章,等. 西非海岸盆地深水区油气地质特征和勘探前景[J]. 油气地质与采收率,2012,19(5): 1-5.
- [29] 徐志诚,吕福亮,范国章,等. 西非中南段盐盆成藏组合及油气勘探方向[J]. 地学前缘,2014,21(3): 72-81.
- [30] 童晓光,李浩武,肖坤叶,等.成藏组合快速分析技术在海外低勘探程度盆地的应用[J]. 石油学报,2009,30(3): 317-323.
- [31] 童晓光. 论成藏组合在勘探评价中的意义[J]. 西南石油大学学报(自然科学版),2009,31(6): 1-8.
- [32] 谢寅符,马中振,刘亚明,等. 以成藏组合为核心的油气资源评价方法及应用:以巴西坎波斯(Campos)盆地为例[J]. 地质科技情报,2012,31(2): 45-49.
- [33] 金之钧,张金川. 油气资源评价方法的基本原则[J]. 石油学报,2002,23(1): 19-23.
- [34] 赵文智,胡素云,沈成喜,等. 油气资源评价的总体思路和方法体系[J]. 石油学报,2005,26(增刊): 12-17.
- [35] 童晓光,张光亚,王兆明,等. 全球油气资源潜力与分布[J]. 石油勘探与开发,2018,45(4): 1-10.
- [36] 田作基,吴义平,王兆明,等.全球常规油气资源评价及潜力分析[J]. 地学前缘,2014,21(3): 10-17.
- [37] 王兆明,童晓光,张光亚,等. 发现过程法估算油气资源量参数敏感性分析及取值优化[J]. 地学前缘,2014,21(3): 181-186.

编辑:张润合

Reservoir-forming assemblages and resource potential of oil and gas of coastal basins in West Africa

WANG Hongping, XU Zhicheng, YU Xinghe, LIU Yanhong, YAN Chun, Lü Fuliang, FAN Guozhang, ZHANG Yonggang

Abstract: Based on the study of the formation and evolution of coastal basins in West Africa, the petroleum geological characteristics of each basin are summarized, the reservoir-forming assemblages of each basin are divided, and the resource potential is evaluated. Finally, the direction of oil and gas exploration is put forward. West Africa coastal basins are mainly consisted of 17 basins and can be divided into 5 provinces: the North salt basin province, the Gulf of Guinea province, the Niger Delta province, the Aptian salt basin province and the South basin province. The formation and evolution of West Africa coastal basins can be divided into 3 stages: pre-rift stage, syn-rift stage, and post-rift stage. Controlled by basin evolution, 6 reservoir-seal assemblages developed in West Africa coastal basins. With reservoir-cap assemblages as the core, 27 reservoir-forming assemblages have been divided in the 17 basins in West Africa. Taking reservoir-forming assemblage as the basic unit of resource evaluation, analogy method, discovery process method and subjective probability method are used to calculate and predict the undiscovered recoverable resource of conventional oil and gas. The results show that the total amount of the resources in these basins is 146,175 MMBOE. The conventional oil and gas resources to be discovered are mainly distributed in the Aptian salt basin province and Niger Delta Basin, and mainly in the Cretaceous, Paleogene and Neogene in the vertical. The 17 basins in West Africa are classified as type I, type II and type III basins according to their exploration potential from large to small. The key exploration targets in West Africa are deep-water turbidite and pre-salt carbonate rocks. The most favorable exploration zones in each basin are the areas where the main reservoir-forming assemblages overlap most.

Key words: reservoir-forming assemblages; petroleum resources; deep-water turbidite; pre-salt carbonate; passive continental margin; West Africa

WANG Hongping, First author: MSc, Senior Geologist, engaged in comprehensive research on overseas petroleum geology. Add: PetroChina Hangzhou Research Institute of Geology, No. 920 Xixi Rd., Hangzhou, Zhejiang 310023, China