



琼东南盆地新生代东西分块差异构造演化及控藏意义

王真真, 朱继田, 李安琪, 胡潜伟, 毛雪莲, 尹宏伟

Differential control of structures over reservoirs and its significance in Qiongdongnan Basin

WANG Zhenzhen, ZHU Jitian, LI Anqi, HU Qianwei, MAO Xuelian, and YIN Hongwei

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2020072401>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

琼东南盆地新生代孢粉组合及其古气候意义

NEOGENE PALYNOLOGICAL ASSEMBLAGES FROM QIONGDONGNAN BASIN AND THEIR PALEOCLIMATIC IMPLICATIONS

海洋地质与第四纪地质. 2017, 37(1): 93

东非海岸构造演化及其对南、北主要富油气盆地控藏作用对比

Tectonic evolution of East Africa coast and comparison of hydrocarbon accumulation conditions in the north and south petroliferous basins

海洋地质与第四纪地质. 2020, 40(1): 104

南海西南次海盆两侧陆缘新生代构造沉降特征及演化过程

Cenozoic tectonic subsidence of the continental margins of southwest sub-basin, South China Sea and its evolution

海洋地质与第四纪地质. 2020, 40(6): 82

渤海湾盆地大歧口凹陷变换构造与板内变形差异

TRANSFER ZONES AND DIFFERENCES IN INTRA-PLATE DEFORMATION IN GREAT QIKOU SAG OF THE BOHAI BAY BASIN

海洋地质与第四纪地质. 2017, 37(4): 98

平衡剖面技术在台湾海峡盆地西部构造演化研究中的应用

Application of balanced cross section technique to the study of tectonic evolution of western Taiwan Strait Basin

海洋地质与第四纪地质. 2018, 38(5): 193

南海礼乐盆地新生代构造沉降特征及其成因分析

Tectonic subsidence and its mechanism of the Liyue Basin, South China Sea

海洋地质与第四纪地质. 2020, 40(4): 17



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2020072401

琼东南盆地新生代东西分块差异构造演化及控藏意义

王真真¹, 朱继田¹, 李安琪¹, 胡潜伟¹, 毛雪莲¹, 尹宏伟²

1. 中海石油中国有限公司湛江分公司, 湛江 524057

2. 南京大学地球科学与工程学院, 南京 210023

摘要: 运用构造解析方法, 通过精细地震资料解释和断层活动性分析, 对琼东南盆地东西分块差异构造演化特征及其构造控藏差异进行了深入研究。根据区域构造差异, 首次厘定了松南凹陷与宝岛凹陷边界, 并分析认为该边界为琼东南盆地东西区分块差异构造演化边界。以此为界, 盆地西区以东北构造走向为主, 以发育大型简单铲式断层控制的大型地堑、半地堑凹陷为特征; 盆地东区以近东西构造走向为主, 以发育 Y 字型断层、铲状及板状阶梯断层控制的大型地堑、复式地堑为特征。综合分析认为, 琼东南盆地东西分块差异构造演化的主控因素主要有三点: 限制性边界条件、地壳结构与热流差异、差异构造地质因素。限制性边界条件差异与区域构造应力场转换是控制盆地东西分块断裂时空差异的主控因素, 而地壳结构与热流差异和差异构造地质因素最终加剧了盆地东西区差异演化。在此基础上, 开展了琼东南盆地深水区构造差异控藏综合研究, 主要包括烃源岩、沉积体系及成藏区带差异研究, 认为深水西区凹陷半地堑结构窄深, 以发育海陆过渡相及陆源海相烃源岩类型为主, 烃源岩埋深大, 热演化程度高, 生排烃时间晚, 成藏层系以新近系重力流沉积为主, 受半地堑凹陷结构控制主要发育 3 个成藏区带: 陡坡带沟源断层垂向运移成藏区带、中央带高压底辟裂隙垂向运移成藏区带和缓坡带侧向运移成藏区带, 以前两种成藏区带最优。深水东区 (复式) 地堑结构宽浅, 以发育陆源海相烃源岩类型为主, 烃源岩埋深浅, 热演化程度中等, 生排烃时间早, 成藏层系以前古近系潜山及古近系三角洲海陆过渡相沉积为主, 受地堑结构控制对称发育 4 个成藏区带: 南北部凸起区断-砂-脊复合疏导格架侧向运移成藏区带和两侧近凹断阶带断层垂向运移成藏区带, 这 4 四个区带成藏条件有利, 均有油气发现, 应为下步勘探重点领域。

关键词: 构造样式; 差异构造演化; 限制性边界; 构造控藏; 琼东南盆地

中图分类号: P736.1

文献标识码: A

Differential control of structures over reservoirs and its significance in Qiongdongnan Basin

WANG Zhenzhen¹, ZHU Jitian¹, LI Anqi¹, HU Qianwei¹, MAO Xuelian¹, YIN Hongwei²

1. Zhanjiang Branch of CNOOC Ltd., Zhanjiang 524057, China

2. School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210023, China

Abstract: Using the method of structural analysis, the differential structural evolution characteristics and their control on difference in reservoirs between the east and west blocks in the deep-water areas of the Qiongdongnan Basin are studied in depth through fine interpretation of seismic data and analysis of fault activities. The boundary between Songnan sag and Baodao sag is delineated by detailed structural analysis, and the structural transitional zone is considered as the boundary of differential tectonic evolution between the east and west blocks of the Qiongdongnan Basin. Taking this as the boundary, the western basin is NE trended and characterized by the development of large grabens and half graben depressions controlled by large simple listric faults; the eastern basin, however, is EW in trend and characterized by the development of large grabens and composite grabens jointly controlled by Y-shaped faults, stepped spade and plate-shaped faults. Analysis shows that there are three controlling factors for the differential tectonic evolution of the east and west blocks of the Qiongdongnan Basin, i.e the restrictive boundary conditions, differences in crustal structure and heat flow, and differential structural geological influence factors. The differences in restrictive boundary conditions and the change in regional tectonic stress field are the main factors controlling the temporal and spatial differences of faults in the basin, while the last two factors eventually aggravate the differential evolution of the eastern and western regions of the basin. On this basis, a comprehensive study on the differences in petroleum systems in the deep-water area of the Qiongdongnan basin is carried out, which includes the differences in source rocks, sedimentary systems and petroleum accumulation systems. It is considered that the western deep-water area is dominated by the source rocks of transitional facies and terrigenous marine facies under large burial depth, high thermal evolution degree, and late hydrocarbon generation and expulsion time, controlled by the structure of half graben depression structure.

资助项目: 国家科技重大专项“大型油气田及煤层气开发”子课题“莺琼盆地高温高压天然气富集规律与勘探开发关键技术”(2016ZX05024-005)

作者简介: 王真真 (1988—), 女, 硕士, 工程师, 主要从事石油天然气地质综合研究工作, E-mail: wangzhz19@cnooc.com.cn

收稿日期: 2020-07-24; **改回日期:** 2020-12-24. 周立君编辑

Three accumulation systems are well developed: vertical migration-accumulation system through depression controlling fault in steep slope zone, vertical migration-accumulation system through high pressure diapirs-fractures in the central zone and lateral migration-accumulation system in the gentle slope zone. Borehole drillings have confirmed that the former two systems are the best. In contrast, the eastern deep-water area is dominated by marine source rocks under shallow burial depth, moderate thermal evolution, early generation and expulsion of hydrocarbon. Controlled by the graben structure, four zones of hydrocarbon accumulation systems are developed symmetrically: the lateral migration-accumulation systems through faults and sand ridge migrating framework in uplift zones and vertical migration-accumulation systems on both sides of the stepped faults in near depression zones. The accumulation conditions of the two areas are favorable for hydrocarbon accumulation and should be the next target for exploration.

Key words: structural style; differential structural evolution; restrictive boundary; structural differential control on reservoirs; Qiongdongnan Basin

琼东南盆地是南海北部重要的深水含油气盆地,近年来盆地深水区陵水 25-1、陵水 17-2、陵水 18-1 大中型天然气田相继发现,显示了盆地巨大的资源勘探潜力^[1-4]。但是,目前琼东南盆地深水区天然气发现主要集中于西部的乐东-陵水凹陷,东部宝岛-长昌凹陷勘探尚无商业性发现。随着深水西区勘探逐步成熟,后备领域与目标逐渐减少,亟需在深水东区拓展领域,开辟深水勘探新战场。

前人关于琼东南盆地深水区东西分块差异构造演化早有研究,雷超等认为以陵水凹陷与松南凹陷边界为界,琼东南盆地深水区分为东西两块,东西区构造机制与演化特征差异明显^[5-7]。以此为基础的构造差异控藏研究也有不少,但均以局部成藏条件差异研究为主,如构造控烃源差异、构造转换带控砂、疏导格架差异等^[5,8],目前尚无对琼东南盆地东西区差异控藏系统性研究文献发表。随着三维地震资料全覆盖及钻井资料逐渐丰富,关于琼东南盆地深水区东西构造差异及其成藏差异有了更深入的认识。本文在充分利用琼东南盆地三维/二维地震资料、已钻井资料基础上,应用精细构造解析、物理模拟和综合研究方法,对琼东南盆地深水区东西分块边界开展充分论证,进一步理清深水东西区构造差异,最后对东西区构造差异控制下的成藏区带差异进行了系统研究,并对深水东区下一步构造控藏研究与勘探方向提出建议。

1 区域地质背景

琼东南盆地为南海北部陆缘伸展盆地,受大型控凹断裂控制,内部发育多个半地堑、地堑等断陷型凹陷,垂向充填始新统岭头组(T80)、下渐新统崖城组(T70)、上渐新统陵水组(T60)、下中新统三亚组(T50)、中中新统梅山组(T40)、上中新统黄流组(T30)、上新统莺歌海组(T20)和第四系(T00)^[9]。其中,下渐新统崖城组已证实为主要烃源岩地层。琼东南盆地成藏层系多样,下渐新统至上新统均发

育储盖组合,均有油气发现,但目前盆地除局部勘探程度较高外,整体勘探程度相对较低,存在油气成藏规律不清楚、下步有利勘探方向仍不明确等问题。

根据凹陷发育格局,琼东南盆地可划分为北部拗陷带、中央凸起区、中央拗陷带、南部隆起带,具有南北分带、东西分块构造演化特征(图1)^[5]。根据前人研究成果,其南北分带特征主要以大型控凹断裂为界,如2号断裂带,其东西分块边界主流观点认为是陵水凹陷与松南凹陷边界,但仍存在一定争议。近年来,随着三维地震、钻井资料逐渐丰富,勘探认识逐渐深入,以陵水-松南凹陷边界为界的東西分块差异演化特征受到质疑。亟需进一步论证盆地东西区构造差异性,厘定东西区边界并论证其主控机制,并开展以此为基础的构造控藏研究,为深水区内下步勘探方向提供理论指导。

2 琼东南盆地深水东西区构造转换边界厘定与构造差异特征

2.1 琼东南盆地深水凹陷精细构造解释

利用三维地震资料精细解释,对盆地中央拗陷带控凹断层组合、断层样式和凹陷结构进行了精细研究。首先对盆地西区主要控凹断层2号断层进行了精细解释,显示2号断层分段性特征较强,由多条断层横向连接而成,不同分段区的断层产状及组合显示出明显差异,控制形成不同的凹陷结构(图1)。对盆地东区主要控凹断层:10号、12号、17号、18号及20号断层,也进行了重新解释和分析,从而对中央拗陷带主要凹陷结构与控凹断层组合样式进行了总结对比(表1)。

乐东凹陷主体为受北部2号断层与南部13号断层控制的不对称地堑结构,凹陷西部为典型地堑,中部被2号断层间断呈南断北超半地堑,东部为受一系列南倾断层复杂化的半地堑结构。陵水

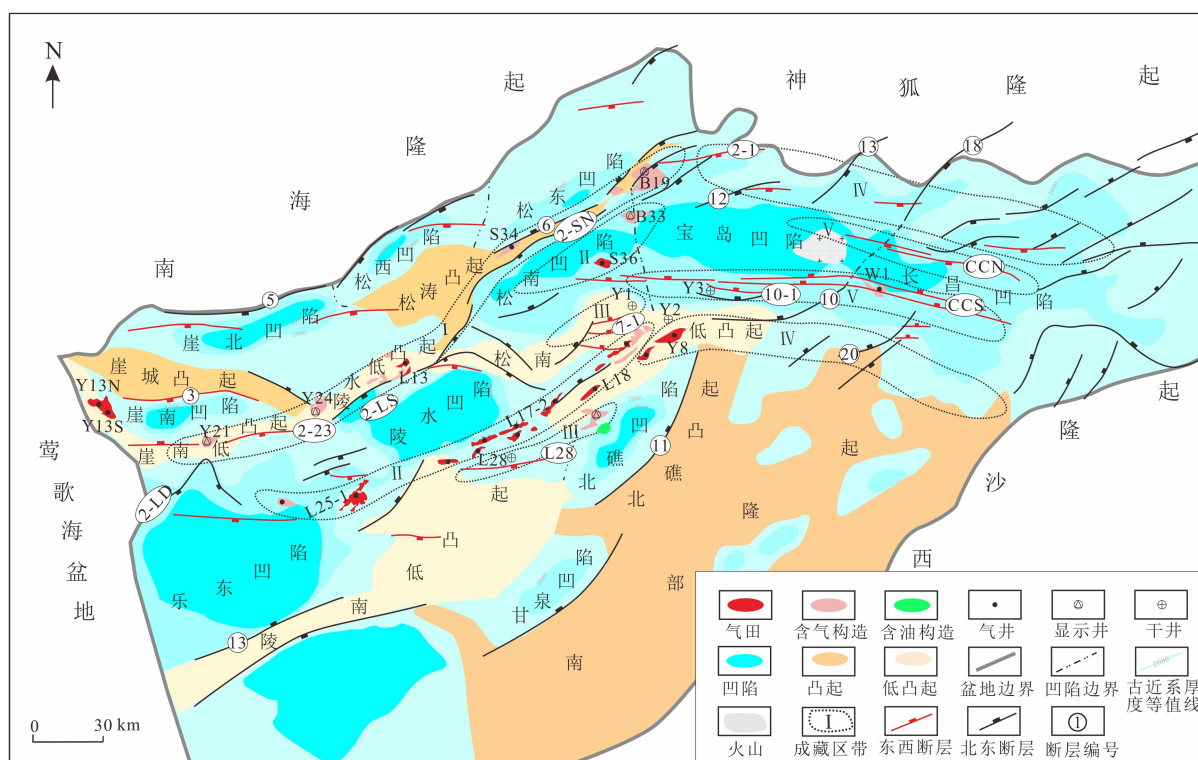


图 1 琼东南盆地构造单元与深水油气田分布图

I. 陡坡带沟源断层垂向迁移成藏区带, II. 中央带高压底辟裂隙垂向迁移成藏区带, III. 缓坡带复合侧向疏导成藏区带, IV. 断-砂-脊复合疏导格架侧向迁移成藏区带, V. 近凹陷阶带断层垂向迁移成藏区带。

Fig.1 Tectonic map showing deepwater oil and gas distribution in the Qiongdongnan Basin

I -vertical migration-accumulation system through depression controlling fault in steep slope zone, II -vertical migration-accumulation system through high pressure diapirs-fractures in central zone, III -lateral migration-accumulation system in the gentle slope zone, IV -lateral migration-accumulation system through faults and sand ridge composite migrating framework in uplift area, V -vertical migration-accumulation system through faults in near depression fault terrace zone.

凹陷主体为受 2 号断层控制的半地堑结构, 凹陷西部为受一系列北倾断层复杂化的地堑结构; 凹陷中部为半地堑结构, 其北部陡坡带发育两级控凹断层, 控制两级坡折, 其南部缓坡带发育一系列南倾断层形成反向断阶带, 向北礁凹陷过渡; 陵水凹陷东部为半地堑结构, 发育 NW 走向断层与松南低凸起为界。乐东凹陷与陵水凹陷之间 2 号断层中断, 两侧次级断裂倾向相反, 为构造转换带特征。2 号断层在乐东、陵水凹陷除局部受周边构造复杂化外, 基本呈简单铲式特征, 断面向下产状变缓, 局部断至莫霍面。

松南凹陷主体为受 2 号断层控制的北断南超型半地堑, 凹陷西部接松南低凸起, 受断裂影响而复杂化, 呈双断地堑结构; 凹陷中部为典型半地堑, 断层较少, 控凹 2 号断层呈简单铲式特征; 凹陷东部接宝岛凹陷, 呈平缓过渡关系, 缓坡带发育一系列同向断阶(与地层倾向相同)。宝岛凹陷主体为略向南倾斜的地堑结构, 凹陷西部与松南凹陷过渡, 呈半地堑结构, 缓坡带发育一系列反向断阶, 与松

南凹陷有区别; 凹陷中部受北部 2 号断层、12 号断层及南部 10 号、10-1 号断层控制, 为地堑结构, 控凹断层剖面组合呈 Y 字型或阶梯状, 断面产状较陡; 凹陷东部为非典型复式地堑结构, 向东接长昌凹陷, 呈构造过渡关系, 南北控凹断层不对称造成凹陷结构具斜向地堑特征。

长昌凹陷主体为复式地堑, 由北部北断南超半地堑、中央地堑及南部南断北超半地堑复合而成, 是长昌凹陷发育多个次洼的主要控制因素。凹陷西部结构与宝岛凹陷东部结构相似, 为过渡结构; 凹陷中部为不对称复式地堑结构, 南北部均发育次洼; 凹陷东部发育一系列北倾断裂为主, 形成复式半地堑结构, 向东接入西沙海槽。长昌凹陷断层组合以 Y 字型、阶梯形为主, 与宝岛凹陷相似。

2.2 深水东西分块构造转换边界厘定

基于以上构造解析研究, 笔者重点关注了松南、宝岛凹陷的差异特征。由于松南凹陷与宝岛凹陷从沉积体系上难以区分, 在过去的研究中, 一直

表 1 琼东南盆地中央坳陷带凹陷结构与断裂样式
Table 1 Depression structure and fault style analysis in central depression belt of Qiongdongnan Basin

凹陷	凹陷结构典型剖面			控凹断层样式		凹陷结构简述
	西部	中部主体	东部	断层	剖面样式	
乐东凹陷				2号		主体为不对称地堑结构, 凹陷西部为典型地堑, 中部受2号断层间断呈南断北超半地堑, 东部为受一系列南倾断层复杂化的半地堑结构。
陵水凹陷				2号		主体为受2号断层控制的半地堑结构, 西部受一系列北倾断层复杂化, 南部缓坡发育一系列南倾断层, 向北礁凹陷过渡, 凹陷东部接松南低凸起
松南凹陷				2号		主体为受2号断层控制的北断南超型半地堑, 凹陷西部接松南低凸起, 受断裂影响而复杂化, 呈双断地堑结构, 东部接宝岛凹陷, 呈平缓过渡关系
宝岛凹陷				2号		主体为略向南倾斜地堑结构, 北部陡坡带受2号断层、12号断层控制, 南部受10号断层控制, 东部接长昌凹陷, 呈构造转换过渡关系, 南北控凹断层不对称造成凹陷平面具斜向地堑特征
				12号		
				10号		
长昌凹陷				17、18号等		长昌凹陷中部主体为复式地堑, 由北部北断半地堑、中央地堑及南部南断半地堑复合而成, 长昌凹陷东西部断裂复杂, 控制沉积多个次洼, 凹陷东部发育北倾断裂为主, 形成复式半地堑, 西部为缓坡带。
				20号		

将两个凹陷作为一个整体来分析, 合称松南-宝岛凹陷。近年来, 随着三维地震资料采集范围增大, 资料处理品质提高, 松南、宝岛凹陷构造解释更加精细, 已钻井揭示成藏系统更加准确, 两个凹陷的差异逐渐显现, 再将两个凹陷作为整体来研究, 已经大大制约了下一步勘探研究与部署。

借助于新的三维地震资料精细解释结构, 笔者重新厘定了松南凹陷与宝岛凹陷边界。该边界大致位于松东凹陷东缘到北礁凹陷东缘一线, 近南北向分布, 自北向南以松东凹陷东缘走滑断裂带^[9]、2号断层中断、古近系地层减薄带及松南低凸起北坡同向断阶与反向断阶转换带为特征(图2, 表1), 下面分别描述。第一, 由图2可见, 松东凹陷东缘发育近南北走向走滑断裂带, 走滑断层西部受6号断层控制, 发育一系列北倾断层, 东部受2号和12号断层控制, 发育一系列南倾断层, 两侧断层倾

向相反, 是形成该被动走滑断裂带的主要原因。分析认为, 该走滑断裂带具有构造转换作用, 因此, 以该走滑断层为标志性构造边界线。第二, 该走滑断层南部延伸点处, 2号断层发生间断, 该区地层呈挠曲特征, 并不发育断面, 2号断层西部松南段以简单铲式断层为特征, 2号断层东部宝岛段以Y字型复合断层为特征, 具有明显差异。第三, 由古近系地层厚度等值线看出, 松南、宝岛凹陷之间存在明显的地层减薄区。第四, 松南低凸起北部斜坡区发育断阶带, 边界以西发育同向断阶带, 边界以东发育反向断阶带, 两者之间断层较少, 笔者据此划分为松南、宝岛凹陷南部边界。通过以上精细构造解析, 将此边界厘定为松南、宝岛凹陷边界, 打破了以往多年的固有认识, 为下一步构造研究与成藏分析奠定了基础。

通过对琼东南盆地中央坳陷带主要凹陷的结



图 2 松南凹陷与宝岛凹陷转换带基底断裂分布图

Fig.2 Basement faults distribution map between Songnan Sag and Baodao Sag

构与断层样式进行精细解析,认为将陵水凹陷与松南凹陷边界,即松南低凸起作为盆地东西分块边界存在较多不妥之处。首先,松南凹陷总体构造走向为北东向,与宝岛、长昌凹陷近东西走向特征差异较大。其次,从断层特征与凹陷结构上,松南凹陷为半地堑结构,与陵水凹陷具有较强相似性,与宝岛、长昌凹陷地堑结构相比差异较大。第三,松南凹陷控凹断裂 2 号断层为简单铲式断层,与宝岛-长

昌凹陷发育 Y 字型、阶梯状控凹断层具有明显差异。第四,已有钻井揭示,松南凹陷与乐东、陵水凹陷相似,发育高压地层,中中新统地层压力系数达到 1.7,与宝岛、长昌凹陷常温、常压地层存在明显差异。另外,从地壳厚度与热流特征来看,乐东、陵水、松南凹陷中央地壳厚度相近,约 17~18 km,而宝岛-长昌凹陷中央地壳厚度更薄,约 15~16 km (图 3);陵水、松南凹陷热流值较低,约 60~70 mW/m²,乐东凹陷略高,约 65~77 mW/m²,而宝岛凹陷热流值约 75~85 mW/m²,长昌凹陷热流值最高,约 85~95 mW/m² (图 4)。综合以上分析,认为将盆地东西分块大型构造转换边界定在松南低凸起对下步构造研究和油气成藏研究有诸多掣肘之处,松南凹陷下步勘探宜与深水西区对比研究。

综合分析盆地已钻井油气发现特征、凹陷地壳厚度、热流特征及断裂组合、凹陷结构特征,认为松南凹陷与宝岛凹陷边界为琼东南盆地东西区分块差异构造演化边界更为合理。以此为界,盆地深水西区以发育大型简单铲式断层控制的大型半地堑(如陵水凹陷、松南凹陷)、非典型地堑(如乐东凹陷)为主,构造变形以简单剪切变形为特征;盆地深水东区以发育 Y 字型断层、铲式阶梯状断层及板式阶梯状断层控制的大型地堑、复式地堑为主,包括宝岛、长昌凹陷,构造演化以纯剪变形为特征。

3 琼东南盆地东西分块差异构造演化主控因素

应用物理模拟实验技术和构造解析方法,综合国内外文献,分析认为琼东南盆地东西分块差异构

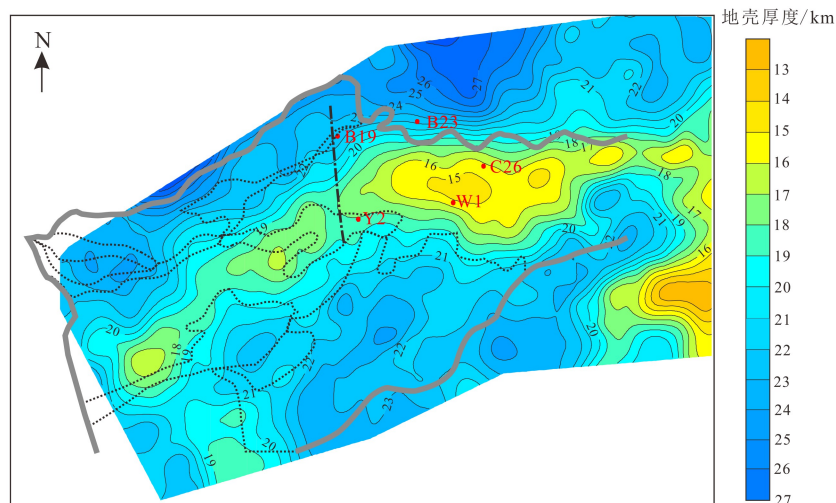


图 3 琼东南盆地莫霍面埋深构造图

Fig.3 Depth structure of Moho in Qiongdongnan Basin

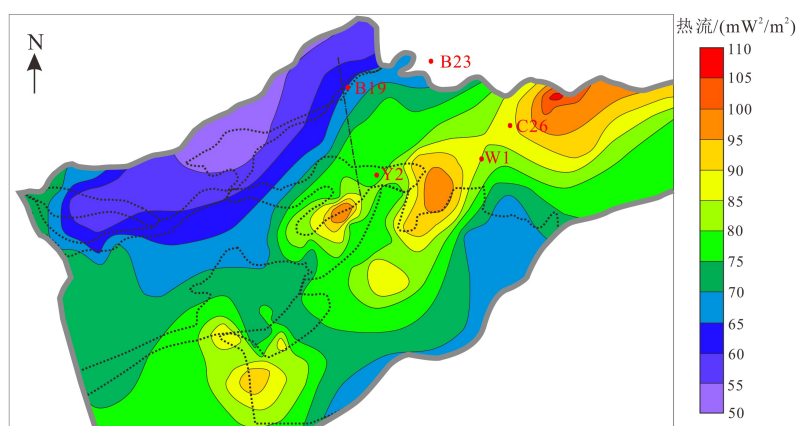


图4 琼东南盆地地表热流分布图

Fig.4 Surface heat flow in Qiongdongnan Basin

造演化的主控因素主要为限制性边界条件、地壳结构与热流差异、差异构造地质影响因素。

3.1 限制性边界条件差异

与珠江口盆地明显不同,受北部海南-神狐隆起及南部西沙隆起限制,琼东南盆地为典型的限制性裂谷盆地。盆地西区具北东走向限制性边界,东区具近东西向限制性边界,是造成盆地东西分块差异构造演化的第一大主控因素。

应用物理模拟实验来研究限制性边界条件对构造变形的控制作用^[10]。采取沙箱实验方法进行物理模拟,沙箱装置由沙箱和两个施力电缸组成,沙箱中使用干燥石英砂模拟上地壳脆性地层。为了模拟不同基底性质,在沙箱底部铺设无伸缩帆布以模拟刚性基底,铺设弹力布以模拟构造薄弱带。为了验证琼东南盆地东西分块构造差异与不同方向限制性边界之间的关系,沙箱实验同样设置两个变形区,一个变形区平行于施力电缸,在拉伸实验中表示正交伸展变形区,另一个变形区斜交于施力电缸,在拉伸实验中表示斜交伸展变形区,两个变形区夹角约135°。

使用施力电缸对沙箱中的“地层”均匀施力,拉伸实验会形成一个垂直拉伸力方向的正向拉伸区及斜交拉伸力方向的斜向拉伸区。从实验结果来看,早期拉伸过程中,无论是正向拉伸区还是斜向拉伸区,形成断裂主要在垂直拉伸力的方向上产生(图5),不同的是,正向拉伸区断层与边界平行、线状分布,断层延伸较长,斜向拉伸区断层与边界斜交,断层短小,平面呈雁列分布,显示了不同边界条件对断层的控制作用。

盆地实际断裂分布是否与实验结果吻合呢?笔者对琼东南盆地断裂系统进行了时空差异分

析。琼东南盆地主要发育NE、近EW和NW走向三组断层,以古近纪断层活动较为强烈,新近纪之后局部断层继承性活动。不同走向断层又有同沉积断层与非同沉积断层之分,笔者对盆地内渐新世同沉积断层进行了甄选,分两组断层分析:NE走向和近EW走向,分别计算断层活动速率并分析其平面展布特征。断层活动速率分析结果显示(图6),NE走向断层在渐新世具有持续活动性,除2号断层松南段(F2-SN)、宝岛段(F2-BD)和11号断层(F11)晚渐新世活动速率高于早渐新世外,多数断层的渐新统崖城组沉积时期活动速率较大。而近EW走向断层主要以上渐新统陵水组沉积时期活动速率最大,少数断层为晚渐新世初始形成。断层平面展布特征显示(图1),NE走向断层在盆地西区表现为大型控沉积断层,线状分布,空间连续距离长,与盆地边界平行,如5号、2号、11号断层,而在盆地东区,NE走向断层平面延伸距离较短,呈雁列状展布,与盆地边界斜交,如12号、18号、10号、20号断层。近EW走向断层在盆地西区表现为雁列状分布,断层规模较小,而在盆地东区,近EW走向断层规模较大,平面延伸距离长,尤其以宝岛-文昌凹陷南北两侧断阶带断层规模最大。

结合盆地区域构造演化过程分析认为,由于渐新世时期南海北部区域构造应力场发生了由北西-南东方向到近南北方向的顺时针转换^[11-12],造成盆地东西区在差异限制性边界条件下的时空演化特征不同。早渐新世,盆地西区为正向拉张区,盆地东区为斜向拉张区;晚渐新世,盆地东区为正向拉张区,盆地西区为斜向拉张区。这种变换造成的结果是:早渐新世,盆地西区形成大量北东走向、线状分布、平行边界的大型控沉积断层带,如5号断裂带、2号断裂带及11号断裂带(图1),盆地东区形

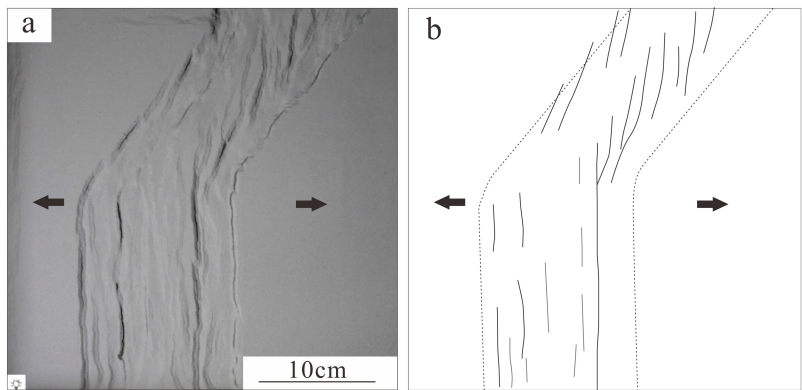


图 5 限制性边界条件断裂展布物理模拟实验
a. 左右拉伸 3 cm 实验拍照, b. 左右拉伸 3 cm 断层解释。

Fig.5 Physical simulation experiment of fracture distribution under restricted boundary conditions
a. Photo of the experiment stretching 3 cm from left to right, b. Fault interpretation of the photo.

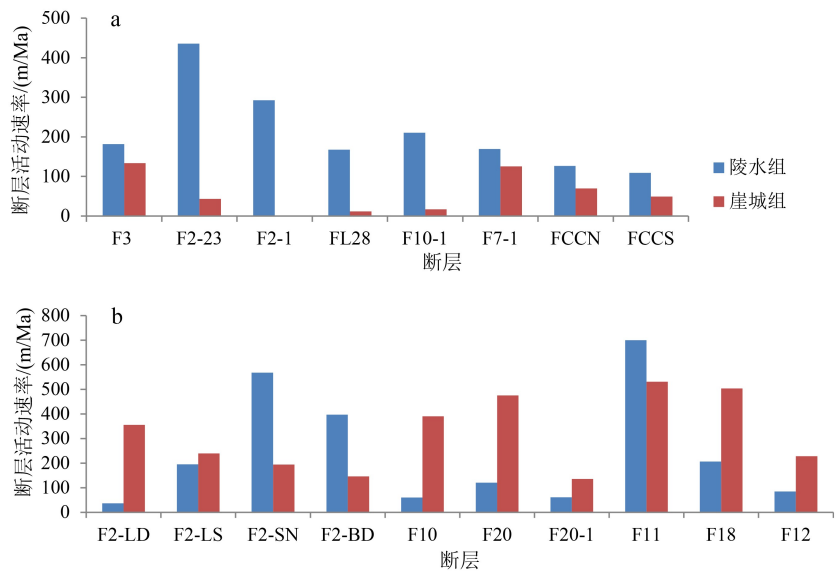


图 6 琼东南盆地不同走向断裂渐新世活动速率直方图
a. 近 EW 走向断层活动速率直方图, b. NE 走向断层活动速率直方图。

Fig.6 Fault activity rate histograms of the Oligocene in Qiongdongnan Basin
a. East-west strike fault activity rate histogram, b. North-east strike fault activity rate histogram.

成大量北东走向、雁列展布、斜交边界的控沉积断层,如宝岛北坡 2-1 号断层、10 号、20 号、12 号、18 号断层等。晚渐新世,在盆地西区形成大量近东西走向、不连续分布的同沉积断层,在东区形成近东西走向、连续的、线状分布的大型断阶带。因此,限制性边界与区域应力场转变是控制琼东南盆地断裂时空展布差异的主控因素。

3.2 地壳厚度与热流差异

影响琼东南盆地东西分块差异演化的第二个因素是地壳结构与热流差异。莫霍面埋深与热流测量资料分析显示(图 3、4),琼东南盆地西区地壳

厚、热流低,东区地壳薄、热流高^[13-17]。数值模拟与区域地质研究认为,岩石圈的流变性主要受岩石圈结构和热状态影响,且其中流变性强度与热流呈明显反相关关系^[18-19]。因此分析认为琼东南盆地西区岩石圈流变性较高,发育断至莫霍面的大型铲式断层,如 2 号断层,造成盆地西区以简单剪切变形为主,而相反的,盆地东区岩石圈流变性低,多级断裂发育,表现为以纯剪切变形为特征。

3.3 构造地质影响因素差异

影响琼东南盆地东西分块差异演化的第三个因素是差异构造地质影响因素。南海北部陆缘盆

地构造演化是多构造事件耦合作用的结果,大的方面包括太平洋板块俯冲后撤和印度-欧亚板块碰撞,小的方面包含古南海俯冲、新南海扩张、青藏高原隆升、红河断裂走滑活动、菲律宾板块俯冲及转向等^[12,18,20]。琼东南盆地为南海北部陆缘中部伸展盆地,前人研究认为,其西部构造演化主要受红河断裂走滑活动影响,东部主要受南海扩张活动影响^[12,20]。物理模拟与数值模拟实验显示,红河断裂左旋走滑活动,造成盆地西部加速裂陷,尤其是北部拗陷带的裂陷与红河断裂左行走滑活动具有直接关系。而晚中新世后红河断裂右旋走滑,对盆地西区伸展具有约束作用^[21-22]。盆地东区主要受南海扩张影响,表现为地幔上涌造成的强烈伸展、地壳减薄和热流升高,进一步加剧东西区构造演化差异性。

4 琼东南盆地东西区构造控藏差异研究与下步勘探建议

琼东南盆地东西分块差异构造演化对盆地的结构样式、烃源岩发育特征、沉积充填体系特征及油气成藏系统产生了根本性的影响。通过已钻井及勘探实践研究,认为琼东南盆地东西分块差异演化主要造成三方面的影响:烃源岩差异、沉积体系差异与成藏区带差异。

4.1 构造差异控制烃源岩

已钻井地化分析显示(图7),琼东南盆地中央拗陷带以发育早渐新统海陆过渡相和陆源海相烃源岩为主,为深水区主要烃源岩类型^[8,23-24]。但是深水东西区构造差异造成盆地东西区烃源岩也具有一定差异。盆地西区以大型半地堑凹陷为特征,凹

陷结构窄深,发育陡坡带、中央带和缓坡带,其中以陡坡带巨厚海陆过渡相与陆源海相烃源岩为烃源岩主体,受后期快速沉降-沉积演化控制,烃源岩埋深大,成熟度高,以天然气勘探为主;同时受低热流影响,烃源岩生排烃晚,成藏层系以新近系为主。盆地东区以大型地堑、复式(半)地堑型凹陷为特征,凹陷中央宽阔,受后期快速热沉降及欠补偿沉积演化特征控制,烃源岩上覆地层薄,埋深浅,凹陷两侧海陆过渡相烃源岩均未成熟,以宽阔中央带陆源海相烃源岩为生烃主体;受深水东区热流高影响,烃源岩生排烃早,成藏层系以古近系和前古近系潜山为主^[1,25-26]。

4.2 构造差异控制沉积体系

受限制性边界控制,琼东南盆地以发育大型轴向沉积体系为特征,其中深水西区钻井已证实中新世后受西部崑崙隆起物源影响,乐东-陵水凹陷发育北东走向轴向沉积体系,包括梅山组海底扇及莺歌海-黄流组峡谷水道,为深水西区主要储集层系^[27-30]。对比西区,分析认为盆地东区同样发育近东西走向轴向沉积体系,且受东部拗陷阶段较早影响,早在陵水组时期便已开始形成西高东低限制性裂谷地貌,有利于轴向沉积体系发育。虽然受宝岛-长昌凹陷中央大火山影响成像品质,三维地震资料显示宝岛凹陷陵水组海底扇低频强反射特征与长昌凹陷万宁1海底扇反射特征在层位和厚度上仍具有一定对比性(图8)。应用重矿物聚类分析判断物源方向的方法,对盆地东区已钻井陵水组地层重矿物分析化验数据,选取14种代表性较强、含量相对较高的重矿物(锆石、电气石、金红石、白钛矿、石榴石、磁铁矿、锐钛矿、独居石、赤褐铁矿等)进行

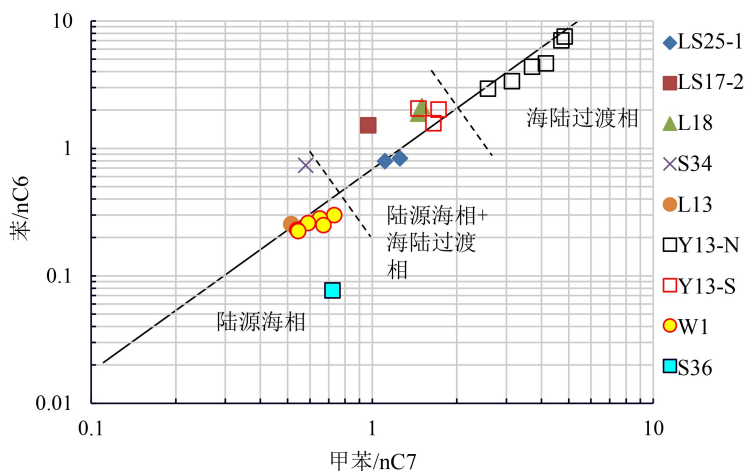


图7 琼东南盆地已钻井罐顶气甲苯-苯组分含量交汇图版

Fig.7 Intersection chart of toluene and benzene components in top gas of drilled tanks in Qiongdongnan Basin

Q 型聚类分析, 聚类方法和度量标准分别选取 Ward 法和平方 Euclidean 距离。结果显示长昌凹陷万宁 1 海底扇陵水组砂岩重矿物特征与宝岛北坡、松东凹陷及松南低凸起已钻井具有同源特征, 推测万宁 1 海底扇物源主要来自西部海南隆起, 并有松南低凸起物源汇入(图 9)。另外, 万宁 1 海底扇已钻井 W1 井距离中央火山 30 km, 其三亚组及陵水组壁心矿物分析化验显示, 岩屑成分中火山喷发碎屑含量占 4%~26%, 近 2000 m 沉积地层内均发现火山碎屑物质, 而且气层组分中 CO_2 含量 45%~52%, 显示了水流方向上存在持续喷发性火山。琼东南盆地区域火山研究显示, 宝岛-长昌凹陷发育多期火山喷发事件, 多数火山为一次性喷发火山, 只有中央大火山具有持续喷发特征, 因此推测 W1 井火山碎屑来自中央大火山, 印证了万宁 1 海底扇物源方向来自西部。

据此认为, 宝岛凹陷海底扇与长昌凹陷海底扇为同一海底扇沉积, 地震资料显示该轴向海底扇体面积超过 3000 km^2 。W1 井在长昌凹陷钻遇该海底扇前缘扇端位置, 距离海底扇头部近百千米, 陵水组储层仍具一定孔、渗物性^[31]。W1 井陵水组钻遇砂岩总厚 249.5 m, 其中细砂岩 137.5 m, 粉砂岩 82.3 m, 泥质粉砂岩 29.7 m, 最大单层厚度 34 m, 孔隙度以中-低孔为主(5.4%~24%), 平均 14.8%, 渗透率以低-特低渗为主(0.05~16.5 mD), 平均 2.41 mD。虽

然 W1 井揭示海底扇储层物性较差, 但推测该轴向海底扇近物源方向粒度更粗, 厚度更大, 储层可能更优, 显示了宝岛-长昌凹陷轴向海底扇优质储层潜力。宝岛凹陷南部断阶带断层十分发育, 在轴向海底扇侧翼可形成多个断鼻或构造+岩性圈闭, 振幅反射较强, 亮点信息较好, 可作为深水东区下步重点勘探领域。

4.3 构造差异控制成藏区带

琼东南盆地东西分块构造差异演化控制了盆地深水西区和深水东区不同的成藏模式, 包括运移、圈闭、层系、储层和成藏有利区带差异等。盆地西区已钻井丰富, 油气发现成果多, 已证实三大成藏区带: 陡坡带沟源断层垂向运移成藏区带、中央带高压底辟裂隙垂向运移成藏区带及缓坡带复合侧向疏导成藏区带(图 1), 代表了高温高压半地堑生烃凹陷成藏规律(图 10)。其中以中央底辟带运聚成藏条件最优, 目前已发现陵水 25、陵水 17-2、陵水 18 大中型气田^[2-4,30,32-34], 运聚成藏方式以高压底辟裂隙垂向运移至区域盖层之下, 然后沿联通砂体侧向运移成藏为主, 圈闭以新近系岩性圈闭为主, 储层包括梅山组海底扇、黄流组中央峡谷水道及莺歌海组海底扇砂岩。陡坡带油气发现集中在 2 号断裂带: 2 号断层持续活动, 油气运移活跃, 目前陵水凹陷北坡已发现陵水 13 油气藏、崖城 24 含

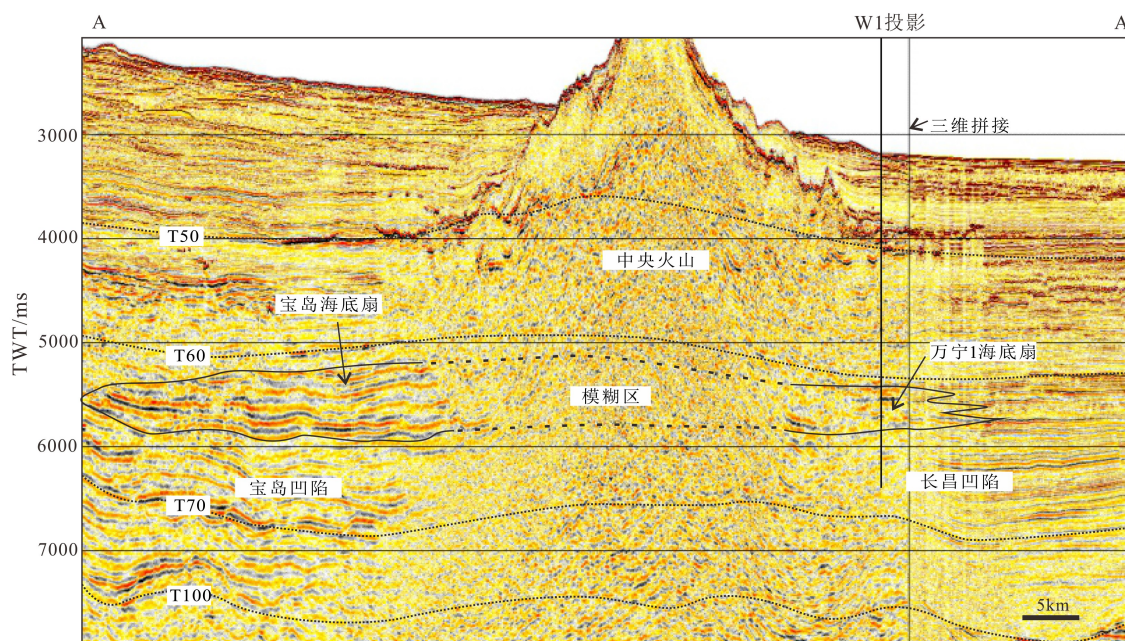


图 8 宝岛-长昌凹陷中央轴向海底扇典型地震剖面
剖面位置见图 9。

Fig.8 Seismic profile of central axial submarine fan in Baodao and Changchang sag

The location of profile is from Fig.9

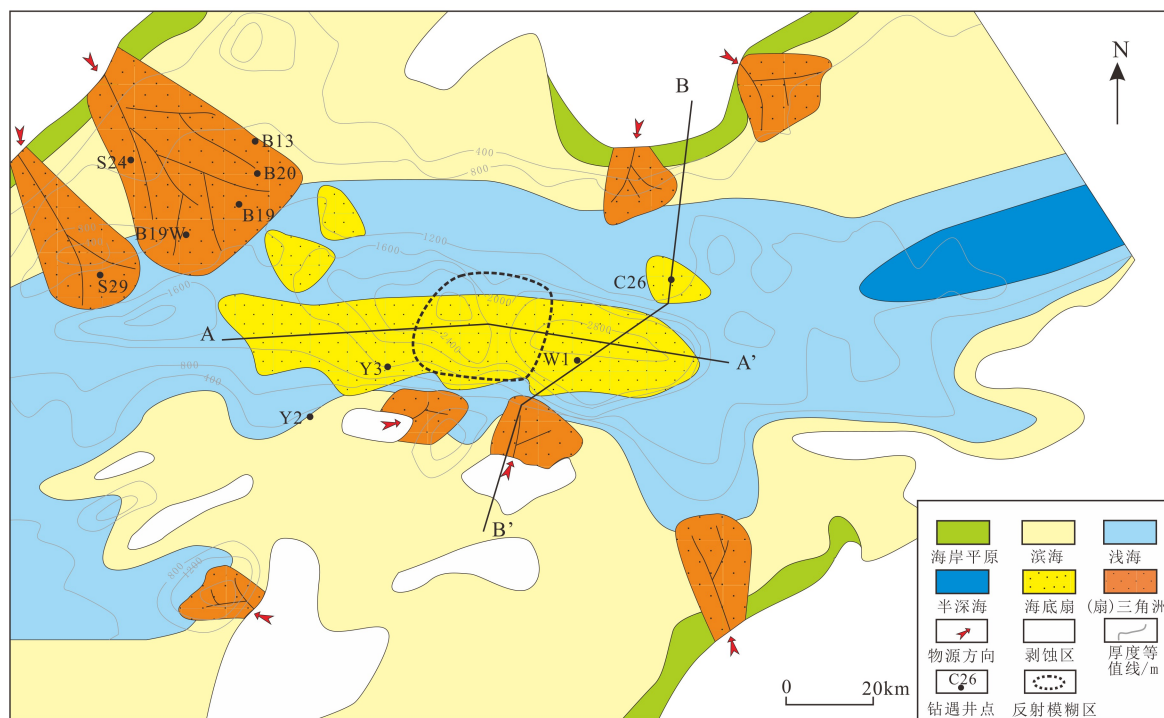


图9 琼东南盆地宝岛-长昌凹陷陵水组沉积相平面图

Fig.9 Sedimentary facies map of Lingshui Formation in Baodao and Changchang sag, Qiongdongnan Basin

气构造,松南凹陷北坡发现松涛34气藏^[25,28],但尚未发现商业性油气田(图1),与该区岩性圈闭保存条件较差、储层物性较差有关。深水西区缓坡带油气发现较少,多口已钻井失利,失利原因主要为油气运移不畅。分析认为,高温高压半地堑凹陷地层底辟和裂隙发育,油气垂向运移距离短,运移势能梯度大,因此垂向运移成藏条件好;反观缓坡带,地层常压,油气侧向运移距离长,运移势能梯度小,运移动力弱,且侧向疏导砂体不发育,运移条件较为不利。

盆地深水东区已钻井较少,尚无商业性油气发现,但多口领域性钻井获得油气发现,显示了深水东区仍具较大勘探潜力。目前,松南低凸起Y8井证实了凸起区基岩潜山和古近系构造圈闭“断-砂-脊”复合疏导格架长距离侧向运移成藏模式^[1],长昌凹陷W1井证实了近凹断阶带轴向海底扇领域构造+岩性圈闭断层垂向运移成藏模式(图11)。综合构造特征分析认为,深水东区发育地堑为主,凹陷结构具有对称性,且发育北东向和近东西向两组沟源断裂,结合领域性钻井成果,认为深水东区发育四个有利成藏区带:①南、北部凸起区侧向运移成藏区带,以前古近系潜山、古近系扇三角洲构造圈闭为主;②南、北部近凹断阶带垂向运移成藏区带,以陵水组、三亚组轴向海底扇岩性+构造圈闭为主。这四个成藏区带近似南北对称、东西带状分

布,均可进一步拓展,为下一油气勘探重点领域(图1,图11)。

5 结论

(1)通过构造几何学分析,提出松南凹陷与宝岛凹陷之间的边界为琼东南盆地东西分块边界,以走滑断裂带、2号断层中断区、古近系地层减薄带及松南低凸起北坡断阶、北礁凹陷东缘转换带为特征,盆地西区以发育大型铲式断层控制的大型半地堑为主,盆地东区以发育Y字型、板式或铲式断阶控制的大型地堑或复式地堑为主。

(2)运用物理模拟技术、断层活动性时空差异分析技术等,分析认为琼东南盆地东西区差异构造演化影响因素主要为限制性边界条件、地壳结构与热流差异、差异性地质影响因素。其中,东西区限制边界条件走向差异是盆地东西区断裂样式差异主控因素,而盆地西区地壳厚、热流低,受红河断裂走滑活动影响大,盆地东区地堑薄、热流高,受南海扩张影响大,最终加剧了东西区构造演化差异。

(3)结合已钻井与勘探实践,分析了盆地西区与盆地东区成藏区带差异。盆地西区半地堑生烃凹陷主要形成三大成藏区带:陡坡带沟源断层垂向运移成藏区带、中央带高压底辟裂隙垂向运移成藏区带及缓坡带复合侧向疏导成藏区带,圈闭以新近

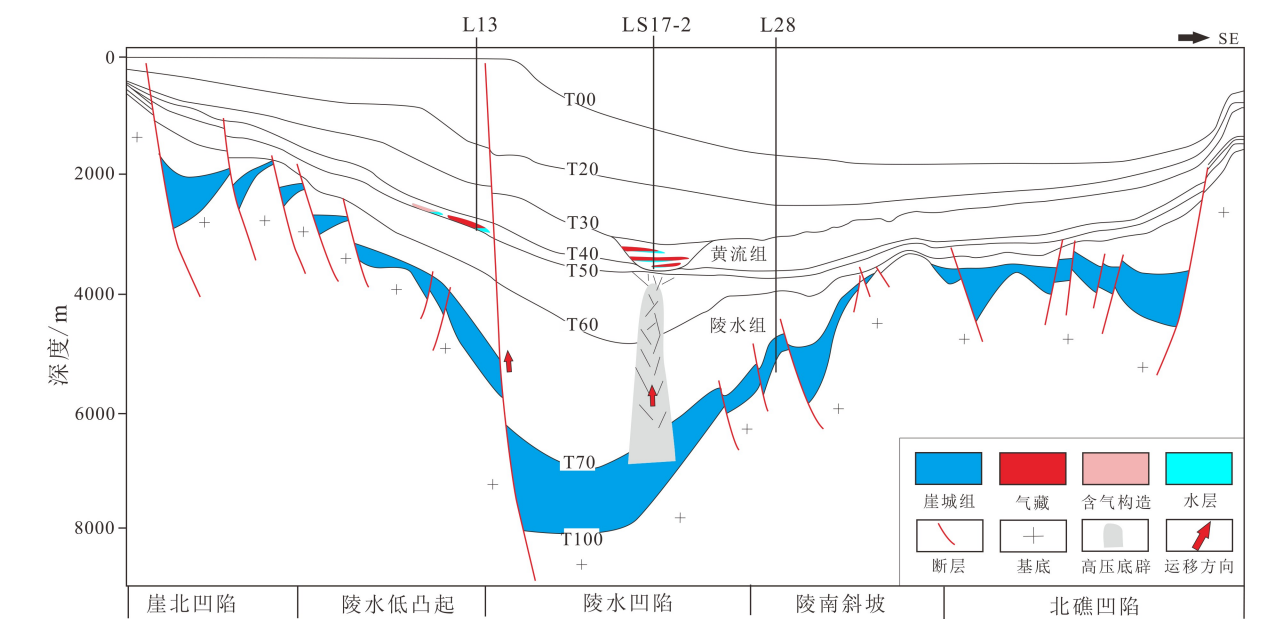


图 10 琼东南盆地陵水凹陷成藏模式图

Fig.10 Hydrocarbon accumulation model for Lingshui Sag, Qiongdongnan Basin

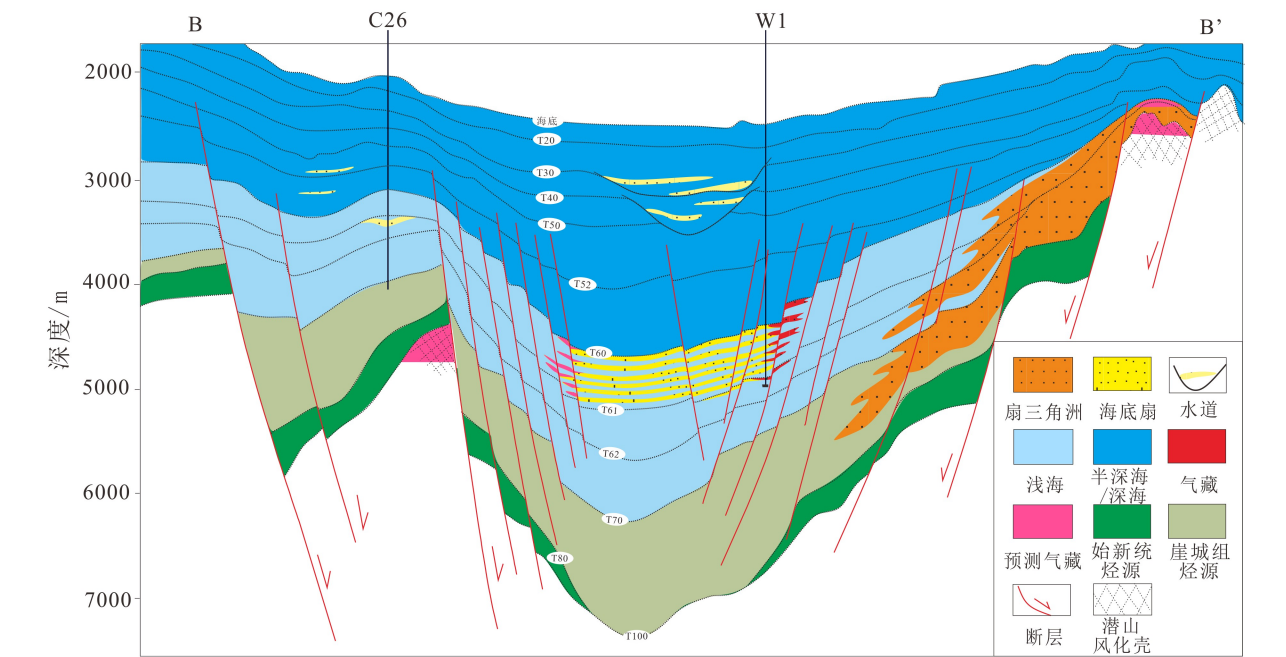


图 11 长昌凹陷地质与预测油气藏模式图

剖面位置见图 9。

Fig.11 Geological and reservoir prediction model for Changchang sag, Qiongdongnan Basin

The location of profile is from Fig.9

系岩性圈闭为主。对比西区, 认为深水东区地堑型生烃凹陷主要形成两大成藏区带: 凸起区断-砂-脊复合疏导格架侧向运移成藏区带, 以基岩潜山及古近系构造圈闭为主要成藏层系, 和近凹断阶带断层垂向运移成藏区带, 以陵水组-三亚组轴向海底扇构造+岩性圈闭为主要成藏类型, 两大成藏区带呈南北对称、东西带状分布, 为下步深水区勘探重点领域。

参考文献 (References)

[1] 施和生, 杨计海, 张迎朝, 等. 琼东南盆地地质认识创新与深水领域天然气勘探重大突破[J]. 中国石油勘探, 2019, 24(6): 691-698. [SHI Hesheng, YANG Jihai, ZHANG Yingzhao, et al. Geological understanding innovation and major breakthrough to natural gas exploration in deep water in Qiongdongnan Basin [J]. China Petroleum Exploration, 2019, 24(6): 691-698.]

- [2] 胡杨, 张伟, 张景茹, 等. 南海北部大陆边缘琼东南盆地有利油气聚集带及勘探方向[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2015, 35(4): 73-86. [HU Yang, ZHANG Wei, ZHANG Jingru, et al. The favorable petroleum accumulation belts and exploration targets in Qiongdongnan Basin on the margin of northern South China Sea [J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2015, 35(4): 73-86.]
- [3] 谢玉洪. 南海北部自营深水天然气勘探重大突破及其启示[J]. 天然气工业, 2014, 34(10): 1-8. [XIE Yuhong. A major breakthrough in deepwater natural gas exploration in a self-run oil/gas field in the northern South China Sea and its enlightenment [J]. Natural Gas Industry, 2014, 34(10): 1-8.]
- [4] 姚哲, 王振峰, 左倩媚, 等. 琼东南盆地中央峡谷深水大气田形成关键要素与勘探前景[J]. 石油学报, 2015, 36(11): 1358-1366. [YAO Zhe, WANG Zhenfeng, ZUO Qianmei, et al. Critical factors for the formation of large-scale deepwater gas field in Central Canyon System of Southeast Hainan Basin and its exploration potential [J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(11): 1358-1366.]
- [5] 雷超. 琼东南盆地深水区盆地结构构造及其形成机制研究[D]. 中国地质大学硕士学位论文, 2009. [LEI Chao. Basin structure and its formation mechanism in deep water areas of Qiongdongnan Basin, South China Sea[D]. Master Dissertation of China University of Geosciences, 2009.]
- [6] 雷超, 任建业, 裴健翔, 等. 琼东南盆地深水区构造格局和幕式演化过程[J]. 地球科学-中国地质大学学报, 2011, 36(1): 151-162. [LEI Chao, REN Jianye, PEI Jianxiang, et al. Tectonic framework and multiple episode tectonic evolution in deepwater area of Qiongdongnan Basin, northern continental margin of South China Sea [J]. Earth Science-Journal of China University of Geosciences, 2011, 36(1): 151-162.]
- [7] 雷超, 任建业, 李绪深, 等. 琼东南盆地深水区结构构造特征与油气勘探潜力[J]. 石油勘探与开发, 2011, 38(5): 560-569. [LEI Chao, REN Jianye, LI Xushen, et al. Structural characteristics and petroleum exploration potential in the deep-water area of the Qiongdongnan Basin, South China Sea [J]. Petroleum Exploration and Development, 2011, 38(5): 560-569.]
- [8] 甘军, 张迎朝, 梁刚, 等. 琼东南盆地深水区烃源岩沉积模式及差异热演化[J]. 地球科学, 2019, 44(8): 2627-2635. [GAN Jun, ZHANG Yingzhao, LIANG Gang, et al. Deposition pattern and differential thermal evolution of source rocks, deep water area of Qiongdongnan Basin [J]. Earth Science, 2019, 44(8): 2627-2635.]
- [9] 韩光明, 李绪深, 王立锋, 等. 琼东南盆地宝岛凹陷北坡断裂体系新认识及与天然气成藏关系[J]. 天然气地球科学, 2013, 24(2): 352-355. [HAN Guangming, LI Xushen, WANG Lifeng, et al. New explanation of fault system in Baodao sag's northern slope of Qiongdongnan Basin and its affect for natural gas accumulation [J]. Natural Gas Geoscience, 2013, 24(2): 352-355.]
- [10] 杨庚兄, 尹宏伟, 朱继田, 等. 三维扫描技术在构造物理模拟中的应用——以琼东南盆地为例[J]. 实验室研究与探索, 2020, 39(5): 8-11, 45. [YANG Gengxiong, YIN Hongwei, ZHU Jitian, et al. Application of 3D scanning technology in physical modeling: taking Qiongdongnan Basin as an example [J]. Research and Exploration in Laboratory, 2020, 39(5): 8-11, 45.]
- [11] 张迎朝, 甘军, 杨希冰, 等. 琼东南盆地陵水凹陷构造演化及其对深水大气田形成的控制作用[J]. 海洋地质前沿, 2017, 33(10): 22-31. [ZHANG Yingzhao, GAN Jun, YANG Xibing, et al. Tectonic evolution and its constraints on the formation of deepwater giant gas field in Lingshui sag, Qiongdongnan Basin [J]. Marine Geology Frontiers, 2017, 33(10): 22-31.]
- [12] 李绪宣. 琼东南盆地构造动力学演化及油气成藏研究[D]. 中国科学院研究生院(广州地球化学研究所)博士学位论文, 2004. [LI Xuxuan. Tectonic dynamic evolution and hydrocarbon accumulation in Qiongdongnan Basin[D]. Doctor Dissertation of Graduate School of Chinese Academy of Sciences (Guangzhou Institute of Geochemistry), 2004.]
- [13] 唐晓音, 胡圣标, 张功成, 等. 南海北部大陆边缘盆地地热特征与油气富集[J]. 地球物理学报, 2014, 57(2): 572-585. [TANG Xiaoyin, HU Shengbiao, ZHANG Gongcheng, et al. Geothermal characteristics and hydrocarbon accumulation of the northern marginal basins, South China Sea [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2014, 57(2): 572-585.]
- [14] 丘学林, 施小斌, 阎贫, 等. 南海北部地壳结构的深地震探测和研究新进展[J]. 自然科学进展, 2003, 13(3): 231-236. [QIU Xuelin, SHI Xiaobin, YAN Pin, et al. New progress in deep seismic exploration and study of crustal structure in the northern South China Sea [J]. Progress in Natural Science, 2003, 13(3): 231-236.]
- [15] 施小斌, 于传海, 陈梅, 等. 南海北部陆缘热流变化特征及其影响因素分析[J]. 地学前缘, 2017, 24(3): 56-64. [SHI Xiaobin, YU Chuanhai, CHEN Mei, et al. Analyses of variation features and influential factors of heat flow in the northern margin of the South China Sea [J]. Earth Science Frontiers, 2017, 24(3): 56-64.]
- [16] 施小斌, 王振峰, 蒋海燕, 等. 张裂型盆地地热参数的垂向变化与琼东南盆地热流分布特征[J]. 地球物理学报, 2015, 58(3): 939-952. [SHI Xiaobin, WANG Zhenfeng, JIANG Haiyan, et al. Vertical variations of geothermal parameters in rifted basins and heat flow distribution features of the Qiongdongnan Basin [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2015, 58(3): 939-952.]
- [17] 米立袁, 袁玉松, 张功成, 等. 南海北部深水区地热特征及其成因[J]. 石油学报, 2009, 30(1): 27-32. [MI Lijun, YUAN Yusong, ZHANG Gongcheng, et al. Characteristics and genesis of geothermal field in deep-water area of the northern South China Sea [J]. Acta Petrolei Sinica, 2009, 30(1): 27-32.]
- [18] 李三忠, 索艳慧, 刘鑫, 等. 南海的基本构造特征与成因模型: 问题与进展及论争[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2012, 32(6): 35-53. [LI Sanzhong, SUO Yanhui, LIU Xin, et al. Basic structural pattern and tectonic models of the South China Sea: problems, advances and controversies [J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2012, 32(6): 35-53.]
- [19] 刘绍文, 施小斌, 王良书, 等. 南海成因机制及北部岩石圈热-流变结构研究进展[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2006, 26(4): 117-124. [LIU Shaowen, SHI Xiaobin, WANG Liangshu, et al. Recent advances in studies on the formation mechanism of the South China Sea and thermo-rheological structure of lithosphere in its northern margin: an overview [J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2006, 26(4): 117-124.]

- [20] 张亮. 南海构造演化模式及其数值模拟[D]. 中国科学院研究生院(海洋研究所)博士学位论文, 2012. [ZHANG Liang. Tectonic evolution of the South China Sea and a numerical modeling[D]. Doctor Dissertation of Graduate School of Chinese Academy of Sciences (Institute of Oceanography), 2012.]
- [21] 万玲, 姚伯初, 吴能友. 红河断裂带入海后的延伸及其构造意义[J]. 南海地质研究, 2000(12): 22-32. [WAN Ling, YAO Bochu, WU Nengyou. The extending of Honghe faults in the South China Sea and its tectonic significance [J]. Gresearch of Eological South China Sea, 2000(12): 22-32.]
- [22] 徐子英, 孙珍. 琼东南盆地西南部反转构造发育机制物理模拟[J]. 海洋地质前沿, 2015, 31(8): 47-52. [XU Ziying, SUN Zhen. Analogue modeling of reversed structural deformation in the southwestern Qiongdongnan Basin [J]. Marine Geology Frontiers, 2015, 31(8): 47-52.]
- [23] 张迎朝, 甘军, 徐新德, 等. 琼东南盆地海相烃源岩的发现与勘探意义[J]. 煤炭技术, 2020, 39(2): 43-45. [ZHANG Yingzhao, GAN Jun, XU Xinde, et al. Marine source rock discovery and exploration significance in Qiongdongnan Basin [J]. Coal Technology, 2020, 39(2): 43-45.]
- [24] 孙瑞, 韩银学, 曾清波, 等. 琼东南盆地深水区东段崖城组沉积特征及对海相烃源岩的控制[J]. 石油学报, 2019, 40(S2): 57-66. [SUN Rui, HAN Yinxue, ZENG Qingbo, et al. Sedimentary characteristics of Yacheng formation in the eastern deepwater area in Qiongdongnan Basin and their control on marine source rocks [J]. Acta Petrolei Sinica, 2019, 40(S2): 57-66.]
- [25] 梁刚, 甘军, 李兴. 琼东南盆地陵水凹陷天然气成因类型及来源[J]. 中国海上油气, 2015, 27(4): 47-53. [LIANG Gang, GAN Jun, LI Xing. Genetic types and origin of natural gas in Lingshui sag, Qiongdongnan basin [J]. China Offshore Oil and Gas, 2015, 27(4): 47-53.]
- [26] 吴景富, 杨树春, 张功成, 等. 南海北部深水区盆地热历史及烃源岩热演化研究[J]. 地球物理学报, 2013, 56(1): 170-180. [WU Jingfu, YANG Shuchun, ZHANG Gongcheng, et al. Geothermal history and thermal evolution of the source rocks in the deep-water area of the northern South China Sea [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2013, 56(1): 170-180.]
- [27] 苏明, 解习农, 王振峰, 等. 南海北部琼东南盆地中央峡谷体系沉积演化[J]. 石油学报, 2013, 34(3): 467-478. [SU Ming, XIE Xinong, WANG Zhenfeng, et al. Sedimentary evolution of the central Canyon system in Qiongdongnan Basin, northern South China Sea [J]. Acta Petrolei Sinica, 2013, 34(3): 467-478.]
- [28] 范彩伟, 李绪深, 刘昆, 等. 琼东南盆地乐东、陵水凹陷中新统岩性地层圈闭成藏条件[J]. 中国海上油气, 2016, 28(2): 53-59. [FAN Caiwei, LI Xushen, LIU Kun, et al. Hydrocarbon accumulation condition of Miocene litho-stratigraphic trap in Ledong & Lingshui sags, Qiongdongnan basin [J]. China Offshore Oil and Gas, 2016, 28(2): 53-59.]
- [29] 苏明, 张成, 解习农, 等. 深水峡谷体系控制因素分析——以南海北部琼东南盆地中央峡谷体系为例[J]. 中国科学: 地球科学, 2014, 57(10): 2457-2468. [SU Ming, ZHANG Cheng, XIE Xinong, et al. Controlling factors on the submarine canyon system: a case study of the Central Canyon System in the Qiongdongnan Basin, northern South China Sea [J]. Science China: Earth Sciences, 2014, 57(10): 2457-2468.]
- [30] 谢玉洪, 李绪深, 范彩伟, 等. 琼东南盆地上中新统黄流组轴向水道源汇体系与天然气成藏特征[J]. 石油勘探与开发, 2016, 43(4): 521-528. [XIE Yuhong, LI Xushen, FAN Caiwei, et al. The axial channel provenance system and natural gas accumulation of the Upper Miocene Huangliu Formation in Qiongdongnan Basin, South China Sea [J]. Petroleum Exploration and Development, 2016, 43(4): 521-528.]
- [31] 钟佳, 杨希冰, 朱沛苑, 等. 琼东南盆地宝岛-文昌凹陷陵水组储层差异演化特征[J]. 地球科学, 2019, 44(8): 2665-2676. [ZHONG Jia, YANG Xibing, ZHU Peiyuan, et al. Porosity evolution differences of the Lingshui formation reservoir between Baodao and Changchang Sag, Qiongdongnan Basin [J]. Earth Science, 2019, 44(8): 2665-2676.]
- [32] 王振峰, 孙志鹏, 张迎朝, 等. 南海北部琼东南盆地深水中央峡谷大气田分布与成藏规律[J]. 中国石油勘探, 2016, 21(4): 54-64. [WANG Zhenfeng, SUN Zhipeng, ZHANG Yingzhao, et al. Distribution and hydrocarbon accumulation mechanism of the giant deepwater Central Canyon gas field in Qiongdongnan Basin, northern South China Sea [J]. China Petroleum Exploration, 2016, 21(4): 54-64.]
- [33] 张迎朝, 徐新德, 甘军, 等. 琼东南盆地深水大气田地质特征、成藏模式及勘探方向研究[J]. 地质学报, 2017, 91(7): 1620-1633. [ZHANG Yingzhao, XU Xinde, GAN Jun, et al. Study on the geological characteristics, accumulation model and exploration direction of the giant deepwater gas field in the Qiongdongnan Basin [J]. Acta Geologica Sinica, 2017, 91(7): 1620-1633.]
- [34] 沈怀磊, 张功成, 孙志鹏, 等. 琼东南盆地深水区富气凹陷形成控制因素与勘探实践——以陵水凹陷为例[J]. 石油学报, 2013, 34(S2): 83-90. [SHEN Huailei, ZHANG Gongcheng, SUN Zhipeng, et al. Formation control factor analysis and exploration practice in gas-rich sag in deep-water areas of Qiongdongnan Basin: a case study of Lingshui sag [J]. Acta Petrolei Sinica, 2013, 34(S2): 83-90.]