

巴西海上坎波斯与桑托斯盆地 油气成藏特征对比研究

熊利平¹, 邬长武¹, 郭永强¹, 李嵩阳²

(1. 中国石油化工股份有限公司 石油勘探开发研究院, 北京 100083; 2. 北京邮电大学, 北京 100876)

摘要:坎波斯与桑托斯盆地油气资源非常丰富。2个盆地均经历了裂谷、过渡、被动大陆边缘3个构造阶段,发育盐下陆相层序、盐岩层序、盐上海相层序,形成盐下、盐上2套成藏组合。由于盆地构造格架不同,导致盐岩分布、盐下储层发育程度的差异,加之盐上储层分布的不同,造成2个盆地油气分布特征的巨大差异。桑托斯盆地油气主要分布在外部高地带的盐下领域,而坎波斯盆地油气主要富集在中部低凸带的盐上储层中。通过分析2个盆地的构造演化及地层发育特征、成藏条件及主控因素,优选了盐下、盐上成藏组合的有利区,剖析了2个盆地成藏条件的异同,可指导我国石油公司在这2个盆地新项目评价和在执行区块的勘探部署。

关键词:盐膏岩;成藏主控因素;油气成藏;坎波斯盆地;桑托斯盆地

中图分类号: TE122.3

文献标识码: A

Petroleum accumulation characteristics in Campos and Santos Basins, offshore Brazil

Xiong Liping¹, Wu Changwu¹, Guo Yongqiang¹, Li Songyang²

(1. *Petroleum Exploration & Production Research Institute of SINOPEC, Beijing 100083, China;*

2. Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract: The Campos and Santos Basins are rich in petroleum. Both of the 2 basins have experienced 3 phases of tectonic evolution (rift, transition and passive continental margin), depositing 3 corresponding sedimentary mega-sequences (pre-salt continental sequence, salt sequence and post-salt marine sequence), and forming 2 plays (pre-salt play and post-salt play). Due to different tectonic frameworks, salt distribution and pre-salt reservoir development patterns are different in the 2 basins. Combining with different post-salt reservoir distribution, obvious difference exists in petroleum distribution between the 2 basins. Petroleum in the Santos Basin mainly distributes in pre-salt sequences of the outer basement plateau while petroleum in the Campos Basin accumulates in post-salt reservoirs of the central low uplift. Based on the analyses of tectonic evolution, sedimentation characteristics and major controlling factors, the favorable exploration zones for pre- and post-salt reservoirs are defined. The differences of accumulation condition between the 2 basins are discussed. The studies may provide Chinese companies a guide for new business development and executing blocks' exploration activities in the 2 basins.

Key words: evaporate; main controlling factors for hydrocarbon accumulation; oil and gas accumulation; Campos Basin; Santos Basin

巴西海上坎波斯与桑托斯盆地是全球重要的含油气盆地,截至2012年1月,这2个盆地共发现2P可采储量 98.4×10^8 t油当量,其中液态烃 81.2×10^8 t,气 2.1×10^{12} m³。自2006年以来,盆地盐下领域不断获得巨型油气发现。近几年,巴西新发现的储量基本相当于全球其他地区新发现储量之和,这些新发现储量绝大多数位于这2个盆地,因此,该区未

来勘探开发潜力巨大。

坎波斯与桑托斯盆地同属典型被动大陆边缘盆地,构造位置相邻,构造演化、沉积地层特征、成藏演化历史相似,但油气分布却存在巨大差异。坎波斯油气主要分布在盐上海相碎屑岩中,而桑托斯盆地油气却主要赋存在盐下湖相碳酸盐岩中。研究这2个盆地油气成藏条件异同,能够明确控制盆

地油气分布的主要因素,确定盆地的勘探潜力及油气成藏有利区。

1 区域构造演化及地层发育特征

巴西桑托斯、坎波斯、埃思皮里奥桑托盆地属典型的大西洋型被动大陆边缘盆地,这3个盆地构造位置相邻,统称为大坎波斯盆地。盆地形成于冈瓦纳大陆解体和自南向北的南大西洋两岸张开时期,主要经历了裂谷、过渡、被动大陆边缘3个阶段,发育了裂谷期陆相层序、过渡期盐岩层序及被动大陆边缘期海相层序^[1-2]。

在早白垩世巴列姆期,南美与西非开始裂开,裂谷作用发生初期,伴随着台地玄武岩喷发,沉积一组厚度有变化的河流—湖相层序,在裂谷作用之后发生了热沉降。盐下地层可分为构造—沉积特征截然不同的两部分:下白垩统下阿普第阶主要为裂谷期陆相沉积,在裂谷期的最后阶段,有海相侵入;中阿普第阶为热沉降期海相沉积,构造相对平静,仅发育局部断层。

在晚阿普第期,狭窄的海道限制了海水的流入,形成了蒸发岩层序,这套蒸发岩在深水区的厚度多数大于1 500 m,对大坎波斯盆地油气成藏起着重要作用,盐岩良好的导热性使得盐下地层地温

梯度较低,烃源岩在埋深5 000~5 500 m时才达到生油高峰。同时,这套盐岩层序的发育,还有利于盐下储层孔隙度的保持。

随后,在晚白垩世阿尔比期,发生了一次海侵,并发育了碳酸盐岩台地。在森诺曼—土伦期,该台地的沉没导致富含有机物的页岩堆积,土伦期三角洲层序向海进积标志着一次海退的开始。从马斯特里赫特期到早渐新世,再次出现沉降和一次海进,各种深水海相页岩和浊积岩跨越盆地,覆盖在西部前寒武系基底上,在这次海进之后出现一个新近纪海退层序,在现有大陆斜坡的沉积中心形成了很厚的充填沉积物^[3]。

2 油气成藏条件

2.1 盆地构造格架

大坎波斯盆地垂向上可分为盐下裂谷体系、盐上重力滑覆体系2套构造层,盐下、盐上构造成因不同,构造特征存在明显的差异。盐下构造主要受控于基底断裂的活动,具有东西分带、南北分段的构造格局,沿东西方向发育两凹两隆,自西向东依次为近岸低凹带、中部低凸带、近海低凹带、外部高地带。3条转换—调节断层将大坎波斯盆地沿南北方向分为3段即3个盆地,形态南宽北窄^[4-5](图1)。盐上

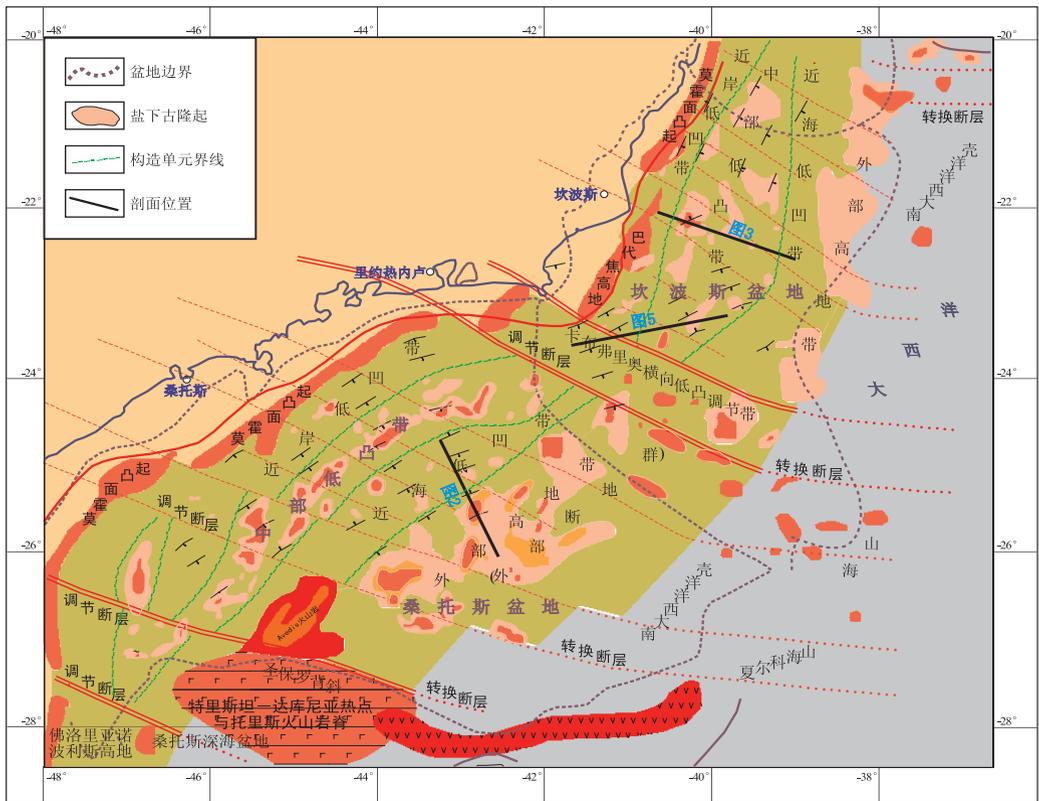


图1 大坎波斯盆地盐下构造格架

Fig. 1 Pre-salt tectonic framework of Greater Campos Basin

构造主要受控于盐岩的重力滑动,自西向东分为后缘伸展带、中部双向伸展带、前缘重力褶皱冲断带。

2.2 烃源岩特征

大坎波斯盆地主力烃源岩均为盐下裂谷期下白垩统巴列姆阶—阿普第阶微咸湖相钙质黑色页岩,这套烃源岩在桑托斯盆地和坎波斯盆地广泛分布,贡献了盆地80%以上的油气。桑托斯盆地地下白垩统 Guaratiba 组烃源岩主要沉积于火山边缘以北的裂谷盆地内。盆地内仅有一口井钻达这套烃源岩,为 I—II 型干酪根,TOC 含量为 2%~4%^[6],厚度 100~200 m。在浅水区,下中白垩统源岩埋深达 7~8 km,这套烃源岩处于过成熟阶段,在大陆斜坡和深水区的湖相页岩的成熟度正处于未成熟到过成熟阶段^[7]。

坎波斯盆地盐下下白垩统 Lagoa Feia 组烃源岩为裂谷湖相黑色页岩,TOC 含量为 2%~6%,最高可达 9%,氢指数可达 900 mg/g。干酪根为 I 型,烃源岩质量极好。除了外部高地带尚未成熟外,这套烃源岩在盆地其他地区都处在生油窗内,尚未达到过成熟。

2.3 储层条件

桑托斯盆地主要储层为盐下的阿普第阶 Guaratiba 组灰岩储层,储层平均厚 30 m,孔隙度 5%~25%,渗透率 1~1 300 mD,盆地 80% 以上的油气储量赋存于这套储层。其次为盐上土仑阶砂岩储层,孔隙度 16%~21%,渗透率较低。

坎波斯盆地的主要储层为盐上 Carapebus 段,这套储层主要有 3 个砂岩段,上白垩统、始新统一渐新统和渐新统一中新统,上白垩统段砂岩最厚可

达 100~250 m,其他段的砂岩厚度也很大,孔隙度 20%~30%,渗透率大于 1 D,最高可达 5.4 D^[6]。盐上阿尔布阶 Macae 组灰岩及砂岩、盐下下白垩统巴列姆—阿普第阶 Coquinas 组灰岩为次要储层。盐上 Macae 组以灰岩为主,另有滨岸相砂岩 Goitacas 段、陆架 Quissama 段和浊积相 Namorado 段,灰岩储层物性一般较差,而 Quissama 段、Namorado 段储层物性较好。盐下 Coquinas 组为碳酸盐岩储层,储层物性受成岩作用控制,横向变化大,孔隙度一般较低,多数介于 4%~6% 之间,但渗透率较高,在多个油田产油。

2.4 盖层及保存条件

盐岩盖层是桑托斯盆地和坎波斯盆地盐下储层的优质区域性盖层,在盐岩连续分布的区域,盐下油气保存条件好,原油未遭受破坏,API 一般为 27°~30°,且缺少盐上油气发现。而在盐窗发育区,盐上油气发现较多,原油多遭受了不同程度的生物降解,API 一般为 13°~22°。盐上储层的盖层为大规模发育的海相页岩。

2.5 圈闭发育特征

盆地盐上、盐下构造的成因机制不同,圈闭特征也存在明显差异。盐下构造与基底活动密切相关,主要发育与基底断裂相关的断垒、翘倾断块、背斜构造^[8]。盐上圈闭主要与盐岩活动有关,发育各类盐相关构造圈闭、岩性圈闭。

2.6 油气成藏模式

桑托斯盆地和坎波斯盆地包括盐下和盐上 2 套成藏组合,这 2 套成藏组合具有不同的成藏模式(图 2)。盐下成藏组合的主要烃源岩为盐下裂谷期湖相

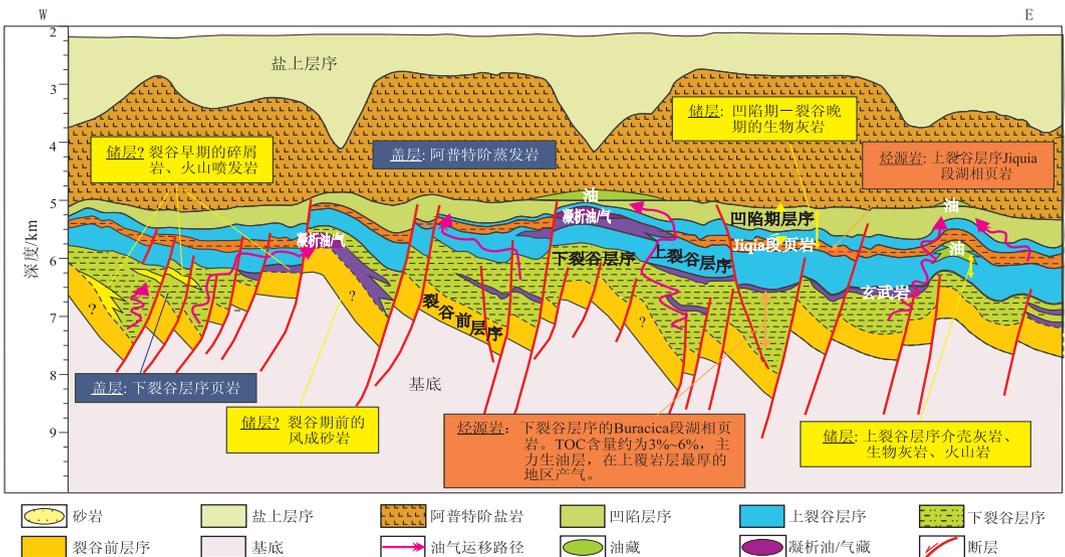


图 2 大坎波斯盆地盐下成藏组合油气成藏模式

Fig. 2 Petroleum accumulation pattern of pre-salt reservoir in Greater Campos Basin

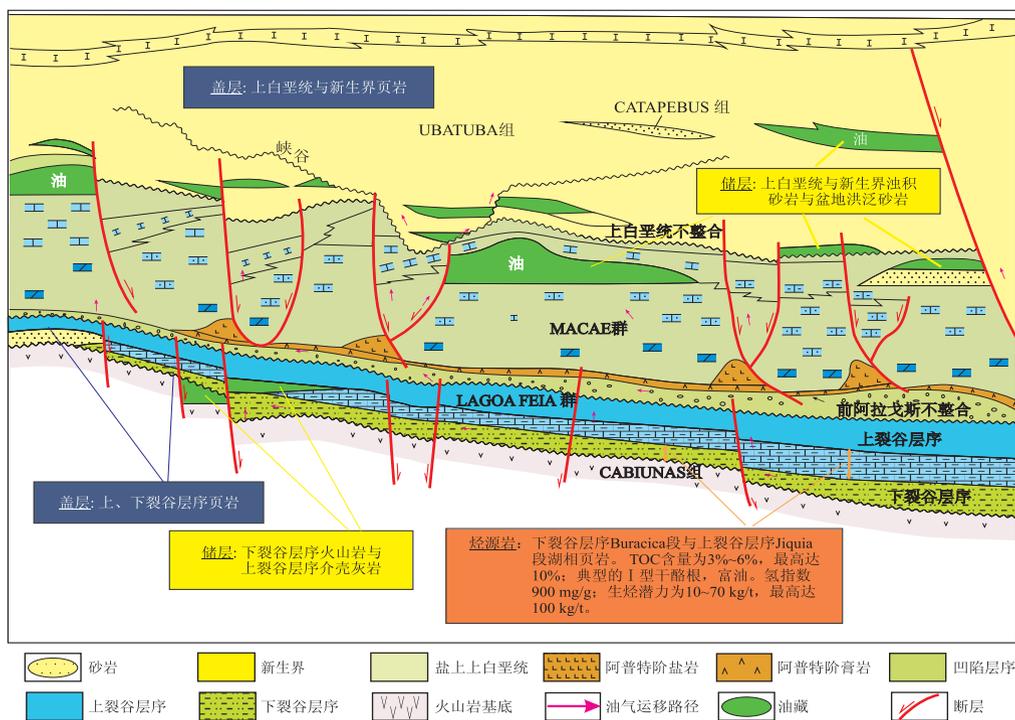


图3 大坎波斯盆地盐上成藏组合油气成藏模式

Fig. 3 Petroleum accumulation pattern of post-salt reservoir in Greater Campos Basin

烃源岩,储层为盐下裂谷期—过渡期碳酸盐岩,盐岩可作为良好的盖层。盐下构造呈地垒、地堑相间的构造格局,凹陷区是盐下烃源岩的生烃中心,基底隆起区是优质碳酸盐岩储层的发育区,也是构造圈闭的发育区。地堑区生成的油气,沿着断层及优质储层油气运移到地垒区圈闭中聚集成藏。

盐上成藏组合主力烃源岩同样是盐下裂谷期湖相页岩,储层为盐上海相碳酸盐岩、砂岩,广泛发育的海相页岩可以作为良好的盖层。盐下裂谷期烃源岩生成的油气,沿盐窗、断层向盐上储层运移,在各类盐相关圈闭、岩性圈闭中聚集成藏^[9-10](图3)。

3 油气成藏主控因素及有利区优选

3.1 盆地油气分布规律对比

在桑托斯盆地和坎波斯盆地,盐下成熟烃源岩分布广泛,但油气分布却极不均匀。坎波斯盆地油气主要分布在中部低凸带,以盐上砂岩油气藏为主。桑托斯盆地油气主要分布在外部高地带,以盐下碳酸盐岩油气藏为主(表1)。

3.2 油气主控因素

盐下油气成藏主要受控于基底隆起和盐岩分布。基底隆起控制盐下圈闭和优质储层的发育,控制油气聚集。基底构造形成的垒堑相间的构造格局,为桑托斯盆地盐下油气富集提供了良好的条件;断陷区供烃,基底隆起区是圈闭发育的有利场

表1 桑托斯盆地及坎波斯盆地油气储量分布

Table 1 Petroleum reserves of Santos and Campos Basins

盆地	成藏组合	2P 储量			合计/ Mboe
		油/ MMbbl	凝析油/ MMbbl	气/bcf	
桑托斯	盐上	3 976	388	19 551	7 622
	盐下	25 649	144	36 896	31 942
	小计	29 625	532	56 447	39 564
坎波斯	盐上	22 197	0.30	11 138	24 054
	盐下	6 784	0.02	7 388	8 015
	小计	28 981	0.32	18 526	32 069

所;基底隆起形成的浅水沉积环境有利于叠层石灰岩储层的发育(图4)。桑托斯盆地和坎波斯盆地盐下油气发现,均位于基底隆起形成的圈闭(图5)。盐岩分布控制盐下油气保存,盐下巨型油气田多分布在连续盐岩分布区,在盐窗发育区,以盐上油气发现为主。

盐上成藏组合中各类盐相关圈闭、岩性圈闭发育,油气成藏主要受控于盐窗和储层发育情况。盐窗发育控制盐下油气向盐上运移,盆地盐下地层的斜坡区,盐岩向下倾方向流动,形成大量的盐窗,有利于油气运移。储层发育控制盐上油气成藏,坎波斯盆地盐上浊积砂体最发育,盐上油气田分布与上白垩统、始新统及渐新统浊积砂体展布密切相关(图6)。而桑托斯盆地,盐上砂岩储层仅零星分布(图6),盐上油气发现较少。

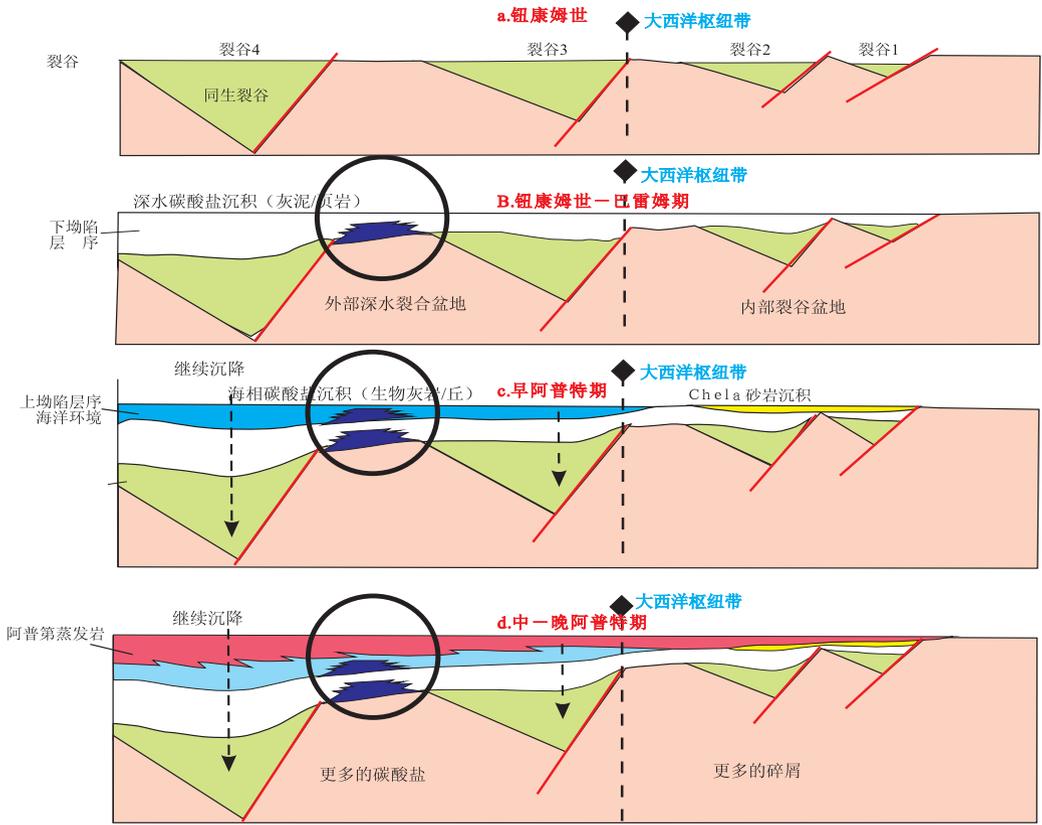


图4 桑托斯盆地盐下碳酸盐储层发育模式

Fig. 4 Development pattern of pre-salt carbonate reservoir in Santos Basin

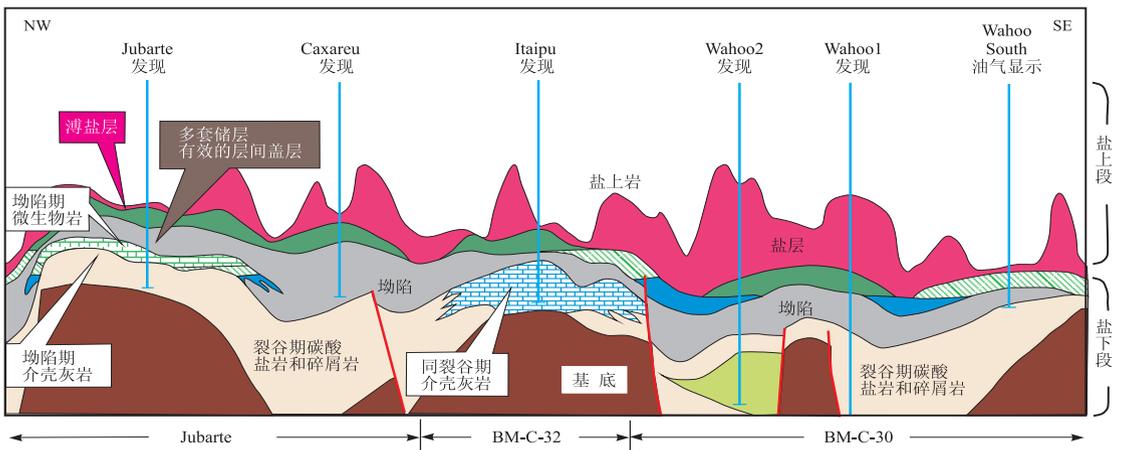


图5 坎波斯盆地盐下油气藏剖面

Fig. 5 Profile of pre-salt reservoir in Campos Basin

3.3 油气成藏有利区优选

盐下油气成藏有利区主要位于盐下中部低凸带和外部高地带,凹陷区是生烃中心,凸起带是油气运移的指向区,碳酸盐储层发育,并发育大量与基底隆起相关的圈闭,盐下组合成藏条件好。桑托斯盆地外部高地带为巨厚连续盐岩分布区,发育大量与基底隆起相关的构造圈闭,是目前盐下巨型油气田发现最多的区域,油气成藏最有利。在该构造带,2006—2010年

共发现8个大于 1.37×10^8 t的盐下油气田,这8个油气田总可采储量达 39.6×10^8 t。桑托斯盆地中部低凸带也存在基底隆起构造,但盐窗发育,盐下油气藏保存条件略差。坎波斯盆地中部低凸带烃源岩成熟,也发育大量与基底隆起相关的圈闭,盐窗同样发育,保存条件存在一定风险,盐下成藏条件差于桑托斯盆地外部高地带。坎波斯盆地外部高地带发育巨厚盐墙,盐下烃源岩埋深浅,未成熟,潜力

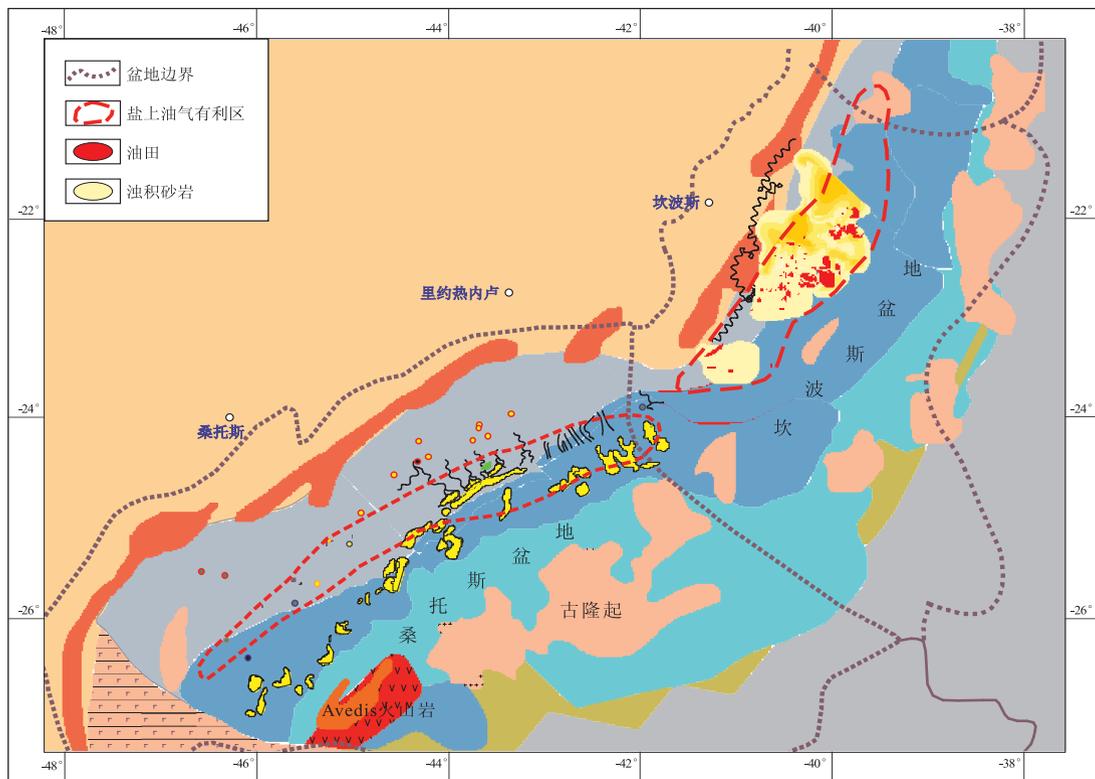


图6 桑托斯和坎波斯盆地盐上浊积砂岩与油气田分布

Fig. 6 Post-salt turbidite sandstones and oil-and-gas fields distribution in Santos and Campos Basins

不大。

盐上有利区主要位于中部低凸带,中部低凸带盐岩不连续,有利于油气从盐下源岩向盐上储层运移,在该带,盐上储层沉积时地形坡度变缓,有利于浊积砂体沉积。坎波斯盆地中部低凸带是盐上最有利的区带,坎波斯盆地盐上物源供应更为充分,浊积砂体更发育,中部低凸带坡度变缓,是浊积砂体的卸载区;盐岩不连续,有利于油气运移;各类盐相关构造与浊积砂体一起,形成大量的构造—岩性复合圈闭。桑托斯盆地盐上砂体相对不发育,盐上勘探潜力较坎波斯盆地差。

4 油气成藏条件对比

桑托斯盆地和坎波斯盆地具有相同的区域构造演化历史,发育相似的地层及岩性序列,烃源岩均为盐下裂谷期湖相页岩,TOC 含量高且分布广泛,均发育盐下、盐上 2 套储盖组合,盐下油气藏主要为与基底隆起相关的圈闭,盐上油气藏主要为盐相关圈闭及岩性圈闭。

尽管如此,但二者油气分布却差异巨大。坎波斯盆地油气主要分布在中部低凸带盐上领域,而桑托斯盆地油气主要分布在外部高地带盐下领域。研究认为,这种差异主要是由 2 个盆地的如下差异

造成的:

(1) 盆地盐下构造格架差异较大,不同构造带的宽度明显不同。坎波斯盆地盐下地层坡度较大,外部高地带窄且盐下地层厚度较小。而桑托斯盆地深海区盐下地层坡度较小,外部高地带宽度大且盐下地层厚度较大。这种构造格架的差别造成盐岩和盐下储层分布的不同,影响油气资源分布。

(2) 盐岩分布差别较大,由于盐下构造特征差异,造成盐岩分布特征差异。盐岩沿着 2 个盆地较陡的斜坡,向下倾方向流动到坡度较缓的外部高地带分布。因此 2 个盆地斜坡区的近岸低凹带、中部低凸带、近海低凹带盐岩均呈不连续分布,不利于盐下油气藏的保存。而外部高地带盐岩连续分布,有利于盐下油气藏的保存,却不利于盐下油气运移到盐上成藏。在坎波斯盆地,外部高地带较窄,盐岩在坡度变缓的狭窄的外部高地带附近形成巨厚的盐墙,加之外部高地带盐下地层厚度较小,不利于盐下油气成藏。而桑托斯盆地外部高地带较宽,盐岩均匀地分布,盐下地层厚度较大,发育大量与基底隆起相关的构造圈闭,桑托斯盆地盐下巨型油气发现大多分布在外部高地带。

(3) 2 个盆地盐下、盐上储层发育程度不同,坎波斯盆地以盐上砂岩储层发育为主,而桑托斯盆地

则以盐下碳酸盐岩储层发育为主。盐上砂体发育程度是造成2个盆地盐上油气富集程度巨大差别的主要原因。南帕拉伊巴河为坎波斯盆地带来相对充足的物源供应,盐上浊积砂体十分发育(图6);而桑托斯盆地周围没有大型河流,盐上砂体呈零星分布(图6),因此坎波斯盆地盐上油气更为富集。桑托斯盆地的外部高地发育大量的基底隆起,形成了远离物源区的浅水沉积环境,有利于生物灰岩储层的发育;坎波斯盆地外部高地窄、盐下地层厚度小且缺少大型的基底隆起,盐下储层发育条件差。

这些差异造成了2个盆地油气成藏条件的差异,影响油气资源分布。

5 结论

1) 桑托斯盆地和坎波斯盆地经历了裂谷、过渡、被动大陆边缘3个构造阶段,形成了盐下裂谷期陆相层序、过渡期盐岩层序、盐上被动大陆边缘期海相层序。

2) 桑托斯盆地和坎波斯盆地油气成藏条件优越,烃源岩、储层、盖层及保存条件良好,盐下及盐上圈闭发育,各种成藏要素配置关系良好。

3) 盐下油气成藏主要受控于基底隆起和盐岩分布,油气成藏有利区主要位于盐下中部低凸带和外部高地,尤以桑托斯盆地外部高地最为有利。盐上成藏组合油气成藏主要受控于盐窗和储层发育情况,有利区位于中部低凸带,以坎波斯盆地中部低凸带最为有利。

4) 桑托斯盆地和坎波斯盆地具有相同的区域构造演化历史,发育相似的地层及岩性序列,生储盖组合及圈闭类型基本相同。但由于盆地构造格

架不同,导致盐岩分布、盐下储层发育程度的差异,加之盐上储层分布的不同,造成2个盆地油气分布特征的巨大差异。

参考文献:

- [1] Norvick M S, Schaller H. A three-phase Early Cretaceous rift history of the South Atlantic salt basins and its influence on lacustrine source facies distribution [C]//ABGP / AAPG International Conference and Exhibition, Rio de Janeiro, Brazil, 1998.
- [2] 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):641-646.
- [3] 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,2004,88:923-945.
- [4] Meisling K E, Cobbold P R, Mount V S. Segmentation of an Obliquely Rifted Margin, Campos and Santos Basins, Southeastern Brazil [J]. AAPG Bulletin,2001,85:1903-1924.
- [5] Karner G D. Rifts of the Campos and Santos Basins, Southeast Brazil: Distribution and Timing [M]//Mello M R, Katz B J. Petroleum Systems of South Atlantic Margins: AAPG Memoir 73. Tulsa: AAPG,2000: 156-158.
- [6] Azambuja Filho N C. The Oligo-Miocene Turbidites and Associated Fácies of the Campos Basin, offshore Brazil [D]. London: Imperial College-London University,1980.
- [7] Gibbons M J, Williams A K, Piggott N, et al. Petroleum geochemistry of the Southern Santos Basin, offshore Brazil [J]. Environmental Geosciences,2009,16:211-234.
- [8] Cobbold P R, Meisling K E, Mount V S. Reactivation of an Obliquely Rifted Margin, Campos and Santos Basins, Southeastern Brazil [J]. AAPG Bulletin,2001,85:1925-1944.
- [9] Guardado L R, Gamboa L A P, Lucchesi C F. Petroleum Geology of the Campos Basin, Brazil: A Model for a Producing Atlantic Type Basin [M]// Edwards J D, Santogrossi P A. Divergent/Passive Margins Basins: AAPG Memoir 48. Tulsa: AAPG, 1990:3-89.
- [10] 朱毅秀,高兴,杨程宇,等. 巴西坎波斯盆地油气地质特征[J]. 海相油气地质,2011,16(3):22-29.

(编辑 徐文明)

(上接第418页)

- [16] 高岗,柳广弟,付金华,等. 确定有效烃源岩有机质丰度下限的一种新方法[J]. 西安石油大学学报:自然科学版,2012,27(2):22-27.
- [17] 霍秋立,曾花森,张晓畅,等. 松辽盆地北部青山口组一段有效烃源岩评价图版的建立及意义[J]. 石油学报,2012,33(3):379-384.

- [18] 祝厚勤,刘平兰,庞雄奇,等. 生烃潜力法研究烃源岩排烃特征的原理及应用[J]. 中国石油勘探,2008,13(3):5-10.
- [19] 陈中红,查明. 烃源岩排烃作用研究现状及展望[J]. 地球科学进展,2005,20(4):459-466.
- [20] 王贵文,朱振宇,朱广宇. 烃源岩测井识别与评价方法研究[J]. 石油勘探与开发,2002,29(4):50-52.

(编辑 黄娟)