

珠江口盆地番禺27洼裂陷期构造演化及其对源-汇系统的控制

王梓颐^{1,2}, 李洪博^{1,2}, 郑金云^{1,2}, 朱定伟^{1,2}, 于 飒^{1,2}, 陈兆明^{1,2}, 李振升^{1,2}

[1. 中海石油(中国)有限公司 深圳分公司, 广东 深圳 518000; 2. 中海石油深海开发有限公司, 广东 深圳 518000]

摘要:番禺27洼位于珠江口盆地中央隆起带中部的番禺低隆起区,为发育在中生代陆缘岩浆弧基底之上“南断北超”的新生代凹陷,钻井取得的油样与砂岩储层抽提烃证实该洼陷存在文昌组中-深湖相烃源岩供烃,但已钻井均没有实际钻至文昌组,烃源岩发育的有利部位与有利时期仍存在不确定性。对控洼断裂系统及洼陷结构样式的研究表明,番禺27洼的发育和演化具有“先存构造约束、右旋伸展主控、岩浆底侵改造”三元耦合成因,控制了二幕裂陷阶段“左阶不对称地堑-左行雁列式半地堑-萎缩期宽缓半地堑”的结构样式。裂陷期三幕控洼断裂差异活化影响沉积中心变迁,洼陷结构差异演化影响洼陷沉积充填格局。随着裂陷期断裂活动的减弱,沉积中心逐渐由东向西、由两端向中部迁移。源-汇沉积体系在裂陷早期以NW轴向和中部转换带沉积体系为主,裂陷中期至裂陷晚期逐渐向北部缓坡大型沉积体系和西北部长轴优势沉积体系转换。西次洼长期作为沉积中心,是优质烃源岩发育的有利部位。裂陷中期发育大型半地堑式湖盆,并伴有较强的岩浆活动,是优质烃源岩发育的最有利时期。裂陷中期至裂陷晚期西北部大型源-汇沉积体系的长期发育为古近系大型储集体的形成提供了有利条件。

关键词:构造演化;裂陷期;源-汇系统;番禺27洼;珠江口盆地

中图分类号:TE121.1

文献标识码:A

Structural evolution and its control on source-to-sink system of Panyu 27 Sag in Pearl River Mouth Basin during rifting

WANG Ziyi^{1,2}, LI Hongbo^{1,2}, ZHENG Jinyun^{1,2}, ZHU Dingwei^{1,2}, YU Sa^{1,2}, CHEN Zhaoming^{1,2}, LI Zhensheng^{1,2}

(1. Shenzhen Branch, CNOOC, Shenzhen, Guangdong 518000, China;

2. CNOOC Deepwater Development Ltd., Shenzhen, Guangdong 518000, China)

Abstract: Sag Panyu 27 is located in the Panyu low uplift area in the middle of the central uplift zone of the Pearl River Mouth Basin. It is a Cenozoic sag developed on the basement of the Mesozoic continental margin magmatic arc, which is ‘faulted in the south and overlapped in the north’. Oil samples and extracted hydrocarbon from wells drilled in the sag can be traced back to the intermediate to deep lacustrine source rocks in the Wenchang Formation. However, none of the wells actually reached the formation, making the specific location and period for the development of source rocks still uncertain. Through the study of the controlling fault and the structural style of the sag, it is shown that the development and evolution of the sag has a ternary coupling genesis of ‘pre-existing structural constraints, dextral extension control, and magmatic underplating transformation’, which controls the structural pattern of ‘left stepping asymmetric graben-left lateral en echelon semi-graben-wide and gentle semi-graben’ in the three-stage rifting period. The differential activation of sag-controlling faults in the three stages of rifting period affects the migration of the sedimentary center, and the differential evolution of the sag architecture affects the sedimentary filling pattern of the sag. With the rifting, the sedimentary center gradually migrated from east to west, and from both ends to the middle. In the early stage of Wenchang Formation deposition, the source-to-sink sedimentary systems are mainly distributed in the central transition zone along the NW-trending axis, while in the late stage, they mainly occurred on the northern gentle slope, and a large source-to-sink sedimentary system with long provenance appeared in the northwest during deposition of the Enping

收稿日期:2023-01-17;修订日期:2023-03-20。

第一作者简介:王梓颐(1995—),女,工程师,油气成藏综合研究。E-mail: wangzy39@cnooc.com.cn。

Formation. As a sedimentary center for a long time, the western sub-sag is the right place for the development of high-quality source rocks. The middle stage of rifting when a large semi-graben lake basin was formed and accompanied by strong magmatic activity was the time for the development of high-quality source rocks. The long-term development of large source-to-sink sedimentary system in the northwest during the middle-late rifting stages provided favorable conditions for the formation of large Paleogene reservoirs.

Key words: structure evolution, rifting period, source-to-sink system, Panyu 27 Sag, Pearl River Mouth Basin

引用格式:王梓颐,李洪博,郑金云,等. 珠江口盆地番禺27洼裂陷期构造演化及其对源-汇系统的控制[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(3): 626-636. DOI: 10. 11743/ogg20230308.

WANG Ziyi, LI Hongbo, ZHENG Jinyun, et al. Structural evolution and its control on source-to-sink system of Panyu 27 Sag in Pearl River Mouth Basin during rifting[J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(3): 626-636. DOI: 10. 11743/ogg20230308.

随着勘探进程的不断加快,珠江口盆地(东部)逐渐加大了对新洼陷的探索,其中就包括位于中央隆起带番禺低隆起之上的番禺27洼。自1984年以来番禺27洼共钻探井7口,钻井取得的油样与砂岩储层抽提烃证实该洼陷存在文昌组中-深湖相烃源岩供烃,但已钻井均没有实际钻至文昌组,烃源岩发育的有利部位与有利时期仍存在不确定性,且目前相关研究较为薄弱。

由于裂陷结构可以作为控制沉积充填的框架和约束性地质条件,不同结构下的可容空间及烃源岩发育模式差别较大^[1]。而裂陷结构形态与控洼断层的特征紧密相关,不同方向或期次的控洼断层对盆地的沉积作用控制程度不同,使得盆地表现出多个沉积中心和强分割性。因此盆地控洼断裂与裂陷结构形态可以影响沉积和沉降中心的发育,从而控制了沉积演化及烃源岩的发育,制约着油气藏的形成与分布^[2-6]。有必要系统研究番禺27洼结构特征,在此基础上剖析洼陷内烃源岩的形成背景、发育的有利部位及有利时期。

本文基于覆盖番禺27洼全区的三维地震资料和已钻探井资料,对番禺27洼南部控洼断裂的活动性进行分析,阐释了裂陷期洼陷结构形态演化过程,从区域应力场转变、基底先存断裂及岩浆活动角度探讨了洼陷的成因演化机制,进而推演出洼陷内部沉积充填演化过程及构造-沉积的响应机制,以期为番禺27洼理论研究与勘探实践提供支撑,同时对珠江口盆地其他洼陷的研究具有良好借鉴意义。

1 区域地质背景

珠江口盆地位于南海北部,构造位置处于华南大陆南缘,其构造演化受控于地球深部地幔对流驱动下形成的欧亚板块、印度-澳大利亚板块、古太平洋板块之间的挤压碰撞与俯冲运动^[7-10]。现今形成了北部隆起带、北部坳陷带、中央隆起带、南部坳陷带和南部隆

起带5个构造单元,呈“三隆夹两坳”的新生代构造格局^[6,11-15]。

珠江口盆地构造演化始于中生代,受古太平洋板块向下俯冲影响,欧亚板块内部发生挤压,珠江口盆地处于主动陆缘,形成了NE走向的陆缘岩浆弧-弧前盆地和前陆盆地,成为盆地新生代沉积的基底^[10,16-17]。盆地的裂陷伸展始于中生代晚期,古太平洋板块俯冲后撤,至新生代古近纪始新世,印支板块与欧亚板块硬碰撞使得华南陆缘旋转挤出,古太平洋板块俯冲方向由NNW逐渐转变为NWW,区域伸展方向逐渐由NW-SE向转变为近NS向,盆地先后经历珠琼运动一幕(约56 Ma)、惠州运动(约43 Ma)和珠琼运动二幕(约38 Ma)共3期盆地拉张裂陷构造运动。自珠琼运动一幕起,盆地开始进入陆内裂谷盆地演化阶段,形成了新生代伸展裂陷盆地,先后沉积了文昌组下段、文昌组上段和恩平组^[1,6,10-11,15-18]。

本文研究主要围绕盆地三幕裂陷期展开,研究范围为位于盆地内部中央隆起带番禺低隆起之上的番禺27洼。该洼陷整体为一个南断北超的近WE走向新生代凹陷,现今洼陷面积约508 km²。洼陷内部的构造单元又可进一步划分出3个次洼、3个斜坡和1个低凸起,次洼包括西、中与东次洼,其他包括番禺19斜坡、番禺21斜坡、番禺22斜坡及番禺27低凸起,南翼的红色断裂即本文研究的主要控洼断裂(图1)。

2 裂陷期洼陷构造特征

2.1 控洼断裂差异活化

伸展裂陷盆地中由于主干控洼断层承担主要伸展量,下降盘往往沉降量较大,且控洼断裂的活动性越强,其下降盘地层沉积的厚度越大,该时期断裂对沉积的控制能力越强,越容易形成沉积和沉降中心,进而为

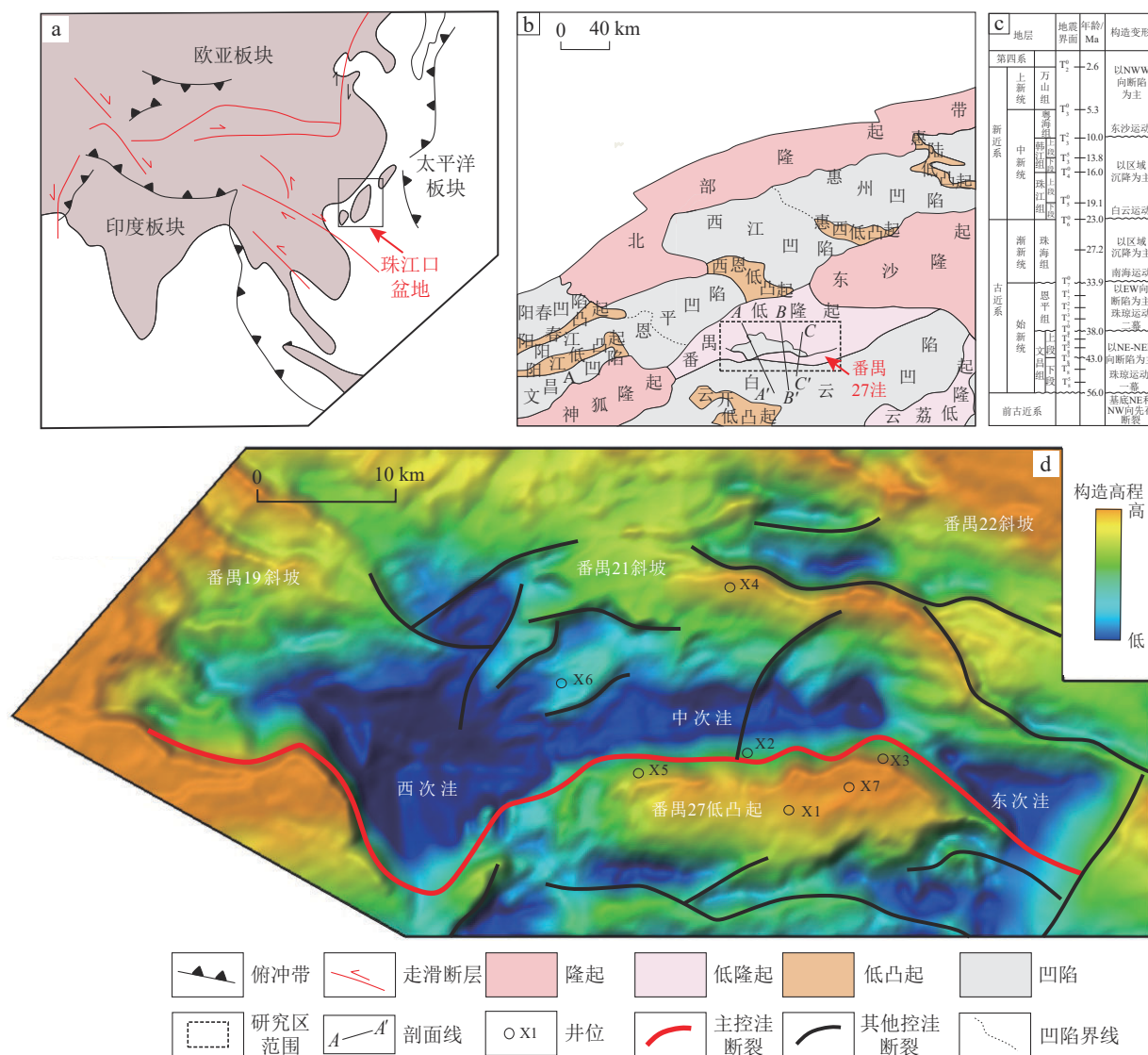


图1 珠江口盆地番禺27洼区域地质(据文献[19]修改)

Fig. 1 Regional geological map of Panyu 27 Sag, Pearl River Mouth Basin (Modified after [19])

a. 区域大地构造背景; b. 珠江口盆地局部放大; c. 地层综合柱状图; d. 番禺27洼基底面等T₀图

优质烃源岩形成提供良好条件^[2-4,6]。目前断层活动性的定量表征方法主要包括断层落差法、断层生长指数法和断层活动速率法。断层生长指数法需要计算下降盘与上升盘地层厚度比值,而裂陷盆地边界控注断层上升盘地层往往受剥蚀而普遍缺失,在此不适合用此种方法。断层古落差法对比相同地层下降盘的厚度即该时期的落差,断层活动速率法在测算断层古落差的同时考虑了各层段沉积的起始时间,这类方法相对更加可靠且直观^[15,20-21]。因此本文通过对三幕裂陷期番禺27洼南翼控注断裂等间距提取采样点,测量断裂下降盘厚度及其与沉积时间的比值,代表各时期断距横向变化规律与断裂的活动速率。

文昌组下段沉积时期,也即裂陷早期,西次洼的控

注断裂下降盘厚度最大,最大断距处下降盘厚度近3 000 m,其次是东次洼,下降盘最大沉积厚度在1 000 m左右,这一时期西次洼控注断裂的断层活动速率也最大,最高近500 m/Ma,其次是东次洼部分,活动速率最高约为200 m/Ma,这一时期中次洼控注断裂活动性整体较弱,裂陷中心主要位于西、东次洼。

文昌组上段沉积时期,也即裂陷中期,西次洼控注断裂下降盘地层厚度依旧最大,且控注断裂的活动速率亦最大,最高将近500 m/Ma,整体活动性最强,其次是中次洼控注断裂的活动性。自裂陷早期到裂陷中期,番禺27洼的控注断裂活动性表现出由两侧较强逐渐转变为中部较强的特征,沉积中心由西、东次洼向中心迁移,中次洼裂陷增强。

恩平组沉积时期,也即裂陷晚期,控洼断裂整体活动性减弱,各次洼控洼断裂古落差与断层活动速率普遍变低,但仍有西、中次洼控洼断裂活动性相对较强的趋势,断层活动速率最高在300 m/Ma左右。整体裂陷晚期东次洼断控作用减弱,中、西次洼连成一体。

番禺27洼西次洼的控洼断裂在裂陷早、中期的活动性强于裂陷晚期;中次洼控洼断裂在裂陷中期活动性相对较强,其次是晚期;东次洼的控洼断裂在裂陷中期活动性相对较强,整体西次洼的控洼断裂在各时期活动性都相对其他两个次洼更强(图2)。

断裂的差异活化直接导致洼陷沉积-沉降中心的迁移^[14]。因此早文昌期裂陷中心主要位于东、西次洼;晚文昌期西次洼沉积中心向东迁移,中次洼裂陷增强;恩平期东次洼断控减弱,中、西次洼连成一体。

2.2 洼陷结构差异演化

在上述番禺27洼裂陷期控洼断裂活动性分析的基础上,结合残留地层厚度展布,从剖面上对番禺27洼各次洼进行洼陷横向对比,从平面上对番禺27洼裂陷早期、中期和晚期三幕构造演化阶段的盆地结构特征进行时期纵向对比。

依据过番禺27洼各次洼的地震剖面,其受区域整体拉张应力背景的影响,在裂陷期发育了大量的正断

层,整体为南断北超的箕状半地堑样式,发育文昌组下段、文昌组上段、恩平组,具有“厚文昌,薄恩平”的特征。西次洼控洼断层呈北倾高角度铲式正断层,裂陷期倾角接近80°,与邻近多条断层向下合并至低角度先存断裂面上形成扇形结构,先存断裂断穿基底面且向基底深部方向延伸,断层倾角逐渐减小。另由于西次洼控洼断裂上升盘地层凸起,及低角度先存断裂中段抬升弯曲形成座椅状形态,推测上升盘一侧发育岩浆底侵。中次洼控洼断层依旧为铲式正断层,但断层倾角相对较缓,裂陷期倾角在60°左右,作为主干断层与衍生反向倾斜次级断层组成复杂Y型组合,使得洼陷内部沉积充填进一步复杂,未见典型先存断裂发育。东次洼控洼断层倾角很小,表明裂陷作用导致先存低角度逆冲断层的活化反转为控沉积的正断层,或者成为高角度断层向下延伸的滑动面,导致倾角快速变小,其间被其他断裂分隔成不同的次洼,向下合并于低角度断面。剖面上双程反射时间的对比则体现西次洼纵向跨越幅度相对最大,可能具有更优的烃源岩发育及成熟条件(图3)。

平面上,结合地层厚度变化与断裂组合样式绘制出番禺27洼三幕裂陷期的构造纲要图,通过标注对比控洼断裂的断层活动速率指数,能够直观展示控洼断裂对沉积中心的控制作用。受裂陷期印支地块旋转挤

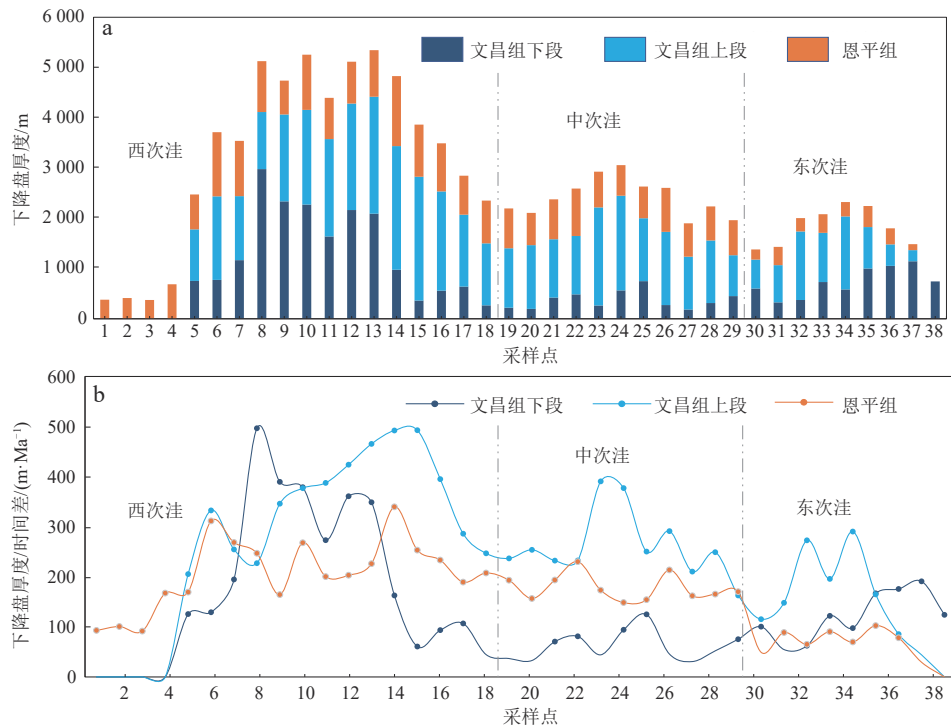


图2 番禺27洼裂陷期控洼断裂活动性分析

Fig. 2 Activity analysis of sag-controlling faults during rifting period in Panyu 27 Sag

a. 古落差横向对比; b. 活动速率对比

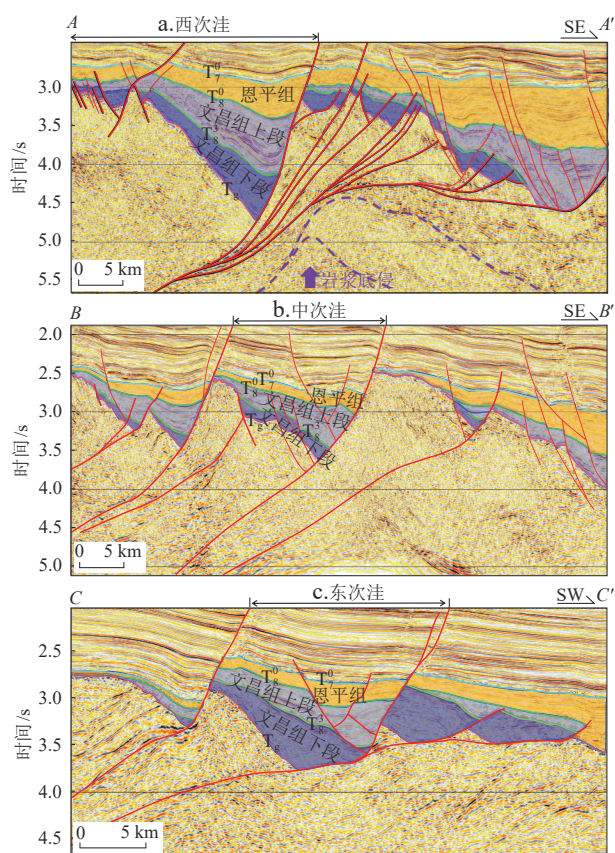


图3 番禺27洼各次洼典型地震剖面(剖面位置见图1b)

Fig. 3 Typical seismic profiles of each sub-sag in Panyu 27 Sag
(See Fig. 1b for the position of seismic line)

出和古南海俯冲影响,区域伸展应力场由NW-SE向顺时针右旋伸展转变为近NS向^[22],番禺27洼在裂陷三幕构造演化阶段的洼陷结构也随之表现出明显的阶段性。

裂陷早期,即文昌组下段沉积时期,部分先存中生代NE走向逆冲断裂系活化反转,叠加区域NW-SE走向较强的右旋伸展分量,形成NE和NW两组共轭控洼断裂及部分反向调节断层,在洼陷东、西两侧形成左阶展布的菱形不对称地堑或半地堑,整体构成不对称地堑式断陷结构。依据地层厚度与控洼断层活动速率对比,认为断裂活动使得湖盆沉积中心位于西次洼与东次洼,且西次洼沉积厚度规模更大。裂陷中期为裂陷高峰期,即文昌组上段沉积时期,区域伸展应力场顺时针旋转,且伸展分量变弱,导致伸展方向与控洼断裂形成一定的夹角,南部陡坡带岩浆强烈底侵,控洼断层向北迁移,早期控洼断裂系统被改造,形成近EW向的雁列式展布的控洼断裂,进而控制了南断北超的近WE走向半地堑式大型湖盆也即箕状半地堑的发育,形成东、中、西3个斜列式分布的裂陷中心,此时各次洼控洼断裂的活动速率普遍加强,尤其是西次洼与中次洼,

因而湖盆沉积中心也主要位于中、西次洼。裂陷晚期,即恩平组沉积时期,区域右旋伸展分量基本消失,断裂继承性发育,但活动性显著减弱,断控作用也随之减弱,整体发育浅湖广盆,呈萎缩宽缓半地堑,湖盆沉积中心主要位于西次洼(图4)。

番禺27洼在新生代三幕裂陷阶段持续顺时针右旋伸展应力构造背景下,断裂活动由西、东次洼强逐渐转变为西、中次洼强,断裂活动具有由分散向集中,由东部向中心迁移的特征,因此湖盆的沉积中心也由西、东次洼逐渐转变到中次洼及西次洼,洼陷结构样式则由左阶不对称地堑,逐步转变为左行雁列式半地堑,在裂陷晚期变为萎缩期宽缓半地堑。

通过对番禺27洼西次洼的平衡剖面恢复,认为该洼陷整体经历了4个演化阶段,洼陷结构从中生代基底构造层逐渐演变为不对称地堑、箕状半地堑和宽缓半地堑。裂陷前期为中生代基底构造层,由岩浆弧与先存逆冲断裂系统组成,基底发育多组低角度逆冲推覆断层与叠瓦状构造,为强烈挤压变形导致,部分被基底不整合面 truncation。裂陷早期,部分先存中生代逆冲断裂

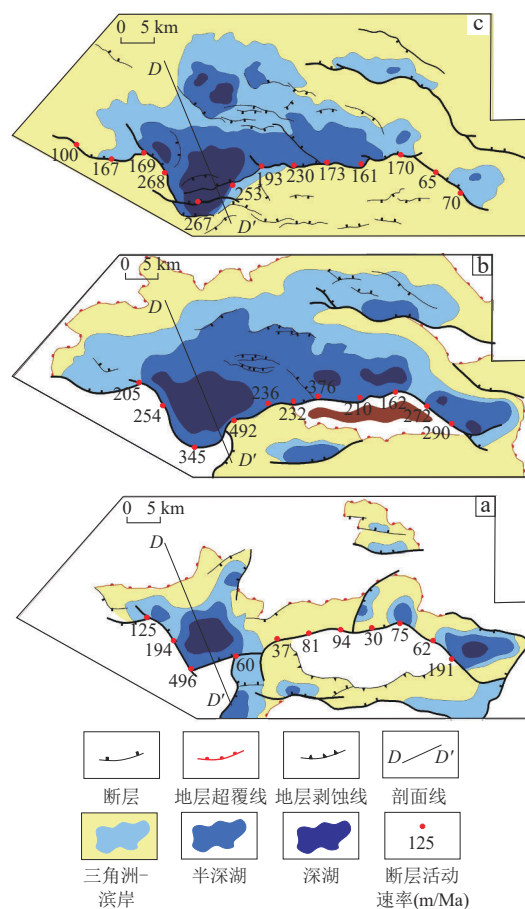


图4 番禺27洼裂陷期构造纲要

Fig. 4 Structure outline map of Panyu 27 Sag in rifting period

a. 文昌组沉积早期; b. 文昌组沉积晚期; c. 恩平组沉积期

系选择性反转为正断层,并发育部分反向调节断层,与邻近多条断层向下合并至低角度先存断裂面上形成扇形结构,先存断裂断穿基底面且向基底深部方向延伸,叠加区域NW-SE走向较强的右旋伸展分量影响,发育左行左阶菱形不对称地堑或半地堑,西次洼整体以双断地堑结构为主。裂陷中期,区域右旋伸展分量减弱,裂陷作用和沉积中心向逆冲推覆体前端迁移,西次洼整体发育南断北超、近EW走向断陷,陡坡受岩浆侵入隆升改造。裂陷晚期,区域右旋伸展分量基本消失,断控作用减弱,发育浅湖广盆,形成宽缓半地堑(图5)。

2.3 洼陷发育成因

研究表明,珠江口盆地中生代为古太平洋板块向欧亚板块俯冲的主动陆缘,形成NE走向的陆缘岩浆弧-弧前盆地,并在裂陷前经过剥蚀后,成为新生代断陷盆地的基底构造层。通过前人地震剖面 and 重磁解释,在基底构造层识别出NE和NW走向两组逆冲断裂和NW走向走滑断裂带,且裂后期中-基性岩浆多沿该走滑断裂带分布^[6,11,23-30]。由于先存断裂属于力学上的构造薄弱面(带),在构造变形中可以作为相对软弱带^[6,31-33],易于在后期的伸展应力场中活化成为伸展断层^[34],并长期继承发育,具有较大发育规模,容易成

为控制裂陷发育的主干断裂,进而影响断陷结构的发育和演化^[6,35-38]。

在番禺27洼及其周缘的基底之下,可识别出一组NE走向、N倾向的低角度断裂,剖面上通常由多条断层向下合并至同一断面而形成扇形结构。平面上,低角度断裂带整体呈NE走向,但分成左行排列的3段。同时,在番禺27洼的多口钻井中发现CO₂气层,其同位素值 $\delta^{13}\text{C}$ 大于-8‰,为幔源无机成因。结合低角度断层走向的变化,推测之间发育NW走向的走滑断层。一般情况下,脆性伸展形成的断层倾角多处于45°~60°,结合区域构造背景,认为这组NE走向的低角度断层为中生代逆冲断层的残留,与NW走向的走滑断层共同形成该区左行压扭的基底先存构造格局(图6)。

由于先存构造与区域应力对伸展盆地的控制是相互联系不可分割的,先存构造与区域伸展应力方向的组合控制了盆地内断裂系统的发育差异,进而影响了裂陷盆地结构形成和演化^[6,32,38-40]。前人研究表明,珠江口盆地裂陷期区域伸展应力场由早期的NW-SE向逐渐转变为近NS向,具有顺时针旋转的特征^[6,39,41]。因此,通常认为裂陷早期洼陷主要呈NE走向,而裂陷晚期为近WE走向。但在惠州凹陷和陆丰凹陷则不符合这一规律,裂陷早期洼陷走向既有NE走向,也有NW走向,尤其是陆丰13洼,呈NW向右行斜列式展布^[42]。因此,盆地裂陷过程中,除区域伸展应力场外,还有其他因素影响裂陷的走向和迁移。

对番禺27洼三幕裂陷结构和展布规律的分析表明,在区域伸展应力场下,裂陷的发育和演化显著受到基底先存构造的制约,并在陡坡区域伴随岩浆侵入隆升的改造。裂陷早期,发育NE和NW向两组控洼断层,东、西两个裂陷中心呈NW向斜列式展布,北部缓坡多发育反向调节断层,构成不对称地堑式断陷结构。表明该时期NW-SE向的伸展具有较强的右旋,形成两组共轭控洼断裂。同时,东次洼控洼断层倾角很小,陡坡隆起区南侧发育一组断陷,这些断陷的控洼断层向下均合并于一条低角度断面,表明该时期裂陷作用导致先存低角度逆冲断层的活化,或者成为高角度断层向下延伸的滑动面,并导致倾角快速变小。裂陷中期,随着区域应力场的顺时针偏转,伸展方向与先存断裂带形成一定的夹角,先存构造格局的影响降低,洼陷整体呈南断北超的半地堑,南部控洼断层整体呈近EW向雁列式展布,形成东、中、西3个斜列式分布的裂陷中心;同时,南部陡坡带早期裂陷抬升削蚀,控洼断层向北迁移,基底以下可识别隆起的锥状反射结构,推测为岩浆侵入,而幔源CO₂主要集中在陡坡位置,岩浆侵

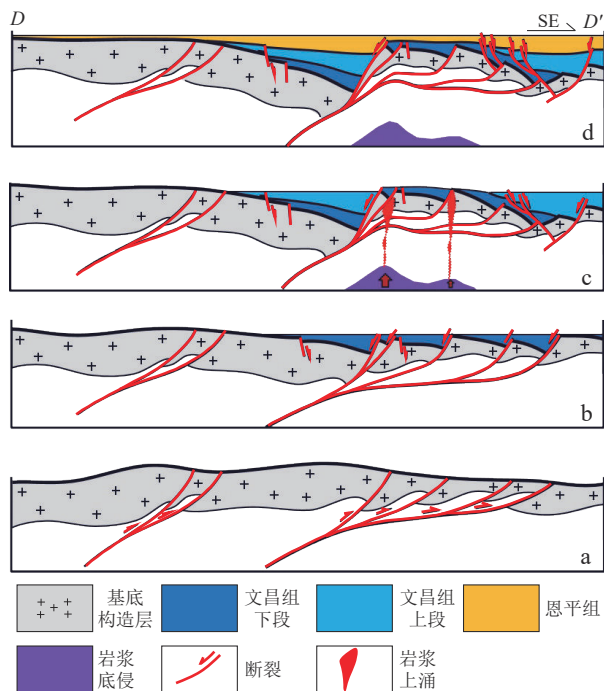


图5 番禺27洼裂陷期演化模式剖面(剖面位置见图4)

Fig. 5 The evolution model profile of Panyu 27 Sag during rifting period (See Fig. 4 for the position of seismic line)

a. 裂陷前基底构造层;b. 文昌早期不对称地堑、半地堑;c. 文昌晚期箕状半地堑;d. 恩平期宽缓半地堑

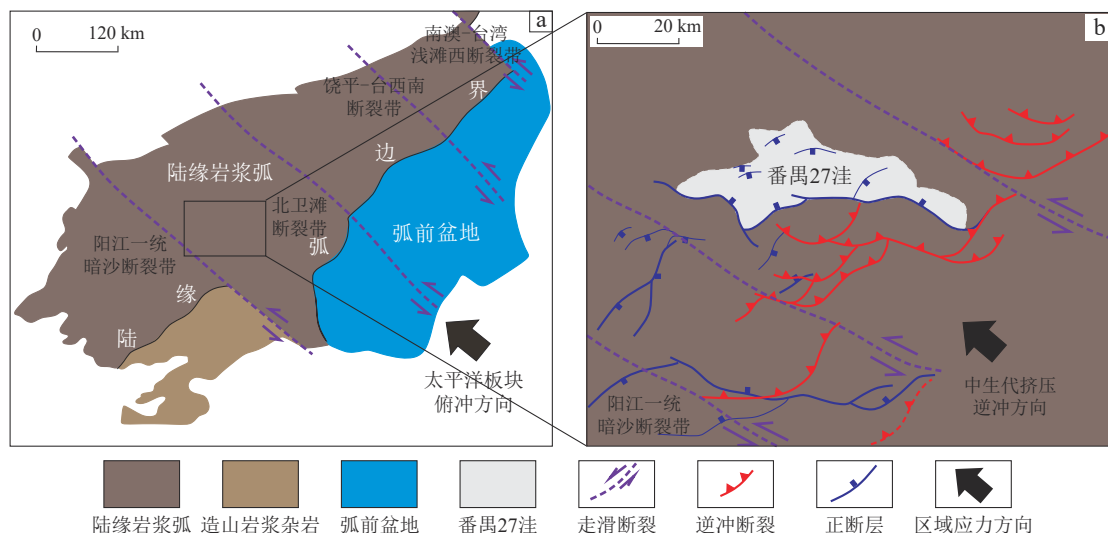


图6 中生代番禺27洼构造格局(据文献[10]修改)

Fig. 6 Tectonic framework of Panyu 27 Sag in the Mesozoic (Modified after reference [10])

a. 珠江口盆地中生代构造格局;b. 和番禺27洼周缘断裂体系

入也可能与先存NW向走滑断层有关,为幔源岩浆的侵入提供通道。裂陷晚期,继承了中期的裂陷格局,但是断陷作用逐渐减弱,呈现为宽缓的半地堑,裂陷中心向西次洼集中,推测与其西侧走滑断层沟通较多的岩浆有关,导致该区域地壳韧性增强,更易于发生深陷作用(图4,图5)。

由此可见,番禺27洼裂陷期的形成和演化受到区域伸展应力场、基底先存构造和岩浆侵入的共同控制,其中,区域伸展应力场占主导地位,基底NE和NW向先存断裂系统成为重要的约束条件,共同控制着裂陷走向与裂陷强弱。而岩浆侵入则改造早期裂陷,导致裂陷的迁移。因此,番禺27洼具有“先存构造约束、右旋伸展主控、岩浆底侵改造”三元耦合成因,控制了三幕裂陷阶段“左阶不对称地堑-左行雁列式半地堑-萎缩期宽缓半地堑”的结构样式。

3 裂陷期构造演化对源-汇系统的控制作用

番禺27洼裂陷期三幕控洼断裂差异活化影响沉积中心变迁。控洼断裂在裂陷早-中期整体断裂活动性最强,控制着西次洼长期作为湖盆的沉积中心,其次是中次洼,随着裂陷期断裂活动的减弱,沉积中心逐渐由东向西迁移,依次为西/东次洼—西/中次洼—西次洼。

番禺27洼裂陷期三幕洼陷结构差异演化影响洼陷沉积充填格局。裂陷早期,即文昌组下段沉积时期,番禺27洼形成左阶不对称地堑,呈多物源供给体系,

为“小湖盆、大物源”,以NW轴向缓坡和北部转换斜坡源-汇沉积体系为主,周缘的隆起及凹陷内凸起都可作为物源,过地堑两侧断层快速沉积卸载。北部近WE走向控洼断裂具有卸载作用,有利于南部沉积中心-深湖相烃源岩的发育,湖盆沉积中心主要位于西次洼与东次洼。裂陷中期为裂陷高峰期,即文昌组上段沉积时期,番禺27洼为左行雁列式半地堑,湖盆显著扩张,发育西北部缓坡大型源-汇沉积体系,物源区向北退缩,尤其中部次洼,形成“大湖盆、小物源”沉积格局,物源主要来自周缘隆起区,裂陷中心更易形成欠补偿环境发育中-深湖相,具有发育大型三角洲储集体和中-深湖相烃源岩的条件,湖盆沉积中心主要位于西次洼与中次洼。裂陷晚期,即恩平组沉积时期,番禺27洼为萎缩期宽缓半地堑,以西北部缓坡大型源-汇沉积体系为主,西北部华南陆缘大型物源供给充足,发育大型辫状河三角洲储集体,不利于较深水湖相烃源岩发育,湖盆沉积中心主要位于西次洼。受裂陷期构造演化的影响,裂陷早期洼陷源-汇沉积体系以NW轴向和中部转换带沉积体系为主,裂陷中期至裂陷晚期逐渐向北部缓坡大型沉积体系和西北部长轴优势沉积体系转换(图7)。

裂陷早期湖盆范围相对较小,但周缘的隆起或洼陷内的凸起都可为湖盆提供砂体供给,受控洼断裂及沉积中心的影响,在西次洼与东次洼沉积了中-深湖相地层。裂陷中期湖盆面积显著扩大,湖盆西次洼与中次洼沉积了部分中-深湖相地层。裂陷晚期湖盆面积最大,但物源方向基本只保留西北部长轴优势物源

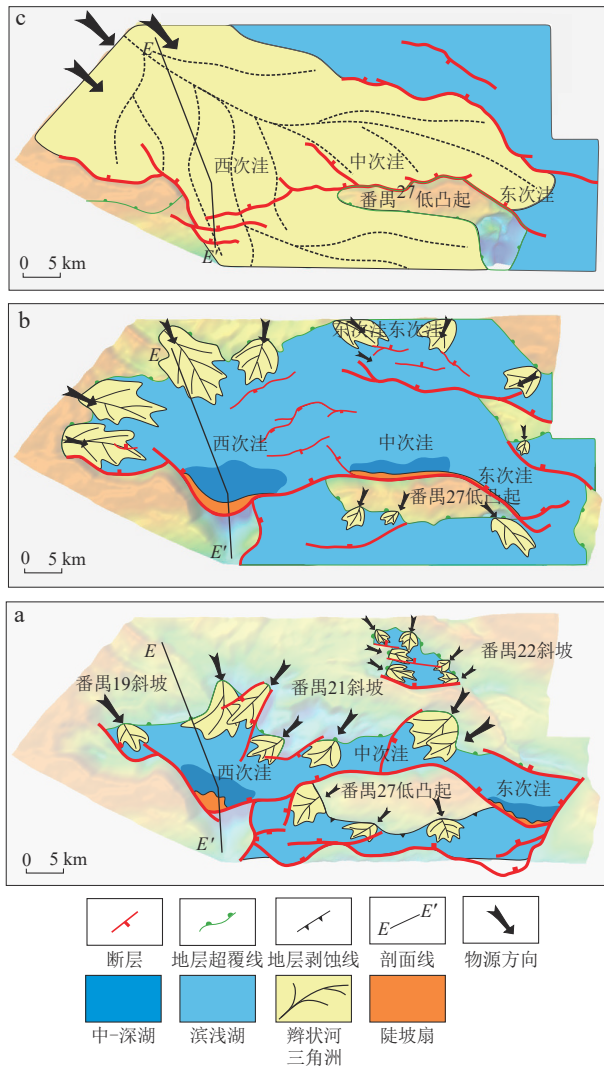


图7 番禺27洼裂陷期沉积体系分布

Fig. 7 Distribution of sedimentary systems in Panyu 27 Sag during rifting period

a. 文昌早期沉积体系; b. 文昌晚期沉积体系; c. 恩平期沉积体系

体系,形成了大面积的辫状河三角洲沉积,覆盖了各个次洼。由此可知西次洼沉积中心相对较稳定,在裂陷早期及裂陷中期稳定发育了中-深湖相优势烃源岩相沉积,而东次洼和中次洼则分别在裂陷早期及裂陷中期发育中-深湖相沉积。

截取过番禺27洼西次洼的典型地震剖面,说明裂陷各时期地震相展布。其中陡坡扇呈空白和杂乱反射,同相轴连续性差,反射振幅较强,中-深湖相地层呈低频、连续、中-强振幅地震相特征,滨浅湖相地层同相轴连续性明显较中-深湖相地层减弱,辫状河三角洲相地层前积作用明显,地震剖面上呈中-弱振幅、低-中等连续反射同相轴,产状为发散或亚平行。

强裂陷阶段具有欠补偿沉积的中-深湖相烃源岩为最优,其次为滨浅湖-沼泽相。随着裂陷作用的逐

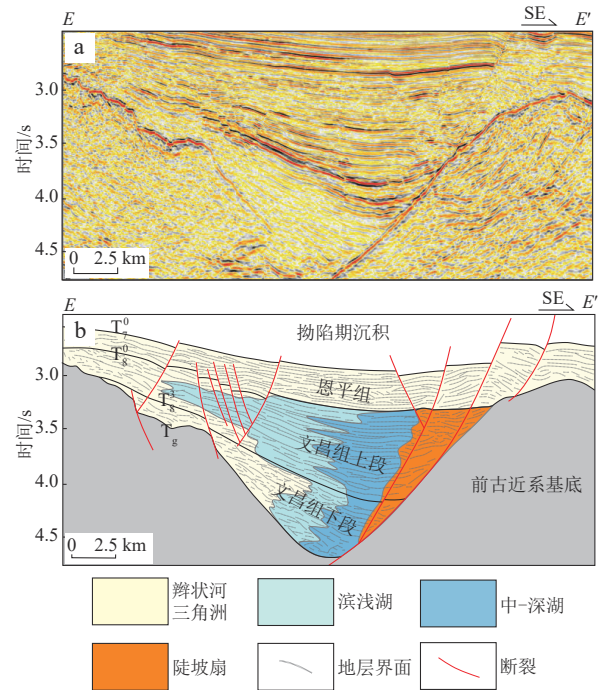


图8 番禺27洼裂陷期过物源方向地震剖面(a)与沉积结构剖面(b)(剖面位置见图7)

Fig. 8 Seismic section (a) and sedimentary architecture section (b) of Panyu 27 Sag across provenance during rifting period (See Fig. 7 for the position of seismic line)

渐减弱,湖盆变浅,烃源岩发育条件逐渐变差^[10]。西次洼在文昌组下段沉积时期由南部控洼断裂向北依次发育陡坡扇沉积、中-深湖沉积、滨浅湖沉积及辫状河三角洲沉积,文昌组上段沉积时期同样发育这4类沉积,但普遍沉积范围较文昌组下段沉积时期大,尤其是中-深湖、滨浅湖沉积基本相当于文昌组下段沉积时期的两倍左右,同时受水体变化的影响具有波动旋回沉积的特征,恩平组时期则主要为辫状河三角洲沉积。由此可知西次洼在文昌组上段沉积时期,也即裂陷中期,具有较好的烃源岩发育条件(图8)。

整体来看,洼陷西北部轴向缓坡是湖盆主物源输入区,其次是北部缓坡区。西次洼长期作为沉积中心,是优质烃源岩发育的有利部位。裂陷中期发育大型半地堑式湖盆,并伴有较强的岩浆活动,是优质烃源岩发育的最有利时期。裂陷中期至裂陷晚期西北部大型源-汇沉积体系的长期发育为古近系大型储集体的形成提供了有利条件。

4 结论

1) 裂陷期三幕控洼断裂的发育具有显著的分段差异性。受基底先存中生代残留NE走向逆冲断裂、

NW走向转换断裂的约束,新生代右旋伸展区域应力场下,裂陷早期发育NE和NW两组控洼断裂。裂陷中期,南部岩浆强烈底侵,早期控洼断裂系统被改造,形成近WE向展布的雁列式断层。裂陷晚期,断裂继承性发育,但活动性显著减弱。

2) 对控洼断裂系统及洼陷结构样式的研究表明,番禺27洼的发育和演化具有“先存构造约束、右旋伸展主控、岩浆底侵改造”三元耦合成因,控制了三幕裂陷阶段“左阶不对称地堑-左行雁列式半地堑-萎缩期宽缓半地堑”的结构样式。

3) 裂陷期三幕控洼断裂差异活化影响沉积中心变迁,洼陷结构差异演化影响洼陷沉积充填格局。随着裂陷期的减弱,沉积中心逐渐由东向西迁移,依次为西/东次洼—西/中次洼—西次洼。源-汇沉积体系在裂陷早期以NW轴向和中部转换带沉积体系为主,裂陷中期至裂陷晚期逐渐向北部缓坡大型沉积体系和西部长轴优势沉积体系转换。

4) 裂陷中期发育大型半地堑式湖盆,并伴有较强的岩浆活动,是优质烃源岩发育的最有利时期。裂陷中期至裂陷晚期西北部大型源-汇沉积体系的长期发育为古近系大型储集体的形成提供了有利条件。

参 考 文 献

- [1] 陶文芳,李洪博,郑金云,等. 南海北部陆缘超深水区域四拗陷地质结构及其对烃源岩发育的控制[J]. 海洋地质前沿, 2023, 39(1): 40-48.
TAO Wenfang, LI Hongbo, ZHENG Jinyun, et al. Geological structure of Zhushi Depression in ultra-deep water area on the continental margin of the northern South China Sea and its control on the development of source rocks[J]. Marine Geology Frontiers, 2023, 39(1): 40-48.
- [2] 漆家福,杨桥. 陆内裂陷盆地构造动力学分析[J]. 地学前缘, 2012, 19(5): 19-26.
QI Jiafu, YANG Qiao. Dynamic analysis of continental rifting basin[J]. Earth Science Frontiers, 2012, 19(5): 19-26.
- [3] 邓棚. 南海北部陆缘古近纪多幕裂陷作用属性及转换——以珠江口盆地珠一坳陷为例[D]. 武汉: 中国地质大学, 2018.
DENG Peng. The nature and tectonic transition of the multiphase rifting in the northern margin of the South China sea: Based on the study of the Zhu I Depression in Pearl River Mouth Basin [D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2018.
- [4] 蒙启安,朱德丰,陈均亮,等. 陆内裂陷盆地的复式断陷结构类型及其油气地质意义: 以海-塔盆地早白垩世盆地为例[J]. 地学前缘, 2012, 19(5): 76-85.
MENG Qi'an, ZHU Defeng, CHEN Junliang, et al. Styles of complex faulted sags in rifting basin and its significance for petroleum geology: An example from Hailar-Tamsag Early Cretaceous Basin[J]. Earth Science Frontiers, 2012, 19(5): 76-85.
- [5] 张威,李磊,邱欣卫,等. A/S对断陷湖盆三角洲时空演化的控制及数值模拟: 以珠江口盆地陆丰22洼古近系文昌组为例[J]. 岩性油气藏, 2022, 34(3): 131-141.
ZHANG Wei, LI Lei, QIU Xinwei, et al. A/S control on spatio-temporal evolution of deltas in rifted lacustrine basin and its numerical simulation: A case study of Paleogene Wenchang Formation in Lufeng 22 subsag, Pearl River Mouth Basin[J]. Lithologic Reservoirs, 2022, 34(3): 131-141.
- [6] 刘海伦,梅廉夫,施和生,等. 珠江口盆地珠一坳陷裂陷结构: 基底属性与区域应力联合制约[J/OL]. 地球科学: 1-17 [2023-03-30]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1874.P.20180302.0859.010.html>.
LIU Hailun, MEI Lianfu, SHI Hesheng, et al. Rift style controlled by basement attribute and regional stress in Zhu I Depression, Pearl River Mouth Basin[J/OL]. Earth Science: 1-17 [2023-03-30]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1874.P.20180302.0859.010.html>.
- [7] SUN Weidong, DING Xing, HU Yanhua, et al. The golden transformation of the Cretaceous plate subduction in the west Pacific[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2007, 262 (3/4): 533-542.
- [8] COPLEY A, AVOUAC J P, ROYER J Y. India-Asia collision and the Cenozoic slowdown of the Indian plate: Implications for the forces driving plate motions [J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2010, 115(B3): B03410.
- [9] 赵淑娟,吴时国,施和生,等. 南海北部东沙运动的构造特征及动力学机制探讨[J]. 地球物理学进展, 2012, 27(3): 1008-1019.
ZHAO Shujuan, WU Shiguo, SHI Hesheng, et al. Structures and dynamic mechanism related to the Dongsha movement at the northern margin of South China Sea[J]. Progress in Geophysics, 2012, 27(3): 1008-1019.
- [10] 和子琛,刘豪,林鹤鸣,等. 断陷湖盆坡折带-古沟谷对沉积的控制作用——以珠江口盆地海丰33洼陷古近系文昌组为例[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(2): 441-451.
HE Zichen, LIU Hao, LIN Heming, et al. Controlling effect of slope-break zone and paleovalley on sedimentation in rifted lake basins: A case study of the Paleogene Wenchang Formation in Haifeng 33 Subsag, Pearl River Mouth Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(2): 441-451.
- [11] 涂乙,闫正和,戴建文,等. 中国南海珠江口盆地西江油田运聚再生油藏模式创新认识与挖潜效果[J]. 石油与天然气地质, 2021, 42(2): 522-532.
TU Yi, YAN Zhenghe, DAI Jianwen, et al. New understanding and tapping effect of remaining oil reservoirs in Xijiang oilfield, PRBM, South China Sea[J]. Oil & Gas Geology, 2021, 42(2): 522-532.

- [12] 朱红涛, 朱筱敏, 刘强虎, 等. 层序地层学与源-汇系统理论内在关联性与其差异性[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(4): 763-776.
- ZHU Hongtao, ZHU Xiaomin, LIU Qianghu, et al. Sequence stratigraphy and source-to-sink system: Connections and distinctions [J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(4): 763-776.
- [13] 施和生, 高阳东, 刘军, 等. 珠江口盆地惠州26洼“源-汇-聚”特征与惠州26-6大油气田发现启示[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(4): 777-791.
- SHI Hesheng, GAO Yangdong, LIU Jun, et al. Characteristics of hydrocarbon source-migration-accumulation in Huizhou 26 Sag and implications of the major Huizhou 26-6 discovery in Pearl River Mouth Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(4): 777-791.
- [14] 李康, 单玄龙, 郝国丽, 等. 珠江口盆地西江凹陷裂陷期构造转换及其对沉积的意义[J/OL]. 吉林大学学报(地球科学版): 1-17 [2023-03-30]. <https://doi.org/10.13278/j.cnki.jjuese.20220248>.
- LI Kang, SHAN Xuanlong, HAO Guoli, et al. Tectonic transformation of Xijiang sag during rifting and its significance to sedimentation in Pearl River Mouth Basin [J/OL]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition): 1-17 [2023-03-30]. <https://doi.org/10.13278/j.cnki.jjuese.20220248>.
- [15] 沈梦蓉, 单玄龙, 郝国丽, 等. 珠江口盆地阳江东凹早新生代洼陷结构差异及其控制机制分析[J/OL]. 地球科学: 1-23 [2023-03-30]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1874.P.20220414.1133.022.html>.
- SHEN Mengrong, SHAN Xuanlong, HAO Guoli, et al. Structural difference and control mechanism of early Cenozoic depression in Yangjiang east sag, Pearl River Mouth Basin [J/OL]. Earth Science: 1-23 [2023-03-30]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1874.P.20220414.1133.022.html>.
- [16] 周蒂, 孙珍, 陈汉宗, 等. 南海及其围区中生代岩相古地理和构造演化[J]. 地学前缘, 2005, 12(3): 204-218.
- ZHOU Di, SUN Zhen, CHEN Hanzong, et al. Mesozoic lithofacies, paleo-geography, and tectonic evolution of the South China Sea and surrounding areas [J]. Earth Science Frontiers, 2005, 12(3): 204-218.
- [17] 张素芳, 张向涛, 张青林, 等. 南海北部白垩系发育特征及构造意义[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2015, 35(6): 81-86.
- ZHANG Sufang, ZHANG Xiangtao, ZHANG Qinglin, et al. Characteristics of the Cretaceous in the northern South China Sea and tectonic implications [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2015, 35(6): 81-86.
- [18] 吴婷婷, 张丽丽, 吴哲, 等. 珠江口盆地前新生代先存断裂特征及动力背景——以惠州凹陷和番禺4洼为例[J]. 海洋地质前沿, 2022, 38(6): 54-62.
- WU Tingting, ZHANG Lili, WU Zhe, et al. Characteristics and dynamic background of pre-existing fractures in pre-Cenozoic of Pearl River Mouth Basin: Cases of Huizhou Sag and Panyu 4 Depression [J]. Marine Geology Frontiers, 2022, 38(6): 54-62.
- [19] 程燕君, 吴智平, 张杰, 等. 西江凹陷早新生代断裂演化及其对南海北缘应力场顺时针旋转的响应[J]. 地球科学, 2020, 45(6): 2199-2209.
- CHENG Yanjun, WU Zhiping, ZHANG Jie, et al. Early Cenozoic evolution of fault system in Xijiang Sag and its implication to clockwise rotation of extension stress in northern margin of South China Sea [J]. Earth Science, 2020, 45(6): 2199-2209.
- [20] 赵勇, 戴俊生. 应用落差分析研究生长断层[J]. 石油勘探与开发, 2003, 30(3): 13-15.
- ZHAO Yong, DAI Junsheng. Identification of growth fault by fault fall analysis [J]. Petroleum Exploration and Development, 2003, 30(3): 13-15.
- [21] 陈刚, 戴俊生, 叶兴树, 等. 生长指数与断层落差的对比研究[J]. 西南石油大学学报, 2007, 29(3): 20-23.
- CHEN Gang, DAI Junsheng, YE Xingshu, et al. A comparison of the fault growth index with fault throw [J]. Journal of Southwest Petroleum University, 2007, 29(3): 20-23.
- [22] 胡阳. 珠江口盆地珠一坳陷新生代盆地结构与成因演化[J]. 高校地质学报, 2019, 25(1): 81-92.
- HU Yang. Basin structure and genetic evolution of the Zhu 1 Depression, during the Cenozoic, Pearl River Mouth Basin, South China [J]. Geological Journal of China Universities, 2019, 25(1): 81-92.
- [23] 陈汉宗, 吴湘杰, 周蒂, 等. 珠江口盆地中生代主要断裂特征和动力背景分析[J]. 热带海洋学报, 2005, 24(2): 52-61.
- CHEN Hanzong, WU Xiangjie, ZHOU Di, et al. Meso-Cenozoic faults in Zhujiang River Mouth Basin and their geodynamic background [J]. Journal of Tropical Oceanography, 2005, 24(2): 52-61.
- [24] ZHOU Di, YAO Bochu. Tectonics and sedimentary basins of the South China Sea: Challenges and progresses [J]. Journal of Earth Science, 2009, 20(1): 1-12.
- [25] 孙晓猛, 张旭庆, 张功成, 等. 南海北部新生代盆地基底结构及构造属性[J]. 中国科学(地球科学), 2014, 44(6): 1312-1323.
- SUN Xiaomeng, ZHANG Xuqing, ZHANG Gongcheng, et al. Texture and tectonic attribute of Cenozoic basin basement in the northern South China Sea [J]. Scientia Sinica (Terrae), 2014, 44(6): 1312-1323.
- [26] 叶青. 南海北部陆缘晚中生代构造体系: 动力学以及对珠江口盆地新生代构造的制约[D]. 武汉: 中国地质大学, 2019.
- YE Qing. The Late Mesozoic structure systems in the northern South China Sea margin: Geodynamics and their influence on the Cenozoic structures in the Pearl River Mouth Basin [D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2019.
- [27] 鲁宝亮, 王璞珺, 张功成, 等. 南海区域断裂特征及其基底构造格局[J]. 地球物理学进展, 2015, 30(4): 1544-1553.

- LU Baoliang, WANG Pujun, ZHANG Gongcheng, et al. Characteristic of regional fractures in South China Sea and its basement tectonic framework [J]. *Progress in Geophysics*, 2015, 30(4): 1544–1553.
- [28] 李平鲁, 王维平, 贺亚纯, 等. 珠江口盆地断裂构造及盆地演化 [R]. 广州: 中国海洋石油总公司南海东部公司, 1986: 7–24.
- LI Pinglu, WANG Weiping, HE Yachun, et al. Fault structure and basin evolution of the Pearl River Mouth Basin [R]. Guangzhou: China National Offshore Oil Corporation Nanhai East Company, 1986: 7–24.
- [29] 张向涛, 张振波, 张青林, 等. 南海北部中生界残留盆地特征及油气潜力 [R]. 深圳: 中海石油(中国)有限公司深圳分公司, 2015: 238–241.
- ZHANG Xiangtao, ZHANG Zhenbo, ZHANG Qinglin, et al. Characteristics and oil and gas potential of Mesozoic residual basins in the northern South China Sea [R]. Shenzhen: Shenzhen Branch of China National Offshore Oil (China) Co., Ltd, 2015: 238–241.
- [30] 庞雄, 袁立忠, 郑金云, 等. 南海东北部超深水洋陆转换带盆地形成与演化 [R]. 深圳: 中海石油(中国)有限公司深圳分公司, 2015: 25–26.
- PANG Xiong, YUAN Lizhong, ZHENG Jinyun, et al. Formation and evolution of ocean land transition zone basins in the ultra deep water area of the northeastern South China Sea [R]. Shenzhen: Shenzhen Branch of China National Offshore Oil (China) Co., Ltd, 2015: 25–26.
- [31] MORLEY C K, HARANYA C, PHOOSONGSEE W, et al. Activation of rift oblique and rift parallel pre-existing fabrics during extension and their effect on deformation style: examples from the rifts of Thailand [J]. *Journal of Structural Geology*, 2004, 26(10): 1803–1829.
- [32] 童亨茂, 蔡东升, 吴永平, 等. 非均匀变形域中先存构造活动性的判定 [J]. *中国科学(地球科学)*, 2011, 41(2): 158–168.
- TONG Hengmao, CAI Dongsheng, WU Yongping, et al. Activity criterion of pre-existing fabrics in non-homogeneous deformation domain [J]. *Scientia Sinica(Terrae)*, 2011, 41(2): 158–168.
- [33] 庞雄, 郑金云, 梅廉夫, 等. 先存俯冲陆缘背景下南海北部陆缘断陷特征及成因 [J]. *石油勘探与开发*, 2021, 48(5): 1069–1080.
- PANG Xiong, ZHENG Jinyun, MEI Lianfu, et al. Characteristics and origin of continental marginal fault depressions under the background of preexisting subduction continental margin, northern South China Sea, China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2021, 48(5): 1069–1080.
- [34] TONG Hengmao, KOYI H, HUANG S, et al. The effect of multiple pre-existing weaknesses on formation and evolution of faults in extended sandbox models [J]. *Tectonophysics*, 2014, 626: 197–212.
- [35] HOLDSWORTH R E, STEWART M, IMBER J, et al. The structure and rheological evolution of reactivated continental fault zones: A review and case study [M]//MILLER J A, HOLDSWORTH R E, BUICK I S, et al. *Continental Reactivation and Reworking*. London: Geological Society of London, 2001: 115–137.
- [36] CORTI G. Evolution and characteristics of continental rifting: Analog modeling-inspired view and comparison with examples from the East African Rift System [J]. *Tectonophysics*, 2012, 522/523: 1–33.
- [37] FENG Xiaojun, AMPONSAH P O, MARTIN R, et al. 3-D numerical modelling of the influence of pre-existing faults and boundary conditions on the distribution of deformation: Example of North-Western Ghana [J]. *Precambrian Research*, 2016, 274: 161–179.
- [38] BONINI L, BASILI R, TOSCANI G, et al. The effects of pre-existing discontinuities on the surface expression of normal faults: Insights from wet-clay analog modeling [J]. *Tectonophysics*, 2016, 684: 157–175.
- [39] 周建勋, 周建生. 渤海湾盆地新生代构造变形机制: 物理模拟和讨论 [J]. *中国科学. D辑: 地球科学*, 2006, 36(6): 507–519.
- ZHOU Jianxun, ZHOU Jiansheng. The mechanism of Cenozoic tectonic deformation in the Bohai Bay Basin: Physical simulation and discussion [J]. *Scientia Sinica (Terrae)*, 2006, 36(6): 507–519.
- [40] FAZLIKHANI H, FOSSEN H, GAWTHORPE R L, et al. Basement structure and its influence on the structural configuration of the northern North Sea rift [J]. *Tectonics*, 2017, 36(6): 1151–1177.
- [41] TAYLOR B, HAYES D E. Origin and history of the South China Sea Basin [M]//HAYES D E. *The Tectonic and Geologic Evolution of Southeast Asian Seas and Islands: Part 2*. Washington, D. C.: The American Geophysical Union, 1983: 23–56.
- [42] 于福生, 汪旭东, 邱欣卫, 等. 珠江口盆地陆丰凹陷断裂构造特征及“人”字型构造成因 [J]. *石油学报*, 2019, 40(S1): 166–177.
- YU Fusheng, WANG Xudong, QIU Xinwei, et al. Characteristics of fault structure and the genesis of herringbone structure in Lufeng Sag, Pearl River Mouth Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2019, 40(S1): 166–177.

(编辑 张亚雄)