

文章编号:1672-6561(2015)05-0080-13

南海北部大陆边缘琼东南盆地含油气系统

张 伟^{1,2}, 何家雄¹, 李晓唐^{1,2}, 刘志杰^{1,2}, 张景茹^{1,2}, 龚晓峰^{1,2}

(1. 中国科学院广州地球化学研究所 边缘海地质重点实验室, 广东 广州 510640;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要:以含油气系统理论为指导,从区域地质及沉积特征、烃源岩生排烃史、油气运移输导系统、油气形成与圈闭配置关系及油气运聚成藏组合模式等方面,对南海北部大陆边缘琼东南盆地不同含油气系统进行综合分析,划分圈定了北部浅水区含油气系统、中央坳陷带深水区含油气系统及南部深水区含油气系统,并进一步划分出 13 个亚含油气系统。由于不同含油气系统及亚含油气系统均存在明显差异,所以重点剖析了含油气系统中生烃子系统、油气运移输导子系统及油气运聚成藏子系统构成及其特点。结果表明:琼东南盆地生烃子系统主要由始新统中深湖相及渐新统煤系烃源岩之生烃灶所构成;油气输导子系统则主要由断裂及裂隙和连续性砂体、不整合、泥底辟、气烟囱等输导体系所构成,控制和制约了油气运聚的主要优势富集区;油气运聚成藏子系统以垂向和侧向运移方式为主,通过输导体系近源或远距离运聚,在圈闭及储盖组合条件极佳的优势区富集成藏。

关键词:含油气系统;生烃;运移输导;成藏;琼东南盆地;南海

中图分类号:P618.130.2 文献标志码:A

Petroleum System in Qiongdongnan Basin of the Continental Margin, the Northern South China Sea

ZHANG Wei^{1,2}, HE Jia-xiong¹, LI Xiao-tang^{1,2}, LIU Zhi-jie^{1,2},

ZHANG Jing-ru^{1,2}, GONG Xiao-feng^{1,2}

(1. Key Laboratory of Marginal Sea Geology, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, Guangdong, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Based on the theory of petroleum system, the different petroleum systems in Qiongdongnan Basin of the continental margin, the northern South China Sea were comprehensively analyzed by means of regional geology and sedimentary characteristics, history of hydrocarbon expulsion of source rocks, petroleum migration and conduction systems, configuration relationships between petroleum formation and traps, as well as the assemblages and modes of petroleum migration and accumulation. The petroleum system was divided into shallow water petroleum system in the northern depression, deep water petroleum system in the central depression and deep water petroleum system in the southern depression of Qiongdongnan Basin, and 13 petroleum sub-systems further. Because of the obvious difference between petroleum systems and petroleum sub-systems, the composition and characteristics of generation, migration and conduction, migration and accumulation sub-systems were analyzed. The results show that the generation sub-system is composed of Eocene mid-deep lacustrine facies and

收稿日期:2015-01-23

基金项目:国家自然科学基金项目(41176052);中国科学院战略性先导科技专项项目(XDA03030301)

作者简介:张 伟(1987-),男,湖北赤壁人,中国科学院大学理学博士研究生,E-mail:zhangwei@gig.ac.cn.

通讯作者:何家雄(1956-),男,湖北天门人,研究员,理学博士,E-mail:hejx@gig.ac.cn.

Oligocene coal series source rock kitchen; the migration and conduction sub-system consists of the pathway systems, including fault, fracture, continuous sand body, unconformity, mud diapir and gas chimney, and controls the main petroleum-bearing advantage region restrictively; the migration and accumulation sub-system is dominated by vertical and lateral migration pattern, and petroleum accumulation in the advantage area under the wonderful condition of trap and reservoir-caprock composition through the proximal or distal migration and accumulation of pathway systems.

Key words: petroleum system; hydrocarbon generation; migration and conduction; accumulation; Qiongdongnan Basin; South China Sea

0 引言

自 20 世纪 70 年代 Dow 首次提出与油气系统相关的概念^[1]以来,含油气系统研究一直是国内外油气领域研究的热点。在理论研究层面,国际上油气地质学界起步较早,Perrodon 等首先提出含油气系统概念^[2]。Demaison 等提出油气系统的成因分类法^[3]。Magoon 等系统论述并总结了含油气系统,明确指出含油气系统包括成熟的烃源岩及所有已生成的油气藏,并且包括一个油气田赋存所必不可少的一切地质要素及作用^[4]。在中国,窦立荣等以气候带为基础,提出含油气超系统的概念及分区^[5]。张厚福拟定出油气系统的历史-成因分类法^[6];梁书义等提出油气成藏体系的概念^[7]。此外,赵文智等总结并补充研究了国内外含油气系统研究理论、方法、手段等,为含油气系统研究做出了重要贡献^[8-10]。在应用实践上,中国很多学者应用含油气系统理论,对不同含油气区和含油气盆地(坳陷)的含油气系统进行了分析与研究^[11-20]。王来斌等研究了济阳坳陷车镇凹陷复合含油气系统特征及其演化规律^[11];成永生等对渤海湾盆地乐亭凹陷古近系含油气系统进行了综合研究^[12];方世虎等以准噶尔盆地东部吉木萨尔凹陷为例,探讨了构造演化与含油气系统形成之间的关系^[13];刘华等分析了东营凹陷油-源特征,并划分了含油气系统^[14];何登发等研究了准噶尔盆地石炭系烃源岩分布,并划分了含油气系统^[15];丘东洲等以雪峰山西侧盆山过渡带为例,论述了改造型盆地含油气系统^[16];Wu 等初步总结了南海北部深水盆地的含油气系统^[17];刘方圆等划分并评价了珠江口盆地恩平凹陷含油气系统^[18]。

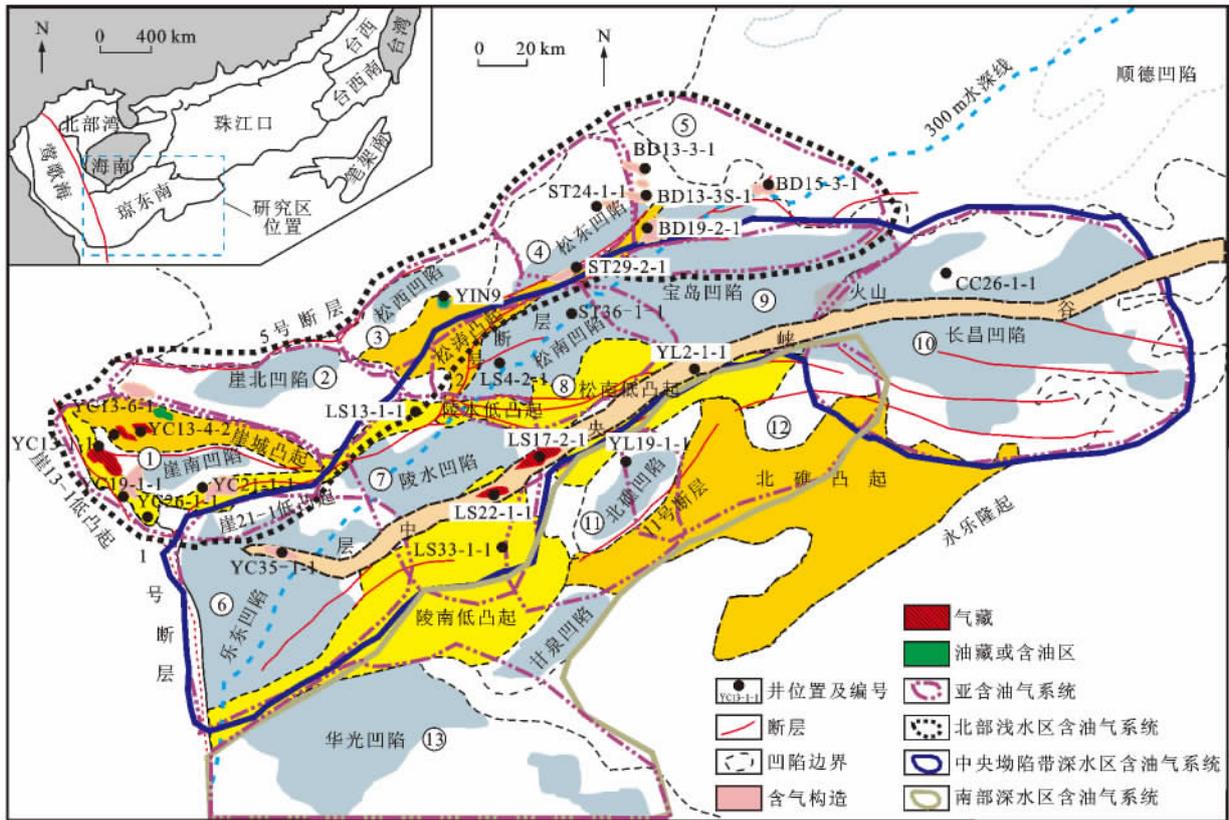
根据不同目的所提出的含油气系统概念及分类方法和研究手段等有很多,但含油气系统的本质及内涵乃是指含油气盆地中油气生成、运移及聚集过程的一个或多个相对封闭的动态系统,其均无法离

开油气成藏所必需的基本要素,即烃源岩与储盖组合、油气运移输导等诸多油气成藏条件之间在空间及时间上的匹配和相互作用^[2-4]。含油气系统划分可以确定盆地中不同源岩油气运聚的范围和聚集空间,即从源岩-圈闭的时空分布找出含油气盆地的油气成藏基本规律和分布特征,为寻找油气藏提供依据^[6-10]。

由于南海北部琼东南盆地油气勘探及研究程度较低,盆地含油气系统划分与分析开展得甚少。基于此,本文在充分认识琼东南盆地油气运聚成藏规律的基础上,根据含油气系统研究的核心内容,从区域地质及沉积特征、烃源岩生排烃史、油气运移输导系统、油气运聚与圈闭配置关系及成藏组合模式入手,对盆地不同含油气系统进行了深入分析;遵循和依据从烃源到圈闭成藏含油气系统的主线和原则,综合划分和圈定了盆地主要含油气系统及亚含油气系统;在此基础上,重点分析了含油气子系统特征,总结和阐明了盆地油气成藏特征及油气运聚分布规律,以期为该区进一步的油气勘探部署和风险决策等提供参考和借鉴。

1 区域地质背景

琼东南盆地位于南海北部陆缘海南岛与西沙群岛之间的海域,处在太平洋—菲律宾板块、欧亚板块及印度—澳大利亚板块相互作用的特殊构造位置^[21-22],因此,区域地质背景复杂,盆地形成演化颇具特色^[23-30]。盆地基本构造单元组成及其划分主要以古近系盆地为基础构造单元,将其综合划分为北部坳陷带、北部(中部)隆起带、中央坳陷带和南部隆起带及南部坳陷带 5 个一级构造单元(图 1),而次一级构造单元则可进一步划分出崖北凹陷、松西凹陷等 10 个主要凹陷,崖城凸起、陵水低凸起等 9 个凸起/低凸起。盆地构造演化及沉积充填特征可明显划分为古近系和新近系(以 T_{60} 为界)两个主要构



北部浅水区含油气系统包括：①为崖南凹陷亚含油气系统；②为崖北凹陷亚含油气系统；③为松西凹陷亚含油气系统；④为松东凹陷亚含油气系统；⑤为宝岛凹陷北坡亚含油气系统。中央坳陷带深水区含油气系统包括：⑥为乐东凹陷亚含油气系统；⑦为陵水凹陷亚含油气系统；⑧为松南凹陷亚含油气系统；⑨为宝岛凹陷亚含油气系统；⑩为长昌凹陷亚含油气系统。南部深水区含油气系统包括：⑪为北礁凹陷—陵南低凸起南部亚含油气系统；⑫为北礁凹陷—松南低凸起南部亚含油气系统；⑬为华光凹陷亚含油气系统

图1 琼东南盆地构造单元展布与含油气系统划分

Fig. 1 Distribution of Tectonic Units and Demarcation of Petroleum System in Qiongdongnan Basin

造层,新生代地层系统自下而上依次由始新统(未钻遇),渐新统崖城组、陵水组,中新统三亚组、梅山组、黄流组及上新统莺歌海组和第四纪乐东组地层所构成。盆地整体呈NE向展布,北部基本上处在陆架浅水区,海水深度为0~200 m;但在盆地南部自西向东从乐东—陵水凹陷、松南—宝岛凹陷到长昌凹陷等以及西南部华光凹陷和西沙北海槽一带属广阔的陆坡深水区,海水最深处超过2 000 m。

2 含油气系统及亚含油气系统划分

在充分认识琼东南盆地构造演化、沉积充填特征以及油气勘探所揭示的油气运聚成藏规律基础上,以含油气系统成因分类法为基本原则,根据烃源岩展布特征及其地球化学特点,以生烃灶烃源供给-圈闭成藏富集区带为主线和基本单元,将琼东南盆地综合划分为三大含油气系统:北部浅水区含油气系统、中央坳陷带深水区含油气系统和南部深水区含油气系统。

勘探及研究表明,各含油气系统中生烃凹陷油气运聚因受输导能力的控制而有一定的空间范围和优势运聚富集区。同时,在油气成因类型及生排烃与运聚时间、油气输导通道条件、油气成藏组合及油气运聚成藏模式等方面,不同凹陷均存在一定差异,因此再将每个含油气系统进一步划分为以生烃凹陷及烃源供给系统为中心,并充分考虑实际油气运移聚集区带范围的亚含油气系统(图1、表1)。每个含油气系统都发育各具特色的烃源岩、生储盖组合及圈闭和运移输导条件等,但含油气系统的诸多成藏要素在某些方面均具有一致性或相似点,因而从全盆地角度出发,分别对生烃子系统、油气运移输导子系统和油气运聚成藏子系统进行重点阐述,以整体性结合单个亚含油气系统特征,综合分析其异同点,找出和总结不同含油气系统中油气运聚成藏基本规律,以指导进一步的油气勘探活动。琼东南盆地油气勘探程度整体偏低,尤其是南部深水区钻井少,对主要烃源岩、储盖组合及油气运移输导和运聚成藏

表 1 含油气系统地质综合特征
Tab. 1 Geological Characteristics of Petroleum Systems

含油气系统	北部浅水区含油气系统					中央坳陷带深水区含油气系统					南部深水区含油气系统			
亚含油气系统	崖南凹陷	崖北凹陷	松西凹陷	松东凹陷	宝岛凹陷 北坡	乐东凹陷	陵水凹陷	松南凹陷	宝岛凹陷	文昌凹陷	北礁凹陷-陵南 低凸起南部	北礁凹陷-松南 低凸起南部	华光凹陷	
凹陷结构	半地堑	半地堑	半地堑	半地堑		半地堑	半地堑	半地堑	半地堑	半地堑			地堑	
凹陷面积/km ²	1 555	2 262	1 013	5 228		7 490	5 084	2 287	3 610	10 130	>7 000		7 500	
代表井编号	YC13-1-1	YC8-2-1	Yin9	ST24-1-1	BD13-3S-1	YC35-1-1	LS22-1-1	ST36-1-1	BD19-2-1	CC26-1-1	YL19-1-1	YL2-1-1		
生烃子 系统	有效烃源岩	始新统中深湖相泥岩、渐新统煤系和海相泥岩					始新统中深湖相泥岩、渐新统煤系和海相泥岩、中统海相泥岩					始新统中深湖相泥岩、渐新统煤系和海相泥岩		
	有机质丰度	煤和碳质泥岩为 12.96%~42.62%,泥岩为 1.56%					0.50%~1.46%					煤系地层为 20%,平均超过 1%		
	有机质类型	II—III型,以 III型为主					II—III型					以 III型为主		
	有机质成熟度	成熟—高成熟阶段					成熟—高成熟阶段					成熟—高成熟阶段		
油气运移 输导子 系统	相态类型	以气为主		油气均生			以气为主		以气为主		油气均生	油气均生		
	输导通道	断裂、砂体、不整合					断裂、砂体、不整合、微裂隙					断裂、砂体、不整合、微裂隙		断裂、砂体、不整合
	温压场	高温高压	常压				高温高压					压力过渡区/正常区		
油气运聚 成藏 子系统	圈闭类型	构造+岩性(以构造为主)					构造+岩性(以构造为主)					构造+岩性		
	储集体	三角洲、三 角洲前 缘砂、扇 三角洲、 滨海砂	(扇)三角 洲、滨 海砂	(扇)三角 洲、滨 海砂	(扇)三角 洲、滨 海砂	(扇)三角 洲、滨 海砂	滨海沙坝、油积砂体、 中央水道砂	冲积平原砂、生物礁、 中央水道砂			低位三角 洲、低位 扇、下 节谷 充填砂	(扇)三角洲、水道砂、 滨海砂、生物礁	(扇)三角洲、 滨海砂、生物礁	
	运移方式	垂向和侧向运移				垂向和侧 向运移	以侧向运移为主,垂向运移为辅					垂向和侧向运移		
	成藏组合	自生自储	下生上储				下生上储,自生自储		下生上储		下生上储	下生上储		
	成藏模式	垂向、侧向匹配晚期成藏					垂向就近运移成藏或垂向、侧向匹配成藏					垂向、侧向匹配成藏		
成藏主控因素	圈闭条件	圈闭、运 移条件	运移通道	储层、圈 闭条件	储层物性、 CO ₂ 干扰	运移通道及储层的物性条件,CO ₂ 干扰					储层条件与运移输导条件			

规律的认识都非常笼统,因此,本次琼东南盆地含油气系统分析研究及其划分仅仅是初步尝试。还须指出的是,基于以上研究思路及框架,本文未对不同含油气系统及亚含油气系统特征进行详细阐述,其中亚含油气系统划分及特点亦仅以列表形式加以高度总结概括(表 1)。

3 生烃子系统

3.1 北部浅水区含油气系统生烃子系统

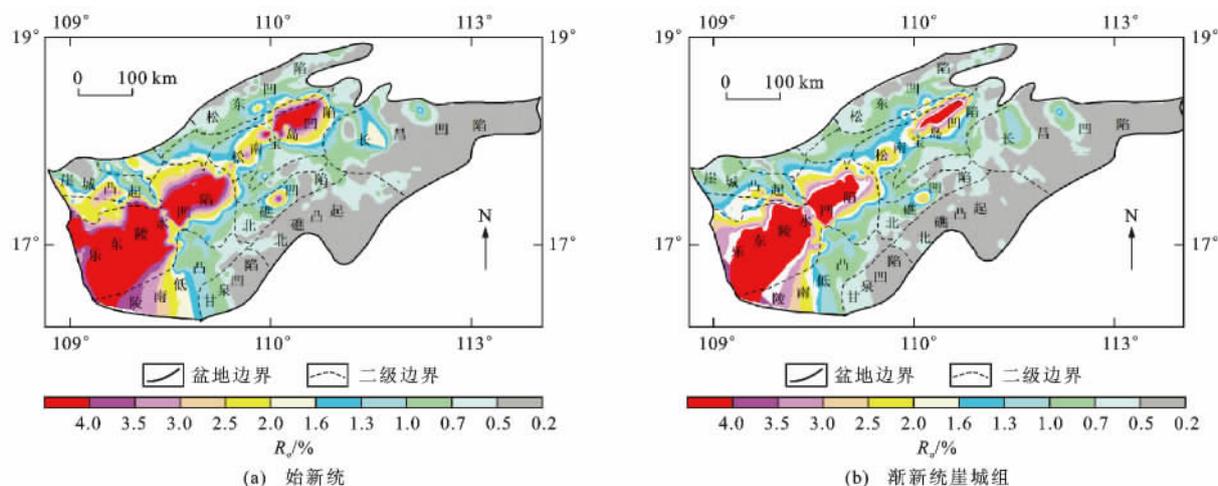
钻井及地震解释和烃源对比表明,北部浅水区含油气系统主要发育始新统中深湖相烃源岩和渐新统煤系烃源岩。始新统主要发育在中央坳陷带,但在北部坳陷带断陷湖盆深处亦有发育。受勘探程度限制,迄今尚未发现来自始新统中深湖相烃源岩的商业性油气藏,但是根据 YC14-1-1、BD15-3-1 等井钻获得少量原油地球化学特征^[31]、层序地层及沉积相特征,发现代表始新统烃源、富含 4-甲基甾烷的

原油或砂岩抽提物,判识确定北部浅水区凹陷存在始新统湖相烃源岩,且具有良好的生烃潜力,其与珠江口盆地始新统文昌组及北部湾盆地始新统流沙港组中深湖相烃源岩在地震反射特征上具有可比性,均属低频连续强反射,后两者均证实为盆地的主力烃源岩,总有机碳(TOC)平均值为 1.60%~1.95%,生烃潜力大^[32]。

渐新世崖城组时期,琼东南盆地处于海陆过渡型沉积环境,沉积充填了大套煤系地层。北部浅水区含油气系统生烃子系统中渐新统崖城组煤系烃源岩的煤及碳质泥岩有机质丰度普遍较高^[24]:总有机碳平均值分别达到 42.62%和 12.96%,氯仿沥青“A”分别为 1.65%和 0.30%;有机质类型多为 II₂—III型干酪根,属偏腐殖型和腐殖型生源母质;生烃潜量大,分别达到 87.56×10⁻³和 22.51×10⁻³,且总烃亦高,分别达到 7 415×10⁻⁶和 1 626×10⁻⁶;煤系烃源岩生烃潜力大。

从烃源岩成熟度平面分布[图 2(a)]来看,始新统湖相烃源岩有机质热演化程度在凸起带略低,且离凹陷带越近,烃源岩有机质热演化程度越高。北部浅水区始新统底部烃源岩现今热演化程度比深水区中央坳陷及南部坳陷明显偏低,镜质体反射率(R_o)为 0.5%~2.0%,且凹陷中央高于边缘,但镜

质体反射率普遍大于 0.7%。崖城组烃源岩与始新统烃源岩有机质热演化特征类似,其底部烃源岩镜质体反射率为 0.5%~1.6%,且由凹陷中心向边缘的热演化程度逐渐降低。在凹陷边缘部位镜质体反射率为 0.5%~0.7%,即已开始进入成熟阶段,典型实例如崖南凹陷[图 2(b)]。



图件引自中国海油 2010 年内部资料,有所修改

图 2 始新统和渐新统崖城组底界烃源岩成熟度分布特征

Fig. 2 Distribution of Maturity of Source Rocks from the Bottom of Eocene and Oligocene Yacheng Formation

从烃源岩有机质成熟演化的剖面特征来看,崖南凹陷生排烃史模拟[图 3(a)]显示其生烃门限深度约为 3 000 m,崖城组有效烃源岩在距今 20 Ma 进入成熟阶段,整体在晚中新世至上新世末达到生气高峰,与圈闭形成的时空配置较好,主要圈闭在梅山组沉积之前已形成。北部浅水区东部松东凹陷生排烃史研究表明,古近纪烃源岩生烃门限深度亦约为 3 000 m[图 3(b)],崖城组烃源岩在距今 18 Ma 左右进入成熟阶段;现今的古近纪烃源岩有机质热演化仍处于生油窗内,而始新统烃源岩有机质热演化程度较高,已进入生气窗^[23]。

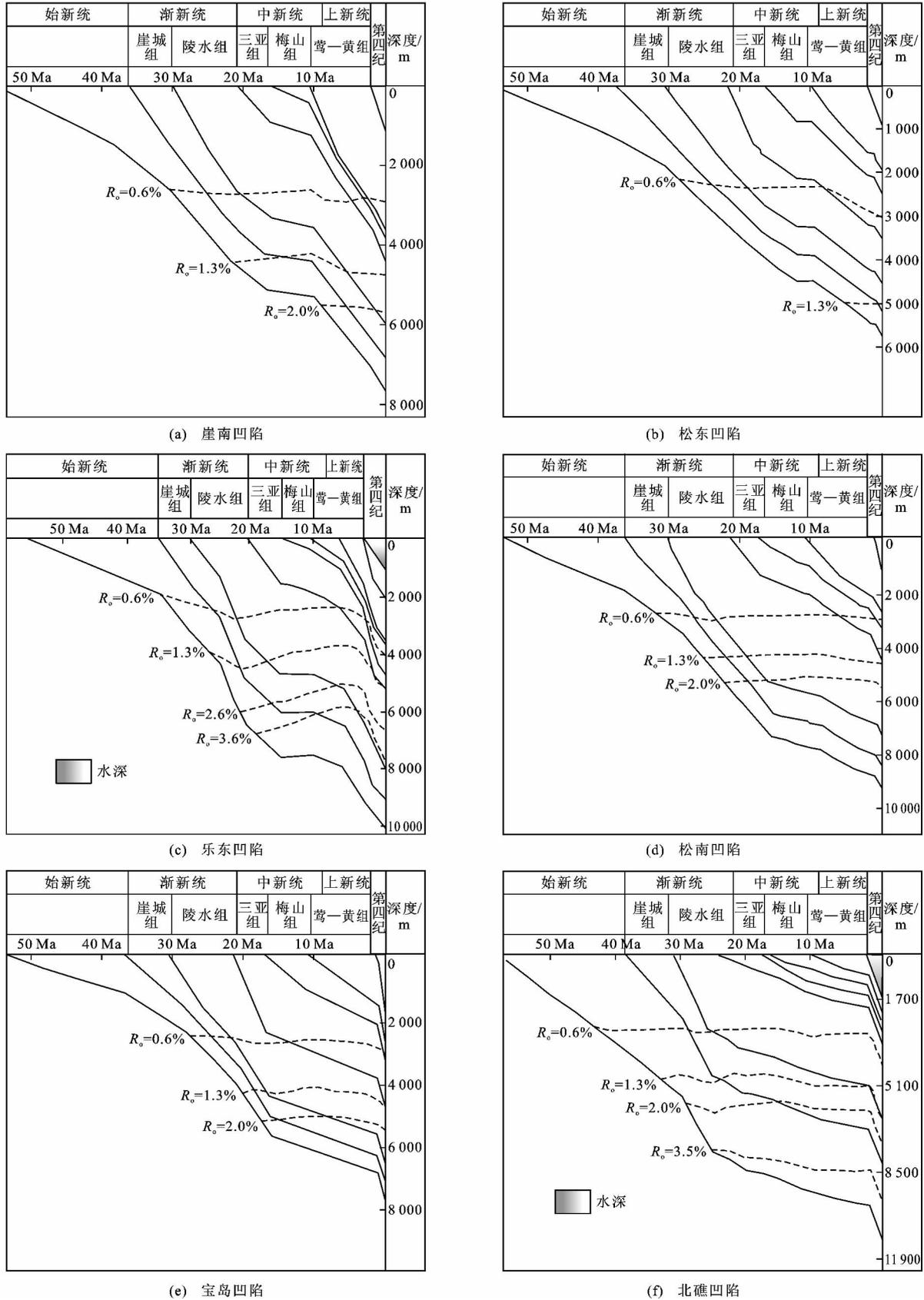
总之,就古近纪烃源岩而言,始新统与崖城组烃源岩在晚渐新世末的快速沉降和热作用期间达到成熟门槛。崖城组烃源岩在晚中新世末—上新世进入湿气及凝析油窗,现今大部分烃源岩仍处于成熟到高成熟生烃高峰阶段;由于其属偏腐殖型生源母质,所以以产大量煤型气及少量凝析油为主。

3.2 中央坳陷带深水含油气系统生烃子系统

勘探及地质综合研究表明,琼东南盆地中央坳陷带发育始新统滨浅湖相及中深湖相暗色泥页岩,推测为一套较好生油岩;同时,凹陷内及附近斜坡在早渐新世崖城期发育了与崖南凹陷相似的海岸平原相煤系及半封闭浅海相泥岩,为该区主要气源岩;此

外,还存在中新统海相泥岩潜在烃源岩,其勘探潜力有待证实。

中央坳陷带渐新统煤系及半封闭浅海相烃源岩钻井揭示较多,其中乐东凹陷北部邻区的崖城 21-1 构造崖城组烃源岩总有机碳多数为 1.0%~1.2%,属于好的气源岩;陵水凹陷的陵水 13-1 构造钻遇油气或油气显示揭示陵水凹陷具生烃能力;松南凹陷崖城组—陵水组煤系也具有较好的生烃条件,LS4-2-1 井揭示陵水组泥岩总有机碳为 0.8%~1.5%。宝岛凹陷 BD19-2-2 井钻遇陵水组一段烃源岩,有机质类型为 II₂—III 型干酪根,总有机碳为 0.59%~0.76%,平均值达 0.7%^[24];此外,BD19-2-1、BD13-1-1 等钻井揭示有来自宝岛凹陷崖城组煤系烃源岩生成的天然气,证实了宝岛凹陷渐新统煤系烃源岩的存在^[33]。必须强调的是,在中央坳陷带中央峡谷带东部 YL2-1-1 井钻遇崖城组暗色泥岩(厚 48 m),其为滨海相沉积,有机质类型为 III 型干酪根,总有机碳为 1.24%~1.46%,说明其为较好的烃源岩。同时,在中央峡谷水道陵南斜坡段 LS22-1-1 井钻遇的黄流组高产气藏(气层厚度超过 50 m)的天然气组成及甲烷同系物碳同位素特征,与北部浅水区崖南凹陷 YC13-1 气田天然气非常相似,可以确定天然气气源亦来自崖城组腐殖型烃源岩^[32],也进一步证实



图件引自文献[23]、[24]及中国海油 2010 年内部资料,有所修改;莺—黄组表示莺歌海组—黄流组

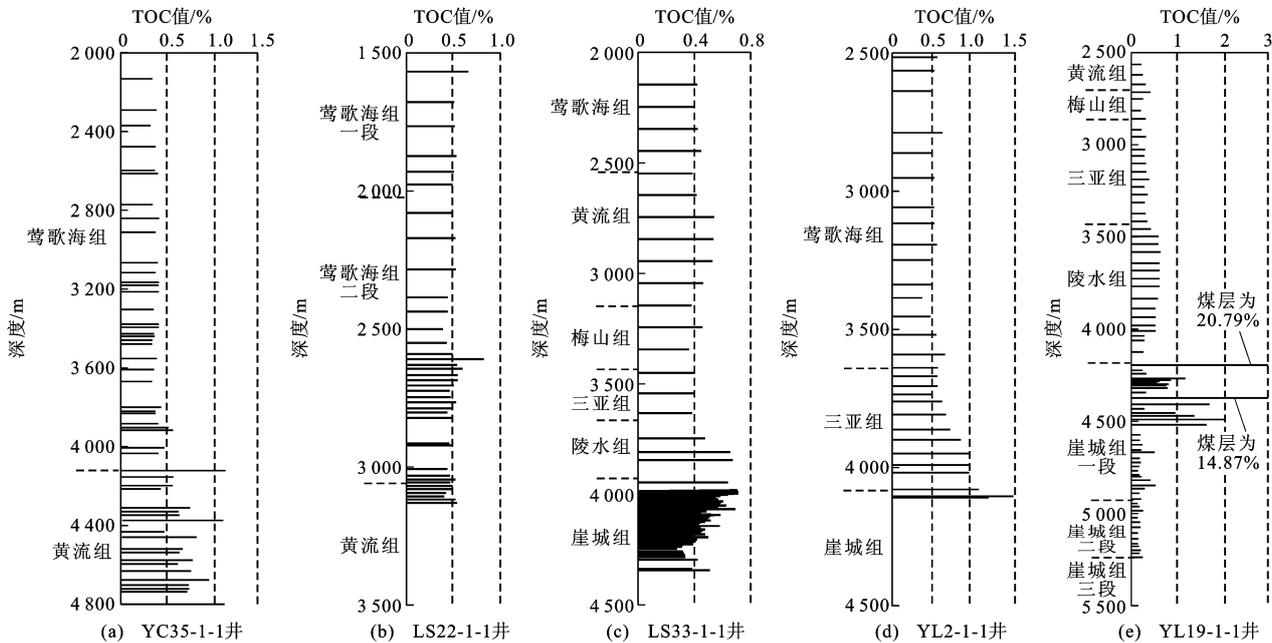
图 3 不同凹陷烃源岩生排烃史模拟

Fig. 3 Simulation of History of Hydrocarbon Expulsion in Different Sags

南部深水区中央拗陷带与北部浅水区崖南凹陷一样,天然气藏气源亦主要来自崖城组煤系烃源岩。

琼东南盆地中新统的油气勘探程度很低,根据目前所钻遇的中新统海相烃源岩地球化学指标,整体上为一套较低有机质丰度、中等生烃潜力的潜在气源岩(图4)。乐东凹陷崖35-1构造在近系莺歌

海组、黄流组、梅山组、三亚组均有气测显示;烃源对比表明天然气来自黄流组和梅山组,属于自生自储成藏^[25];上中新统黄流组烃源岩及下中新统烃源岩在该区已成熟,虽然仅有黄流组为较好的烃源岩,中新统其他层段为差的烃源岩,但证明了中新统这套潜在烃源岩的部分层段具有一定的生烃潜力^[34-35]。



图件引自文献[25]、[32]及中国海油2012年内部资料,有所修改

图4 深水区钻井揭示的烃源岩有机质丰度随深度的变化特征

Fig. 4 Change Characteristics of Organic Matter Abundance of Source Rock Revealed by Wells with Depth in Deep Water Area

从烃源岩成熟度平面分布特征(图2)来看,中央拗陷带深水区含油气系统中烃源岩镜质体反射率为2%~4.5%。总体上,始新统烃源岩有机质热演化程度很高,有机质处于成熟—高成熟阶段;在平面上,成熟度分布呈西高东低的特点。总体来看,崖城组烃源岩有机质热演化程度较高,有机质处于成熟—高成熟阶段,镜质体反射率为2%~3.5%,乐东凹陷崖城组的镜质体反射率已超过4.0%。陵水组烃源岩成熟度在平面上也呈现西高东低的特点,乐东凹陷镜质体反射率大多已超过2.0%,陵水凹陷镜质体反射率大多已超过1.5%,松南凹陷陵水组镜质体反射率亦大于1.8%,但宝岛凹陷陵水组烃源岩成熟度相对较低,大部分地区小于2.0%。

根据烃源岩纵向热演化特点[图3(c)~(e)],中央拗陷带古近纪不同层段烃源岩进入成熟阶段的时间明显早于北部拗陷带,而新近纪下中新统及以下地层都已进入生烃门限。烃源岩生排烃史模拟结果表明^[23],中央拗陷带深水区始新统及渐新统崖城组烃源岩类型及热演化特征和生烃潜力等均与北部

浅水区崖南凹陷等基本一致,有机质成熟度生烃门槛亦约为3000m(扣除水深)。始新统湖相烃源岩及生烃灶主要处在高成熟—过成熟阶段的油气窗及气窗范围,属重要烃源岩;下渐新统崖城组煤系烃源岩及生烃灶处于成熟—高成熟阶段的湿气及凝析油气窗范围,亦属主力烃源岩;而中新统陆源海相烃源岩则为潜在烃源岩,有机质丰度较低,有机质成熟度偏低,生烃潜力有限。

3.3 南部深水区含油气系统生烃子系统

根据盆地南部深水区探井揭示成果,结合层序地层学及沉积相分析,可以确定盆地南部深水区存在始新统湖相泥岩和渐新统煤系及浅海相泥岩两套主要烃源岩以及中新统海相泥岩潜在烃源岩。始新统地层在南部深水区目前尚未钻遇,但地震解释及地层对比追踪均证实其存在,在此不阐述。对于崖城组烃源岩,北礁凹陷YL19-1-1井揭示崖城组煤系地层广泛发育,该井钻遇的海岸平原沼泽煤系地层及潮坪—潟湖暗色泥岩有机质类型为Ⅲ型干酪根,总有机碳高达20%左右,平均超过1%,属较好的烃

源岩^[36]。此外,临近南部深水区的LS33-1-1井亦钻遇299.7 m渐新统崖城组暗色泥岩,属滨岸平原相—浅海相沉积,有机质类型属Ⅲ型干酪根,总有机碳为0.33%~1.17%,平均值为0.79%,属中等—较好的烃源岩。深水区中新统海相泥岩在中央坳陷带沉积最厚达4 000 m,乐东凹陷北部浅水区YC35-1-1井证实中新统烃源岩具生烃潜力;根据地震解释,南部深水区这套中新统海相泥岩亦发育,且具生烃潜力,属潜在烃源岩。而从过深水区含油气系统的LS22-1-1、LS33-1-1、YL2-1-1、YL19-1-1等4口井有机碳含量剖面图(图4)可以看出,中新统烃源岩有机质丰度普遍偏低,属于潜在烃源岩,因此,中新统海相烃源岩在南部深水区含油气系统中的生烃潜力尚待进一步勘探证实。

南部深水区北礁凹陷单点(凹陷最深点)生排烃史模拟结果显示,始新统湖相烃源岩在始新世晚期(约43 Ma)开始成熟,目前凹陷最深点处于过成熟阶段;崖城组烃源岩在陵三段早期(约29 Ma)开始成熟,目前凹陷最深点处于高成熟—过成熟阶段[图3(f)]^[37]。该凹陷北部的YL19-1-1井实测地温梯度达每百米4.62℃,属于高地温梯度区域,崖城组含煤泥岩有机质实测镜质体反射率为0.5%~1.3%,处于成熟生油窗范围内,大致在2 500 m左右深度处进入生油窗。这表明该区有机质热演化模拟的成熟度偏高,烃源岩实际热演化程度可能要低一些。总之,南部深水区含油气系统钻井揭示的烃源岩特征及盆地模拟结果表明,该区已具备形成优质烃源岩的条件,以渐新统煤系烃源岩为主,油气勘探应以寻找成熟—高成熟阶段崖城组烃源岩及其生烃灶为主。

4 油气运移输导子系统

4.1 北部浅水区含油气系统断裂-砂体-不整合复合输导体系

北部浅水区含油气系统中的西部崖城构造带主要受控于1号和3号断裂。3号断裂由两条断层组成,是崖南凹陷的控凹断裂,并与凹陷中心凸起构成了断坡构造,控制形成了该区断裂-砂体-不整合复合输导体系;凹陷内古近纪崖城组烃源岩生成的天然气经3号断裂沿陡坡带垂向运移,再经陵水组与三亚组不整合面和连续性三角洲砂体侧向运移,最终在崖城凸起YC13-6构造中聚集成藏;同时,崖南凹陷崖城组生成的油气沿南部缓坡带断裂和凹陷内次级断裂垂直向上运移,在YC13-1构造陵水组扇

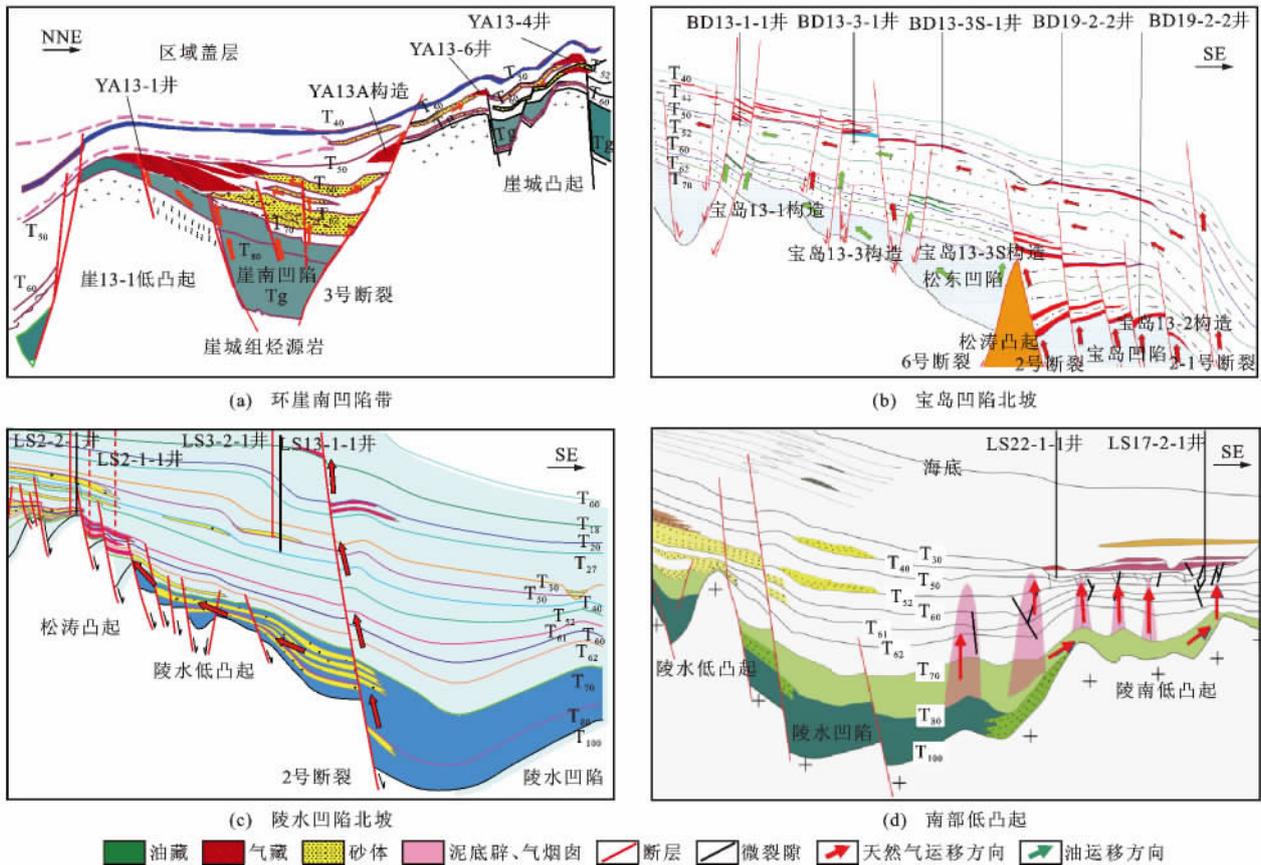
三角洲砂岩储层中聚集成藏,形成自生自储的YC13-1大气田[图5(a)]。

北部浅水区东部宝岛凹陷北坡亚含油气系统天然气运聚成藏过程中,断裂与砂体、不整合的匹配是油气成藏的关键。该区临近海南岛北部物源,古近纪和新近纪均发育连续性较好的骨架砂体,同时2号断裂也起到重要的沟源作用,来自于宝岛凹陷始新统中深湖相和崖城组海岸平原相煤系烃源岩生成的天然气经2号断裂垂向运移,再沿砂体和不整合面侧向运移至凹陷北坡鼻状圈闭带中聚集成藏[图5(b)]。

4.2 中央坳陷带深水区含油气系统断层-砂体-底辟及气烟囱复合输导体系

2号断裂带横贯盆地东西,衔接盆地北部坳陷带和中央坳陷带深水区,主要由2号和2-1号断裂组成;其对北部浅水区及南部中央坳陷带深水区油气运聚成藏均具有一定的输导作用,有利于古近系生成的油气向新近系储层中聚集,或古近系油气藏中的油气发生重组,在新近系中重新聚集。根据在盆地中平面上的展布及纵向上剖面构造特征,2号断裂带可划分为乐东、陵水、松南和宝岛四段;由于断裂不同分段的构造与沉积特征不同,导致不同分段对油气的输导能力差异明显,且断层的沟源和垂向疏导是否有效还与砂体及不整合面等输导体系配合关系密切[图5(b)、(c)]。新近纪盆地断裂活动微弱,2号断裂纵向多未切穿中新统地层,导致早期深部古近系形成的油气难以运聚至上覆浅部新近系圈闭之中,严重制约和影响油气纵向运聚成藏与分布格局,LS4-2、ST36-1构造钻探失利便是典型例证^[23-24]。因此,在实际勘探时必须充分考虑断层切穿的层位及被切穿地层骨架砂体发育程度及展布特征。

中央坳陷带不同类型凹陷及南部深水区周缘快速沉积充填较厚的局部地区具备泥底辟及气烟囱形成的地质条件,往往能够形成一些底辟、气烟囱及水力压裂形成的微裂隙(裂缝)纵向运聚通道^[38];当其与断裂裂隙及上覆不同类型圈闭时空耦合配置良好时,即可构成一种特殊的油气运聚之高速通道输导体系,促使深部始新统湖相及渐新统煤系生成的油气向上运聚到上覆中新统不同类型圈闭中,形成下生上储、古生新储、陆生海储油气藏。该区陵水凹陷陵南斜坡段中央峡谷水道上新统黄流组砂岩高产气藏即为其典型实例[图5(d)]。在中央坳陷带深水区含油气系统中,LS22-1、LS17-2油气运移通道地震剖面显示储层砂体均被泥质围岩包围,侧封条



图件引自文献[23]、[33]及中国海油2014年内部资料,有所修改

图5 不同构造带含油气系统油气输导特征

Fig. 5 Petroleum Conduction Features of Petroleum System in Different Tectonic Belts

件十分优越,易于形成岩性圈闭,来自陵水凹陷内烃源首先通过伸入到凹陷内部的连续性砂体和不整合面等运移到南部低凸起区,然后通过底辟和气烟囱及微裂缝构成的垂向疏导通道向上运聚至水道砂成藏^[37]。这种通过水道下部底辟与气烟囱,或由水力张裂产生的一系列微裂缝和小断层捕获来自深层的天然气复合输导体系,可能对沟源断裂不发育地区油气运移输导起到重要作用,值得加以重视。

4.3 南部深水区含油气系统断层-砂体-不整合复合输导体系

琼东南盆地南部深水区含油气系统总体勘探程度较低,油气运移输导体系的研究主要根据区域构造与沉积特征,结合地震资料解释和判识来进行的。总体来看,琼东南盆地具断坳双层结构,下构造层断裂活动强烈,表现为垂直断距大、平面延伸长的特点。上构造层构造活动逐渐减弱,断层发育程度降低,多为继承性断层或差异压实作用形成的,这一基本特征在南部深水区也得到体现^[39]。同时,南部深水区发育海岸平原砂和滨海相砂、大型三角洲、斜坡扇、海底扇群等类型砂体。

因此,南部深水区含油气系统总体上构成了断层-砂体-不整合复合输导体系。近洼区主要以断裂沟通古近系、新近系目的层,低凸起区和隆起区则以断裂、构造脊、输导砂体(陵水组和三亚组砂体)和不整合面联合组成油气运移输导网络^[34-37]。此外,孙启良等研究发现,在琼东南盆地深水区新近纪中新统(黄流组和梅山组)地层发现大量多边形断裂,可能对油气通过中新统地层继续向上运移进入浅部圈闭有重要作用^[40]。

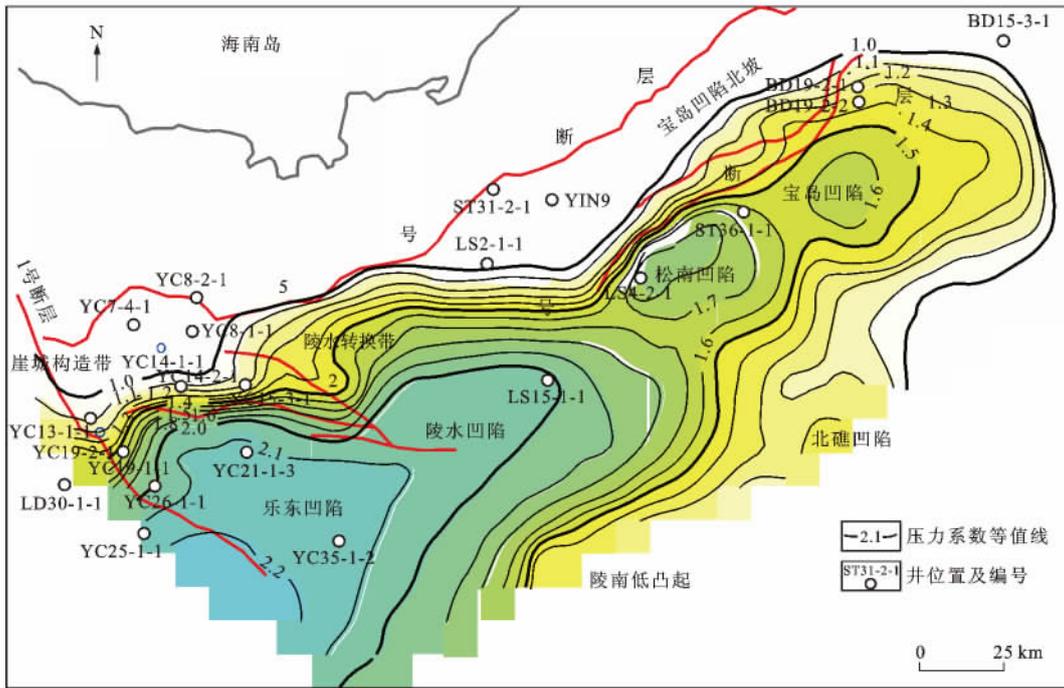
5 油气运聚成藏子系统

异常高压是构成盆地区域流体势场的一种重要动力来源。在高温高压条件下,天然气的运移方向依流体势而定,一般由高势区向低势区运移,因而在发育超压的含油气盆地中,泄压带位置往往是有利的油气运移指向区与聚集带。谢泰俊对琼东南盆地油气运聚特征进行分析研究,认为沉积物快速堆积造成泥岩的欠压实及有机质生烃增压,导致琼东南盆地中心区域聚集了巨大的能量,并处于高温高压状态^[41],盆地地温梯度一般超过每百米4℃,压力

系数则可超过 2.0^[38,41]。

琼东南盆地压力分布特征具有分带性,不同含油气系统之间压力分布特征差异显著。总体来看,北部浅水区含油气系统中隆起带局部发育超压;中央坳陷带深水区含油气系统内普遍发育超压,压力系数随着地层的加深而不断增大;南部深水区含油气系统中隆起区基本处于压力过渡带或正常压力区,除了一些较深的小断陷发育超压外,其他区域基本均发育弱超压或未发育超压。以陵水组三段顶面(T₆₂)的压力系数平面分布(图 6)为例,其压力分布特征与盆地总体压力分布特征基本一致:超压主要发育在中央坳陷带深水区含油气系统内,随着地层深度的加深,超压范围逐渐扩大,且整体上西部凹陷

压力系数要比东部凹陷大,乐东—陵水凹陷超压系数最高,压力系数最大值超过 2.0,松南—宝岛凹陷中心压力系数为 1.6~1.7;北部隆起带与中央坳陷带的分界线为 2 号断层,其泄压作用显著,两侧压力系数存在明显差异。与中央坳陷带深水区含油气系统压力呈鲜明对比的是,北部浅水区含油气系统中隆起带主要发育常压—弱超压,仅陵水转换带区域压力系数稍高,而压力系数相对较低(或为常压)的环崖南凹陷构造带与松涛—宝岛地区则大致对称分布在其东、西两侧。南部深水区含油气系统中隆起带主要为常压和压力过渡带,但受乐东凹陷的强超压影响,西部陵南低凸起区域局部也发育了超压^[38,41-42]。



图件引自中国海油 2010 年内部资料,有所修改

图 6 陵水组三段顶面(T₆₂)压力系数平面分布特征

Fig. 6 Horizontal Distribution of Pressure Coefficients in Top of the Third Member of Lingshui Formation (T₆₂)

总之,根据不同层段的压力分布特征,琼东南盆地主要的低压带(泄压带)分布在北部浅水区含油气系统的环崖南凹陷、松涛—宝岛地区以及南部深水区含油气系统中南部隆起带低凸起位置。上述低压区应该是油气运移的主要指向区和油气聚集的主要地带;凹陷内生成的烃类气以超压为动力,由高势区向低势区运移,聚集于盆地内有利的油气聚集带^[38],而有利聚集带是否可以成为有利的勘探目标区,还需考虑其他成藏条件是否匹配,各有利油气聚集区油气运聚特征与成藏模式、主控因素等含油气系统要素特征详见表 1。

6 结 语

(1)以含油气系统理论为指导,琼东南盆地可划分为北部浅水区含油气系统、中央坳陷带深水区含油气系统及南部深水区含油气系统。根据不同构造带构造沉积演化特征,依据烃源岩地球化学特征及主要生烃灶特点,结合该区油气运聚富集特征,含油气系统可进一步划分为不同的亚含油气系统。

(2)琼东南盆地生烃子系统中,始新统中深湖相及渐新统煤系是北部浅水区含油气系统中主要烃源岩及其生烃灶;始新统中深湖相、渐新统煤系浅海相

泥岩和中新统海相泥岩为中央坳陷带深水区含油气系统中主要烃源岩、潜在烃源岩及生烃灶;南部深水区含油气系统中主要烃源岩及生烃灶与中央坳陷带深水区含油气系统基本一致。

(3)琼东南盆地油气运移输导子系统主要由盆地断层裂隙、连续性砂体以及不整合和底辟、气烟囱等输导体构成。该复合油气运聚输导系统控制了油气运聚富集规律。

(4)油气运聚成藏子系统中,北部浅水区含油气系统中环崖南凹陷地区、宝岛凹陷以及南部深水区含油气系统隆起带低凸起位置是油气运移的主要指向区和油气聚集的主要区带,油气以垂向和侧向方式通过复合输导体系近源或远距离成藏。

参考文献:

References:

- [1] DOW W G. Application of Oil-correlation and Source-rock Data to Exploration in Williston Basin [J]. AAPG Bulletin, 1974, 58(7): 1253-1262.
- [2] PERRODON A, MASSE P. Subsidence, Sedimentation and Petroleum Systems [J]. Journal of Petroleum Geology, 1984, 7(1): 5-25.
- [3] DEMAISON G, HUIZINGA B J. Genetic Classification of Petroleum Systems [J]. AAPG Bulletin, 1991, 75(10): 1626-1643.
- [4] MAGOON L B, DOW W G. The Petroleum System: From Source to Trap [R]. Tulsa: AAPG, 1994.
- [5] 窦立荣, 李伟, 方向. 中国陆相含油气系统的成因类型及分布特征 [J]. 石油勘探与开发, 1996, 23(1): 1-6.
DOU Li-rong, LI Wei, FANG Xiang. Genetic Classification and Distribution Characteristics of Continental Petroleum Systems in China [J]. Petroleum Exploration and Development, 1996, 23(1): 1-6.
- [6] 张厚福. 油气系统的新定义及历史-成因分类方案 [J]. 成都理工学院学报, 1999, 26(1): 14-16.
ZHANG Hou-fu. New Concept of Petroleum System and Its History-genetic Classification [J]. Journal of Chengdu University of Technology, 1999, 26(1): 14-16.
- [7] 梁书义, 刘克奇, 蔡忠贤. 油气成藏体系及油气输导体系研究 [J]. 石油实验地质, 2005, 27(4): 327-332.
LIANG Shu-yi, LIU Ke-qi, CAI Zhong-xian. Study of Petroleum Accumulation System and Pathway System [J]. Petroleum Geology and Experiment, 2005, 27(4): 327-332.
- [8] 赵文智, 何登发. 含油气系统理论在油气勘探中的应用 [J]. 勘探家, 1996, 1(2): 12-19.
ZHAO Wen-zhi, HE Deng-fa. Application of Petroleum System in Petroleum Exploration [J]. Explorationist, 1996, 1(2): 12-19.
- [9] 李贤庆, 潘继平, 许晓宏. 含油气系统基本理论与实践 [J]. 断块油气田, 2000, 7(1): 1-5.
LI Xian-qing, PAN Ji-ping, XU Xiao-hong. The Fundamental Theories and Practice of Petroleum System [J]. Fault Block Oil and Gas Field, 2000, 7(1): 1-5.
- [10] 赵宗举. 油气系统成因分类及其勘探思路 [J]. 石油与天然气地质, 2006, 27(1): 1-10.
ZHAO Zong-ju. Genetic Classification of Petroleum System and Idea of Exploration [J]. Oil and Gas Geology, 2006, 27(1): 1-10.
- [11] 王来斌, 陈建平, 徐怀民, 等. 济阳坳陷车镇凹陷复合含油气系统特征及演化 [J]. 安徽理工大学学报: 自然科学版, 2006, 26(3): 7-11.
WANG Lai-bin, CHEN Jian-ping, XU Huai-min, et al. Characteristics and Evolution of the Composite Petroleum System in Chezhen Sag, Jiyang Depression [J]. Journal of Anhui University of Science and Technology: Natural Science, 2006, 26(3): 7-11.
- [12] 成永生, 陈松岭, 王海, 等. 渤海湾盆地乐亭凹陷下第三系含油气系统 [J]. 天然气地球科学, 2007, 18(6): 854-858, 863.
CHENG Yong-sheng, CHEN Song-ling, WANG Hai, et al. Lower Tertiary Petroleum System in Leting Sag, Bohai Bay Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2007, 18(6): 854-858, 863.
- [13] 方世虎, 宋岩, 徐怀民, 等. 构造演化与含油气系统的形成: 以准噶尔盆地东部吉木萨尔凹陷为例 [J]. 石油实验地质, 2007, 29(2): 149-161.
FANG Shi-hu, SONG Yan, XU Huai-min, et al. Relationship Between Tectonic Evolution and Petroleum System Formation: Taking the Jimsar Sag of Eastern Junggar Basin as an Example [J]. Petroleum Geology and Experiment, 2007, 29(2): 149-161.
- [14] 刘华, 蒋有录, 任景伦. 东营凹陷油源特征与含油气系统划分 [J]. 高校地质学报, 2009, 15(1): 93-99.
LIU Hua, JIANG You-lu, REN Jing-lun. Characteristics of Petroleum System and Oil-source in Dongying Depression [J]. Geological Journal of China Universities, 2009, 15(1): 93-99.
- [15] 何登发, 陈新发, 况军, 等. 准噶尔盆地石炭系烃源岩分布与含油气系统 [J]. 石油勘探与开发, 2010, 37(4): 397-408.
HE Deng-fa, CHEN Xin-fa, KUANG Jun, et al. Distribution of Carboniferous Source Rocks and Petroleum Systems in the Junggar Basin [J]. Petroleum Explora-

- tion and Development, 2010, 37(4): 397-408.
- [16] 丘东洲, 谢渊, 赵瞻, 等. 改造型盆地含油气系统分析: 以雪峰山西侧盆山过渡带为例[J]. 地质通报, 2012, 31(11): 1781-1794.
QIU Dong-zhou, XIE Yuan, ZHAO Zhan, et al. The Oil and Gas System in the Reformed Basin: A Case Study of the Basin-mountain Transitional Area on the Western Side of the Xuefeng Mountain[J]. Geological Bulletin of China, 2012, 31(11): 1781-1794.
- [17] WU S G, HAN Q H, MA Y B, et al. Petroleum System in Deepwater Basins of the Northern South China Sea[J]. Journal of Earth Science, 2009, 20(1): 124-135.
- [18] 刘方圆, 叶加仁, 舒誉, 等. 恩平凹陷含油气系统划分与评价[J]. 西安石油大学学报: 自然科学版, 2014, 29(4): 37-45.
LIU Fang-yuan, YE Jia-ren, SHU Yu, et al. Division and Evaluation of Hydrocarbon-bearing System in Enping Sag[J]. Journal of Xi'an Shiyou University: Natural Science Edition, 2014, 29(4): 37-45.
- [19] 杨明慧, 张厚和, 廖宗宝, 等. 南海南沙海域主要盆地含油气系统特征[J]. 地学前缘, 2015, 22(3): 48-58.
YANG Ming-hui, ZHANG Hou-he, LIAO Zong-bao, et al. Petroleum Systems of the Major Sedimentary Basins in Nansha Sea Waters (South China Sea)[J]. Earth Science Frontiers, 2015, 22(3): 48-58.
- [20] 梁英波, 赵喆, 张光亚, 等. 俄罗斯主要含油气盆地油气成藏组合及资源潜力[J]. 地学前缘, 2014, 21(3): 38-46.
LIANG Ying-bo, ZHAO Zhe, ZHANG Guang-ya, et al. Resource Potentials of Main Plays in the Petroliferous Basins in Russia[J]. Earth Science Frontiers, 2014, 21(3): 38-46.
- [21] 李三忠, 索艳慧, 刘鑫, 等. 南海的盆地群与盆地动力学[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2012, 32(6): 55-78.
LI San-zhong, SUO Yan-hui, LIU Xin, et al. Basin Dynamics and Basin Groups of the South China Sea[J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2012, 32(6): 55-78.
- [22] 陈建军, 马艳萍, 陈建中, 等. 南海北部陆缘盆地形成的构造动力学背景[J]. 地学前缘, 2015, 22(3): 38-47.
CHEN Jian-jun, MA Yan-ping, CHEN Jian-zhong, et al. Tectonic Dynamics of Northern Continental Margin Basins in South China Sea[J]. Earth Science Frontiers, 2015, 22(3): 38-47.
- [23] 李绪宣. 琼东南盆地构造动力学演化及油气成藏研究[D]. 广州: 中国科学院广州地球化学研究所, 2004.
LI Xu-xuan. The Study of Dynamics of Structures Evolution and Reservoir Accumulation of Qiongdongnan Basin[D]. Guangzhou: Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, 2004.
- [24] 朱伟林, 张功成, 杨少坤, 等. 南海北部大陆边缘盆地天然气地质[M]. 北京: 石油工业出版社, 2007.
ZHU Wei-lin, ZHANG Gong-cheng, YANG Shao-kun, et al. Gas Geology of Continental Margin in Northern South China Sea[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2007.
- [25] 何家雄, 刘海龄, 姚永坚, 等. 南海北部边缘盆地油气地质及资源前景[M]. 北京: 石油工业出版社, 2008.
HE Jia-xiong, LIU Hai-ling, YAO Yong-jian, et al. The Petroleum Geology and the Resource Potential of the Marginal Basins in the Northern South China Sea[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2008.
- [26] 席敏红, 周兴海, 王琳, 等. 琼东南盆地深水生物礁发育模式研究[J]. 石油实验地质, 2014, 36(4): 435-441.
XI Min-hong, ZHOU Xing-hai, WANG Lin, et al. Bioherm Developmental Mode in Deepwater Area of Qiongdongnan Basin[J]. Petroleum Geology and Experiment, 2014, 36(4): 435-441.
- [27] 刘兵, 周家雄, 任科英, 等. 琼东南盆地坡折带斜井时深关系研究[J]. 天然气工业, 2014, 34(11): 36-40.
LIU Bing, ZHOU Jia-xiong, REN Ke-ying, et al. The T-D Relationship of Deviated Wells in the Slope-break Belts of the Qiongdongnan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2014, 34(11): 36-40.
- [28] 张功成, 张义娜, 沈怀磊, 等. “源热联控”琼东南盆地的天然气勘探潜力[J]. 天然气工业, 2014, 34(1): 18-27.
ZHANG Gong-cheng, ZHANG Yi-na, SHEN Huai-lei, et al. An Analysis of Natural Gas Exploration Potential in the Qiongdongnan Basin by Use of the Theory of Joint Control of Source Rock and Geothermal Heat[J]. Natural Gas Industry, 2014, 34(1): 18-27.
- [29] 何家雄, 苏丕波, 卢振权, 等. 南海北部琼东南盆地天然气水合物气源及运聚成藏模式预测[J]. 天然气工业, 2015, 35(8): 19-29.
HE Jia-xiong, SU Pi-bo, LU Zhen-quan, et al. Prediction of Gas Sources of Natural Gas Hydrate in the Qiongdongnan Basin, Northern South China Sea, and Its Migration, Accumulation and Reservoir Formation Pattern[J]. Natural Gas Industry, 2015, 35(8): 19-29.
- [30] 何家雄, 颜文, 祝有海, 等. 南海北部边缘盆地生物气/亚生物气资源与天然气水合物成矿成藏[J]. 天然气工业, 2013, 33(6): 121-134.
HE Jia-xiong, YAN Wen, ZHU You-hai, et al. Bio-ge-

- netic and Sub-biogenetic Gas Resource Potential and Genetic Types of Natural Gas Hydrates in the Northern Marginal Basins of South China Sea[J]. *Natural Gas Industry*, 2013, 33(6): 121-134.
- [31] 刘正华, 陈红汉. 琼东南盆地天然气成因类型及其烃源探讨[J]. *石油实验地质*, 2011, 33(6): 639-644.
LIU Zheng-hua, CHEN Hong-han. Origin Mechanism and Source Rock for Natural Gas in Qiongdongnan Basin, South China Sea[J]. *Petroleum Geology and Experiment*, 2011, 33(6): 639-644.
- [32] 黄保家, 李绪深, 王振峰, 等. 琼东南盆地深水区烃源岩地球化学特征与天然气潜力[J]. *中国海上油气*, 2012, 24(4): 1-7.
HUANG Bao-jia, LI Xu-shen, WANG Zhen-feng, et al. Source Rock Geochemistry and Gas Potential in the Deep Water Area, Qiongdongnan Basin[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2012, 24(4): 1-7.
- [33] 黄保家, 李里, 黄合庭. 琼东南盆地宝岛北坡浅层天然气成因与成藏机制[J]. *石油勘探与开发*, 2012, 39(5): 530-536.
HUANG Bao-jia, LI Li, HUANG He-ting. Origin and Accumulation Mechanism of Shallow Gas in the North Baodao Slope, Qiongdongnan Basin, South China Sea[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2012, 39(5): 530-536.
- [34] 游君君, 孙志鹏, 李俊良, 等. 琼东南盆地深水区松南低凸起勘探潜力评价[J]. *中国矿业*, 2012, 21(8): 56-59.
YOU Jun-jun, SUN Zhi-peng, LI Jun-liang, et al. Exploration and Potential of Songnan Low-uplift in the Deep Water Region, Qiongdongnan Basin[J]. *China Mining Magazine*, 2012, 21(8): 56-59.
- [35] 张功成, 米立军, 吴景富, 等. 凸起及其倾没端: 琼东南盆地深水区大中型油气田有利勘探方向[J]. *中国海上油气*, 2010, 22(6): 360-368.
ZHANG Gong-cheng, MI Li-jun, WU Jing-fu, et al. Rises and Their Plunges: Favorable Exploration Directions for Major Fields in the Deepwater Area, Qiongdongnan Basin[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2010, 22(6): 360-368.
- [36] 沈怀磊, 屈红军, 张义娜, 等. 琼东南盆地深水区北礁凹陷勘探潜力评价[J]. *内蒙古石油化工*, 2014(7): 1-5.
SHEN Huai-lei, QU Hong-jun, ZHANG Yi-na, et al. Preliminary Evaluation of the Exploring Potentiality of the Beijiao Sag in the Deep Water Area of the Qiongdongnan Basin[J]. *Inner Mongolia Petrochemical Industry*, 2014(7): 1-5.
- [37] 孙志鹏, 张伟, 黄安敏, 等. 南海西部深水区地质特征与勘探潜力、突破方向[R]. 湛江: 中海石油(中国)有限公司湛江分公司, 2009.
SUN Zhi-peng, ZHANG Wei, HUANG An-min, et al. Geologic Feature, Exploration Potential and Breakthrough Direction of Western Abyssal Region in South China Sea[R]. Zhanjiang: Zhanjiang Company, CNOOC, 2009.
- [38] 孔敏. 琼东南盆地油气运移动力特征分析[D]. 武汉: 中国地质大学, 2010.
KONG Min. The Analysis of Over-pressure and Hydrocarbon Migration in Qiongdongnan Basin[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2010.
- [39] 杨涛涛, 吴敬武, 王彬, 等. 琼东南盆地华光凹陷构造特征及沉积充填[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2012, 32(5): 13-18.
YANG Tao-tao, WU Jing-wu, WANG Bin, et al. Structural Pattern and Sediment Filling in Huaguang Sag of Southern Qiongdongnan Basin[J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 2012, 32(5): 13-18.
- [40] SUN Q L, WU S G, LU F L, et al. Polygonal Faults and Their Implications for Hydrocarbon Reservoirs in the Southern Qiongdongnan Basin, South China Sea[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2010, 39(5): 470-479.
- [41] 谢泰俊. 琼东南盆地天然气运移输导体系及成藏模式[J]. *勘探家*, 2000, 5(1): 17-21.
XIE Tai-jun. Natural Gas Migration Conducting System and Reservoir Formation Pattern in Southeast Hainan Basin[J]. *Explorationist*, 2000, 5(1): 17-21.
- [42] 朱光辉, 陈刚, 刁应护. 琼东南盆地温压场特征及其与油气运聚的关系[J]. *中国海上油气: 地质*, 2000, 14(1): 29-36.
ZHU Guang-hui, CHEN Gang, DIAO Ying-hu. Characteristics of Geotherm-pressure Field and Its Relationship with Hydrocarbon Migration and Accumulation in Qiongdongnan Basin, South China Sea[J]. *China Offshore Oil and Gas: Geology*, 2000, 14(1): 29-36.