

超伸展陆缘盆地深部结构及油气勘探意义

——以琼东南盆地为例

吴克强¹, 解习农², 裴健翔¹, 任建业², 尤丽¹, 姜涛², 权永彬²

[1. 中海石油(中国)有限公司海南分公司, 海南海口 570100; 2. 中国地质大学(武汉), 湖北武汉 430074]

摘要:南海北部被动陆缘盆地是中国海域重要的油气基地。以琼东南盆地为例,通过大量地震、钻井资料的综合分析,从被动陆缘深部地壳形变与盆地充填耦合的角度,揭示了超伸展陆缘裂谷盆地沉积充填特点及地层样式。研究表明,位于南海西北次海盆西延长线上的琼东南盆地属于夭折型陆缘裂谷盆地,沿中央拗陷带岩石圈拆离减薄形成了细颈带和远端带,盆地裂陷期经历3幕伸展作用,早期断陷幕发育以高角度正断裂为特征的孤立断陷,中期拆离幕发育以低角度拆离断裂为特征的拆离断陷,且拆离断裂作用具有明显自东向西迁移的特点,晚期断-拗幕沉积中心位于凹陷中央。正是由于变形构造活动迁移特征构成了琼东南盆地独特的深部构造格局,进而导致不同构造单元的沉积充填及地层样式存在明显差异,其主拆离断裂侧以发育扇三角洲为主,而相向的滚动背斜侧则以发育辫状河三角洲为特征。这些因素制约裂陷期烃源岩分布以及深部储层展布,进而约束油气地质条件的差异。因此,基于岩石圈非瞬时破裂过程所建立的超伸展陆缘裂谷盆地深部结构及沉积充填特点认识,对琼东南盆地油气勘探具有重要的指导意义,同时也为被动陆缘盆地深层地层样式及沉积充填研究提供可参考范例。

关键词:地层样式;拆离盆地;超伸展陆缘盆地;琼东南盆地;南海北部

中图分类号:TE121.1

文献标识码:A

Deep architecture of hyperextended marginal basin and implications for hydrocarbon exploration: A case study of Qiongdongnan Basin

WU Keqiang¹, XIE Xinong², PEI Jianxiang¹, REN Jianye², YOU Li¹, JIANG Tao², QUAN Yongbin²

[1. Hainan Branch, CNOOC, Haikou, Hainan 570100, China; 2. China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan, Hubei 430074, China]

Abstract: The passive continental margin basin in the northern South China Sea is an important oil and gas base in China's offshore area. This paper reveals depositional filling characteristics and stratigraphic patterns of hyperextended continental margin rift basins based on coupling analysis of the deformation of deep crust and basin filling in the passive continental margin through comprehensive analyses of massive seismic and drilling data from the Qiongdongnan Basin of South China Sea. The results show that the Qiongdongnan Basin, located on the western tip of the northwest sub-basin of the South China Sea, is once a failed continental margin rift basin and presents now as a neck and distal zone along the central depression belt after lithospheric detachment and thinning. The rifting period contains three stretching stages. During the early stage, the formation of isolated rifted basin is characterized by high-angle positive faults. During the detachment active stage, the formation of detachment rifted basin is characterized by low-angle detachment faults with their active time obviously characterized by an east-west migration. And during the late rifting-depression stage, the depocenter is located in the center of the depression. The migration characteristics of differential deformation tectonic movement define the unique deep structure pattern of the Qiongdongnan Basin and lead to obvious differences in depositional fillings and stratigraphic patterns in different tectonic units, especially in depositional systems, where fan delta deposits dominate the main detachment fault side and braided delta deposits occupy the opposite rolling anticline. These factors restricted the distribution of source rocks and deep reservoirs during the rifting period, which in turn constrained geological conditions of hydrocarbon generation and accumulation. Therefore, the deep architecture of

收稿日期:2023-02-16;修订日期:2023-03-20。

第一作者简介:吴克强(1970—),男,教授级高级工程师,石油地质综合研究与管理。E-mail:wukq@cnooc.com.cn。

基金项目:中海石油(中国)有限公司科技项目(KJZH-2021-0003-00)。

hyperextended continental marginal rift basins established based on non-transient breaking-up process of the lithosphere and depositional filling characteristics have important guiding significance for hydrocarbon exploration in the Qiongdongnan Basin, and may serve as reference for the study of deep stratigraphic pattern and depositional filling in passive continental margin basins.

Key words: stratigraphic pattern, detachment basin, failed passive marginal rift, Qiongdongnan Basin, South China Sea

引用格式: 吴克强, 解习农, 裴健翔, 等. 超伸展陆缘盆地深部结构及油气勘探意义——以琼东南盆地为例[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(3): 651–661. DOI: 10. 11743/ogg20230310.

WU Keqiang, XIE Xinong, PEI Jianxiang, et al. Deep architecture of hyperextended marginal basin and implications for hydrocarbon exploration: A case study of Qiongdongnan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(3): 651–661. DOI: 10. 11743/ogg20230310.

被动陆缘盆地是全球最为重要的深水油气赋存场所, 受到工业界和学术界的广泛重视。贫岩浆型和富岩浆型陆缘代表被动陆缘两类端元类型, 前者以非对称发育、向洋倾斜的大型拆离断层体系为特征^[1]; 后者一般表现为对称发育、向陆倾斜的大型拆离断层体系和向海倾斜的强振幅反射体^[2]。研究表明, 岩石圈破裂过程并非单一简单的瞬时破裂过程, 而是经历了多幕伸展过程和裂解事件, 由于断裂几何形态、变形机制的差异导致了明显不同的盆地结构和构造地层样式。因此, 不同陆缘呈现多种复杂的裂解过程和地层样式^[3–5]。近年来, 南海北部新生代盆地作为典型被动陆缘盆地, 已有较多的研究成果, 如依据被动陆缘岩石圈伸展破裂中地壳厚度减薄与断裂系统的耦合关系, 将珠江口陆缘区划分出近端带、细颈带、远端带和洋–陆转换带等构造单元, 不同构造带具有不同的地层样式^[6–7]。但珠江口盆地属于贫岩浆型还是富岩浆型陆缘, 一直存在争议, 有些学者认为是两端元之间的中等岩浆型陆缘^[8]。无论是贫岩浆型陆缘还是富岩浆型陆缘, 在构造演化阶段上均具有较好的相似性^[5], 而且陆缘一级构造单元大体上是相同的。与珠江口盆地相比, 琼东南盆地并未直接与洋盆相连, 而是与洋盆之间存在一个厚陆壳的海隆, 该盆地属于陆内裂谷还是陆缘裂谷, 这个问题前期未有相关研究。本文围绕这一科学问题, 通过琼东南盆地岩石圈破裂过程与沉积充填的耦合分析, 厘定盆地岩石圈地壳结构, 进而揭示超伸展断裂活动对烃源岩及沉积充填的影响, 以期指导深层油气勘探。

1 超伸展陆缘盆地岩石圈地壳结构

基于琼东南盆地的三维地震资料以及钻井资料, 重新对琼东南盆地大型断裂系统开展了研究, 确定了琼东南盆地深水大型断裂的展布特征(图1)。琼东南盆地深水大型断裂系统主要由 F_2 , F_{10} , F_{18} , F_{20} , F_{2-2} , F_{12-1} , F_{14} 及 F_{13} 断层等组成。其中, F_2 断层平面长度

可达 200 km, F_{2-2} 断层平面长度可达 100 km。根据大型断层平面特征以及全区地震剖面的解释, 刻画了由大型断裂系统控制的深水盆地结构构造, 如长昌凹陷东部由 F_{10} 断层控制的半地堑结构, 长昌凹陷西部由 F_{10} , F_{16} , F_{20} 和 F_{18} 断层共同控制的地堑结构; 宝岛凹陷东西部结构构造差异较大, 东部是由 F_2 , F_{12-1} , F_{10} 和 F_{15} 共同控制的地堑结构, 而西部是由 F_2 和 F_{2-1} 断层控制的半地堑结构; 陵水凹陷主要受 F_{2-3} , F_{14} 断层控制, 整体呈现地堑结构, 而东部地区呈半地堑结构; 乐东凹陷位于琼东南盆地与莺歌海盆地转换部位, 整体呈现复式的半地堑结构特征。其中, 深水区与其两侧地壳结构差别显著(图2)。

地震剖面 A—A' 完整揭示长昌凹陷的地壳结构(图2a)。该区地壳由新生代盆地基底界面 T_{10}^0 以及莫霍面限定, 地震反射界面 T_{10}^0 明显, 其上为层状沉积充填反射, 其下为均一或杂乱反射的脆性上地壳。长昌凹陷莫霍面主要位于地震剖面上 9 s 时间深度附近, 莫霍面之上为下地壳, 下地壳内可识别连续性差、振幅强的地震反射, 可能为剪切流动作用形成, 代表了岩石圈地壳在拆离幕时期的强烈变形。地壳厚度的变化可代表岩石圈地壳的变形减薄程度, 长昌凹陷下伏地壳时间厚度为 1.5 s, 估算厚度为 4.9 km, 其岩石圈地壳拉伸系数为 6.1, 代表了该区岩石圈地壳经历了强烈减薄, 其两侧地壳相对较厚, 厚度可达 25 ~ 28 km, 其岩石圈地壳拉伸系数 1.1 ~ 1.2, 与北部湾盆地为代表的陆内裂谷盆地岩石圈地壳拉伸状态大致相当。长昌凹陷为明显的地堑型凹陷, 北部由 F_{18} 和 F_{20} 等断层控制, 南部由 F_{10} 和 F_{16} 等断层控制, 这些断层被揭示为上陡下缓、最终消失于下地壳。长昌凹陷内发育的地层较全, 可识别始新统, 渐新统崖城组与陵水组, 中新统三亚组、梅山组和黄流组, 上新统—更新统莺歌海组和乐东组。始新统受控于早期的高角度正断层, 断层规模小, 地层厚度呈弥散状分布; 自渐新统崖城组沉积开始, F_{18} , F_{20} , F_{10} 和 F_{16} 断层水平断距加大, 形成“宽、深”

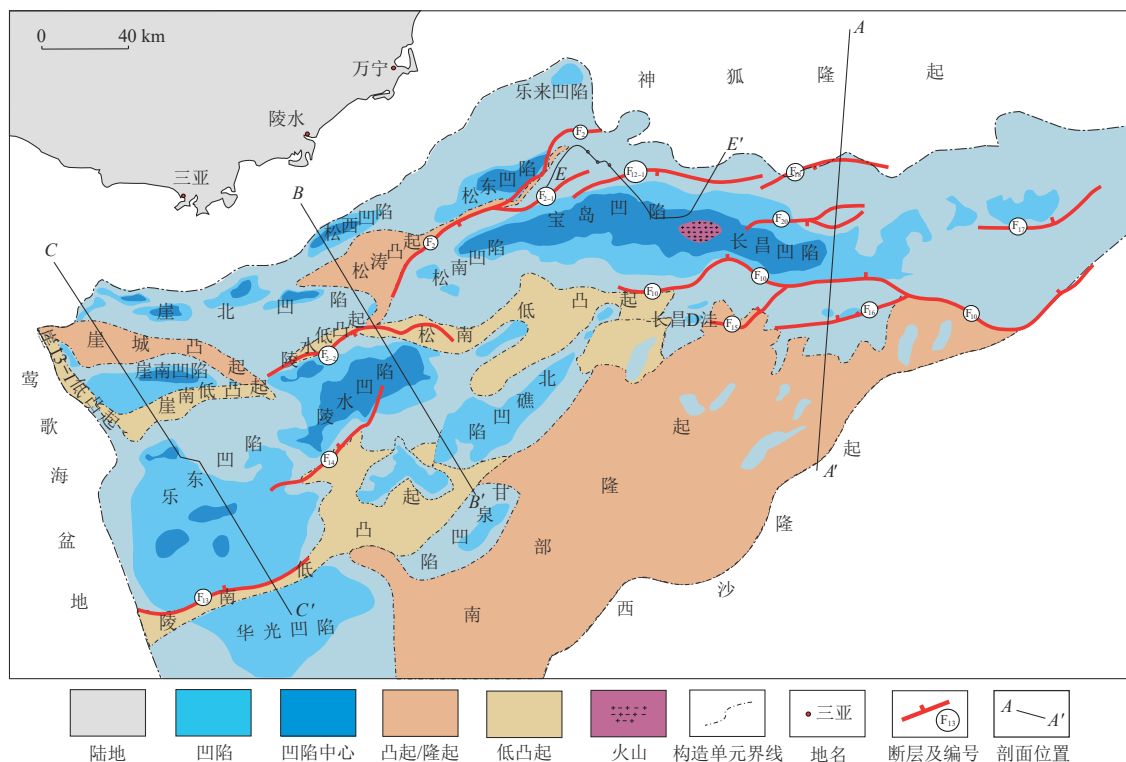


图1 琼东南盆地隆-坳格局和大型拆离断层分布范围

Fig. 1 Tectonic framework and distribution of large-scale detachment faults in the Qiongdongnan Basin

拆离盆地,拆离断层对地壳厚度减薄显著,拆离断层停止活动时间为地震界面 T_0^0 发育时期,即崖城组沉积末期;拆离作用停止活动后,陵水组 and 三亚组呈碟型几何学特征,发育大量的隐伏式断层,断层上、下盘地层厚度相当,表明该类型断层对盆地结构影响较小;直至 T_0^0 界面发育时期,除盆地浅层与沉积滑动等相关的断裂外,盆地大型断层基本停止活动,盆地进入裂后热沉降阶段。

地震剖面 $B-B'$ 位于琼东南盆地的中部(图2b),横跨松西凹陷—松涛低凸起—陵水凹陷—陵南低凸起。根据 T_0^0 界面以下地壳内反射特征,可将地壳划分为振幅较均一、连续性差的上地壳以及地震反射呈水平状、连续性一般的下地壳。通过界面 T_0^0 和脆-塑性转换面,可以确定上地壳厚度在陵水凹陷非常薄,推测可能与断层对地壳的强烈减薄有关,在陵水凹陷两侧较厚。陵水凹陷为大型的半地堑结构,主控断层为 F_{2-2} ,断层结构清晰,呈上陡下缓的低角度构造样式,断层向地壳深部延伸至下地壳。通过沉积充填记录的断层活动信息,可识别陵水凹陷控凹断层 F_{2-2} 的拆离活动开始于 T_0^0 界面发育时期终止于 T_0^0 界面发育时期, T_0^0 界面呈现上削、下超结构特征,表明该界面是强烈的不整合界面。陵水凹陷沉积充填过程和长昌凹陷具有显著不同,陵水凹陷并未发育始新统,但其两侧如崖北、松西凹陷发育这套地层。

地震剖面 $C-C'$ 揭示琼东南盆地西部结构构造特征(图2c),主要包括乐东凹陷、崖南凹陷、崖北凹陷等构造单元。乐东凹陷为琼东南盆地西部的大型凹陷,其主要边界断层为南部的 F_{13} 断层和北部的 F_{2-3} 断层, F_{13} 断层控制了一系列旋转断块,其主断层被揭示为上陡下缓并向地壳深部延伸消失的铲式断层,具有拆离断层的几何学和运动学特征。前期研究发现,乐东凹陷地壳厚度较薄,可能与拆离断层以及红河断裂走滑向海延伸密切相关^[9]。相比较, F_{2-3} 断层规模比 F_{13} 断层小,但其对裂陷早期始新统具有明显控制作用,在其上盘揭示了始新统。崖北凹陷控凹断层 F_3 和崖南凹陷控凹断层 F_5 的发育演化与 F_{2-3} 断层类似,在凹陷中保存一套呈楔形特征的始新统。 F_{13} 断层在始新统时期并未有生长地层发育,但从 T_0^0 界面发育时开始强烈控制了崖城组与陵(陵水组)二段、陵三段,直至地震界面发育时才停止拆离活动。随后进入断-拗转换阶段,地层结构呈碟型特征,直至 T_0^0 界面发育时所有基底断层停止活动,进入裂后热沉降阶段,控制 T_0^0 界面至海底的地层厚度较厚,陆架坡折带持续向海域方向推进。

琼东南盆地深水区发育大型拆离断层系统,形成了“宽、深”的大型拆离盆地,中央坳陷带地壳厚度强烈减薄带与盆地超伸展带具有很好的对应关系,形成了独特的构造格局和地层样式,强烈的构造沉降为大、中型油气田的形成提供了沉积物的可容纳

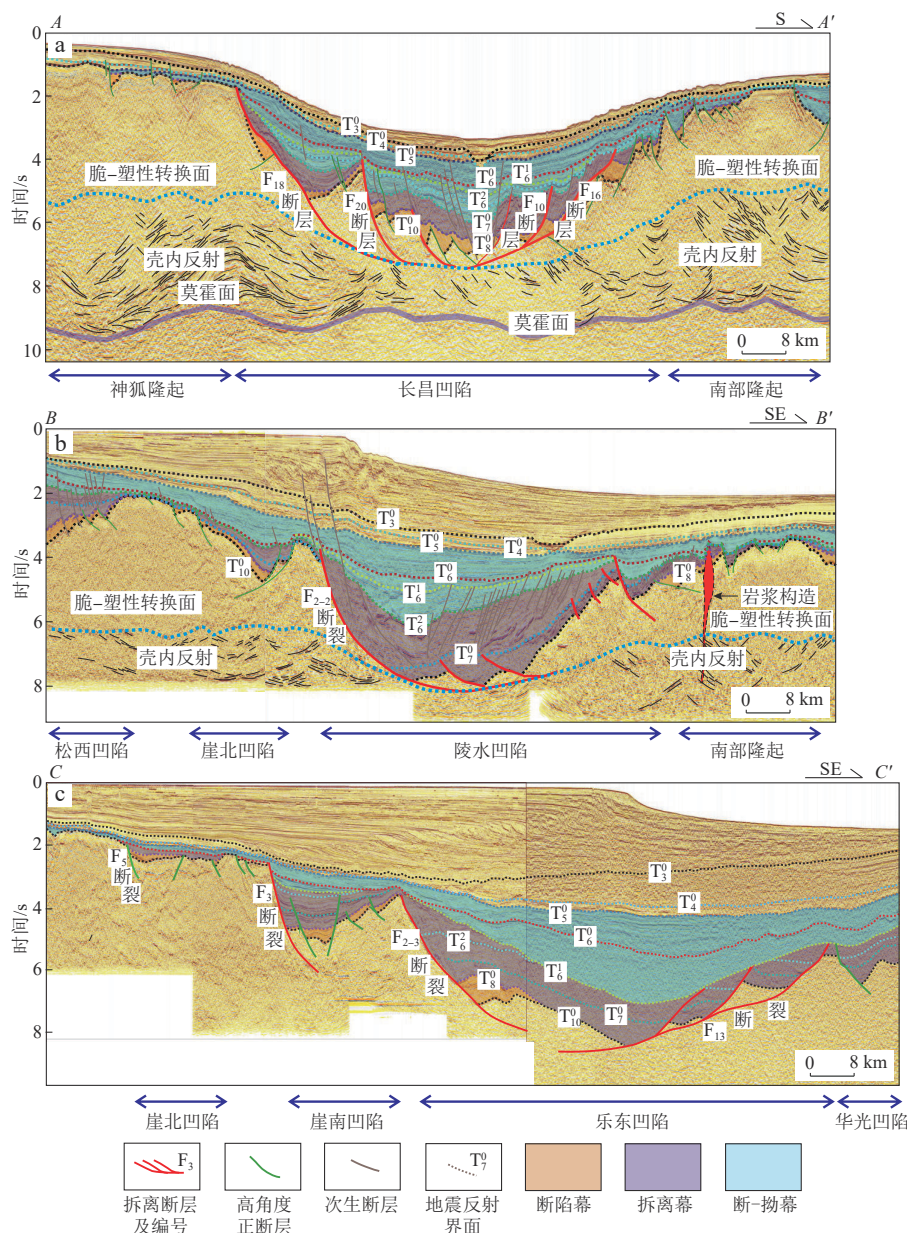


图2 琼东南盆地深水区凹陷结构及其地层样式差异特征(剖面位置见图1)

Fig. 2 Architecture of depression and stratigraphic pattern differences in deepwater area of the Qiongdongnan Basin (see Fig. 1 for the location of the sections)

a. 过长昌凹陷典型剖面; b. 过陵水凹陷典型剖面; c. 过乐东凹陷典型剖面

空间。拆离断层开始发育时间为 T_8^0 界面形成时期,与南海洋盆打开同步,拆离断层在长昌凹陷、宝岛-松南-陵水凹陷和乐东凹陷停止时间分别为界面 T_9^0 、 T_6^0 和 T_6^0 界面形成时期(图3),分别对应28.4、27.4和25.3 Ma。前人研究已将琼东南盆地构造演化划分为两个阶段,即断陷阶段和拗陷阶段(或同裂陷阶段和裂后热沉降阶段)^[10-12],认为 T_6^0 界面为断-拗转换面。根据本次研究,重新厘定的重要构造不整合界面,结合区域动力学事件,将琼东南盆地深水区构造演化划分为断陷幕、拆离幕、断-拗幕、裂后热沉降幕,拆离作

用停止时间差异性,造成了构造幕次演化的差异性,长昌凹陷构造演化划分为断陷幕($T_0^0-T_8^0$)、拆离幕($T_8^0-T_9^0$)、断-拗幕($T_9^0-T_5^0$)和裂后热沉降幕($T_5^0-T_0^0$);宝岛-陵水-松南凹陷构造演化划分为断陷幕($T_0^0-T_8^0$)、拆离幕($T_8^0-T_6^0$)、断-拗幕($T_6^0-T_5^0$)和裂后热沉降幕($T_5^0-T_0^0$);乐东凹陷构造演化划分为断陷幕($T_0^0-T_8^0$)、拆离幕($T_8^0-T_6^0$)、断-拗幕($T_6^0-T_5^0$)和裂后热沉降幕($T_5^0-T_2^0$)。因此,盆地拆离幕自东向西逐渐迁移的规律,与南海洋盆渐进式伸展扩张密切相关^[9],该过程已在北大西洋和西非陆缘深水盆地被揭示^[13-14]。

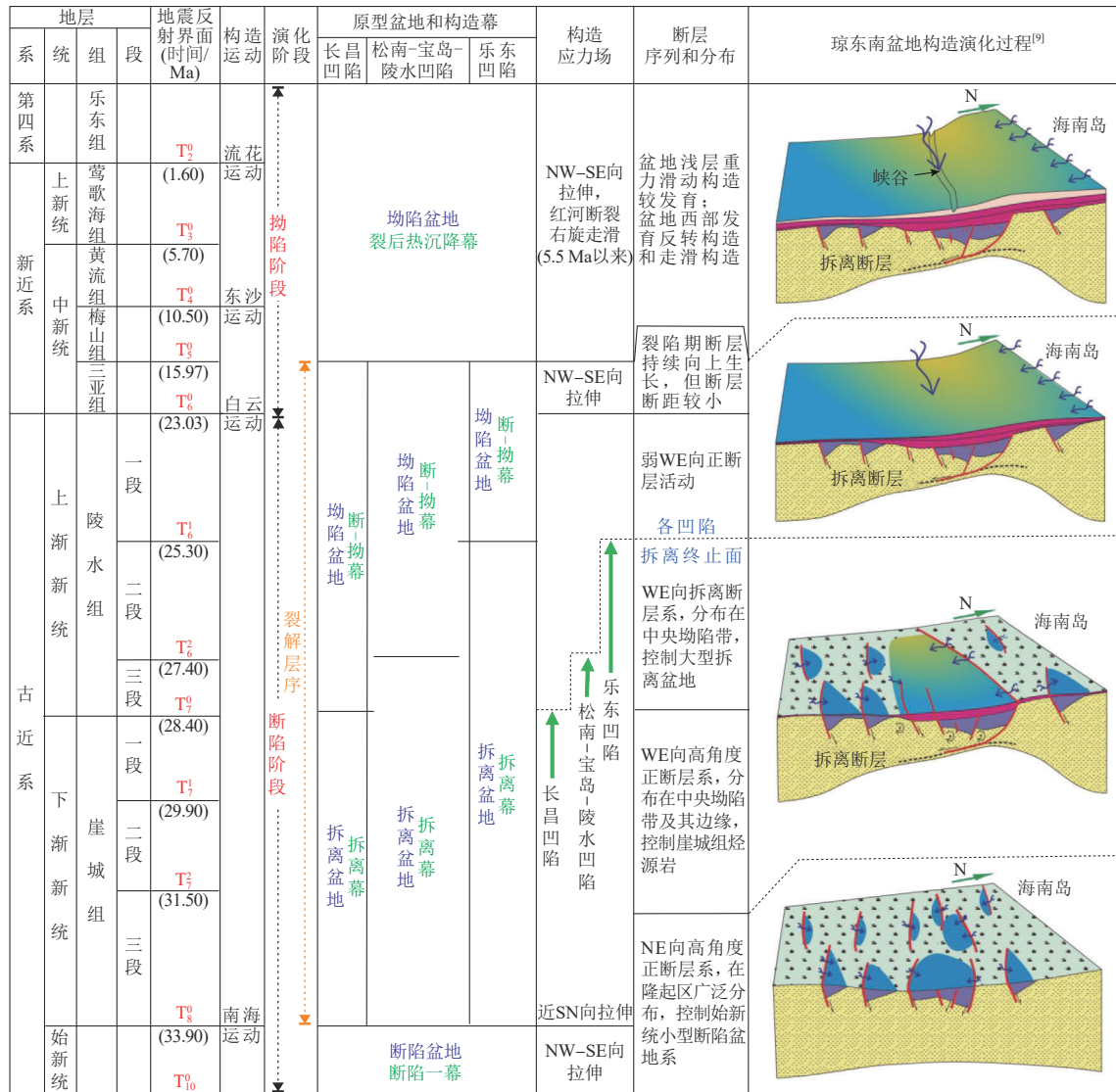


图3 琼东南盆地深水区凹陷发育演化阶段及其主要特征

Fig. 3 Evolution stages of depression and their main characteristics in the deepwater area of the Qiongdongnan Basin

2 裂陷期沉积体系及源-汇系统特征

如前所述,琼东南盆地裂陷期可划分为断陷幕、拆离幕和断-拗幕。断陷幕,受NE向高角度正断层控制,形成一系列小型孤立的断陷盆地,充填陆相湖盆及周缘扇三角洲沉积^[10, 15];进入拆离幕和断-拗幕沉积环境发生了明显的改变,盆地由早期孤立的断陷湖盆演变成大型断-拗型结构,沉积环境也演变成滨浅海和半深海环境。随着拆离断层自东向西渐进式活动,导致海水自东向西侵入,沉积环境从滨海向滨浅海和半深海演变。

2.1 拆离幕和断-拗幕沉积体系演变特点

琼东南盆地拆离幕发育时期,盆地一侧发育主拆离断层,相向一侧发育滚动背斜。研究表明,盆地不同

区带主拆离断层不仅活动时间不同,且发育位置也不相同,如乐东凹陷、长昌凹陷主拆离断层发育在中央拗陷南侧,陵水凹陷、松南-宝岛凹陷主拆离断层发育在中央拗陷北侧。拆离断层活动导致了拗陷结构通常呈箕状半地堑的特征,拆离断层活动不仅持续强化了隆拗格局,导致多源-汇系统^[16-17],同时也控制了古地貌特征,进而影响了沉积物的搬运路径及沉积体类型。

拆离幕发育时期,在主拆离断层活动较强区,断层持续间歇性活动,水体不断加深,发育扇三角洲沉积(图4,图5),具有中-弱振幅、中-低频率、中-差连续的地震反射特征,沉积厚度横向变化快,呈楔状特征,由于搬运距离短且具有事件性沉积性质,砂岩分选和磨圆度差,储层物性差;在主拆离断层活动较弱区或相向的缓坡一侧,由于较缓的地形坡度发育辫状河三角洲沉积

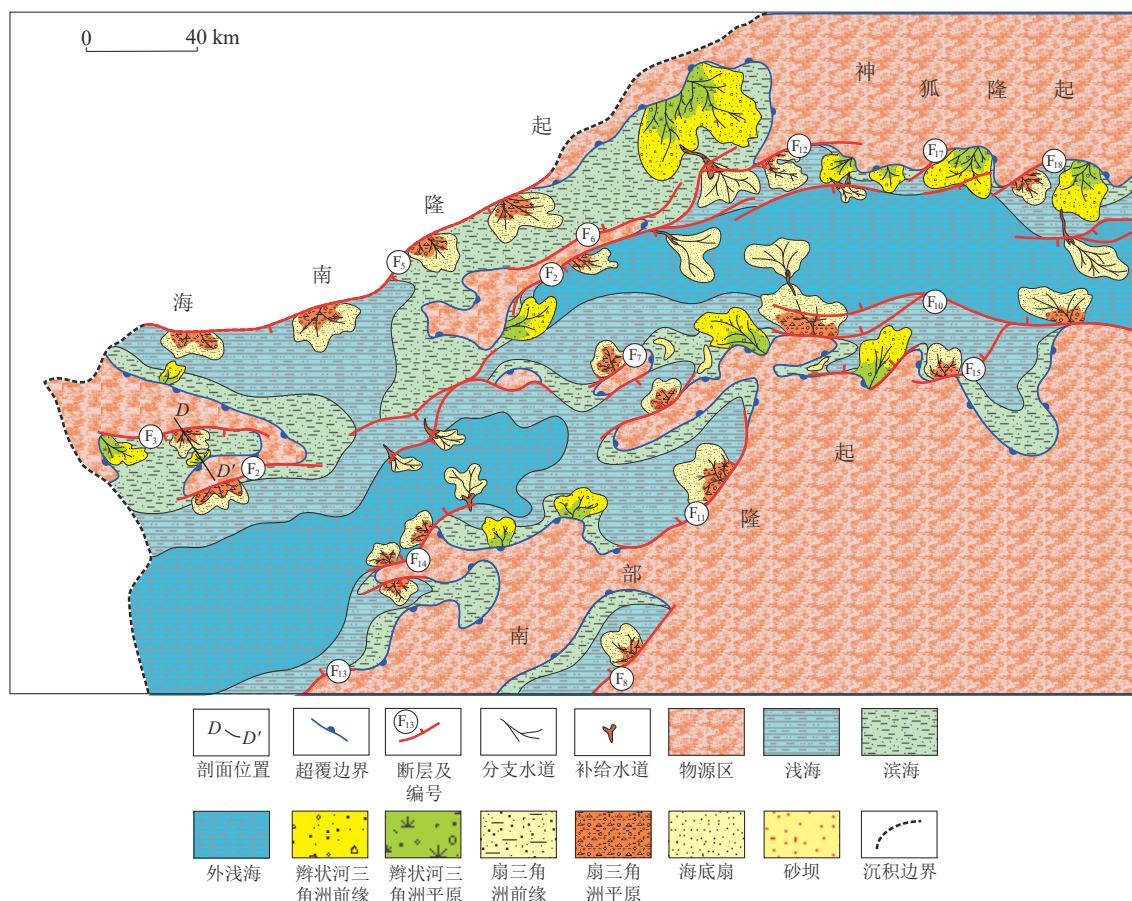


图4 琼东南盆地陵三段沉积体系展布特征

Fig. 4 Distribution of depositional systems during the detachment stage of deposition of the third member of Lingshui Formation in the Qiongdongnan Basin

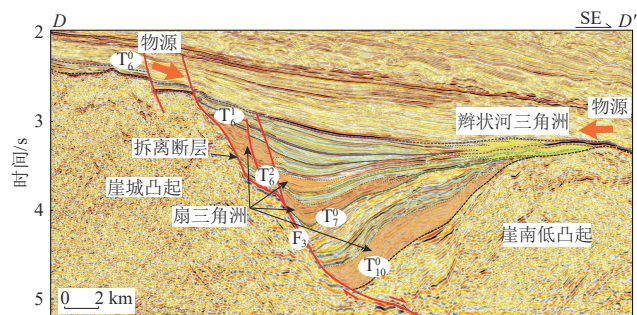


图5 琼东南盆地崖南区拆离断层对三角洲沉积体系地震反射特征的控制(剖面位置见图4)

Fig. 5 Seismic reflections showing detachment faults controlling on distribution of deltas from Yanan area in Qiongdongnan Basin (see Fig. 4 for the location)

(图4,图5),由于地形坡度较缓,经常会发生一定程度的侧向摆动,沉积物搬运距离相对扇三角洲更长,砂岩分选性和磨圆度较好,储层物性好,可作为良好油气储层。由于物源区相对稳定,加上拆离断层的持续活动,具有继承性的扇三角洲、辫状河三角洲沉积特征。

断-拗幕发育时期,拆离断裂活动停止,盆地整体呈现断-拗型结构,在凹槽区出现明显双向上超特征,由于盆地拆离断层停止活动时间具有东早、西晚的特点,盆地东部的宝岛凹陷、长昌凹陷在陵三段沉积时期就进入深水环境,而盆地西部的乐东-陵水凹陷直到陵二段和陵一段沉积时期才进入较深水环境。

2.2 拆离断层对源-汇系统的控制作用

琼东南盆地拆离断层发育控制了裂陷期构造格局和隆坳分布。拆离断层活动控制了中央坳陷带凹陷的分布,主拆离断裂活动时间及位置不同导致凹陷相间排列,凹陷之间被构造转换带分隔^[6, 18-19]。早期高角度正断裂发育时期形成的孤立湖盆呈现多个小规模的沉积中心,拆离断裂发育则形成相对较大的沉积中心,分别为盆地西部的乐东-陵水凹陷和盆地东部的宝岛-长昌凹陷两个主要的沉积沉降中心^[20],且沉积中心偏离主拆离断裂向凹陷迁移。除规模相对较大且长期暴露剥蚀的南部隆起和神狐隆起外,盆地内部也分

布多个受拆离断层控制的低凸起或掀斜断块,均可向盆地内相对低洼的负地形区提供沉积物源^[21],具有多隆多凹多源-汇体系特征(图4)。

陵水组沉积时期受持续的断裂活动和全球海平面上升的影响,水体不断加深,在凹陷中部相继发育浅海和半深海沉积环境,而周缘区主要发育滨海环境的扇三角洲和辫状河三角洲^[22-23](图5),局部由于断层活动的触发,以重力流的方式向凹陷搬运沉积物,形成海底扇等沉积体,这些沉积体经过重力流的二次搬运,通常呈相对较大范围的扇形或席状分布,沉积物分选和磨圆度相对较好,也可以作为良好的油气储层。

3 古近系烃源岩发育特征

琼东南盆地超伸展带主要分布于中央拗陷带,该区发育早期断陷幕、拆离幕和晚期断-拗幕。由于盆地深水區揭示古近系钻井少,很难直观分析烃源岩发育情况,可通过目前发现的油气特征推断烃源岩性质^[24-25]。根据研究区天然气中甲烷、乙烷和丙烷含量及其碳同位素特征,结合区域烃源岩成熟度以及凹陷地质背景,将盆地烃源岩有机质划分为3大类、5小类(图6;表1)。

1) 海-陆过渡相型:该类主要分布在崖城13-1气

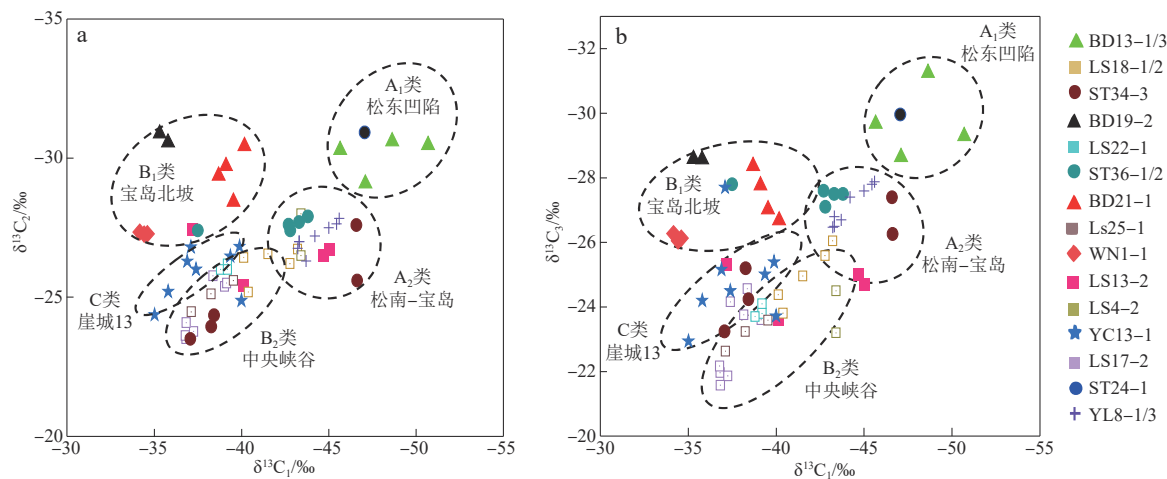


图6 琼东南盆地天然气甲烷与乙烷和丙烷碳同位素交汇图

Fig. 6 Cross plots of $\delta^{13}C_1$ vs. $\delta^{13}C_2$ and $\delta^{13}C_1$ vs. $\delta^{13}C_3$ for gases from the Qiongdongnan Basin

a. 甲烷-乙烷; b. 甲烷-丙烷

表1 琼东南盆地天然气类型特征

Table 1 Gas types and their macroscopic patterns in the Qiongdongnan Basin

分类	源岩类型	源岩层位	天然气碳同位素值	干燥系数	成熟度及类型	主要气藏	
A	A ₁ 松东凹陷	海相陆源、湖相 源岩	崖城组	$\delta^{13}\text{C}_1$: -51.0 ‰ ~ -45.0 ‰ $\delta^{13}\text{C}_2$: -31.0 ‰ ~ -29.0 ‰ $\delta^{13}\text{C}_3$: -31.0 ‰ ~ -28.0 ‰	0.88 ~ 0.92(均值 0.90)	低熟-成熟 油型气	BD13-1/3, ST34-3
			陵水组				
			梅山组				
	A ₂ 松南-宝岛	海相陆源 源岩	陵水组	$\delta^{13}\text{C}_1$: -47.0 ‰ ~ -42.0 ‰ $\delta^{13}\text{C}_2$: -28.0 ‰ ~ -25.5 ‰ $\delta^{13}\text{C}_3$: -28.0 ‰ ~ -25.5 ‰	0.87 ~ 0.98(均值 0.94)	低熟-成熟 煤型气	ST36-1/2, LS18-2, YL8-1/3
			三亚组				
B	B ₁ 宝岛北坡	海相陆源 源岩	崖城组	$\delta^{13}\text{C}_1$: -40.0 ‰ ~ -34.0 ‰ $\delta^{13}\text{C}_2$: -27.0 ‰ ~ -23.0 ‰ $\delta^{13}\text{C}_3$: -24.0 ‰ ~ -23.0 ‰		成熟煤型气	BD21-1, BD19-2, WN1-1
			陵水组				
			三亚组				
	B ₂ 中央峡谷	海相陆源 源岩	崖城组	$\delta^{13}\text{C}_1$: -42.0 ‰ ~ -36.0 ‰ $\delta^{13}\text{C}_2$: -27.0 ‰ ~ -23.0 ‰ $\delta^{13}\text{C}_3$: -24.0 ‰ ~ -23.0 ‰	0.91 ~ 0.96(均值 0.94)	成熟煤型气	LS17-2/18-1, LS22-1/25-1, YC24-1, LS13-2W
			陵水组				
C	海-陆过渡相 煤系		崖城组	$\delta^{13}\text{C}_1$: -40.0 ‰ ~ -35.0 ‰ $\delta^{13}\text{C}_2$: -28.0 ‰ ~ -24.0 ‰ $\delta^{13}\text{C}_3$: -28.0 ‰ ~ -22.0 ‰	0.91 ~ 0.98(均值 0.95)	成熟-高熟煤型气	YC13-1, YC13-4/6, LS13-2N

田,天然气表现为以碳同位素偏重、碳同位素差值较小的成熟-高成熟煤型气特征,以甲烷为主,干燥系数均值为0.95,推断其主要来自崖城组煤系烃源岩。

2) 陆源海相型:该类天然气甲烷碳同位素较重,乙烷碳同位素变化较大,可以进一步分成两小类。以宝岛凹陷北坡天然气为代表,乙烷碳同位素较轻,指示具有较多海相藻类输入贡献;以中央峡谷天然气为代表,乙烷碳同位素相对较重,海相藻类输入相对较少。该类母质相比于海-陆过渡相,具有较多藻类的输入。

3) 混合型:该类天然气主要分布在盆地西北部,以碳同位素偏轻、重烃含量较高为主要特征,进一步划分为两小类。第一类天然气甲烷、乙烷异常偏轻,具有腐泥型和低熟生物气的贡献,主要分布在松东凹陷;第二类烃类气碳同位素相对偏重,具有腐泥型的贡献,无明显生物气特征,主要分布于松南-宝岛凹陷北坡。

琼东南盆地发育始新统岭头组湖相烃源岩、渐新统崖城组海-陆过渡相烃源岩以及陵水组海相烃源岩^[26-27]。始新统岭头组湖相烃源岩分布于系列北东向高角度正断层控制形成的小而深的断陷湖盆^[28]。早期北东向断层分布不均,主要分布于西部浅水区、深水区长昌凹陷及长昌凹陷南北两侧。盆地西部浅水区松东凹陷ST24-1A井、松西凹陷Y9井及宝岛凹陷北坡的BD15-3A井原油或油砂中均检测到丰富的C₃₀四甲基甾烷^[24],原油轻烃中识别出了高正庚烷和二甲基环戊烷,证实了湖相烃源岩的存在和贡献。北礁凹陷缓坡带YL19-1A井在三亚组薄层灰岩有油层发现,油源对比分析认为该油层来源于始新统湖相烃源岩^[29],证实了北礁凹陷始新统湖相烃源岩的存在。因此,推断长昌凹陷南北缘同样发育始新统湖相烃源岩。崖城13-1气田的发现,证实了盆地崖城组海-陆过渡相烃源岩的巨大生烃潜力^[30-31]。该套烃源岩在渐新世早期发育,且一系列东西向高角度正断层控制了崖城组主力烃源岩的展布。崖南凹陷由于靠近物源,在崖城组沉积时期存在大量陆源高等植物输入,以丰富的双杜松烷和奥利烷生物标志化合物为主要特征^[32]。南部隆起区崖城组具有一定厚度,且存在断续状强反射,YL19-1A井已钻遇了煤系地层,指示该区煤系烃源岩可能广泛存在。中央峡谷区陆源海相型油气的发现,表明乐东-陵水凹陷烃源岩具有一定海相藻类输入的贡献^[33]。前人普遍认为该区油气来自崖城组陆源海相烃源岩^[25],忽略了陵水组的可能贡献。渐新世晚期陵水组沉积期,中央拗陷带发育东西向大型拆离断层,控制大型拆离盆地的形成,形成了近3 km厚的陵水组。陵一段、陵二段呈狭长带状展布,东部(宝岛-长

昌凹陷)为开放半深海-深海沉积,西部(乐东-陵水凹陷)可能为半开放陆表海环境,靠近前三三角洲有机质丰度越高,类型好。因此,琼东南盆地发育早期始新统断陷幕、崖城组拆离幕和晚期陵水组断-拗幕可能分别对应于陆相湖盆、海-陆过渡相及陆源海相与海相混合型3类烃源岩。

4 深层油气勘探启示

琼东南盆地经过多轮勘探,前期发现了崖城13-1、陵水17-2等气田^[30,34-35],主要集中于浅水区以及深水区的浅层,分别如崖13-1构造带构造-岩性圈闭、陵水17-2中央峡谷带岩性圈闭群,而深层油气勘探受制于盆地深部结构的认识,一直未获得突破。近年来,新增大片三维地震资料及其连片精细解释,对盆地深部结构有了更清晰的认识,并取得了深水深层宝岛21-1大型气田的突破(图7)。通过岩石圈破裂过程与被动陆缘沉积充填的耦合分析,对盆地超伸展带裂陷期构造格局及地层样式形成了新认识,并对琼东南盆地研究和深层油气勘探具有如下重要启示。

4.1 盆地裂陷期结构差异

琼东南盆地作为超伸展陆缘裂谷盆地,既不同于典型陆内裂谷盆地,也不同于典型被动陆缘盆地,与前者差异在于拆离断裂活动及拆离盆地的形成,由于拆离断裂活动形成了地壳厚度极薄的超伸展带;与后者差异在于裂后漂移期沉积构成不同。琼东南盆地裂陷期可划分为3幕,早期断陷幕为高角度正断层控制的孤立断陷湖盆,拆离幕为低角度拆离断层控制的大型海相断-拗型拆离盆地,晚期断-拗幕为控凹断裂弱活动与热沉降复合控制的拗陷层,该层相当于被动陆缘盆地中破裂不整合面之下凹陷层。这种独特的深部构造格局,既控制地层样式及沉积物特征,也控制着烃源岩的发育。

4.2 裂陷期烃源岩发育

新三维地震资料揭示,在北部和南部隆起带发育一系列NE向始新统断陷盆地,通过与邻区类比,可能发育优质湖相烃源岩。崖城组沉积期间,逐渐从陆相湖盆向滨海平原及滨浅海环境过渡,尽管各个凹陷之间被构造转换带分隔而形成孤立的封闭、半封闭凹陷,但这些低凸起区形成了有利于海-陆过渡相发育的构造地貌环境,导致规模煤系烃源岩发育。陵水组沉积时期,随着拆离断裂活动,使得中央拗陷带从滨海平原

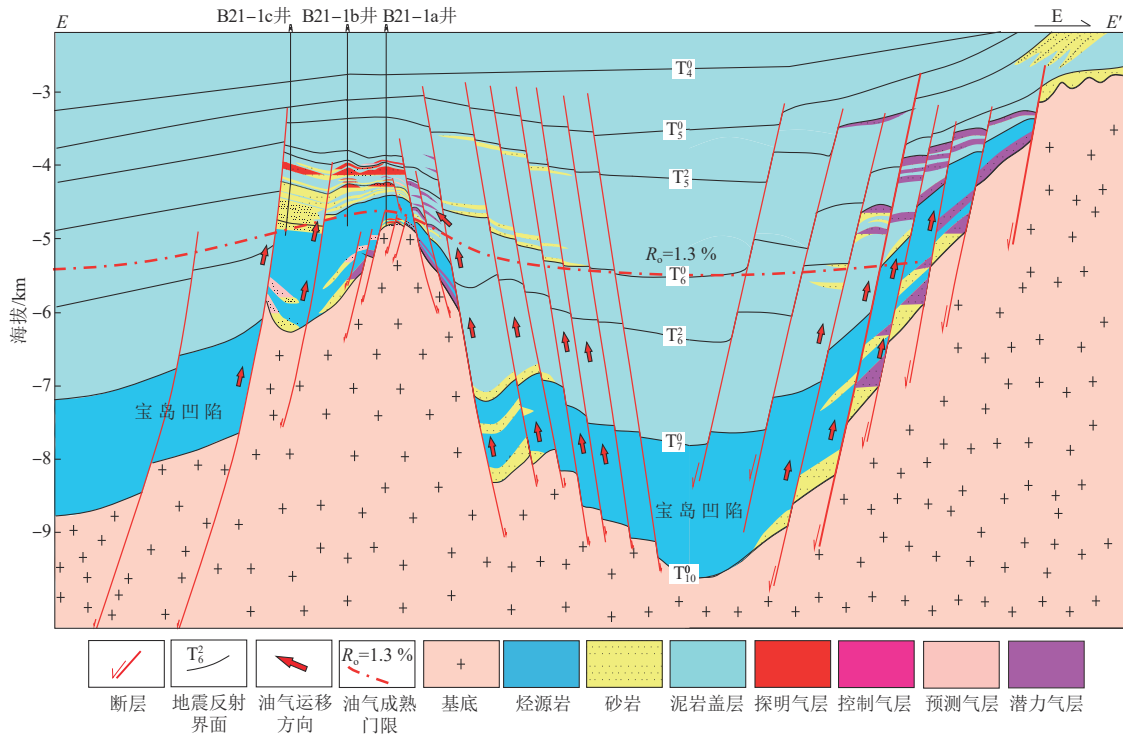


图7 琼东南盆地典型油气藏成藏模式(剖面位置见图1)

Fig. 7 Hydrocarbon accumulation models of the Qiongdongnan Basin (see Fig. 1 for the location)

逐渐过渡为滨浅海,甚至半深海环境,这样可能出现陆源海相烃源岩,甚至出现海相烃源岩。拆离幕和断-拗幕所形成的相对受限海相环境,均有可能形成优质烃源岩。

4.3 盆地热历史差异

根据盆地深部结构特点,中央拗陷带属于细颈带和远端带或超伸展带,地壳厚度从斜坡区到拗陷区逐渐减薄,地壳厚度最薄处小于10 km,这样导致不同构造区带热结构存在较大差异,中央拗陷超伸展带地壳最薄,热流值最高,最高可达100 mW/m²,近端带地壳较厚导致热流值普遍低于70 mW/m²。此外,盆地岩浆活动主要集中在中央拗陷带,拆离断层将地壳拉伸减薄后岩浆物质上涌,也会导致局部热历史演变的异常,进而促进烃源岩早熟。

4.4 对油气勘探启示

基于超伸展陆缘盆地模型对盆地深部结构的认识,对研究区深层油气勘探得到3点启示。一是沿主拆离断裂通常形成多阶段断裂渐进式活动,形成多个断阶为大型物源通道,进而为大型储集体发育提供有利条件;二是由于不同区带拆离断裂活动时间及断裂倾向改变导致在中央拗陷带长昌凹陷、宝岛凹陷、陵水凹

陷和乐东凹陷之间均发育明显构造转换带,除长昌凹陷与宝岛凹陷之间转换带外,其余两个转换带均表现为凹陷间低凸起,这些低凸起不仅对同沉积期陵水组沉积环境有一定程度的分隔作用,同时也是晚期油气运聚的有利构造带;三是由于沿中央拗陷带地壳强烈拉伸减薄,导致裂后期较大的热沉降量,后叠加新构造运动导致裂后期密集小型断裂系发育和先存断裂再活动,晚期断裂活动成为油气的有利输导通道,同时也是裂后期岩浆活动区,特别是长昌凹陷和宝岛凹陷岩浆活动较为强烈,需要关注CO₂勘探风险。

5 结论

1) 琼东南盆地作为超伸展陆缘裂谷盆地,既不同于典型陆内裂谷盆地,也不同于典型被动陆缘盆地,与前者差异在于拆离断裂活动及拆离盆地形成,与后者差异在于裂后漂移期沉积构成不同。琼东南盆地裂陷期可划分为3幕,早期断陷幕为高角度正断层控制的孤立断陷湖盆,拆离幕为低角度拆离断层控制的大型海相断-陷型拆离盆地,晚期断-拗幕为控凹断裂弱活动与热沉降复合控制的拗陷层。被动大陆边缘区深部地壳减薄带与浅部盆地超伸展带的耦合,很好地记录了这些构造格架时空演变的差异。

2) 琼东南盆地发育3类烃源岩,包括始新统湖相烃源岩、下渐新统崖城组以海-陆过渡相为主的煤系烃源岩以及上渐新统陵水组以陆源海相为主及可能海相的烃源岩,这些烃源岩类型与盆地深部结构及演化阶段密切相关。基于“构造-地貌-物源”多因素控制下的中深层源-汇系统的认识,陵水组沉积时期扇三角洲及辫状河三角洲砂体可构成深部有利的储层。

3) 深部动力学机制控制盆地形成演化,对大、中型气田形成具有重要控制作用。基于超伸展陆缘盆地模型得出的对盆地深部结构的认识,可有效地指导研究区深层油气勘探。拆离断裂活动与多阶断裂系相关的大型物源通道是寻找大型储集体的有利构造部位;各凹陷之间的转换带,特别是宝岛凹陷与陵水凹陷、陵水凹陷和乐东凹陷之间的松南低凸起和陵南低凸起是油气运聚的有利构造带。

参 考 文 献

- [1] PÉRON-PINVIDIC G, MANATSCHAL G. The final rifting evolution at deep magma-poor passive margins from Iberia-Newfoundland: a new point of view[J]. *International Journal of Earth Sciences*, 2009, 98(7): 1581-1597.
- [2] GEOFFROY L, BUROV E B, WERNER P. Volcanic passive margins: another way to break up continents [J]. *Scientific Reports*, 2015, 5(1): 14828.
- [3] MANATSCHAL G. New models for evolution of magma-poor rifted margins based on a review of data and concepts from West Iberia and the Alps[J]. *International Journal of Earth Sciences*, 2004, 93(3): 432-466.
- [4] MOHN G, MANATSCHAL G, BELTRANDO M, et al. The role of rift-inherited hyper-extension in Alpine-type orogens[J]. *Terra Nova*, 2014, 26(5): 347-353.
- [5] HAUPERT I, MANATSCHAL G, DECARLIS A, et al. Upper-plate magma-poor rifted margins: Stratigraphic architecture and structural evolution[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2016, 69: 241-261.
- [6] REN Jianye, ZHANG Daojun, TONG Dianjun, et al. Characterising the nature, evolution and origin of detachment fault in central depression belt, Qiongdongnan Basin of South China Sea: Evidence from seismic reflection data[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2014, 33(12): 118-126.
- [7] XIE Xinong, REN Jianye, PANG Xiong, et al. Stratigraphic architectures and associated unconformities of Pearl River Mouth Basin during rifting and lithospheric breakup of the South China Sea[J]. *Marine Geophysical Research*, 2019, 40(2): 129-144.
- [8] 孙珍, 李付成, 林间, 等. 被动大陆边缘张-破裂过程与岩浆活动: 南海的归属[J]. *地球科学*, 2021, 46(3): 770-789.
SUN Zhen, LI Fucheng, LIN Jian, et al. The rifting-breakup process of the passive continental margin and its relationship with magmatism: The attribution of the South China Sea [J]. *Earth Science*, 2021, 46(3): 770-789.
- [9] LEI Chao, ALVES T M, REN Jianye, et al. Rift structure and sediment infill of hyperextended continental crust: Insights from 3D seismic and well data (Xisha Trough, South China Sea)[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2020, 125(5): e2019JB018610.
- [10] 雷超, 任建业, 裴健翔, 等. 琼东南盆地深水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.
- [11] 解习农, 任建业, 王振峰, 等. 南海大陆边缘盆地构造演化差异性及其与南海扩张耦合关系[J]. *地学前缘*, 2015, 22(1): 77-87.
XIE Xinong, REN Jianye, WANG Zhenfeng, et al. Difference of tectonic evolution of continental marginal basins of South China Sea and relationship with SCS spreading [J]. *Earth Science Frontiers*, 2015, 22(1): 77-87.
- [12] 解习农, 赵帅, 任建业, 等. 南海后扩张期大陆边缘闭合过程及成因机制[J]. *地球科学*, 2022, 47(10): 3524-3542.
XIE Xinong, ZHAO Shuai, REN Jianye, et al. Marginal sea closure process and genetic mechanism of South China Sea during post-spreading period[J]. *Earth Science*, 2022, 47(10): 3524-3542.
- [13] LYMER G, CRESSWELL D J F, RESTON T J, et al. 3D development of detachment faulting during continental breakup [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2019, 515: 90-99.
- [14] CONTRUCCI I, MATIAS L, MOULIN M, et al. Deep structure of the West African continental margin (Congo, Zaïre, Angola), between 5° S and 8° S, from reflection/refraction seismics and gravity data [J]. *Geophysical Journal International*, 2004, 158(2): 529-553.
- [15] 任建业, 雷超. 莺歌海—琼东南盆地构造-地层格架及南海动力变形分区[J]. *地球物理学报*, 2011, 54(12): 3303-3314.
REN Jianye, LEI Chao. Tectonic stratigraphic framework of Yinggehai-Qiongdongnan basins and its implication for tectonic province division in South China Sea [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2011, 54(12): 3303-3314.
- [16] 赵民, 张晓宝, 吉利明, 等. 琼东南盆地构造演化特征及其对油气藏的控制浅析[J]. *天然气地球科学*, 2010, 21(3): 494-502.
ZHAO Min, ZHANG Xiaobao, JI Liming, et al. Characteristics of tectonic evolution in the Qiongdongnan Basin and brief discussion about its controlling on reservoirs [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2010, 21(3): 494-502.
- [17] 任建业, 庞雄, 雷超, 等. 被动陆缘洋陆转换带和岩石圈伸展破裂过程分析及其对南海陆缘深水盆地研究的启示[J]. *地学前缘*, 2015, 22(1): 102-114.
REN Jianye, PANG Xiong, LEI Chao, et al. Ocean and continent transition in passive continental margins and analysis of lithospheric extension and breakup process: Implication for

- research of the deepwater basins in the continental margins of South China Sea [J]. *Earth Science Frontiers*, 2015, 22 (1): 102-114.
- [18] 谢玉洪, 童传新, 范彩伟, 等. 琼东南盆地断裂系统特征与演化[J]. *大地构造与成矿学*, 2015, 39(5): 795-807.
- XIE Yuhong, TONG Chuanxin, FAN Caiwei, et al. Characteristics and evolution of fault system in Qiongdongnan Basin [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2015, 39(5): 795-807.
- [19] 谢玉洪, 张功成, 唐武, 等. 南海北部深水区油气成藏理论技术创新与勘探重大突破[J]. *天然气工业*, 2020, 40(12): 1-11.
- XIE Yuhong, ZHANG Gongcheng, TANG Wu, et al. Theoretical and technological innovation of oil and gas accumulation and major exploration breakthroughs in deep-water areas, northern South China Sea [J]. *Natural Gas Industry*, 2020, 40(12): 1-11.
- [20] QIU Ning, WANG Zhenfeng, XIE Hui, et al. Geophysical investigations of crust-scale structural model of the Qiongdongnan Basin, Northern South China Sea [J]. *Marine Geophysical Research*, 2013, 34(3): 259-279.
- [21] 徐长贵, 尤丽. 琼东南盆地松南—宝岛凹陷北坡转换带特征及其对大中型气田的控制[J]. *石油勘探与开发*, 2022, 49(6): 1061-1072.
- XU Changgui, YOU Li. North slope transition zone of Songnan-Baodao sag in Qiongdongnan Basin and its control on medium and large gas fields, South China Sea [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2022, 49(6): 1061-1072.
- [22] 李增学, 刘莹, 李晓静, 等. 琼东南盆地古近纪泥炭沼泽破坏与重建作用对煤型源岩物质形成的控制[J]. *石油与天然气地质*, 2022, 43(6): 1309-1320.
- LI Zengxue, LIU Ying, LI Xiaojing, et al. The control of Paleogene peat swamp destruction and reconstruction on the formation of coal-type source material in the Qiongdongnan Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2022, 43(6): 1309-1320.
- [23] 张功成, 陈莹, 李增学, 等. 中国海域煤型油气成因理论[J]. *石油与天然气地质*, 2022, 43(3): 553-565.
- ZHANG Gongcheng, CHEN Ying, LI Zengxue, et al. Theory on genesis of coaliferous petroleum in the China Sea [J]. *Oil & Gas Geology*, 2022, 43(3): 553-565.
- [24] ZHU Weilin, HUANG Baojia, MI Lijun, et al. Geochemistry, origin, and deep-water exploration potential of natural gases in the Pearl River Mouth and Qiongdongnan basins, South China Sea [J]. *AAPG Bulletin*, 2009, 93(6): 741-761.
- [25] HUANG Baojia, TIAN Hui, LI Xushen, et al. Geochemistry, origin and accumulation of natural gases in the deepwater area of the Qiongdongnan Basin, South China Sea [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2016, 72: 254-267.
- [26] HUANG Baojia, XIAO Xianming, LI Xuxuan. Geochemistry and origins of natural gases in the Yinggehai and Qiongdongnan basins, offshore South China Sea [J]. *Organic Geochemistry*, 2003, 34(7): 1009-1025.
- [27] XIE Yuhong, WANG Zhenfeng, TONG Chuanxin. Petroleum geology of Yacheng 13-1, the largest gas field in China's offshore region [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2008, 25 (4/5): 433-444.
- [28] 傅恒, 匡明志, 何小胡, 等. 琼东南盆地南部隆起带渐新统崖城组层序沉积模式[J]. *天然气工业*, 2020, 40(12): 18-28.
- FU Heng, KUANG Mingzhi, HE Xiaohu, et al. Sequence sedimentary models of Oligocene Yacheng Formation in the southern uplift belt of the Qiongdongnan Basin [J]. *Natural Gas Industry*, 2020, 40(12): 18-28.
- [29] 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 Baojia, LI Xushen, WANG Zhenfeng, 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.
- [30] HAO Fang, LI Sitian, SUN Yongchuan, et al. Geology, compositional heterogeneities, and geochemical origin of the Yacheng gas field, Qiongdongnan Basin, South China Sea [J]. *AAPG Bulletin*, 1998, 82(7): 1372-1384.
- [31] 谢玉洪, 童传新. 崖城 13-1 气田天然气富集条件及成藏模式[J]. *天然气工业*, 2011, 31(8): 1-5, 127.
- XIE Yuhong, TONG Chuanxin. Conditions and gas pooling modes of natural gas accumulation in the Yacheng-13-1 gas field [J]. *Natural Gas Industry*, 2011, 31(8): 1-5, 127.
- [32] 朱扬明, 孙林婷, 谢建明, 等. 崖城地区渐新统不同沉积相带烃源岩生物标志物组合特征及其烃源意义[J]. *地质科学*, 2016, 51(1): 204-219.
- ZHU Yangming, SUN Linting, XIE Jianming, et al. Biomarker compositions and hydrocarbon source significances of different facies Oligocene source rocks in Yacheng region, Qiongdongnan Basin [J]. *Chinese Journal of Geology*, 2016, 51(1): 204-219.
- [33] 甘军, 张迎朝, 杨希冰, 等. 琼东南盆地深水区源—储共控的天然气成藏模式[J]. *高校地质学报*, 2022, 28(5): 635-643.
- GAN Jun, ZHANG Yingzhao, YANG Xibing, et al. Natural gas accumulation model controlled jointly by source and reservoir in deep water area of Qiongdongnan Basin [J]. *Geological Journal of China Universities*, 2022, 28(5): 635-643.
- [34] 张功成, 曾清波, 苏龙, 等. 琼东南盆地深水区陵水 17-2 大气田成藏机理[J]. *石油学报*, 2016, 37(S1): 34-46.
- ZHANG Gongcheng, ZENG Qingbo, SU Long, et al. Accumulation mechanism of LS 17-2 deep water giant gas field in Qiongdongnan Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2016, 37(S1): 34-46.
- [35] 邓勇, 裴健翔, 胡林, 等. 南海西部海域宝岛 21-1 气田的发现与成藏模式[J]. *中国海上油气*, 2022, 34(5): 13-22.
- DENG Yong, PEI Jianxiang, HU Lin, et al. Discovery and hydrocarbon accumulation models of Baodao 21-1 gas field in the western South China Sea [J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2022, 34(5): 13-22.

(编辑 张亚雄)