

珠江口盆地白云凹陷西区始新世张裂-拆离作用下 沉积转换及源-汇响应

刘军^{1,2}, 彭光荣^{1,2}, 郑金云^{1,2}, 蔡嵩^{1,2}, 朱定伟^{1,2}, 王梓颐^{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:珠江口盆地始新世裂陷期盆地呈隆-坳相间格局, 陆缘深水区脆性张裂作用向韧性拆离作用的转变多表现为洼陷由深变浅和沉积中心的迁移。目前针对张裂-拆离裂陷转换过程中洼陷内沉积响应的研究还比较少, 制约了沉积体分布的预测。基于珠江口盆地白云凹陷西区钻井与全覆盖三维地震数据, 恢复始新世张裂期与拆离期沉积古地貌。研究结果表明:①张裂期窄深湖盆发育多沉积中心, 拆离期宽缓湖盆水体连片、向拆离中心区汇聚;②联合井-震格架与地震构型标定, 认为白云凹陷西区张裂期受先存断块的调控作用而出现了短轴物源供给, 发育了扇三角洲-半深湖-辫状河三角洲(扇辫)沉积体系, 而拆离期地壳韧性隆升导致整体地形坡度减缓($<10^\circ$), 水深变浅、高能水体范围扩大, 出现隆升带长轴供源体系, 沿低隆带广泛发育辫状河三角洲-滩坝(滩扇)沉积体系;③番禺低隆源区流域分区参数耦合揭示张裂-拆离转换过程中滩扇沉积体系供给效率提高、砂质含量增加, 与韧性隆升对应的长轴区所发育的沉积体系可形成有利的源-储配置关系。

关键词:张裂-拆离转换; 沉积地貌恢复; 源-汇系统; 始新世; 白云凹陷; 珠江口盆地

中图分类号:TE121.2

文献标识码:A

Sedimentary transformation and source-to-sink response to the Eocene rifting-detachment in the western Baiyun Sag, Pearl River Mouth Basin

LIU Jun^{1,2}, PENG Guangrong^{1,2}, ZHENG Jinyun^{1,2}, CAI Song^{1,2}, ZHU Dingwei^{1,2}, WANG Ziyi^{1,2}

(1. Shenzhen Branch of CNOOC, Shenzhen, Guangdong 518000, China; 2. Deepwater Development Ltd., CNOOC, Shenzhen, Guangdong 518000, China)

Abstract: During the Eocene rifting period, the Pearl River Mouth Basin (PRMB) was in an alternating pattern of uplift and depression. The transition of tectonic activity from brittle rifting to ductile detachment in the deep water area of the continental margin is mostly manifested as the change of sag from deep to shallow and the migration of depositional center. However, the lack of discussion on the sedimentary responses in the depression has restricted the prediction of the distribution of sedimentary bodies formed in the process of transition. The study serves to restore the sedimentary palaeogeomorphology during the Eocene rifting and detachment periods based on the drilling and 3D seismic data of full coverage in the western Baiyun Sag, PRMB. The results are shown as follows. First, during the rifting period, the lacustrine basins were narrow and deep, generally with multiple depositional centers developed, while during the detachment period, the lacustrine basins were wide and gentle, with water converging toward the detachment center. Second, combined with well-tied seismic interpretation of depositional framework and seismic calibration of depositional configuration, it is believed that minor-axis provenances existed in the western Baiyun Sag due to the control of pre-existing fault blocks, leading to the development of fan delta, semi-deep lake and braided river delta (fan/braid) depositional systems during the rifting period; while during the detachment period, as a result of ductile uplifting, the overall terrain slope got lowered ($<10^\circ$), the water body got shallowed and the range of high-energy water body expanded. Major-axis provenances appeared in the uplifted zone, and braided river delta-beach bar (beach/fan) depositional systems were widely developed within the structural lows. Third, the coupling of drainage zoning

收稿日期:2023-01-17;修订日期:2023-03-15。

第一作者简介:刘军(1973—),男,高级工程师,油气勘探。E-mail: liujun1@cnooc.com.cn。

parameters in Panyu low uplift area reveals that the sediment supply efficiency of beach/fan sedimentary systems was high, with an increasing proportion of sand in the sediments, and the sedimentary system developed in the major-axis direction of the ductile uplift zone can form a favorable source-reservoir configuration.

Key words: rifting-detachment transformation, sedimentary landform restoration, source-to-sink system, Eocene, Baiyun Sag, Pearl River Mouth Basin (PRMB)

引用格式: 刘军, 彭光荣, 郑金云, 等. 珠江口盆地白云凹陷西区始新世张裂-拆离作用下沉积转换及源-汇响应[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(3): 600-612. DOI: 10. 11743/ogg20230306.

LIU Jun, PENG Guangrong, ZHENG Jinyun, et al. Sedimentary transformation and source-to-sink response to the Eocene rifting-detachment in the western Baiyun Sag, Pearl River Mouth Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(3): 600-612. DOI: 10. 11743/ogg20230306.

珠江口盆地位于南海北部陆缘, 在陆缘伸展减薄的过程中发育多种类型的拆离断陷^[1-2], 其中白云凹陷是珠江口盆地中面积最大、新生代地层发育最全的深凹陷。随着三维地震资料的大面积覆盖、地震成像品质的提高和勘探程度的深化, 白云凹陷可清晰地识别延伸至莫霍面的系列北倾低角度正断层, 认为是始新世受南海北部陆缘地壳伸展拆离薄化模式控制的大型低角度拆离裂陷结构^[3-7]; 与此同时, 白云凹陷西侧的开平凹陷同样识别出大型NEE走向的南倾边界拆离断层——神开断层, 水平位移量可达数十千米, 几乎横穿整个开平凹陷, 同期发育变质核杂岩^[8], 构成了与白云凹陷北倾拆离体系相对的南倾拆离体系^[9-10]。空间上, 白云凹陷系列北倾拆离体系与开平凹陷单一南倾拆离体系汇聚于白云凹陷西侧——白云西区。然而, 当前关于陆缘深水区裂陷转换, 尤其是拆离体系转换研究多侧重结构成因探讨, 以断裂样式、活动性分析为主, 而对从初始张裂至拆离转换过程中沉积响应的解剖相对薄弱, 这也制约了深水区裂陷期有利储集体分布的预测^[11-14]。

白云西区是白云凹陷和开平凹陷之间的过渡区域, 包含白云3洼和番禺25洼两个次级洼陷, 在古近系文昌期分别受白云主洼北倾壳幔拆离体系和开平凹陷南倾壳间拆离体系的作用^[15-17], 同时, 早、晚文昌期构造转换过程中地壳韧性隆升持续进行, 并伴随断裂差异活动、岩浆作用及沉积迁移响应等地质作用, 导致洼陷结构及其沉积充填过程复杂。本研究基于全覆盖三维地震资料和关键井位的约束, 恢复始新世张裂期与拆离期沉积古地貌, 井-震联合厘定张裂至拆离过程中沉积体系及源-汇耦合响应关系, 预测有利储集体的分布, 揭示拆离体系下的沉积响应关系。

1 区域概况

珠江口盆地是发育在南海北部陆缘由陆向海逐

渐减薄的地壳岩石圈之上的大型新生代裂陷盆地, 盆地整体走向为NE-SW向, 在中生代基底内可识别出NE-NEE和NW-NWW走向的两组走滑断裂, 其中NE-NEE向断裂被认为是受控于古太平洋板块NW向俯冲作用, 在燕山期持续发育; NW-NWW向断裂与古太平洋俯冲方向转变形成的左行压扭应力场有关, 发育于晚白垩世构造转换期(图1a)^[18-20]。珠二坳陷位于珠江口盆地深水区, 古新世以隆升剥蚀为主, 早始新世因华南板块挤出而开始广泛发育箕状断陷。白云凹陷是珠二坳陷中面积、厚度最大的凹陷, 白云西区位于白云凹陷和开平凹陷之间(面积约3 570 km²), 由白云3洼、番禺25洼两个负向构造单元和番禺25低凸起、白云1-1凸起两个正向构造单元组成, 研究区北接番禺低隆起, 西邻神狐隆起, 南连云开低凸起, 东连白云主洼(图1b)。白云3洼继承白云主洼南断北超构造格局, 其中洼陷南部由近WE向边界断层控制, 番禺25洼呈NE向展布, 受多条NEE向南倾边界断层控制^[21-22]。

新生代以来, 珠江口盆地经历了裂陷、坳陷以及构造活化三大阶段, 沉积地层自下而上依次发育神狐组、文昌组、恩平组、珠海组、珠江组、粤海组、万山组和第四系地层(图1c)^[23-24]。本研究以白云西区始新统文昌组为目的层段, 整体处于裂陷期, 其中早、晚文昌期间存在一个因惠州运动而形成的区域不整合面T₈³, 界面上、下表现为裂陷作用的南、北转变和沿断裂走向的迁移、基底隆升、岩浆底辟及地层剥蚀等^[25], 且珠二坳陷集中表现为张裂作用向韧性隆升改造成因的拆离作用转换。白云西区早文昌期(主张裂期)在活化的NE-NEE向先存断裂和NEE向生长断裂控制下发育由盆缘隆起供给的盆内近源沉积体系^[26-27]; 晚文昌期(主拆离期)韧性地壳差异隆升, 地层掀斜、剥蚀, 先存断裂控制作用减弱, 边界断裂活动性递减并顺拆离断面向洼陷中心迁移^[8]。在张裂-拆离作用框架下, 沉积体系恢复关键在于厘清其沉积地貌格

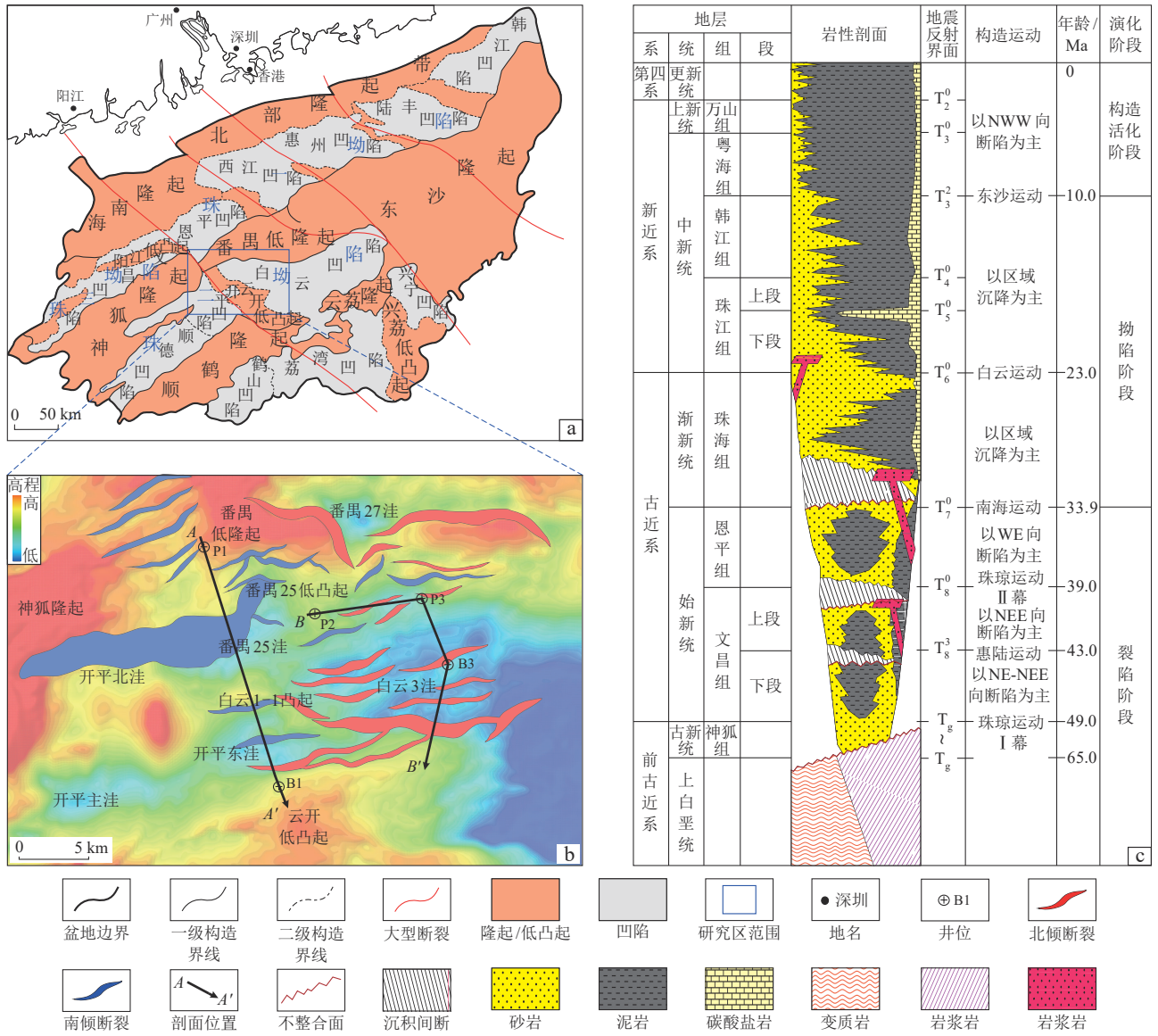


图1 珠江口盆地白云凹陷西区构造位置(a)、构造纲要(b)及地层综合柱状图(c)
Fig. 1 Structural location map (a), outline map (b) and composite stratigraphic column (c) of the western Baiyun Sag, PRMB

局,进而解析张裂期-拆离期沉积响应特征。

2 张裂期-拆离期沉积地貌恢复及转换特征

地貌是构造、气候、生物活动以及剥蚀-沉积共同作用的结果,其记录摹刻不同时期的作用过程,是沉积学研究的载体。相比于地表地貌系统,深埋于地下的古地貌由于受到后生作用改造往往已“面目全非”,因此需要追本溯源,还原其沉积时期的真实地形地貌。

2.1 古地貌恢复方法

传统的沉积地貌恢复方法主要有残厚法、印模法

和沉积学法等,在此基础上人们又提出了高分辨率层序地层学法、回剥与填平补齐法和构造沉积模拟法等适用于不同沉积背景下的古地貌恢复方法^[28-31]。其中回剥和填平补齐法在珠江口盆地更为适用,它是基于物质守恒原则的沉积体体积回剥,但前人的研究忽略了差异压实对于体量的影响^[32],因而难以准确反应沉积区的地形起伏,因此这里针对沉积区进行去压实恢复。

盆地沉积和埋藏过程中,沉积物成层性堆叠,受到上覆地层压实,导致岩层孔隙度与沉积时存在差异,这使得残余地层厚度一般远小于沉积时的厚度,因此只有通过统计差异减孔率实现压实倍数的计算,进而恢复最初的沉积厚度,才能真实反映沉积可容空间。实

际的研究过程中,依据正常压实模型,拟合压实系数与地层埋深间的函数关系,并依据这种关系计算出地层原始沉积厚度,从而恢复沉积古地貌。白云西区古地貌重建采用的是岩石差异压实校正方法(图2)。

2.1.1 压实系数获取

压实系数的获取需要岩石颗粒的初始孔隙度和压实后孔隙度信息,通过公式(1)计算得到。

$$C_f = \frac{\Phi_0}{\Phi_0 - \Phi_n} \quad (1)$$

式中: C_f 为压实系数,无量纲; Φ_0 为初始孔隙度,%; Φ_n 为压实后孔隙度,%。

首先利用研究区岩石样品的粒径信息,通过分析粒度累积曲线得到初始孔隙度,然后根据岩石薄片信息统计及岩心孔、渗测试分析资料,获取压后孔隙度,进而计算压实系数。其中,初始孔隙度和压后孔隙度分别通过公式(2)和公式(3)来求取。

$$\Phi_0 = 20.91 + \frac{22.90}{S_0} \quad (2)$$

$$\Phi_n = \omega + \frac{\varphi_M(\varphi_1 + \varphi_2)}{\varphi_T} \quad (3)$$

式中: S_0 为特拉斯克分选系数,无量纲, $S_0 = \sqrt{\frac{d_{25\%}}{d_{75\%}}}$; $d_{25\%}$

和 $d_{75\%}$ 分别为粒度累积曲线上 25 % 和 75 % 处的粒径大小,mm; ω 为胶结物含量占比,%; φ_1 为残余粒间孔面孔率,%; φ_2 为胶结物晶间孔面孔率,%; φ_M 为砂岩孔隙度,%; φ_T 为总面孔率,%。

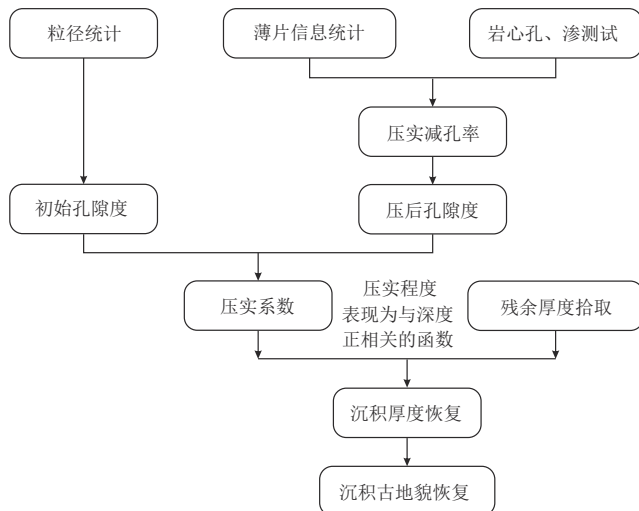


图2 珠江口盆地白云西区始新世沉积古地貌恢复流程

Fig. 2 Restoration process of the Eocene sedimentary palaeogeomorphology in the western Baiyun Sag, PRMB

2.1.2 关键界面构造等值线时-深转化

基于水深等值线分布图,将珠江口盆地白云西区关键地质界面的构造等时间线分布,转换为深度域,即构造等深度线分布。时-深转换公式为

$$D = 0.00030213T^2 + 0.71911363T + 45.38942435 \quad (4)$$

式中: D 为深度,m; T 为时间,ms。

2.1.3 压实系数-深度关系建立

利用2.1.1中获得的压实系数数据,与对应的深度数据做函数关系拟合,将压实程度与深度联系起来,二者之间满足关系式(5),具有很高的相关性, $R^2 = 0.9601$ 。

$$C_f = \frac{a}{1 + e^{-k(D-b)}} \quad (5)$$

式中: C_f 为压实系数,无量纲; $a = 4.58 \pm 0.25$; $b = 2227.71 \pm 178.62$; $k = 70.00 \times 10^{-5} \pm 7.49 \times 10^{-5}$ 。

2.1.4 原始沉积厚度去压实恢复

利用研究区关键地质界面的现今残余厚度等值线分布图,基于建立的压实系数和深度之间的函数关系,恢复出对应时期原始沉积厚度,利用软件进行相关立体化显示处理,即重建出某一关键地质时期的沉积古地貌。

2.2 张裂期-拆离期地貌特征及其转换

早文昌期白云西区处于脆性张裂阶段,对应珠江 I 幕运动,主应力方向为 NW-SE 向,断裂活动性强,形成大量分散的半地堑或复式半地堑,湖盆窄而深,呈现出多个沉积分隔中心,具隆-洼相间特征(图 3a)。基于沉积地貌恢复,可知该时期地貌坡度较陡,最大坡度达 75°,平均坡度 49°。其中,番禺 25 洼整体坡度较大,地貌陡,白云 3 洼整体坡度小,地貌较之番禺 25 洼缓。

白云西区晚文昌期内受控于岩石圈地壳的韧性隆升,发生强烈拆离作用,对应惠陆运动,主应力方向偏转至 NNW-SSE 向,窄深湖盆向宽浅湖盆转化,该时期沉积古地貌局部剥蚀夷平,早期多隆多洼的格局向洼陷连片转变,顺拆离断面发育继承性的沉积中心,且位于白云 3 洼构造单元内(图 3b)。地貌恢复指示该时期最大坡度为 51°,平均坡度 32°,且白云 1-1 凸起周缘韧性隆升改造地形坡度接近 10°,较早文昌期明显变缓。

对比恢复后的始新世张裂期与拆离期沉积古地

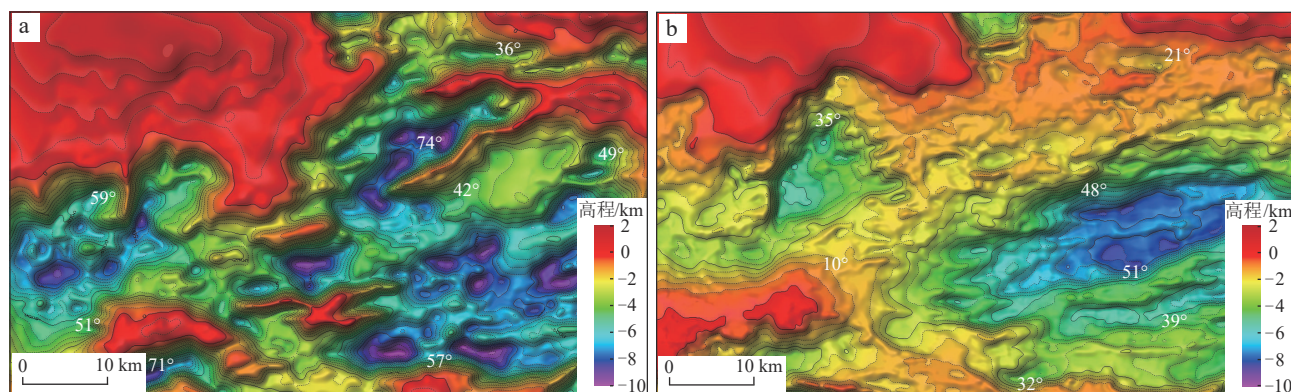


图3 珠江口盆地白云西区始新世张裂期-拆离期沉积古地貌转换特征

Fig. 3 Sedimentary paleogeomorphic transformation during the Eocene rifting (a) and detachment (b) periods in the western Baiyun Sag, PRMB

a. 文昌组下段(张裂期); b. 文昌组上段(拆离期)
(图中数字度数表示坡度。)

貌,关键转换体现为脆性张裂期先存断裂体系制约洼陷早期格局,洼内先存断块发育,强烈裂陷活动控制窄深湖盆形成多沉积中心面貌,具备多点分散供源特性;韧性拆离期,中、下地壳差异隆升与剥露,沉积地貌坡度变缓,宽缓湖盆水体连片,沿韧性隆升带侵没端近WE向发生轴向汇聚,沉积中心顺白云3洼内部拆离断裂向中央带迁移。张裂至拆离转换过程中沉积地貌显著变化,制约区内沉积体类型及分布。

3 张裂期-拆离期沉积格局及转换特征

陆相湖盆裂陷期沉积充填主要受控于构造活动,不同构造演化阶段沉积充填样式差异大。其中,张裂期以典型箕状断陷充填样式为主,洼陷陡坡带发育近岸扇三角洲,缓坡发育短轴辫状河三角洲,洼陷中心发育半深湖或重力流沉积;拆离期伴随韧性隆升,地貌坡度减缓、水体变浅,断裂陡坡带继承性发育扇三角洲,缓坡带短轴辫状河三角洲规模增大,中央隆升带(如白云1-1构造带)存在间断供源,在南北倾断裂限定下存在轴向供源作用。本文联合井震格架与地震构型解剖张裂期-拆离期沉积体系,厘定其转换特征。

3.1 张裂期古沉积格局

受控于珠琼一幕运动,白云西区形成系列北西向展布的互相割裂的深洼,由番禺25洼至开平东洼近NS向的过井地震格架剖面可见白云1-1凸起分隔番禺25洼与开平东洼(图4)。番禺25洼西北侧番禺低隆区流域面积大,沉积供给通量大,近源区断裂根部发育大套楔形杂乱反射,延伸距离远(6~10 km),类比邻

区开平凹陷,推测该套沉积体为近源扇三角洲沉积^[33],主要分布于番禺25洼,沉积较厚,呈过补偿充填,开平东洼仅少量展布。白云3洼内,过P2井至B3井的关键井-震格架剖面,清晰显示了洼陷内NE-SW向高角度活动断裂,以及伴随垂向张裂至拆离转换,洼陷内稳定低频强振幅连续反射相应的迁移变化(图5)。早文昌期张裂作用主控,南部北倾控边断裂调控近源沉积对接,因云开低凸起源区流域范围小,其对应的断裂根部楔形杂乱反射延伸距离近(3~5 km),前端与低频强振幅反射间存在相变,指示近源扇三角洲向稳定半深湖相转换;同时,该时期存在多个张裂中心,北部近番禺低隆区亦存在对应箕状断陷。

3.2 拆离期古沉积格局

区域应力与中生代先存NEE向断裂体系正交,断裂活化导致洼陷淤浅,早期分割的洼陷开始连片分布,沉积扇体延展范围呈扩大趋势(图4),该时期白云1-1凸起动态供源,沉积体在开平东洼由北向南展布,且伴随地形坡度变缓,白云1-1凸起区局部发育低幅丘状反射,指示浅水改造沉积作用,与邻近恩平凹陷恩平18-1构造相近,沿低隆发育滩坝沉积体^[34-36]。在此期间,拆离隆升作用使得拆离断裂向中央带汇聚,近源沉积地貌变缓,沉积砂体向低频强振幅反射所代表的洼陷沉积中心迁移,指示垂向上短轴扇三角洲向轴向辫状河三角洲转换,沉积水体由相对偏深的窄深湖向宽浅湖转换(图5)。

3.3 张裂期-拆离期构造-沉积结构响应

基于沉积古地貌格局,联合典型地震构型厘定张

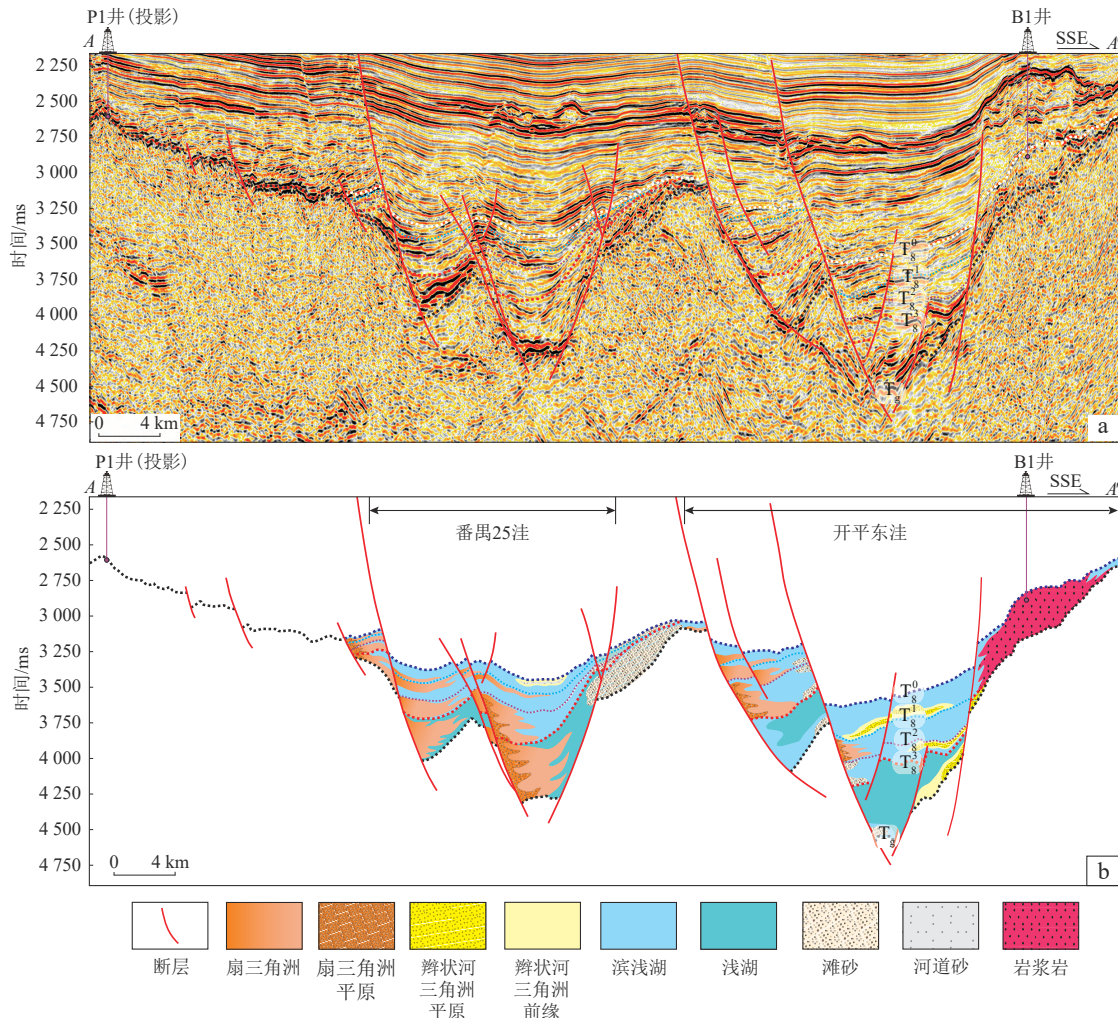


图4 珠江口盆地白云凹陷西区番禺25注SSE向过井格架剖面(剖面位置见图1b)

Fig. 4 SSE-trending well-tied framework profile in Panyu 25 subsag, western Baiyun Sag, PRMB (see Fig. 1b for the profile location)

a. 过井地震剖面;b. 地质解释剖面

裂期-拆离期结构特征(图6),对于沉积体性质及分布研究具重要指示意义。其中,张裂期先存断块普遍发育(图6a₁, a₂),存在分隔洼陷及间歇供源特征,在白云3注北坡的地貌恢复揭示存在北倾断块(图3a), NW-SE向地震剖面上可见断裂根部发育小型楔状杂乱反射,向次洼中央带过渡为席状强振幅反射(图6a₁),指示早文昌期小型箕状充填结构,且垂向上越过T₈³界面由早期高角度断裂控制的近源扇三角洲体系(图6a₂)向晚期-拆离期辫状河三角洲体系转化,洼陷深部由半深湖向滨浅湖转化。拆离期伴随韧性隆升,地形趋于平缓,轴向供源体系相对发育(图6b₁, b₂),在南倾与北倾交互区先存断块形成轴向限定性沟槽,约束沉积物沿EW向搬运汇聚,且地震剖面上可见多期次向白云3注中央带叠置迁移的叠瓦状前积反射(图6b₁),指示为限定性短轴辫状河三角洲沉积。

3.4 张裂期-拆离期沉积格局转换

基于井-震格架标定(图7),对比厘定白云西区始新世张裂期-拆离期沉积体系(图8)。早文昌脆性张裂阶段的特殊性在于发育系列先存断块,调节控制近源沉积体分布(图8a);晚文昌韧性拆离期的特殊性在于隆升断块轴向汇聚,调节改造浅湖沉积体(图8b)。

早文昌期番禺25注北侧对应为番禺低隆起区,强物源供给,断裂根部处于过补偿状态,发育受南倾控边断裂约束的裙带扇三角洲,洼陷内深湖-半深湖相对受限;南部白云1-1凸起局部出露并动态供源,向开平东注侧调节供给点状扇三角洲沉积(图8a)。于此同时,白云3注南侧对应为相对小流域的云开低凸起,弱物源供给,高角度断裂根部处于欠补偿状态,自南向北发育多级北倾半地堑结构,调节控制多个点

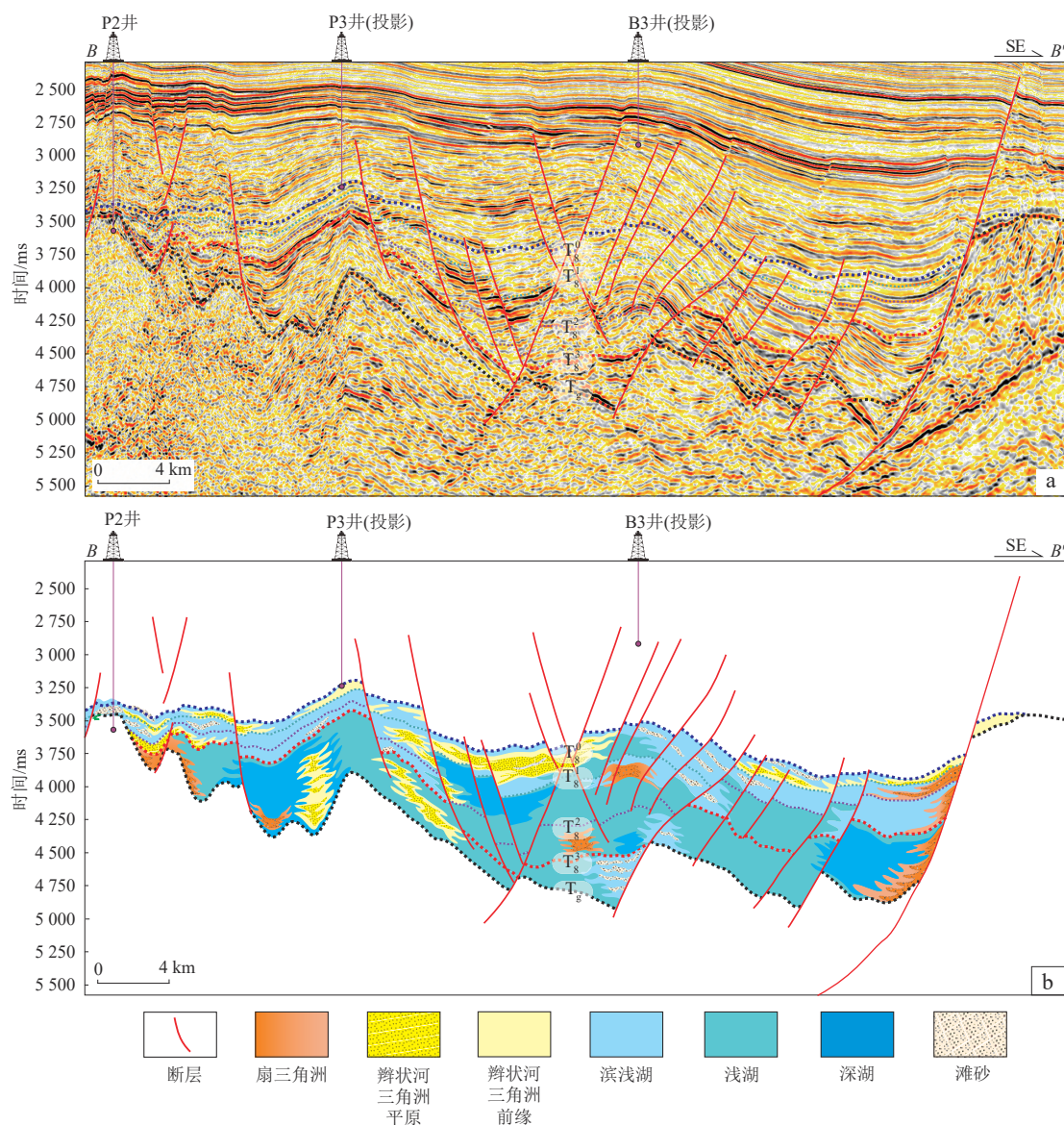


图5 珠江口盆地白云凹陷西区白云3洼近SE向过井格架剖面(剖面位置见图1b)

Fig. 5 Nearly SE-trending well-tied framework profile in Baiyun 3 subsag, western Baiyun Sag, PRMB (see Fig. 1b for the profile location)

a. 过井地震剖面; b. 地质解释剖面

状扇三角洲沉积物的注入与堆积, 北侧番禺低隆区顺斜坡沟道发育多支NE-SW向辫状河三角洲沉积, 且该时期半深湖相沿控边断裂根部发育, 浅湖相较为发育(图8a)。

晚文昌期伴随湖盆边界外扩, 番禺低隆区与云开低凸起源区范围相对减小, 坡度变缓, 洼内韧性隆升区内的白云1-1凸起隆升幅度增大(图3)。番禺25洼在番禺低隆起持续供源作用下, 仍处于过补偿状态, 因拆离作用使得控洼断裂角度变缓, 西北侧长轴辫状河三角洲相对发育; 白云1-1凸起伴随持续韧性隆升, 沿EW向发育限定性长轴辫状河三角洲沉积, 向白云3洼中央带汇聚(图8b)。同时, 白云3洼北侧因韧性隆升

作用供源增强, 辫状河三角洲规模增大, 洼陷内韧性隆升区, 水体相对偏浅, 具备发育滩坝砂的潜力, 该阶段滨浅湖普遍发育, 沉积体充填范围显著增大, 局部半深湖相(优势沉积中心)随拆离断裂向洼陷中央带汇聚(图8b)。

综合对比张裂期-拆离期沉积体系转换可知, 其差异性主要表现为如下5点: ①湖盆的显著外扩, 水体深度变浅; ②沉积中心在番禺25洼存在自西向东迁移, 白云3洼存在自南向北迁移特征; ③白云1-1凸起以及番禺25低凸起等受韧性隆升影响的洼内凸起供源能力显著增强, 对应的沉积扇体规模增大; ④沉积体优势展布方向由垂直断裂走向的NNW短轴方向转变

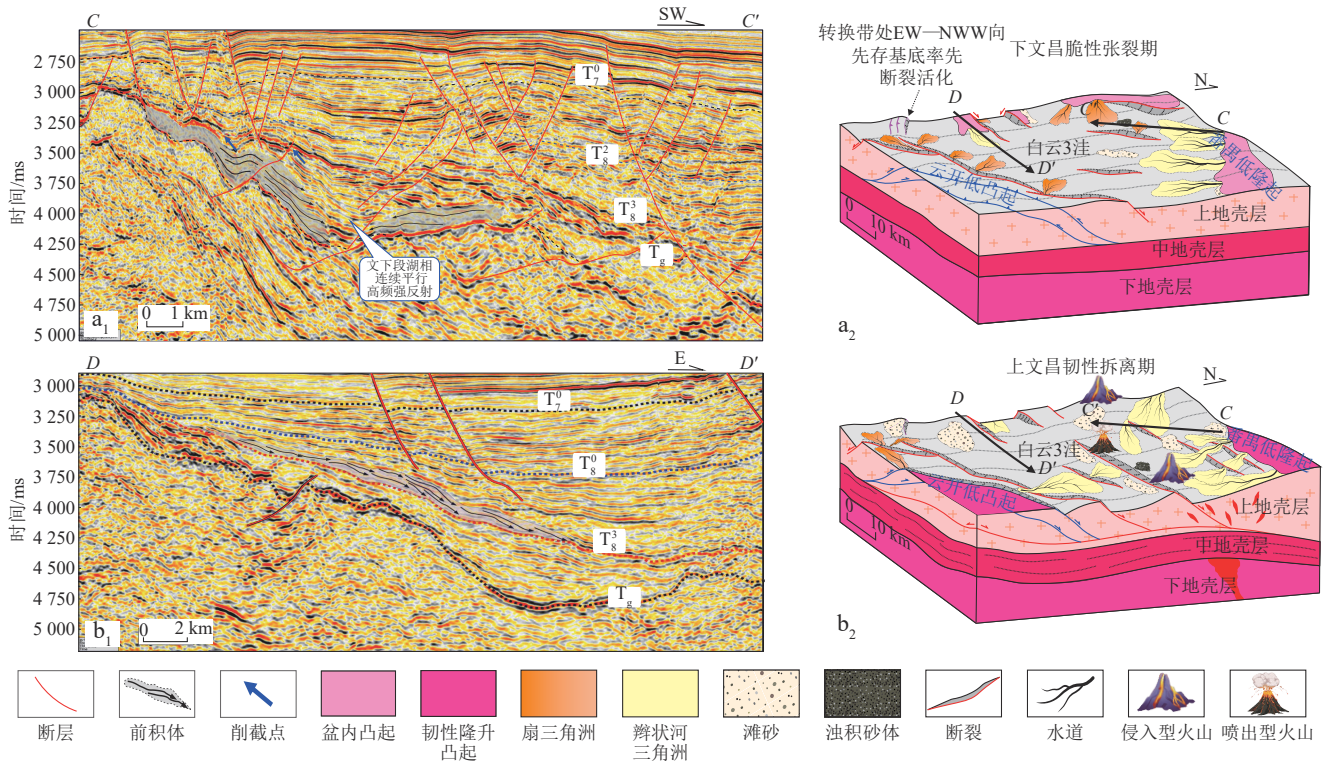


图6 珠江口盆地白云凹陷西区始新世张裂期(a₁, a₂)-拆离期(b₁, b₂)关键地震构型(a₁, b₁)及结构模型(a₂, b₂)

Fig. 6 The key seismic architecture (a₁, b₁) and structure models (a₂, b₂) of the Eocene rifting (a₁, a₂) and detachment (b₁, b₂) periods in the western Baiyun Sag, PRMB (see Fig. 1b for the profile location)

为受近WE向韧性隆升带和转换带处地堑联合约束的长轴方向;⑤沉积相组合由近源短轴扇三角洲-半深湖相转变为近源短轴扇三角洲相/相对长轴辫状河三角洲相交,并沿水下低隆起伴生轴向改造滩坝-滨浅湖相序列。

4 张裂期-拆离期源-汇响应

陆相断陷盆地中,源-汇系统分析思路已广泛用于探讨砂岩富集位置和预测有利储层分布^[37-39]。白云西区张裂期-拆离期沉积砂体受构造阶段、边界要素及充填环境等多方面因素影响,整体表现为张裂期的窄深湖点状粗粒扇辫体系转换至拆离期的宽浅湖片状中粗-滩扇体系(图8)。分别提取早、晚文昌期关键源-汇参数,如源区流域面积(A , km²)、集水高差(H , km)、供给质量(参照BQART模型,单位时间内的沉积物供给通量 Q , mt)与汇区沉积扇体体积(M , km³),综合构建沉积体与源区流域及供给效率间关系(图9)。

4.1 张裂期源-汇响应模型

早文昌期湖盆表现为窄且深的特点,源区多为短

轴多点供源,受统一张裂作用调控发育多级伸展断裂,具多个水深中心,整体地貌表现为隆-洼相间的窄深湖分隔地貌;沉积区在番禺低隆、番禺27低隆(局部番禺33低隆)、白云1-1凸起和云开低凸起集水流域差异供给下,形成近源粗粒沉积砂体,统计该时期沉积扇体体积 M 可知(图9a),在南、北双向多点供源作用下,沉积砂体总体表现为小-中型、厚点状、扇状分布,与对应源区关键参数及供给质量间多元函数关系式如下:

$$M = 7.62 \times 10^{-15} A - 1.70 \times 10^{-5} Q + 0.81e^{H-0.79} \quad (6)$$

公式(6)中,沉积体积与流域面积及集水高差呈正相关关系,早期供给效率受限于源区物质组成及气候风化等因素呈负相关关系。

4.2 拆离期源-汇响应模型

晚文昌期湖盆表现为宽且缓的特点,源区属长轴与短轴联合供源,在韧性拆离作用下形成北倾中央汇聚而南倾自西向东迁移的连通地貌;沉积区在番禺低隆、云开低凸起及隆升改造的番禺27低隆及白云1-1凸起联合作用下供源方向呈短轴向长轴转换,沉积砂体由相对近源粗粒向远源中-粗粒的中等、中-厚扇体

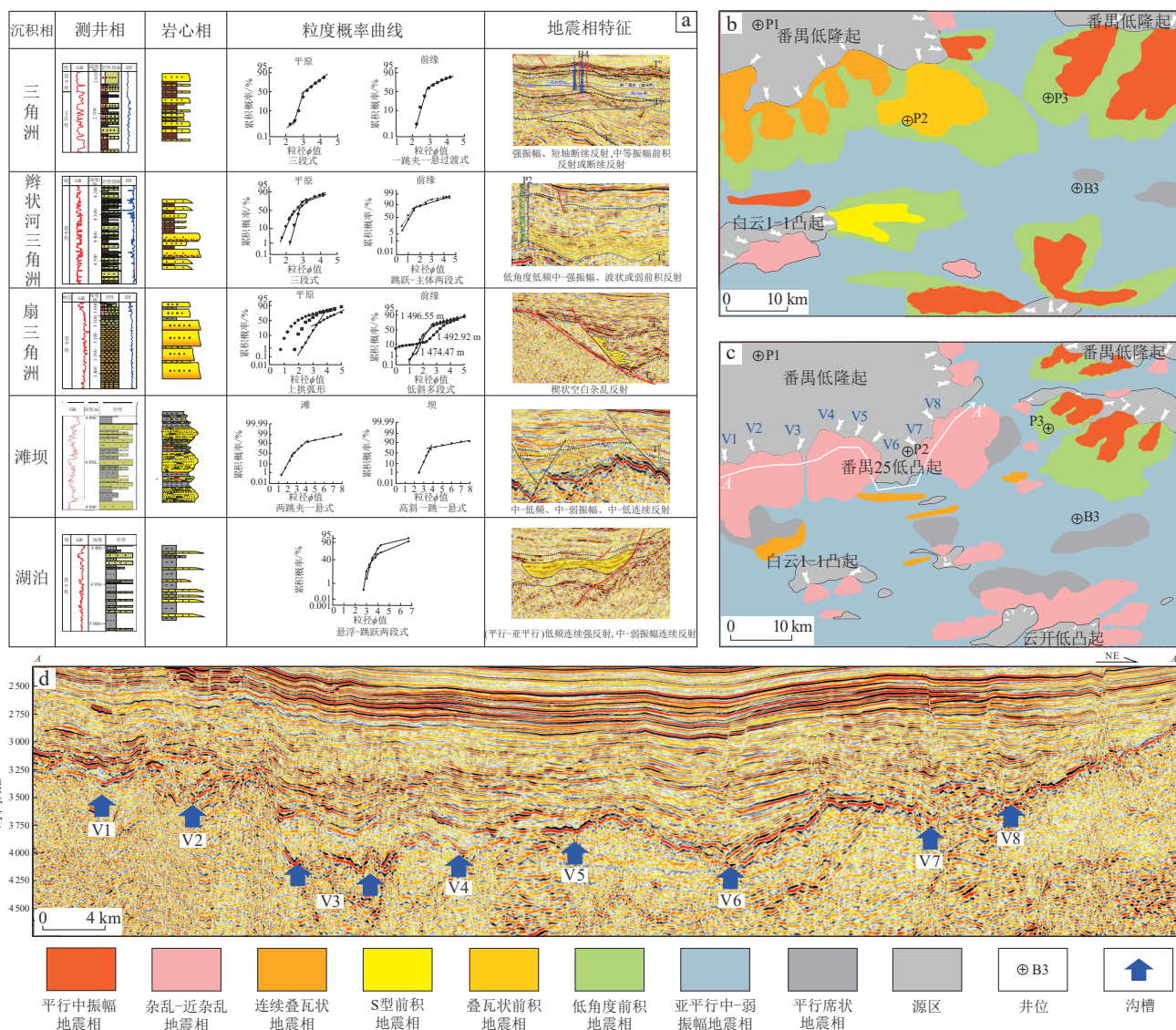


图7 珠江口盆地白云凹陷西区井-震综合图版

Fig. 7 Composite well-to-seismic chart boards of the western Baiyun Sag, PRMB

a. 白云西区井-震综合图版; b. 白云西区晚文昌期地震相; c. 白云西区早文昌期地震相; d. 番禺低隆起出水口指示剖面, V1—V8分别对应图c中V1—V8出水口 (V1—V8为沟槽编号。)

转换, 该阶段对应源-汇关键参数间相关性函数 (图8b)如下式所示:

$$M = -4.25 \times 10^{-5} A + 0.065 Q + 0.84 e^H - 0.83 \quad (7)$$

公式(7)中沉积体积与供给效率及集水高差呈正相关关系, 伴随白云1-1凸起动态源区持续作用, 沉积体积与先存流域面积间呈负相关关系。

通过细化集水流域源-汇单元 (图9c), 对比张裂期-拆离期关键源-汇参数可知, M 与 Q 关系指示沉积物密度, 即从早期 (张裂期) 向晚期 (拆离期) 沉积物供给密度下降、砂质含量增多; M 与 A 关系指示供给效

率, 即从早期 (张裂期) 向晚期 (拆离期) 供给效率提高, 指示晚文昌期源区易风化、陆生植物密度降低, 汇聚效率增高。

纵观整个张裂期-拆离期构造转换时期, 伴随物源体系的转变和地貌的充填演化, 沉积砂体类型呈现出从扇三角洲-辫状河三角洲向滩坝-扇三角洲的转变 (表1), 结合基于过程的定量源-汇参数 (图8) 可知: 张裂期, 供给通量相对小、沉积体量小, 盆地内断块动态供源, 整体供给效率低; 拆离期, 伴随周缘凸起隆升, 次级流域面积减小, 供给通量及沉积体量增加, 长轴大体量物源的输入增强了供给效率。源区剥蚀-汇区沉

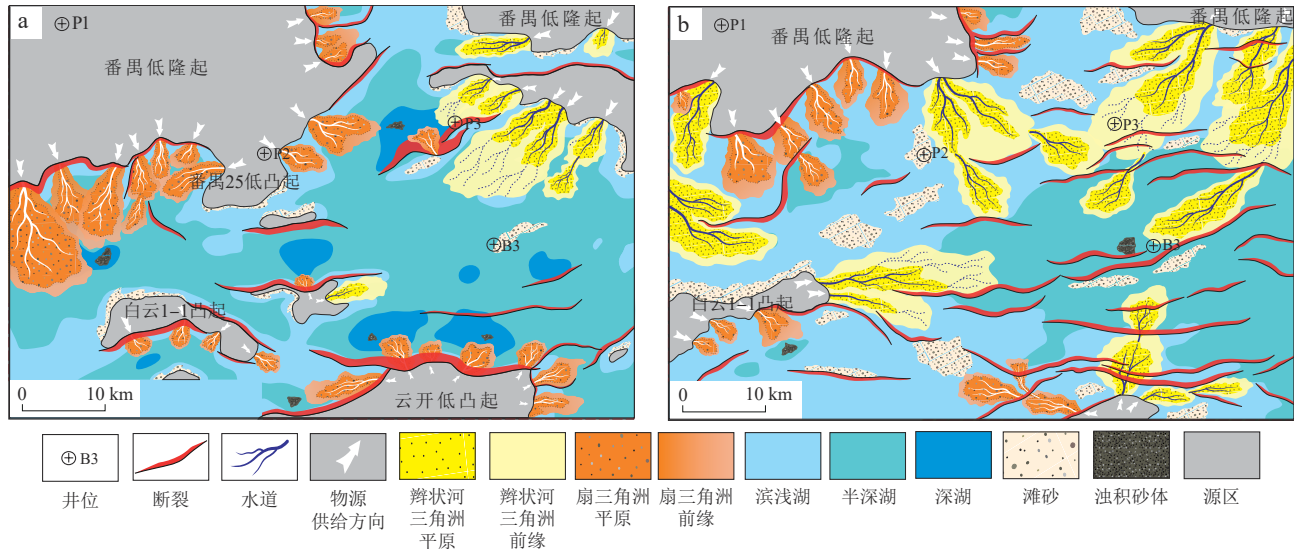


图8 珠江口盆地白云凹陷西区始新世张裂期(a)-拆离期沉积体系(b)转换

Fig. 8 Change of spatial distribution of sedimentary systems during the Eocene rifting (a) and detachment (b) periods in the western Baiyun Sag, PRMB

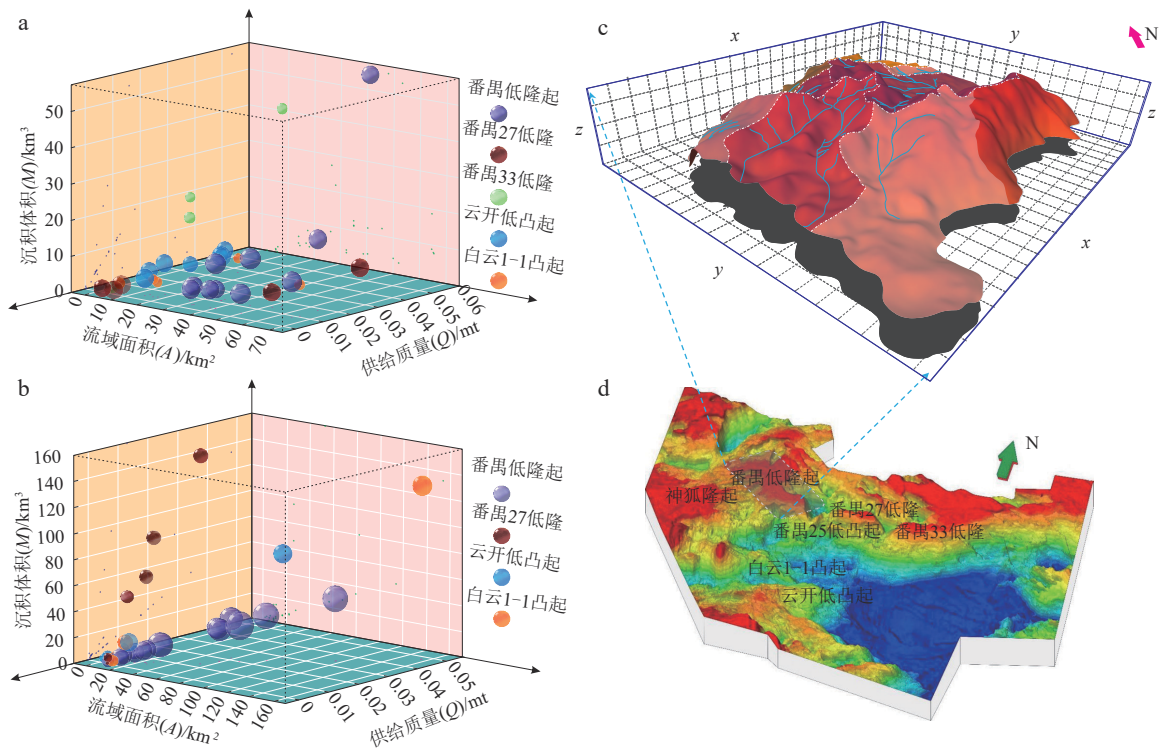


图9 珠江口盆地白云凹陷西区始新世张裂期(a)-拆离期源-汇耦合(b)及流域拾取表征(c,d)

Fig. 9 Source-to-sink coupling of the Eocene rifting (a) and detachment (b) periods and drainage characterization (c, d) in the western Baiyun Sag, PRMB

积过程受构造转换的控制,为相带发育和砂体改造提供了条件,特别是拆离过程中对储集砂体的正向改造作用,协同沉积中心迁移变化,匹配张裂期-拆离期沉积砂体-沉积中心时-空耦合关系有助于预测区内潜力勘探目标区。

5 结论

1) 沉积体系从早文昌期脆性张裂阶段的先存断块-近源扇辫体系向晚文昌期韧性拆离阶段的轴向隆

表1 珠江口盆地白云凹陷西区始新世张裂期-拆离期源-汇响应特征

Table 1 Response characteristics of source-to-sink during the Eocene rifting-detachment periods in western Baiyun Sag, PRMB

时期	注陷	物源组成	物源变化特征	沉积相类型	汇水区特征
张裂期	白云3注	番禺低隆西段	周缘汇聚、盆地低隆动态供源	辫状河三角洲	多中心分割、局限深注
		云开低凸起			
	番禺25注	番禺低隆东段		扇三角洲	
		白云1-1凸起			
拆离期	白云3注	番禺低隆西段	长、短轴联合供给	辫状河三角洲	连片浅注
		云开低凸起		辫状河三角洲、扇三角洲	
	番禺25注	番禺低隆东段			
		白云1-1凸起		辫状河三角洲、滩砂	

升-滩扇体系转换。早文昌期盆内凸起短轴供源,沿断裂陡坡发育扇三角洲沉积体系,东北部斜坡发育短轴辫状河三角洲,主要为番禺低隆起以及周围断块多点供源,近源发育中-小型扇三角洲沉积体系,东北部斜坡发育短轴辫状河三角洲,白云1-1凸起区出现轴向辫状河三角洲体系。

2) 晚文昌期拆离作用导致断裂体系坡度减缓,区内扇三角洲体系逐渐向辫状河三角洲体系转变,水下低隆缓坡带、斜坡带发育辫状河三角洲-滩坝沉积体系,且盆外长轴辫状河三角洲体系开始向盆内推进。据此,综合构建了白云西区始新世文昌组窄深复式半地堑扇辫体系-宽浅拆离隆升滩扇体系耦合模型。

参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] YE Qing, MEI Lianfu, SHI Hesheng, et al. A low-angle normal fault and basement structures within the Enping Sag, Pearl River Mouth Basin: Insights into late Mesozoic to early Cenozoic tectonic evolution of the South China Sea area[J]. Tectonophysics, 2018, 731/732: 1-16.
- [3] 任建业, 庞雄, 于鹏, 等. 南海北部陆缘深水-超深水盆地成因机制分析[J]. 地球物理学报, 2018, 61(12): 4901-4920.
REN Jianye, PANG Xiong, YU Peng, et al. Characteristics and formation mechanism of deepwater and ultra-deepwater basins in the northern continental margin of the South China Sea [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2018, 61(12): 4901-4920.
- [4] 柳保军, 庞雄, 王家豪, 等. 珠江口盆地深水区伸展陆缘地壳减薄背景下的沉积体系响应过程及油气勘探意义[J]. 石油学

报, 2019, 40(S1): 124-138.

LIU Baojun, PANG Xiong, WANG Jiahao, et al. Sedimentary system response process and hydrocarbon exploration significance of crust thinning zone at extensional continental margin of deep-water area in Pearl River Mouth Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2019, 40(S1): 124-138.

- [5] 张文昭, 张厚和, 李春荣, 等. 珠江口盆地油气勘探历程与启示[J]. 新疆石油地质, 2021, 42(3): 346-352, 363.
ZHANG Wenzhao, ZHANG Houhe, LI Chunrong, et al. Petroleum exploration history and enlightenment in Pearl River Mouth Basin [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2021, 42(3): 346-352, 363.
- [6] 庞雄, 郑金云, 任建业, 等. 南海北部陆缘超伸展区白云凹陷断陷结构演化与岩浆作用[J]. 地球科学, 2022, 47(7): 2303-2316.
PANG Xiong, ZHENG Jinyun, REN Jianye, et al. Structural evolution and magmatism of fault depression in Baiyun Sag, northern margin of South China Sea [J]. Earth Science, 2022, 47(7): 2303-2316.
- [7] 郑金云, 高阳东, 张向涛, 等. 珠江口盆地构造演化旋回及其新生代沉积环境变迁[J]. 地球科学, 2022, 47(7): 2374-2390.
ZHENG Jinyun, GAO Yangdong, ZHANG Xiangtao, et al. Tectonic evolution cycles and Cenozoic sedimentary environment changes in Pearl River Mouth Basin [J]. Earth Science, 2022, 47(7): 2374-2390.
- [8] YE Qing, MEI Lianfu, JIANG Dapeng, et al. 3-D structure and development of a metamorphic core complex in the northern south china sea rifted margin [J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2022, 127(2): e2021JB022595.
- [9] 毛云华, 赵中贤, 孙珍. 珠江口盆地西部陆缘伸展-减薄机制[J]. 地球科学, 2020, 45(5): 1622-1635.
MAO Yunhua, ZHAO Zhongxian, SUN Zhen. Extensional thinning mechanism of the western continental margin of the Pearl River Mouth Basin [J]. Earth Science, 2020, 45(5): 1622-1635.
- [10] 王嘉, 栾锡武, 何兵寿, 等. 珠江口盆地开平凹陷断裂构造特征与动力学机制探讨[J]. 海洋学报, 2021, 43(8): 41-53.
WANG Jia, LUAN Xiwu, HE Bingshou, et al. Study on the

- structural characteristics and dynamic mechanism of faults in the Kaiping Sag of Zhujiang River Mouth Basin[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2021, 43(8): 41–53.
- [11] UNTERNEHR P, PÉRON-PINVIDIC G, MANATSCHAL G, et al. Hyper-extended crust in the South Atlantic: In search of a model[J]. *Petroleum Geoscience*, 2010, 16(3): 207–215.
- [12] WHITNEY D L, TEYSSIER C, REY P, et al. Continental and oceanic core complexes[J]. *GSA Bulletin*, 2013, 125(3/4): 273–298.
- [13] MORLEY C K. The widespread occurrence of low-angle normal faults in a rift setting: Review of examples from Thailand, and implications for their origin and evolution[J]. *Earth-Science Reviews*, 2014, 133: 18–42.
- [14] 张向涛, 史玉玲, 刘杰, 等. 珠江口盆地惠州凹陷古近系文昌组优质湖相烃源岩生烃动力学[J]. *石油与天然气地质*, 2022, 43(5): 1249–1258.
- ZHANG Xiangtao, SHI Yuling, LIU Jie, et al. Kinetics of high-quality lacustrine source rocks of Paleogene Wenchang Formation, Huizhou Sag, Pearl River Mouth Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2022, 43(5): 1249–1258.
- [15] 张智辉. 珠江口盆地白云西洼油气输导体系特征研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2017.
- ZHANG Zhihui. Study on characteristics of hydrocarbon conduit system in the west of Baiyun Sag, Pearl River Mouth Basin, South China Sea[D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2017.
- [16] 刘培, 张向涛, 林鹤鸣, 等. 珠江口盆地西江主洼油气差异分布机制[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2021, 51(1): 52–64.
- LIU Pei, ZHANG Xiangtao, LIN Heming, et al. Distribution mechanism of oil and gas in Xijiang main depression of Pearl River Mouth Basin[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2021, 51(1): 52–64.
- [17] 李瑞彪, 石宁, 陈兆明, 等. 白云西洼油藏的“近临界流体”特征及成因分析[J]. *桂林理工大学学报*, 2020, 40(3): 494–499.
- LI Ruibiao, SHI Ning, CHEN Zhaoming, et al. Characteristics and genetic analysis of the “near critical fluids” of oil 1 reservoir in western Baiyun Sag[J]. *Journal of Guilin University of Technology*, 2020, 40(3): 494–499.
- [18] 漆家福, 吴景富, 马兵山, 等. 南海北部珠江口盆地中段伸展构造模型及其动力学[J]. *地学前缘*, 2019, 26(2): 203–221.
- QI Jiafu, WU Jingfu, MA Bingshan, et al. The structural model and dynamics concerning middle section, Pearl River Mouth Basin in north margin of South China Sea[J]. *Earth Science Frontiers*, 2019, 26(2): 203–221.
- [19] 邓棚, 梅廉夫, 杜家元, 等. 珠江口盆地西江主洼低角度边界正断层特征及成因演化[J]. *石油与天然气地质*, 2020, 41(3): 606–616.
- DENG Peng, MEI Lianfu, DU Jiayuan, et al. Characteristics and genetic development of a low-angle boundary normal fault in Xijiang main sag, Pearl River Mouth Basin, China[J]. *Oil & Gas Geology*, 2020, 41(3): 606–616.
- [20] 高阳东, 张向涛, 张丽丽, 等. 珠江口盆地中生代陆缘岩弧弧地质特征及构造背景[J]. *地球科学*, 2022, 47(7): 2317–2327.
- GAO Yangdong, ZHANG Xiangtao, ZHANG Lili, et al. Geological characteristics and tectonic settings of Mesozoic continental margin magmatic arc in Pearl River Mouth Basin[J]. *Earth Science*, 2022, 47(7): 2317–2327.
- [21] 李骥. 珠江口盆地白云西凹与番禺27洼文昌及恩平组沉积体系研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2018.
- LI Ji. The research on sedimentary system in the Wenchang and Enping Formation of Pearl River Mouth Basin Baiyun west depression and Panyu 27 Sag[D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2018.
- [22] 戴宗, 张青青, 衡立群, 等. 珠江口盆地番禺4洼珠江组层序地层及其约束下砂体发育模式[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2021, 45(1): 12–22.
- DAI Zong, ZHANG Qingqing, HENG Liqun, et al. Sequence stratigraphy and sand body development model of Zhujiang Formation in Panyu 4 subsag, Pearl River Mouth Basin[J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2021, 45(1): 12–22.
- [23] 蔡国富, 张向涛, 彭光荣, 等. 南海北部阳江—统暗沙断裂带与新近纪岩浆活动[J]. *大地构造与成矿学*, 2021, 45(1): 40–52.
- CAI Guofu, ZHANG Xiangtao, PENG Guangrong, et al. Neogene volcanism and tectonics along the Yangjing–Yitong’ ansha fault zone in the northern South China Sea margin[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2021, 45(1): 40–52.
- [24] 陈维涛, 徐少华, 孙珍, 等. 层序地层学标准化理论在陆架坡折-陆坡区的应用——以珠江口盆地中中新世沉积层序为例[J]. *石油与天然气地质*, 2021, 42(6): 1414–1422.
- CHEN Weitao, XU Shaohua, SUN Zhen, et al. Application of standardized sequence stratigraphy theory in the shelf break-to-slope area: A case study of the Middle Miocene sedimentary sequence in the PRMB[J]. *Oil & Gas Geology*, 2021, 42(6): 1414–1422.
- [25] 施和生, 杜家元, 梅廉夫, 等. 珠江口盆地惠州运动及其意义[J]. *石油勘探与开发*, 2020, 47(3): 447–461.
- SHI Hesheng, DU Jiayuan, MEI Lianfu, et al. Huizhou movement and its significance in Pearl River Mouth Basin, China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2020, 47(3): 447–461.
- [26] 郭伟, 徐国强, 柳保军, 等. 珠江口盆地白云凹陷文昌组构造-沉积响应关系[J]. *地球科学*, 2022, 47(7): 2433–2453.
- GUO Wei, XU Guoqiang, LIU Baojun, et al. Structure-sedimentary response relationship of Wenchang Formation in Baiyun Sag, Pearl River Mouth Basin[J]. *Earth Science*, 2022, 47(7): 2433–2453.
- [27] 马晓倩, 刘军, 朱定伟, 等. 多期走滑拉分盆地的沉积响应:

- 以南海北部珠江口盆地为例[J]. 大地构造与成矿学, 2021, 45(1): 64-78.
- MA Xiaoqing, LIU Jun, ZHU Dingwei, et al. Sedimentary response of multi-stage pull-apart basin: Insights from the Pearl River Mouth Basin in the northern South China Sea margin [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2021, 45(1): 64-78.
- [28] 庞雄奇, 付广, 陈章明, 等. 地震资料用于地层古厚度恢复与剥蚀量计算方法探讨[J]. 大庆石油学院学报, 1991, 15(4): 1-8.
- PANG Xiongqi, FU Guang, CHEN Zhangming, et al. An approach to the calculation method of the ancient thickness and the eroded amount of the sedimentary strata by seismic data [J]. *Journal of Northeast Petroleum University*, 1991, 15(4): 1-8.
- [29] 闫海军, 何东博, 许文壮, 等. 古地貌恢复及对流体分布的控制作用——以鄂尔多斯盆地高桥区气藏评价阶段为例[J]. 石油学报, 2016, 37(12): 1483-1494.
- YAN Haijun, HE Dongbo, XU Wenzhuang, et al. Paleotopography restoration method and its controlling effect on fluid distribution: A case study of the gas reservoir evaluation stage in Gaoqiao, Ordos Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2016, 37(12): 1483-1494.
- [30] 左丽群. 古地貌恢复方法综述[J]. 石油地质与工程, 2019, 33(3): 12-16, 21.
- ZUO Liqun. Review on methods of paleo-geomorphologic restoration [J]. *Petroleum Geology and Engineering*, 2019, 33(3): 12-16, 21.
- [31] TONY J T. Reservoir characterization, paleoenvironment, and paleogeomorphology of the Mississippian redwall limestone paleokarst, Hualapai Indian reservation, grand canyon area, Arizona [J]. *AAPG Bulletin*, 2000, 84(11): 1875-1880.
- [32] ZHAO Qian, ZHU Hongtao, ZHANG Xiangtao, et al. Geomorphologic reconstruction of an uplift in a continental basin with a source-to-sink balance: An example from the Huizhou-Lufeng uplift, Pearl River Mouth Basin, South China sea [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2021, 128: 104984.
- [33] 程昊峰, 李三忠, 彭光荣, 等. 珠江口盆地始新统“源-渠-汇”分析——以阳江东凹和开平凹陷为例[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2022, 42(5): 124-136.
- CHENG Haohao, LI Sanzhong, PENG Guangrong, et al. Eocene “provenance-channel-sink” analysis of Pearl River Mouth Basin: A case study of eastern Yangjiang Sag and Kaiping Sag [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2022, 42(5): 124-136.
- [34] 刘强虎, 朱红涛, 舒誉, 等. 珠江口盆地恩平凹陷古近系恩平组物源体系及其对滩坝的控制[J]. 石油学报, 2015, 36(3): 286-299.
- LIU Qianghu, ZHU Hongtao, SHU Yu, et al. Provenance systems and their control on the beach-bar of Paleogene Enping Formation, Enping Sag, Pearl River Mouth Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2015, 36(3): 286-299.
- [35] 陈一鸣, 谢明英, 闫正和, 等. 珠江口盆地恩平凹陷海相高泥质砂岩储层特征及主控因素[J]. 石油地质与工程, 2022, 36(1): 14-19.
- CHEN Yiming, XIE Mingying, YAN Zhenghe, et al. Reservoir characteristics and main controlling factors of marine high argillaceous sandstone in Enping Sag of Pearl River Mouth Basin [J]. *Petroleum Geology and Engineering*, 2022, 36(1): 14-19.
- [36] LIU Qianghu, ZHU Hongtao, SHU Yu, et al. Provenance identification and sedimentary analysis of the beach and bar systems in the Palaeogene of the Enping Sag, Pearl River Mouth Basin, South China Sea [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2016, 70: 251-272.
- [37] LI Zhiyao, LIU Qianghu, ZHU Hongtao, et al. Compositional relationship between the source-to-sink segments and their sedimentary response to diverse geomorphology types in the intrabasinal lower uplift of continental basins [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2021, 123: 104716.
- [38] 徐长贵. 陆相断陷盆地源-汇时空耦合控砂原理: 基本思想、概念体系及控砂模式[J]. 中国海上油气, 2013, 25(4): 1-11, 21.
- XU Changgui. Controlling sand principle of source-sink coupling in time and space in continental rift basins: Basic idea, conceptual systems and controlling sand models [J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2013, 25(4): 1-11, 21.
- [39] 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.

(编辑 梁 慧)