

断陷末期海-陆过渡背景下辫状河三角洲构型样式及沉积演化

——以珠江口盆地开平凹陷东部始新统恩平组-珠海组为例

范洪军^{1,2}, 张旭^{1,2}, 蒋蕾³, 徐伟¹, 苑志旺¹, 王晖¹

[1. 中海油研究总院有限责任公司, 北京 100028; 2. 海洋油气高效开发全国重点实验室, 北京 100028;
3. 中国地质大学(北京) 能源学院, 北京 100028]

摘要:断陷湖盆进入断陷末期后,构造活动逐渐减弱,可容纳空间增速变缓。有限的可容纳空间导致沉积物供给和堆积过程复杂,其方向与强度均易发生剧烈变化,进而使复合砂体构型样式多变。局部古地貌样式与物源供给的改变,进一步造成沉积展布规律及复合砂体构型难以预测,严重制约储层精细表征。以珠江口盆地开平凹陷东部始新统恩平组-珠海组为例,综合利用岩心、测井及三维地震资料,结合沉积学分析、相带识别与构型解剖方法,厘清断陷末期海-陆过渡背景下三角洲沉积演化过程,并提出“早期低位河控三角洲—晚期高位受潮汐影响三角洲”的演化模式。基于该模式指导,总结出厚-薄交互叠置型、多期厚层叠置型、多期互层连片型和多期薄层连片型4类复合砂体构型样式。结合三角洲演化阶段进一步明确:早期多物源供给背景下,低位域时期发育多期厚层叠置与厚-薄交互叠置砂体;海侵域时期发育多期薄层连片砂体;高位域时期发育多期互层连片砂体。研究结果为断陷末期复合砂体构型刻画与储层精细预测提供了新思路和方法借鉴。

关键词:三角洲演化;海-陆过渡;断陷末期;沉积演化;复合砂体;恩平组-珠海组;开平凹陷东部;珠江口盆地

中图分类号:TE121.3

文献标识码:A

Architectural styles and sedimentary evolution of braided river deltas in a marine-continental transitional setting during the late syn-rift stage: A case study of the Eocene Enping-Zhuhai Formation, eastern Kaiping Sag, Pearl River Mouth Basin

FAN Hongjun^{1,2}, ZHANG Xu^{1,2}, JIANG Lei³, XU Wei¹, YUAN Zhiwang¹, WANG Hui¹

[1. CNOOC Research Institute Co., Ltd., Beijing 100028, China; 2. State Key Laboratory of Offshore Oil and Gas Exploitation, Beijing 100028, China; 3. School of Energy Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100028, China]

Abstract: As fault-controlled lacustrine basins enter the late syn-rift stage, tectonic activity gradually weakens and the growth rate of accommodation space slows down. Limited accommodation space makes sediment supply and depositional processes more complex, in which both direction and intensity are prone to significant fluctuations, resulting in highly variable architectural styles of composite sand bodies. Changes in local paleogeomorphology and sediment provenance further make it difficult to predict depositional distribution patterns and composite sand body architecture, which severely restrict fine reservoir characterization. Taking the Eocene Enping-Zhuhai Formation in the eastern Kaiping Sag, Pearl River Mouth Basin (PRMB), as an example, this study aims to clarify the deltaic sedimentary evolution process in a marine-continental transitional setting during the late syn-rift stage by integrating core, well log, and 3D seismic data and applying combination of sedimentological analysis, facies-belt identification, and architectural-element dissection. An evolutionary model of “early lowstand fluvial-dominated delta while late highstand tide-influenced delta” is proposed. Guided by this model, four types of composite sand body architectural styles are identified: interbedded thick-

收稿日期:2026-03-12;修回日期:2026-06-15。

第一作者简介:范洪军(1977—),男,博士、高级工程师,油气开发地质学。E-mail: fanhj@coori.com.cn。

通信作者简介:张旭(1988—),男,高级工程师,油气开发地质学。E-mail: zhangxu19@coori.com.cn。

基金项目:海洋油气高效开发全国重点实验室主任基金项目(2025)。

thin stacking type, multiphase thick-bed stacking type, multiphase interbedded type with lateral continuity, and multiphase thin-bed type with lateral continuity. Corresponding to diverse stages of delta evolution, the study further indicates that, under an early multi-source supply background, multi-phase thick-bed stacking sand bodies and interbedded thick-thin stacking sand bodies developed during the lowstand systems tract (LST); multi-phase thin-bed sand bodies with lateral continuity developed during the transgressive systems tract (TST); and multiphase interbedded sand bodies with lateral continuity developed during the highstand systems tract (HST). The research results provide new insights and methodological references for characterizing composite sand body architecture and predicting reservoirs finely during the late syn-rift stage.

Key words: delta evolution, marine-continental transition, late syn-rift stage, sedimentary evolution, composite sand body, Enping-Zhuhai Formation, eastern Kaiping Sag, Pearl River Mouth Basin

引用格式:范洪军,张旭,蒋蕾,等. 断陷末期海-陆过渡背景下辫状河三角洲构型样式及沉积演化——以珠江口盆地开平凹陷东部始新统恩平组-珠海组为例[J]. 石油与天然气地质, 2026, 47(4): 1231–1246. DOI: 10. 11743/ogg20260411.

FAN Hongjun, ZHANG Xu, JIANG Lei, et al. Architectural styles and sedimentary evolution of braided river deltas in a marine-continental transitional setting during the late syn-rift stage: A case study of the Eocene Enping-Zhuhai Formation, eastern Kaiping Sag, Pearl River Mouth Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2026, 47(4): 1231–1246. DOI: 10. 11743/ogg20260411.

珠江口盆地作为南海北部重要的新生代断陷盆地,其断陷末期可容纳空间相对较大,但尚未完全稳定^[1-2]。多物源供给叠加作用使沉积物厚度增加,储集空间较为发育^[3-4]。然而,物源方向与供给强度快速变化,造成砂体展布规律复杂,储层结构非均质性强,极大制约了储层的高效开发与精细预测^[5-7]。在此背景下,深入探讨断陷末期三角洲沉积演化机制及砂体构型特征,明确控制因素,成为沉积学与油气地质领域亟需解决的重要问题^[8-10]。

目前大量学者针对以上问题均有较为深入的研究。沉积演化方面研究普遍认为断陷期—拗陷期沉积过程受海(湖)平面升降的显著影响:断陷期多表现为近源物源快速堆积,拗陷期则表现为频繁湖侵—湖退导致的多期沉积旋回^[11-12]。朱筱敏等指出断陷期海(湖)平面多呈长周期进—退,发育厚层近源粗粒三角洲,平面展布多为朵状,砂体以厚层块状为主^[13];赵国祥等强调拗陷期则表现为高频湖退—湖侵,三角洲多为浅水鸟足状或朵叶状^[14];于兴河等研究进一步揭示了断陷期与拗陷期沉积体系在储层非均质性方面的差异^[15],其指出断裂活动末期,多物源供给条件下仍能形成厚层辫状三角洲或吉尔伯特型三角洲,砂体以多期厚层叠置为主^[16-22],现有研究主要聚焦于断陷—拗陷过渡期的宏观特征,而对海—陆过渡阶段砂体构型量化特征研究不足^[23-28]。基于此,本研究以海平面变化过程为主控因素,建立其与砂体构型样式和宽/厚比特征之间的对应关系,并据此将海—陆过渡阶段进一步划分为3个亚阶段:低位期、海侵期与高位期。通过对3个阶段砂体几何参数与构型特征的对比,揭示了海平面升降变化对砂体展布与构型演化的制约机制,为

建立断陷末期海—陆过渡体系砂体发育的判别指标体系提供了依据。

早期研究表明,海(湖)面变化影响沉积层序。为此,本研究从海平面变化入手,探讨海—陆过渡的沉积演化过程及其对三角洲构型的影响。研究选取珠江口盆地开平凹陷始新统恩平组—珠海组为目标层段,该凹陷为典型的受拆离断层控制的断陷。在断层活动早期,横向断距较大,其内部核杂岩体可以提供大量的碎屑岩沉积物,且整体地貌表现出隆—坳间互的特征^[29-36]。进入断陷活动末期,构造活动不发育,其地貌样式继承性发展,叠加物源供给方向与强度的快速变化,导致沉积体系的展布方式及砂体构型样式发生显著改变,进一步加大了储层精细刻画难度。本研究基于三维地震解释和古构造恢复,结合钻井、测井与岩心等多源数据,建立了沉积相带划分标准;通过物源体系分析,厘清了主力层段的沉积模式与沉积微相特征,明确了储层平面展布规律,并构建了恩平组—珠海组的储层构型模式。在此基础上,进一步提出断陷末期三角洲的沉积演化模式。

1 地质背景

本次研究区为珠江口盆地开平凹陷东部(图1a),平面上位于凹陷构造反转带。现今水深200~500 m,以云开低凸起与白云凹陷分隔(图1)^[37-39]。开平凹陷属于断陷型凹陷,其内部控洼断层规模较小,但沉降幅度较大^[40-42]。凹陷内新生代地层自下而上依次发育文昌组、恩平组、珠海组、珠江组和韩江组,反映沉积环境由陆相向浅海—半深海相逐渐过渡的特征^[40],总体呈现“下断—上坳”的双层结构:下部文昌组与恩平组为

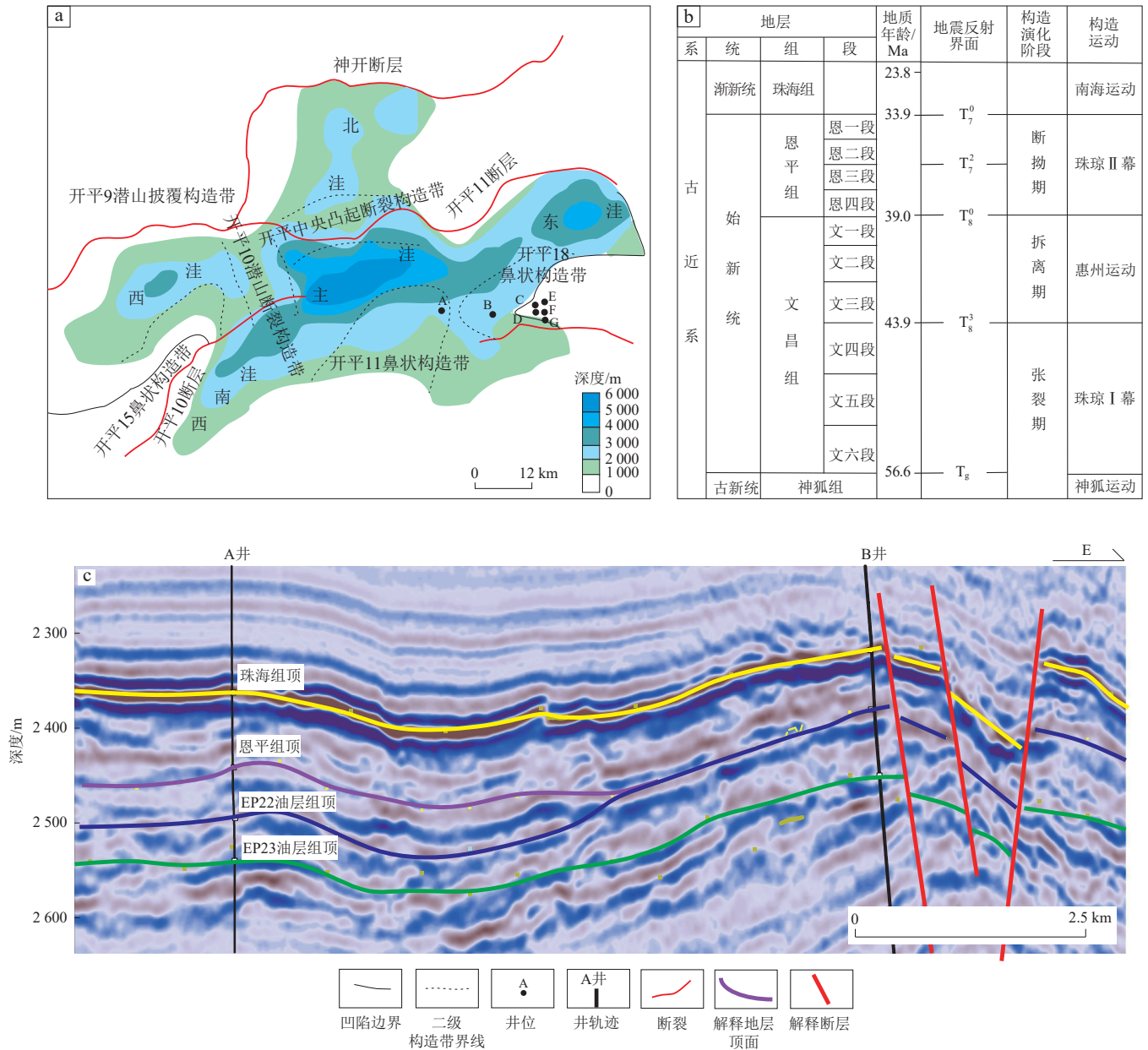


图1 珠江口盆地开平凹陷东部构造分区(a)、地层综合柱状图(b)及过A井—B井地震剖面与层位解释(c)(据文献[24]修改)
Fig. 1 Tectonic division (a), composite stratigraphic column (b), and seismic section across wells A and B with interpreted horizons (c) of the eastern Kaiping Sag, Pearl River Mouth Basin (PRMB) (modified after reference [24])

断陷期充填的陆相沉积,分别可细分为6个段和4个段(图1b);上部珠海组—第四系则为拗陷期形成的浅海—半深海相沉积^[29,40,43]。

本次研究目的层位为恩平组与珠海组。受地层超覆与抬升剥蚀的影响,二者之间呈不整合接触,并缺失恩(恩平组)一段(图1c)。恩平组主要形成于晚始新世,其沉积物类型以中-粗粒细砾岩和细砂岩为主,对应发育河流—三角洲为主的陆相沉积体系。随着裂陷活动减弱,珠海组形成于渐新世,受海侵和海洋环境影响,主要沉积物为粉砂岩和黏土岩,粒度更细,发育海相三角洲与滨浅海沉积。在开平凹陷东部地区,研究区

目的层包括恩二段的EP22油层组以及珠海组的ZH115与ZH110油层组。依据四级和五级旋回层序地层的划分及叠加样式,可划分出3个四级(半)旋回(分属2个不同的三级层序)和8个五级(半)旋回(图2a)。

2 海-陆过渡背景下三角洲沉积特征及其演化

基于岩心、测井与地震数据,通过对岩石类型、沉积构造及垂向组合关系的对比分析,重点探讨了海-陆过渡背景下的三角洲沉积特征。

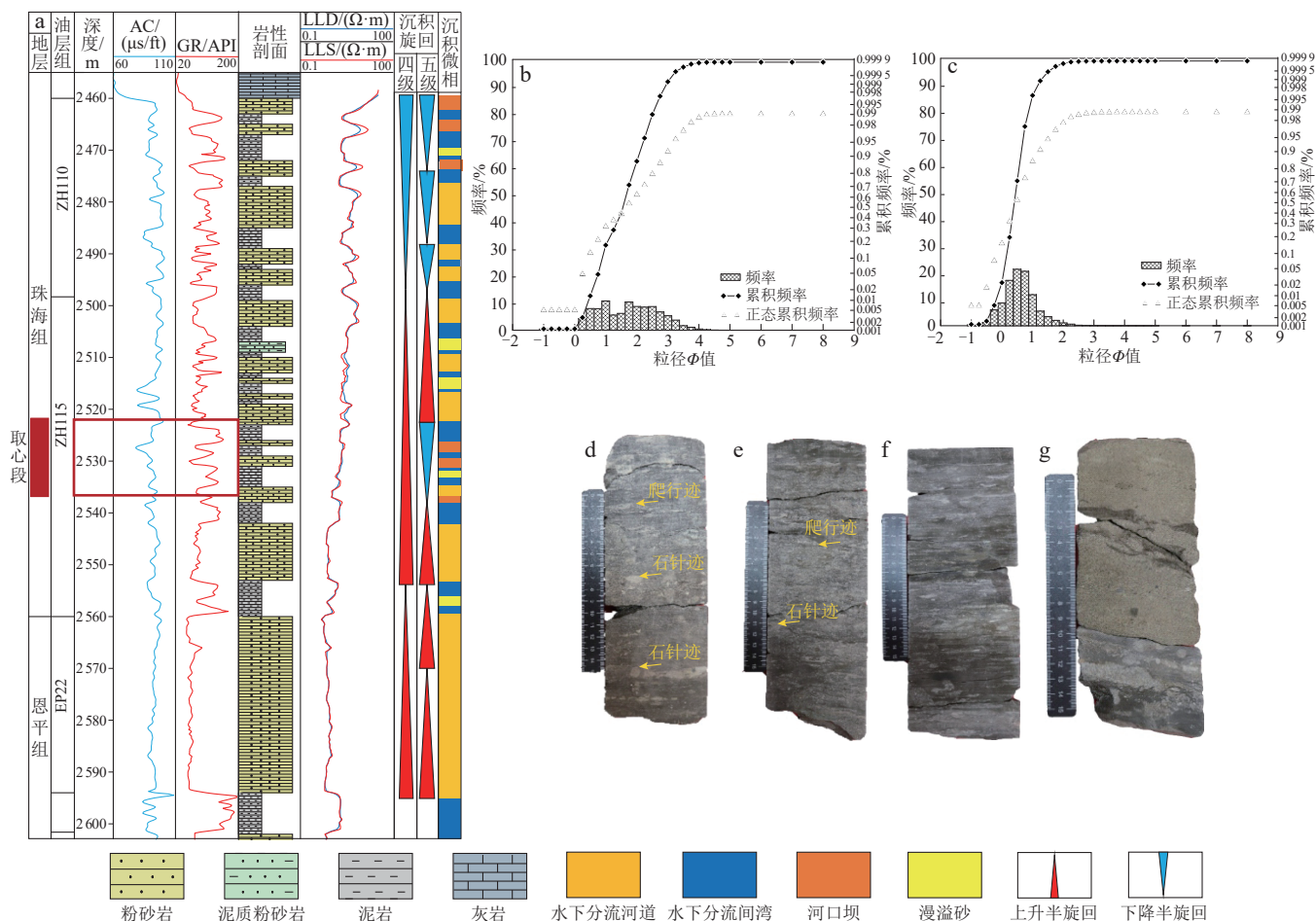


图2 珠江口盆地开平凹陷东部C井地层综合柱状图、粒度分布及岩心照片

Fig. 2 Composite stratigraphic column, grain-size distribution, and core photographs of well C in the eastern Kaiping Sag, PRMB

a. 地层综合柱状图; b. EP22油层组粒度累积概率曲线; c. ZH110—ZH115油层组粒度累积概率曲线; d. ZH115油层组, 深度2 537.50 ~ 2 537.60 m, 浅褐灰色泥质粉砂岩, 生物扰动强烈, 遗迹化石以石针迹为主, 岩心照片; e. ZH115油层组, 深度2 533.50 ~ 2 533.75 m, 浅褐灰色中-粗砂岩, 下部见泥质撕裂屑, 上部褐灰色泥质粉砂岩, 生物扰动强烈, 岩心照片; f. ZH115油层组, 深度2 534.00 ~ 2 534.35 m, 深褐灰色粉砂质泥岩, 发育弱水平层理, 受生物扰动强烈, 水平层理不连续, 岩心照片; g. ZH115油层组, 深度2 535.00 ~ 2 535.25 m, 下部褐灰色泥岩薄层, 粉砂质虫孔遗迹构造沿纹层分布, 上部浅灰色中-细砂岩, 岩心照片

2.1 受潮汐影响的辫状河三角洲沉积特征

通过对研究区岩屑录井及取心段开展系统的沉积学观察与描述, 综合分析了岩相与岩相组合、沉积构造、生物化石特征及相序特征, 并结合前人研究^[43-45], 识别出开平凹陷东部恩平组以河流作用为主导的辫状河三角洲沉积体系, 而珠海组则发育受潮汐影响的辫状河三角洲体系。

2.1.1 岩心特征与岩相组合

研究区岩性粒度范围较大, 其底部恩平组上段以含砾中-粗砂岩和泥岩为主, 自下而上粒度发生明显变化, 主要发育厚层粗粒块状砂岩, 中部夹少量含砾粗砂岩, 粒径 Φ 值主要介于0~1。综合沟鞭藻、有孔虫以及孢粉等古生物资料, 开平凹陷恩平组沉积时期主

要为陆相沉积, 晚期可能受到海侵影响, 表明该层段主要发育厚层浅水辫状河三角洲前缘沉积^[7-8]。

向上至珠海组粒度变细, 复合层理较为发育, 以浅褐灰色、浅灰色细砂岩和灰色、褐灰色泥岩为主。普遍发育虫孔, 生物扰动强烈, 偶见炭质纹层和云母。砂岩中发育交错层理和流水沙纹层理, 层理受生物扰动影响而发生变形, 可见泥砾和泥质撕裂屑; 粉砂岩与泥岩中发育块状层理、复合层理和水平层理, 易受生物扰动而发生变形。砂岩分选较好, 含砾砂岩中的砾石分选及磨圆均较好(图2)。此外, 图2的岩心照片显示生物遗迹化石极为发育, 以石针迹和爬行迹为主, 指示滨浅海相环境。

2.1.2 沉积微相类型

基于取心井(C井)岩心观察建立的沉积序列, 结

合箱形、钟形、漏斗形、指形和直线形5种全井自然伽马(GR)曲线形态(图2,图3),在研究区可识别出4种沉积微相,即水下分流河道、水下分流间湾、漫溢砂(或席状砂)及河口坝。

1) 水下分流河道。岩性为细砾岩、含砾中-粗砂岩至中-细砂岩,呈正粒序。砾石以石英为主,次圆状,空间排列可见斜层理,较松散,为非致密段。GR曲线表现为2种特征:①箱形,对应的岩性多为粗砂岩-细砂岩,单层厚变化大,曲线呈高幅,顶、底突变,略显齿化(图2),通常为多期水道叠加,反映物源相对充足条件下的水下分流河道充填砂体;②钟形,曲线呈现上窄、下宽的特征,底部突变,齿化明显,自下而上异常幅度逐渐增大,表明沉积期物源供给减少、水动力条件减弱。

2) 水下分流间湾。岩性为深灰色泥岩、灰色粉砂质泥岩和深褐灰色粉砂质泥岩,局部夹粉砂质条带,发育水平层理,生物扰动强烈,可见植物碎屑、弱水平纹

层,虫孔及爬迹普遍发育,断面上可见云母片。GR曲线呈微锯齿形或直线形,低幅,顶、底突变接触(图2),反映水动力极弱且稳定。

3) 河口坝。岩性为含砾或不含砾的浅灰色中-细砂岩和中-粗砂岩,总体呈反粒序,发育泥质或粉砂质条带,生物扰动强烈,虫孔及爬迹普遍发育,断面上可见云母片。GR曲线主要呈漏斗形,顶部突变、底部渐变(图2)。

4) 漫溢砂(席状砂)。岩性主要为深褐灰色粉砂岩和泥岩,粒度中间粗、上-下细,发育水平纹层,但受生物扰动强烈,水平层理不连续,中部生物扰动最为强烈。底部渐变、顶部突变。GR曲线常呈指形,中间幅度高,上、下渐变式接触(图2)。

2.2 沉积演化过程

断陷末期三角洲演化过程恢复是复合砂体构型刻画的基础,两者相互验证:前者揭示沉积体系形成机制,后

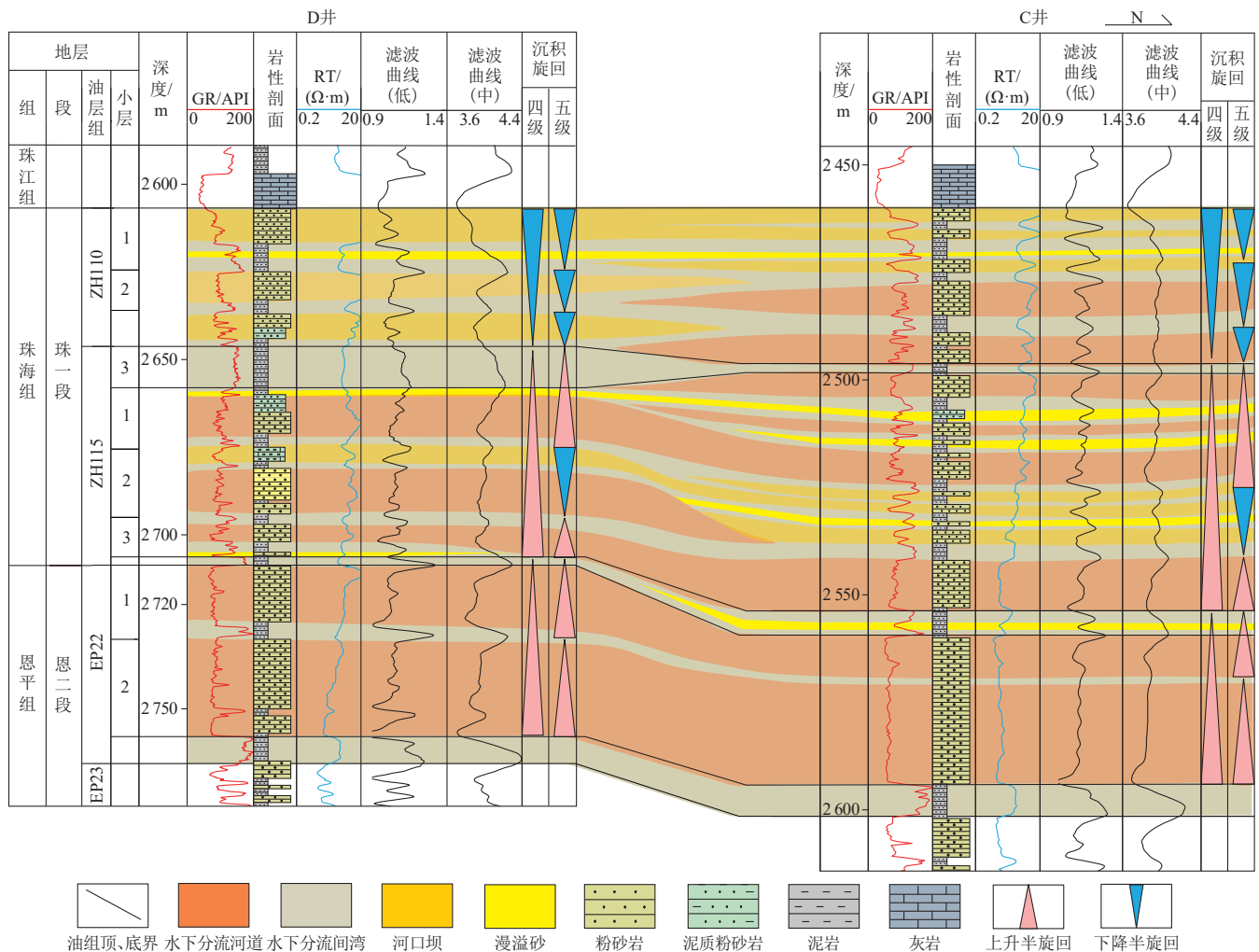


图3 珠江口盆地开平凹陷东部过D井—C井沉积微相连井对比剖面

Fig. 3 Cross-well correlation section of sedimentary microfacies across wells D and C in the eastern Kaiping Sag, PRMB

者刻画砂体叠置格架与沉积能量分布特征,共同构建区域沉积体系演化格局。早期恩平组表现为河控厚层型辫状河三角洲,物源充足、能量强,发育连续厚层砂体;晚期珠海组受潮汐作用增强影响,逐渐过渡为薄层型与混控互层型三角洲,砂体连通性减弱、层间非均质性增强。

伴随沉积物供源方向的变化,基于地震体构建地震属性均方根振幅(RMS)数据,恢复沉积展布样式,提出不同类型三角洲的演化过程。其中,研究区早期(恩平组沉积期)以发育浅水辫状河三角洲前缘为主,河道较为发育,局部发育河口坝;晚期(珠海组沉积期)发育受潮汐影响的辫状河三角洲,河口坝更为发育。

2.2.1 三角洲发育早期(恩平组沉积期)

综合钻井-测井解释的沉积微相类型(图3)与层间地震属性(图4),刻画了恩平组的沉积体系展布。该时期水

下分流河道较为发育,GR曲线形态为箱形或微锯齿形,齿化程度整体较低,岩性为厚层砂岩,局部夹薄层泥岩;地震属性整体较高,但是各区域高值区较为孤立(图4e, f)。上述特征表明该时期主要发育厚层三角洲前缘沉积,但是单期三角洲发育范围有限,内部多相互叠置。此外,该时期南部砂体厚度分布较均匀,以近源堆积为主,快速的沉积速率使该时期主要发育朵状三角洲前积体,不同期次朵体相互叠置,形成连片厚层砂体。

2.2.2 三角洲发育晚期(珠海组 ZH110 和 ZH115 油层组沉积期)

层间地震属性分析显示不同厚度的砂体响应程度不同——属性高值反映厚层,低值反映薄层,研究区珠海组辫状河三角洲发育规模整体相对较小。其中, ZH115 油层组沉积期, GR 曲线整体呈反韵律漏斗形—

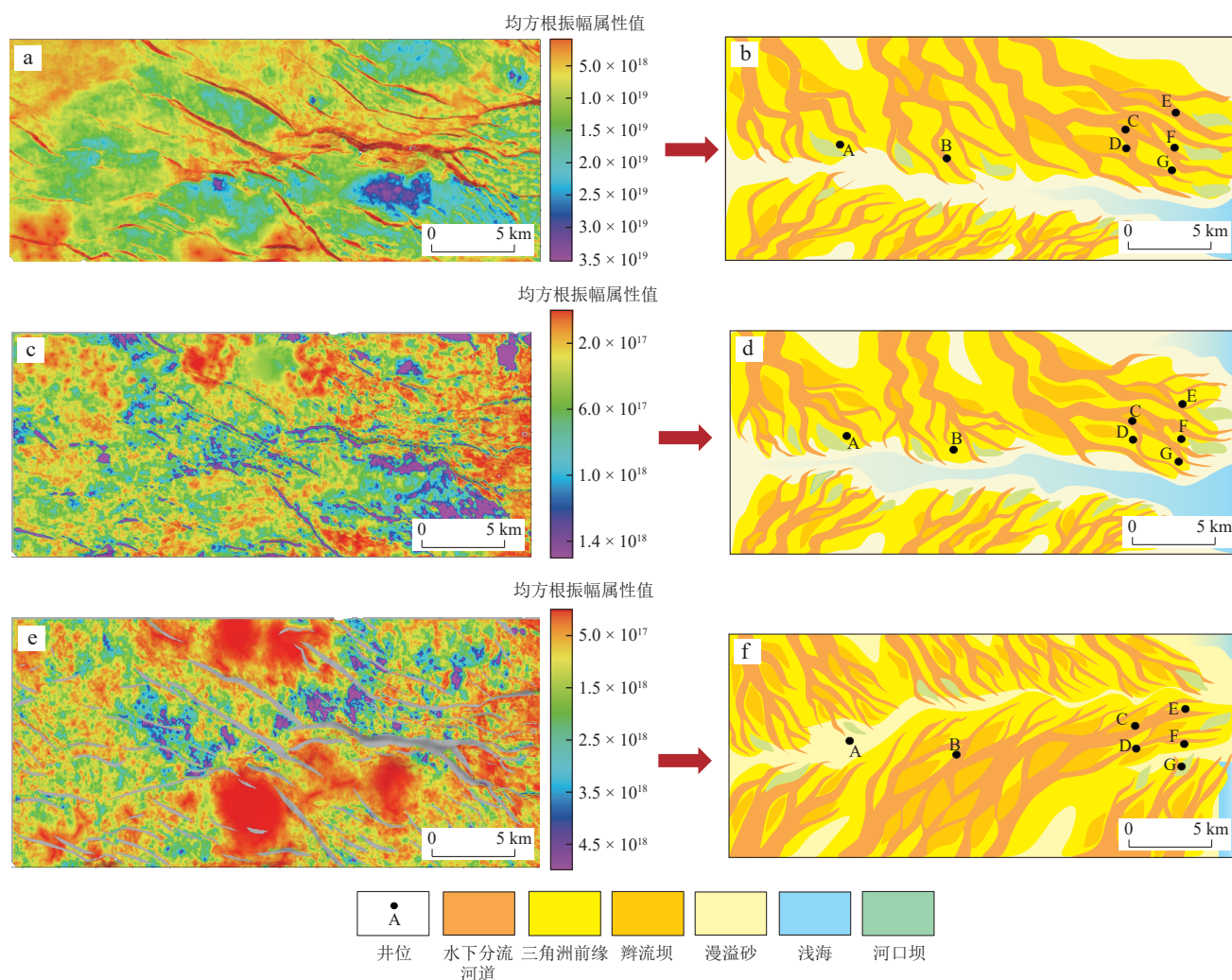


图4 珠江口盆地开平凹陷东部地震属性切片与沉积展布特征

Fig. 4 Seismic attribute slices and depositional distribution characteristics in the eastern Kaiping Sag, PRMB

a. ZH110 油层组地震属性切片; b. ZH110 油层组沉积展布; c. ZH115 油层组地震属性切片; d. ZH115 油层组沉积展布; e. EP22 油层组地震属性切片; f. EP22 油层组沉积展布

指形-微锯齿形,齿化程度较高,指示韵律型沉积,水动力条件呈间歇性变化;岩心显示以细粒沉积为主,砂体厚-薄交互叠置,含生物扰动构造,为典型的潮汐作用特征,水下分流河道与河口坝交替发育(图3)。地震属性连片性增加(图4c,5d),说明该时期三角洲分布面积扩大,以大型片状河口坝发育为主。ZH110油层组沉积期,GR曲线呈漏斗形-微锯齿形-钟形,齿化程度中等,大型河口坝发育(图3);相较于珠海组沉积早期,地震属性高值区更为孤立(图4a),辫状河三角洲发育规模更大,其前缘形态成指状或朵叶状(图4b)。

3 海-陆过渡背景下三角洲复合砂体构型样式

3.1 井-震结合刻画复合砂体构型

基于井钻遇的复合砂体特征,综合砂体边界识别标志及地震响应信息,建立连井对比剖面,确定复合砂体的分布与叠置关系。在稀井网油田中,复合砂体构型解剖的关键在于井-震联合。在沉积模式指导下,基于复合砂体成因分析及边界识别方法,结合井间砂体边界的地震反演响应特征,落实相邻井间复合砂体的分布范围及切割叠置关系,是稀井网油田复合砂体构型解剖的常用手段^[46]。

参考 Miall 构型划分方案^[47],对恩平组-珠海组沉积期的5级砂体构型单元(复合河道砂)进行划分(表1)。其中,中期旋回对应5级构型顶、底界面(图3;表1)。在第一个长期旋回(EP22油层组沉积期)内可划分出2个中期旋回,沉积初期水体相对较浅,三角洲向陆方向迁移,形成退积型复合砂体,同时可容纳空间增大,水体变深;下一长期旋回(ZH115油层组沉积期)水体继续上升,内部可划分出3个中期旋回,其基准面先上升、继而下降、之后再次上升,该时期海水侵入研究区南部,水体较深,相较于前一个沉积期,沉积物泥质含

量增加,复合砂体规模变小;最后一个长期旋回(ZH110油层组沉积期)沉积初期水体相对较深,三角洲向海推进,对应3套中期基准面连续下降所形成的进积型复合砂体。各复合砂体之间基本上都发育泥质夹层:有些夹层发育稳定、延伸较远,如ZH110-1小层和ZH110-2小层之间的稳定泥质夹层;有些仅在局部发育,如EP22-1小层与EP22-2小层之间的夹层仅在开平凹陷南、北部局部发育。

在沉积过程中,开平凹陷东部复合砂体内部单期水道的迁移摆动会不同程度地改造前一期水道,导致不同水道砂体间以及水道和河口坝砂体之间相互切割叠置,形成由多期相同或不同沉积成因的砂体嵌合而成的复合砂体(图3)。该类复合砂体宽度及厚度均较大,宽度多数在几百米至两千多米,厚度最大可超过33 m,平均厚度为20~30 m/期。

通过精细解剖开平凹陷东部复合砂体的分布,总结了其构型样式。开平凹陷东部位于三角洲前缘的主体区。恩平组沉积期,充足的物源供给使研究区表现出富砂特点,主要砂体类型为厚层箱形及箱形-钟形的水下分流河道;珠海组沉积早期,主要砂体类型为薄层指形河口坝砂;珠海组沉积晚期,发育漏斗形的河口坝和箱形-钟形的水下分流河道。

剖面上,复合砂体呈多期、多条水下分流河道与河口坝切叠接触的样式。在断陷末期三角洲发育早期,EP22油层组砂体呈现多期叠置和厚-薄交互叠置的复合砂体形态(图5)。该时期受南部物源影响,沉积物供给充足,可容纳空间较大,以基准面上升旋回为主;砂体全区连续性较好,沉积成因为深切叠型河道复合体的迁移叠置。在断陷末期三角洲发育晚期,ZH115油层组沉积期多期薄层连片砂体较为发育;ZH110油层组沉积期多期互层连片砂体较为发育,该时期以北部物源为主,可容纳空间较小,沉积成因为中-弱切割型河道-坝体复合体的叠置。

表1 珠江口盆地开平凹陷东部复合砂体构型划分方案

Table 1 Classification scheme for composite sand body architecture in the eastern Kaiping Sag, PRMB

Miall 构型 级次 ^[47]	沉积相 级次	复合砂体构型方案	构型界面	旋回级别	对应研究区层段(油层组)
6级	沉积相	复合砂体系统	油组顶、底界面	长期旋回	ZH110,ZH115,EP22
5级	亚相	复合砂体	单一复合砂体顶、底界面	中期旋回	ZH110-1,ZH110-2,ZH110-3,ZH115-1, ZH115-2,ZH115-3,EP22-1,EP22-2
4级	微相	单期砂体	单砂体顶、底界面	短期旋回	—
3级	岩相组合	单韵律层	增生体顶、底界面	超短期旋回	—

注:“—”表示无数据。

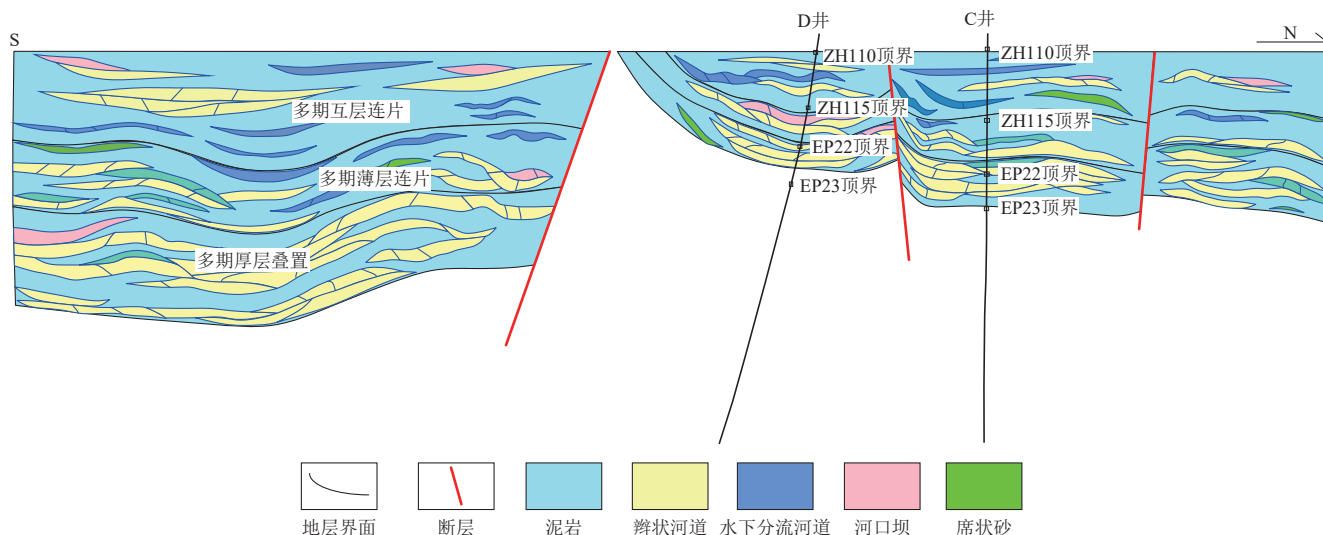


图5 珠江口盆地开平凹陷东部复合砂体构型剖面示意图

Fig. 5 Cross-well correlation section of composite sand body architecture in the eastern Kaiping Sag, PRMB

3.2 复合砂体构型模式

3.2.1 复合砂体类型划分

针对目的层段,采用地震波形相控建模与贝叶斯模型反演方法,开展叠后波阻抗反演,反演结果对厚度8 m以上的砂体刻画效果较好。根据地震反演剖面(图6),将断陷末期三角洲成因的复合砂体划分为4种类型。

1) 厚-薄交互叠置型。该类型砂体由厚层与薄层砂体交替叠置组成,反映沉积期内水动力条件和物源供给频繁变化。地震反演剖面上表现为振幅强-弱交替、相对连续但频率不稳定的反射特征,局部存在低频干扰;内部夹层发育频繁但分布范围有限,指示其构型内部复杂、非均质性较强(图6a)。

2) 多期厚层叠置型。该类型砂体由多个时期形成的厚层砂体垂向叠置而成,反映在相对稳定的沉积环境中,物源持续强供给。地震反演剖面上表现为低频、强振幅和连续反射特征,常见垂向分段的高振幅层状特征,砂体边界清晰、横向延伸稳定,对应长期稳定的沉积环境(图6b)。

3) 多期互层连片型。该类型砂体在垂向上呈互层状分布,但在空间上连片展布,反映多期沉积过程中水体环境和能量频繁切换,不同时期的砂体相互分隔。地震反演剖面上表现为中频、中振幅特征,反映构造活动间歇性引发的沉积环境分异(图6c)。

4) 多期薄层连片型。该类型砂体为横向连续分布的多期薄层砂体,常见于海侵背景下能量较弱的

沉积环境,地震反演剖面上表现为高频、弱振幅反射。

多期相邻的单一水道与河口坝经不同程度的侵蚀切割及沉积叠合,形成复合砂体。测井曲线及地震反演剖面可用于识别砂体厚度、岩性和垂向叠置关系。利用这些资料建立了开平凹陷南部始新统恩平组-珠海组砂体的叠置关系,划分出深切叠型、中切叠型、浅切叠型和弱切叠型4种类型(图7)。①深切叠型:以多期水下分流河道强烈切叠为特征,形成的复合砂体厚度介于30~50 m,内部泥岩夹层不稳定。②中切叠型:表现为水下分流河道与河口坝砂体的相互叠置,形成的复合砂体厚度多介于10~30 m。③浅切叠型:表现为多期水下分流河道与河口坝砂体的侧向叠置,叠置程度较低,复合砂体厚度介于5~15 m,砂体间易出现泥岩隔夹层。④弱切叠型:砂体呈坨状平面展布,连通性较差,叠置现象不明显,通常表现为单期河道砂体的厚度。

3.2.2 复合砂体类型演化模式

1) 三角洲发育早期(EP22油层组沉积期)

该沉积期为低位域背景下的三角洲近源发育期,基准面整体处于上升阶段,可划分为2期复合砂体(图8)。①EP22-II沉积期对应早期基准面较低阶段,古地貌坡度陡,物源供给充足,河流作用主导,发育强水动力粗粒辫状河道;砂体厚度较大,以多期厚层叠置型复合砂体为主,表现为较窄、深切的辫状河道砂体相互叠加;地震反演剖面上呈高振幅、高连续性反射,GR曲线为箱型-钟型组合,夹层发育不明显,推测为多期河道

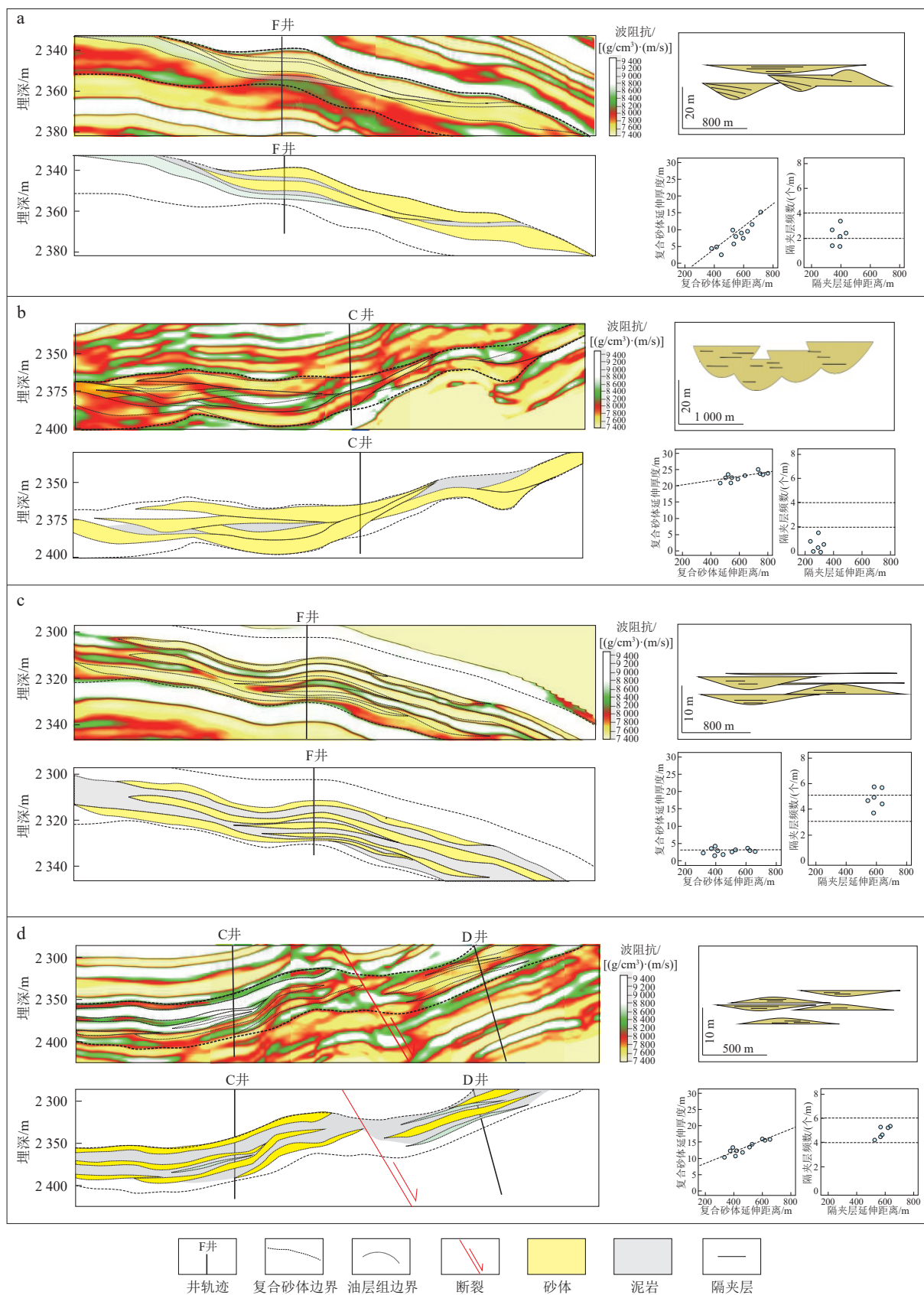


图6 珠江口盆地开平凹陷东部复合砂体样式划分

Fig. 6 Classification of composite sand bodies in the eastern Kaiping Sag, PRMB

a. 厚-薄交互叠置型, EP22 油层组; b. 多期厚层叠置型, EP22 油层组; c. 多期互层连片型, ZH110 油层组; d. 多期薄层连片型, ZH115 油层组

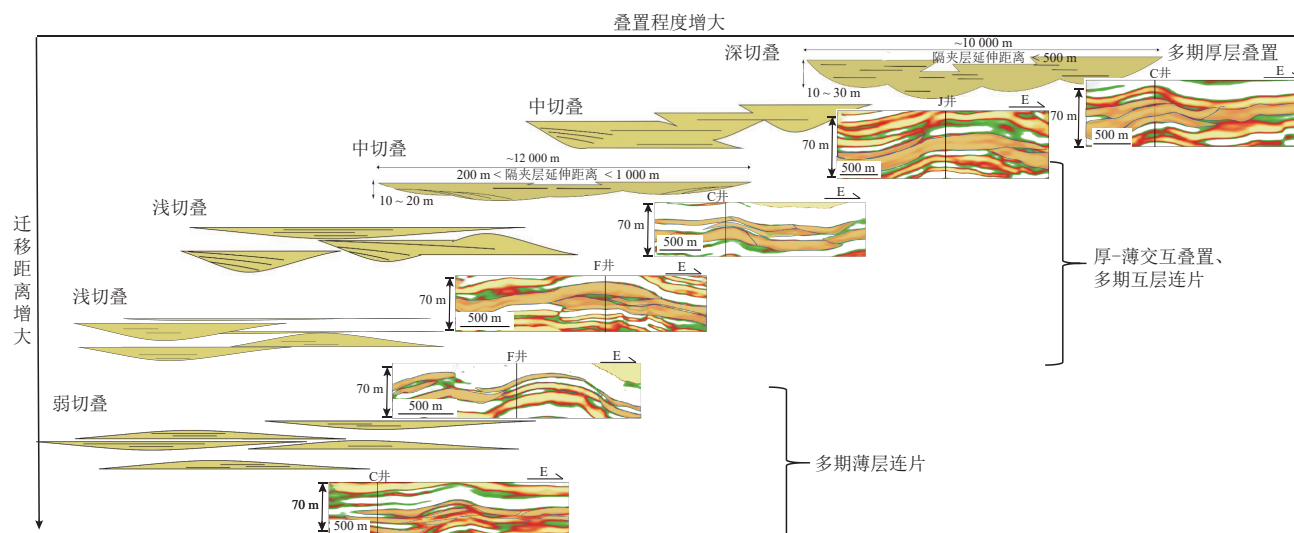


图7 珠江口盆地开平凹陷东部断陷末期海-陆过渡背景下砂体切叠关系

Fig. 7 Analysis of sand body cutting and stacking relationships in a marine-continental transitional setting during the late syn-rift stage in the eastern Kaiping Sag, PRMB

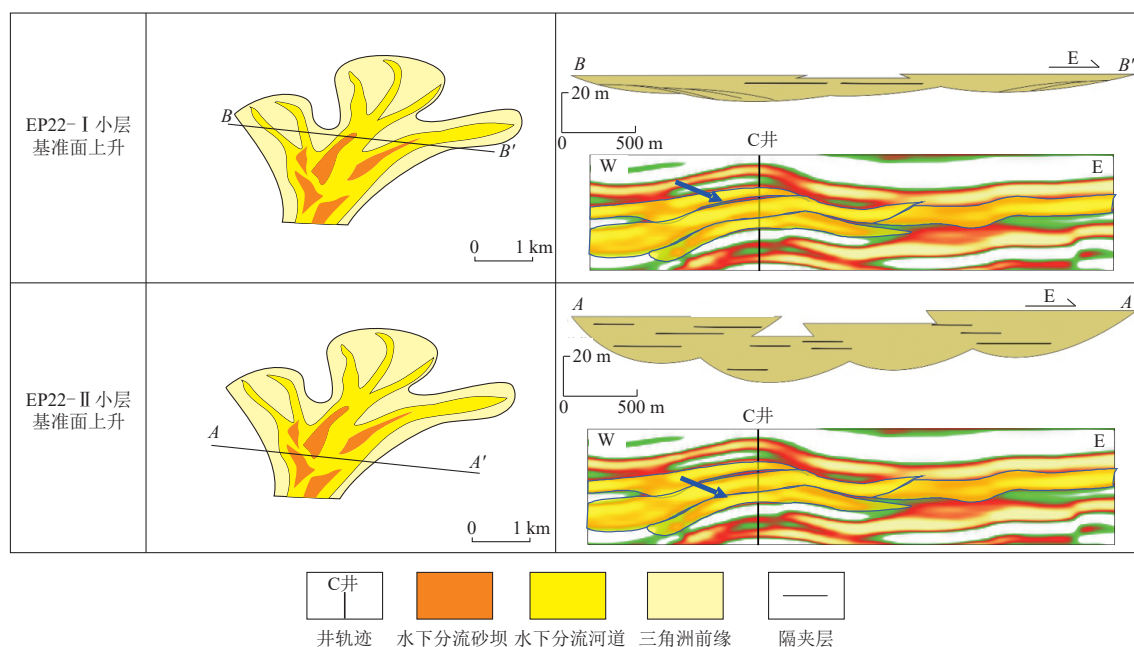


图8 珠江口盆地开平凹陷东部断陷末期早期(EP22油层组沉积期)三角洲样式演化与复合砂体构型模式示意图

Fig. 8 Schematic diagram showing the delta style evolution and composite sand body architectural model during the early phase of the late syn-rift stage (that is, during the deposition of the EP22 oil layer group) in the eastern Kaiping Sag, PRMB

迁移反复叠置形成。②EP22-I 沉积期基准面持续上升,可容纳空间进一步增加,砂体类型过渡为厚-薄交互叠置型与多期厚层叠置型,内部夹层数量与厚度均增加,侧积型隔夹层范围扩大,反映了分支水道频繁迁移与水体能量变化,推测为多期分支水道迁移叠置所致。总体而言,该时期砂体构型受控于河道迁移频率与物源强度的动态调节,表现为纵向厚度大、横向展布有限和强河控特征。该时期以多期厚层叠置型和厚-

薄交互叠置型为主,多期厚层叠置型与主干河道沉积匹配度高,推测为多期河道叠置成因;厚-薄交互叠置型与分支河道沉积对应关系较好,推测为多期迁移叠置成因。

2) 三角洲发育晚期北部主物源供给阶段 I (ZH115 油层组沉积期)

该沉积期海平面稳步上升,物源供给受限,可划分为3期复合砂体(图9)。①ZH115-III 沉积期基准面上

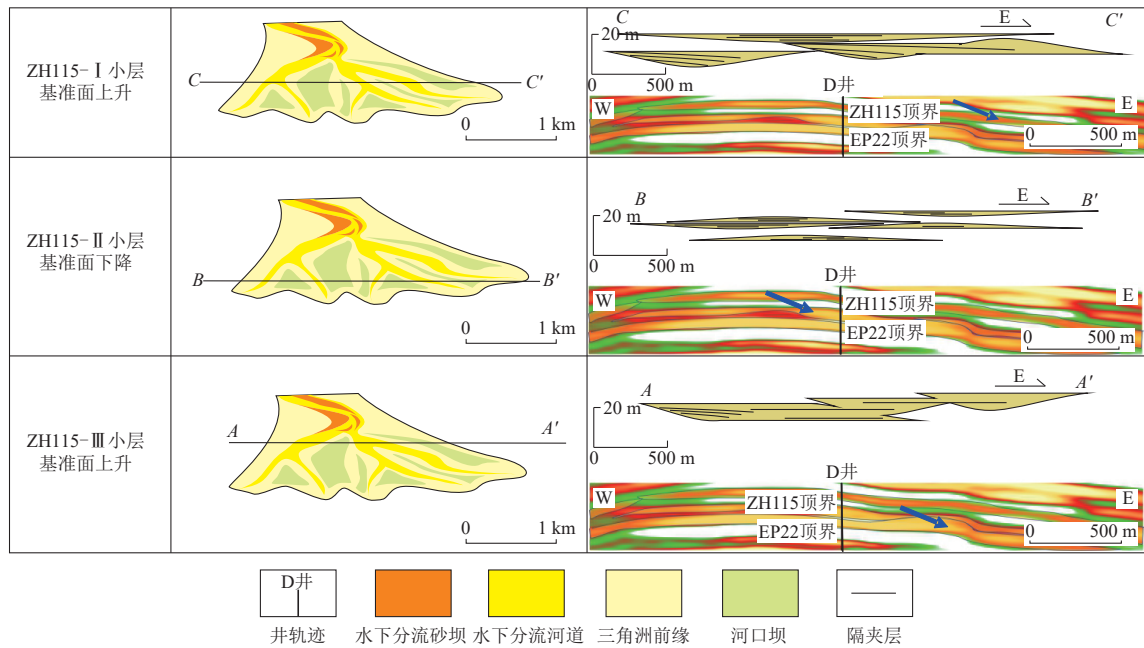


图9 珠江口盆地开平凹陷东部断陷末期晚期(ZH115油层组沉积期)三角洲样式演化与复合砂体构型模式示意图

Fig. 9 Schematic diagram showing the delta style evolution and composite sand body architectural model during the late syn-rift stage (that is, during the deposition of the ZH115 oil layer group) in the eastern Kaiping Sag, PRMB
(图中蓝色箭头指示复合砂体内部不同垂向位置。)

升,可容纳空间较大,物源供给有限,河流作用较弱,潮汐作用逐渐加强,砂体的分布开始出现横向展布;复合砂体以薄层砂体为主,形成多期薄层弱连片型砂体,推测为远端河口坝与远砂坝沉积。②ZH115-II沉积期基准面下降,以宽辫状河道砂体和河口坝为主,内部发育连续性较强的侧积隔夹层,反映出河流和潮汐共同作用,以多期薄层连片型为主。③ZH115-I沉积期基准面再次上升,发育厚-薄交互叠置型及多期互层连片型砂体。河道砂与河口坝、河口坝与河口坝、河道与河道之间呈弱切叠型和浅切叠型,片状展布,非均质性增强。该时期主要发育多期薄层弱连片型砂体,多期薄层弱连片型与薄层河口坝及远砂坝对应关系较好,推测为薄层河口坝成因砂体。

3) 三角洲发育晚期北部主物源供给阶段 II (ZH110油层组沉积期)

该沉积期为高位域背景下的沉积单元,可划分为3期复合砂体(图10)。①ZH110-III沉积期基准面下降,进入道-坝快速转换阶段,以薄层砂体为主,隔层不发育、夹层发育,表现为多期互层连片型及多期薄层连片型复合砂体。②ZH110-II沉积期基准面下降,河道侧向迁移显著,砂体呈中切叠型和浅切叠型,内部隔夹层发育不稳定,反映河口坝与河道相互转化的过程。③ZH110-I沉积期基准面进一步下降,以河道砂和薄层连片河口坝砂体为主,呈片状发育,该时期多期互层

连片型为主,多期互层连片型与三角洲平原河道相关,推测为河道与河口坝砂体连片成因。

4 沉积演化对复合砂体的控制作用

在前人研究基础上,结合本次多源资料综合分析结果,建立了珠江口盆地开平凹陷东部始新统恩平组-珠海组在低位-海侵-高位体系域下的沉积演化模式。依据岩相组合、沉积类型及复合砂体构型特征,认为该区三角洲沉积体系主要发育河控厚层型、受潮汐影响的薄层型和混控互层型3类复合砂体模式,其形成受海平面周期性升降与物源供给方向双重控制。通过多尺度资料综合分析,揭示出断陷末期海-陆过渡阶段沉积体系的时-空转换规律及其对复合砂体构型的控制作用^[36-40]。

恩平组沉积晚期(EP22油层组沉积期),受低湖平面背景与南、北双向物源均衡供给的共同作用,形成河控厚层型辫状河三角洲体系(图11a)。水下分流河道较为顺直,延伸较远,呈鸟足状,河道较为发育。河道宽/深比小,因此水下分流河道砂体的宽/厚比小。该时期复合砂体厚度较大,多为15~30 m,宽度多为800~2 500 m,宽/厚比多为40~90。各种构型单元相互叠置,砂坝延伸范围广、厚度大,砂体连续性好。

珠海组沉积早期(ZH115油层组沉积期),发生海

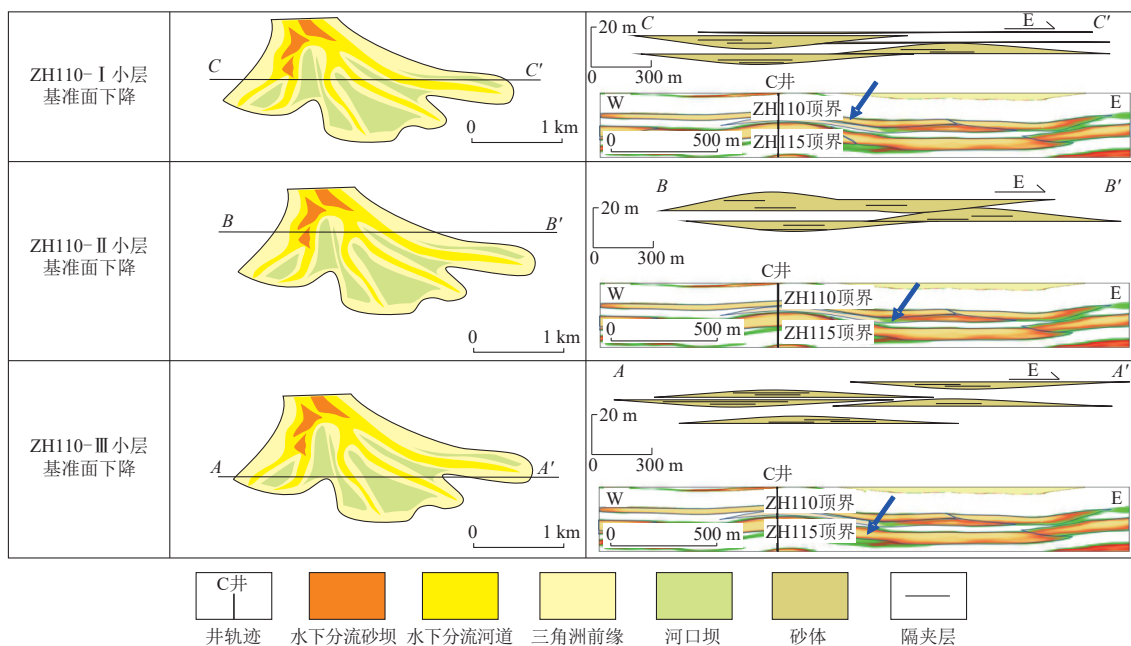


图10 珠江口盆地开平凹陷东部断陷末期晚期(ZH110油层组沉积期)三角洲样式演化与复合砂体构型模式示意图

Fig. 10 Schematic diagram showing the delta style evolution and composite sand body architectural model during the late phase of the late syn-rift stage (that is, during the deposition of the ZH110 oil layer group) in the eastern Kaiping Sag, PRMB

(图中蓝色箭头指示复合砂体内部不同垂向位置。)

侵,形成以北部远物源供给为主的受潮汐影响的薄层型辫状河三角洲体系(图11b)。三角洲前缘受潮汐改造强烈,发育小弯曲型分流河道,呈朵叶状。该时期地形平坦,河道频繁迁移和摆动,河口不稳定,难以发育大型河口坝。复合砂体厚度小,多为4~10 m;宽/厚比小,多为170~300。

珠海组沉积晚期(ZH110油层组沉积期),海平面处于较为稳定的高位,河流与潮汐共同作用,发育典型的混控互层型辫状河三角洲体系。潮汐对辫状河三角洲前缘的冲刷、改造作用相对较小,砂坝等沉积保存较好,受潮汐作用破坏程度低,发育大规模的河口坝(图11c)。经潮汐改造的水道砂体和分流河道砂体叠置。该时期砂体厚度变化较大,宽/厚比较大,多介于110~230 m。

综合3期沉积演化分析结果,提出海平面升降与物源供给强度是控制断陷末期复合砂体构型差异的关键因素。低位期物源供给充足,形成厚层叠置的河控型砂体;海侵期潮汐作用增强,砂体呈薄层分散的潮控型构型;高位期则表现为河-潮共同控制的互层状砂体,砂体连片性较好。不同构型受控于特定的古地貌格局与沉积环境:河控厚层型多形成于三角洲发育早期,古地貌坡度较陡、物源充足、处于低海平面时期;受潮汐影响的薄层型主要形成于海侵期,地形相对平缓、物源供给较远。

5 结论

1) 三角洲沉积样式。EP22油层组发育浅水湖泊砂质辫状三角洲前缘,水下分流河道规模大、延伸远,具退积式特征;ZH115油层组为海侵背景下形成的远源砂质辫状三角洲前缘,潮汐改造显著,沉积规模较小,具退积式特征;ZH110油层组发育远源砂质辫状三角洲,呈前积式特征。

2) 复合砂体构型特征。研究区复合砂体属5级构型单元,根据地震信息识别4种砂体叠置关系。EP22油层组以多期水下分流河道叠置为主,呈深-中切叠型;ZH115油层组受海侵控制,砂体规模最小,多表现为薄层弱连片型,发育河口坝浅切叠型和弱切叠型;ZH110油层组在海退背景下,砂体以多期互层孤立与薄层连片为特征,呈现河口坝与水下分流河道的中-浅切叠型。

3) 控制机制。研究区三角洲沉积模式及砂体叠置样式主要受控于海平面变化与物源供给双重因素。海平面升降决定了沉积动力由河控向受潮汐影响的演化过程,进而影响砂体规模、厚度与连片性;物源供给强度与方向则直接控制砂体厚度与展布稳定性。两者耦合作用下,形成了不同体系域的沉积模式与复合砂体构型特征。

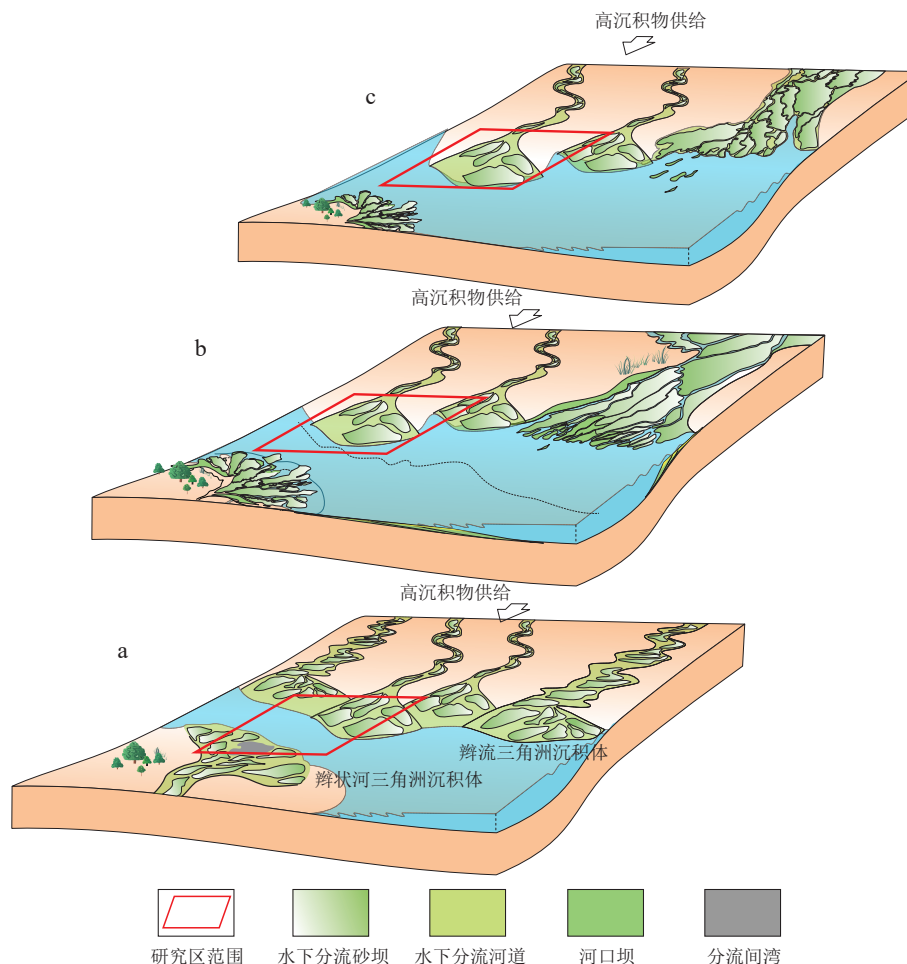


图 11 珠江口盆地开平凹陷东部低位-海侵-高位体系域沉积演化模式示意图

Fig. 11 Schematic diagram showing the sedimentary evolution model of the lowstand-transgressive-highstand systems tracts in the eastern Kaiping Sag, PRMB

a. 恩平组晚期;b. 珠海组早期;c. 珠海组晚期

参 考 文 献

- [1] 闫义, 夏斌, 林舸, 等. 南海北缘新生代盆地沉积与构造演化及地球动力学背景[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2005, 25(2): 53-61.
YAN Yi, XIA Bin, LIN Ge, et al. The sedimentary and tectonic evolution of the basins in the north margin of the south china sea and geodynamic setting [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2005, 25(2): 53-61.
- [2] 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.
- [3] 刘强虎, 彭光荣, 刘培, 等. 中国南海东沙隆起北缘晚始新世构造裂点迁移及其源-汇效应[J]. 石油与天然气地质, 2025, 46(3): 846-859.
LIU Qianghu, PENG Guangrong, LIU Pei, et al. Migration of the Late Eocene knickpoints and their source-to-sink system along the northern margin of the Dongsha Uplift, South China Sea [J]. Oil & Gas Geology, 2025, 46(3): 846-859.
- [4] 刘常妮, 吴胜和, 徐振华, 等. 湖盆浅水三角洲-离岸滩坝体系构型特征——以东营凹陷胜坨油田沙河街组为例[J]. 石油科学通报, 2025, 10(3): 430-445.
LIU Changni, WU Shenghe, XU Zhenhua, et al. Architectural characteristics of shallow water delta-offshore beach-bar system in lacustrine basin: Taking the Shahejie Formation of Shengtuo Oilfield, Dongying Sag as an example [J]. Petroleum Science Bulletin, 2025, 10(3): 430-445.
- [5] 莫博文, 陈仕臻, 秦玲, 等. 断陷湖盆扇三角洲沉积特征及砂体构型模式——以泌阳凹陷核一段 I-II 油组为例[J]. 断块油气田, 2025, 32(3): 381-388.
MO Bowen, CHEN Shizhen, QIN Ling, et al. Sedimentary

- characteristics of fan delta in faulted lake basin and architecture model of sand body: Taking I - II oil formation of He 1 Member of Biyang Sag as an example[J]. *Fault-Block Oil and Gas Field*, 2025, 32(3): 381-388.
- [6] 陈彬滔, 马轮, 洪亮, 等. 断陷湖盆陡坡带扇三角洲—滑塌扇复合扇体的沉积演化及油气地质意义——以中非地区 Melut 盆地 A 凹陷白垩系为例[J]. *沉积学报*, 2024, 42(3): 1058-1072.
- CHEN Bintao, MA Lun, HONG Liang, et al. Sedimentary evolution and controlling factors of fan delta and slump fan complex deposition in a steep slope belt of a faulted basin: A case study from the Cretaceous deposits of the a sag in Melut Basin, central Africa[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2024, 42(3): 1058-1072.
- [7] 朱筱敏, 陈贺贺, 葛家旺, 等. 陆相断陷湖盆层序构型与砂体发育分布特征[J]. *石油与天然气地质*, 2022, 43(4): 746-762.
- ZHU Xiaomin, CHEN Hehe, GE Jiawang, et al. Characterization of sequence architectures and sandbody distribution in continental rift basins[J]. *Oil & Gas Geology*, 2022, 43(4): 746-762.
- [8] 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.
- [9] 叶蕾, 朱筱敏, 秦祎, 等. 断陷湖盆浅水三角洲沉积体系[J]. *地球科学与环境学报*, 2018, 40(2): 186-202.
- YE Lei, ZHU Xiaomin, QIN Yi, et al. Depositional system of shallow water delta in rifted lacustrine basin[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2018, 40(2): 186-202.
- [10] 蔡全升, 胡明毅, 陈孝红, 等. 小型断陷湖盆扇三角洲沉积特征与发育模式——以徐家围子断陷北部沙河子组为例[J]. *岩性油气藏*, 2018, 30(1): 86-96.
- CAI Quansheng, HU Mingyi, CHEN Xiaohong, et al. Sedimentary characteristics and development model of fan delta in small faulted basin: a case of Shahezi Formation in northern Xujiaweizi Fault Depression, NE China [J]. *Lithologic Reservoirs*, 2018, 30(1): 86-96.
- [11] 朱红涛, 徐长贵, 朱筱敏, 等. 陆相盆地源—汇系统要素耦合研究进展[J]. *地球科学*, 2017, 42(11): 1851-1870.
- ZHU Hongtao, XU Changgui, ZHU Xiaomin, et al. Advances of the source-to-sink units and coupling model research in continental basin[J]. *Earth Science*, 2017, 42(11): 1851-1870.
- [12] 朱筱敏, 钟大康, 袁选俊, 等. 中国含油气盆地沉积地质学进展[J]. *石油勘探与开发*, 2016, 43(5): 820-829.
- ZHU Xiaomin, ZHONG Dakang, YUAN Xuanjun, et al. Development of sedimentary geology of petroliferous basins in China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2016, 43(5): 820-829.
- [13] 朱筱敏, 谈明轩, 董艳蕾, 等. 当今沉积学研究热点讨论——第20届国际沉积学大会评述[J]. *沉积学报*, 2019, 37(1): 1-16.
- ZHU Xiaomin, TAN Mingxuan, DONG Yanlei, et al. Current hot topics of sedimentology: Comment on the 20th international sedimentological congress [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2019, 37(1): 1-16.
- [14] 赵国祥, 官大勇, 刘朋波, 等. 庙西南凸起馆陶组浅水辫状河三角洲沉积特征及砂体演化[J]. *沉积学报*, 2018, 36(4): 807-817.
- ZHAO Guoxiang, GUAN Dayong, LIU Pengbo, et al. Sedimentary characteristics and sand body evolution of shallow braided river delta of Guantao Formation in Miaozi'nan uplift, Bohai Sea area[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2018, 36(4): 807-817.
- [15] 于兴河, 李胜利, 李顺利. 三角洲沉积的结构—成因分类与编图方法[J]. *沉积学报*, 2013, 31(5): 782-797.
- YU Xinghe, LI Shengli, LI Shunli. Texture-genetic classifications and mapping methods for deltaic deposits [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2013, 31(5): 782-797.
- [16] GAWTHORPE R L, LEEDER M R. Tectono-sedimentary evolution of active extensional basins[J]. *Basin Research*, 2000, 12(3/4): 195-218.
- [17] HENSTRA G A, ROTEVATN A, GAWTHORPE R L, et al. Evolution of a major segmented normal fault during multiphase rifting: The origin of plan-view zigzag geometry [J]. *Journal of Structural Geology*, 2015, 74: 45-63.
- [18] HENSTRA G A, GAWTHORPE R L, HELLAND-HANSEN W, et al. Depositional systems in multiphase rifts: Seismic case study from the Lofoten margin, Norway[J]. *Basin Research*, 2017, 29(4): 447-469.
- [19] BRUNER K R, SMOSNA R. Stratigraphic-tectonic relations in Spain's Cantabrian mountains: Fan delta meets carbonate shelf [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2000, 70(6): 1302-1314.
- [20] 蔡国富, 邵磊, 乔培军, 等. 琼东南盆地古近纪海侵及沉积环境演化[J]. *石油学报*, 2013, 34(增刊2): 91-101.
- CAI Guofu, SHAO Lei, QIAO Peijun, et al. Marine transgression and evolution of depositional environment in the Paleogene strata of Qiongdongnan Basin, South China Sea [J]. *Acta Petroli Sinica*, 2013, 34(S2): 91-101.
- [21] CAIN S A, MOUNTNEY N P. Spatial and temporal evolution of a terminal fluvial fan system: the Permian Organ Rock Formation, South-east Utah, USA[J]. *Sedimentology*, 2009, 56(6): 1774-1800.
- [22] COLELLA A. Fault-controlled marine Gilbert-type fan deltas[J].

- Geology, 1988, 16(11): 1031-1034.
- [23] GE Jiawang, ZHU Xiaomin, ZHAO Xiaoming, et al. Tectono-sedimentary signature of the second rift phase in multiphase rifts: A case study in the Lufeng Depression (38-33.9 Ma), Pearl River Mouth Basin, South China Sea [J]. Marine and Petroleum Geology, 2020, 114: 104218.
- [24] 彭光荣, 张丽丽, 许新明, 等. 珠江口盆地开平凹陷核杂岩拆离结构及其动力学成因[J]. 地球科学, 2024, 49(9): 3306-3317.
- PENG Guangrong, ZHANG Lili, XU Xinming, et al. Core complex and detachment structure in the kaiping sag, pearl river mouth basin and a discussion on the dynamics [J]. Earth Science, 2024, 49(9): 3306-3317.
- [25] 徐长贵, 高阳东, 刘军, 等. 珠江口盆地开平南大型深水深层油田发现与认识创新[J]. 中国海上油气, 2024, 36(1): 1-13.
- XU Changgui, GAO Yangdong, LIU Jun, et al. Discovery of large deep-water and deep-formation oilfield in South Kaiping Sag of Pearl River Mouth Basin and new geological understandings [J]. China Offshore Oil and Gas, 2024, 36(1): 1-13.
- [26] 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.
- 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.
- [27] 庞军刚, 杨友运, 蒲秀刚. 断陷湖盆扇三角洲、近岸水下扇及湖底扇的识别特征[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2011, 47(4): 18-23, 32.
- PANG Jungang, YANG Youyun, PU Xiugang. Identification characteristics of fan delta, nearshore subaqueous fan and sublacustrine fan in fault trough lake basin [J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2011, 47(4): 18-23, 32.
- [28] 王升兰, 刘晖. 珠江口盆地开平凹陷恩平组地震反射特征与沉积体系展布[J]. 科技导报, 2014, 32(增刊2): 64-69.
- WANG Shenglan, LIU Hui. Seismic reflection and depositional system of the Enping Formation in the Kaiping depression of the Zhujiangkou Basin [J]. Science & Technology Review, 2014, 32(S2): 64-69.
- [29] 邓运华, 兰蕾, 李友川, 等. 论三角洲对南海海相油气田分布的控制作用[J]. 石油学报, 2019, 40(增刊2): 1-12.
- DENG Yunhua, LAN Lei, LI Youchuan, et al. On the control effect of deltas on the distribution of marine oil and gas fields in the South China Sea [J]. Acta Petrolei Sinica, 2019, 40(S2): 1-12.
- [30] 屈童, 高岗, 徐新德, 等. 三角洲-浅海沉积体系陆源有机质沉积模拟实验研究——以琼东南盆地崖南凹陷崖城组为例[J]. 沉积学报, 2023, 41(2): 584-600.
- QU Tong, GAO Gang, XU Xinde, et al. Sedimentary simulation experiment study on the distribution of terrestrial organic matter in the delta-shallow sea sedimentary system: A case study of the Yacheng Formation in the Yanan Sag, Qiongdongnan Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2023, 41(2): 584-600.
- [31] 屈童. 琼东南盆地崖南凹陷崖城组三角洲沉积体系陆源有机质分布模拟[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2020: 1-20.
- QU Tong. Simulation of terrestrial organic matter distribution in the delta sedimentary system of the Yacheng Formation in the Yanan Depression, Qiongdongnan Basin [D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2020: 1-20.
- [32] 曾智伟, 朱红涛, 杨香华, 等. 珠江口盆地白云凹陷恩平组物源转换及沉积充填演化[J]. 地球科学, 2017, 42(11): 1936-1954.
- ZENG Zhiwei, ZHU Hongtao, YANG Xianghua, et al. Provenance transformation and sedimentary evolution of Enping Formation, Baiyun Sag, Pearl River Mouth Basin [J]. Earth Science, 2017, 42(11): 1936-1954.
- [33] 徐强, 王英民, 吕明, 等. 陆架边缘三角洲在层序地层格架中的识别及其意义——以南海白云凹陷为例[J]. 石油与天然气地质, 2011, 32(5): 733-742.
- XU Qiang, WANG Yingmin, LYU Ming, et al. Identification of the shelf margin delta in sequence stratigraphic frameworks and its significance: A case study of the Baiyun Sag, South China Sea [J]. Oil & Gas Geology, 2011, 32(5): 733-742.
- [34] 李燕, 邓运华, 李友川. 河流-三角洲体系微相控烃及机理研究: 以珠江口盆地恩平组煤系烃源岩为例[J]. 现代地质, 2021, 35(4): 1065-1077.
- LI Yan, DENG Yunhua, LI Youchuan. Characteristics and mechanism of source rock development controlled by sedimentary microfacies in river-delta system: Case study of coal-measure source rock in Enping Formation in Pearl River Estuary Basin [J]. Geoscience, 2021, 35(4): 1065-1077.
- [35] 郭齐军, 邓铭哲, 张晨雨, 等. 中国含油气盆地不同构造样式及其油气地质意义[J]. 石油与天然气地质, 2024, 45(3): 609-621.
- GUO Qijun, DENG Mingzhe, ZHANG Chenyu, et al. Structural styles and their geological significance to petroliferous basins of China [J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(3): 609-621.
- [36] 徐长贵, 高阳东, 刘军, 等. 复合陆缘盆地成盆机制及其控藏作用——以中国南海北部珠江口盆地为例[J]. 石油与天然气地质, 2025, 46(3): 719-739.
- XU Changgui, GAO Yangdong, LIU Jun, et al. Formation mechanisms of composite continental-margin basins and their control of hydrocarbon accumulation: A case study of the Pearl River Mouth Basin, northern South China Sea [J]. Oil & Gas Geology, 2025, 46(3): 719-739.
- [37] 张功成, 米立军, 吴时国, 等. 深水区——南海北部大陆边缘

- 盆地油气勘探新领域[J]. 石油学报, 2007, 28(2): 15-21.
- ZHANG Gongcheng, MI Lijun, WU Shiguo, et al. Deepwater area—The new prospecting targets of northern continental margin of South China Sea [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2007, 28(2): 15-21.
- [38] 高阳东, 彭光荣, 陈兆明, 等. 珠江口盆地开平凹陷深水古近系勘探重大发现及意义[J]. 石油学报, 2023, 44(7): 1029-1040.
- GAO Yangdong, PENG Guangrong, CHEN Zhaoming, et al. Breakthrough and significance of deep-water Paleogene exploration in Kaiping sag, Pearl River Mouth Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2023, 44(7): 1029-1040.
- [39] 远光辉, 彭光荣, 张丽丽, 等. 珠江口盆地白云凹陷古近系深层高变温背景下储层成岩作用与低渗致密化机制[J]. 石油与天然气地质, 2024, 45(1): 44-64.
- YUAN Guanghui, PENG Guangrong, ZHANG Lili, et al. Diagenesis and low-permeability tightening mechanisms of the deep Paleogene reservoirs under high temperature and highly variable geothermal gradients in the Baiyun Sag, Pearl River Mouth Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2024, 45(1): 44-64.
- [40] 熊连桥. 开平凹陷文昌组沉积特征及半深湖空间分布[J]. 中国海上油气, 2021, 33(5): 51-61.
- XIONG Lianqiao. Sedimentary characteristics and semi-deep lacustrine facies spatial distribution of Wenchang Formation in Kaiping Sag [J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2021, 33(5): 51-61.
- [41] 李智, 张志业, 何登发, 等. 珠江口盆地开平凹陷构造单元划分与平面复原[J]. 海洋地质前沿, 2023, 39(7): 70-78.
- LI Zhi, ZHANG Zhiye, HE Dengfa, et al. Tectonic division and plane restoration of Kaiping Sag, Pearl River Mouth Basin [J]. *Marine Geology Frontiers*, 2023, 39(7): 70-78.
- [42] 蔡嵩, 彭光荣, 陈兆明, 等. 珠江口盆地开平凹陷古近系构造特征及构造演化分析[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2023, 43(2): 106-118.
- CAI Song, PENG Guangrong, CHEN Zhaoming, et al. Paleogene tectonic evolution of Kaiping Sag, Pearl River Mouth Basin [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2023, 43(2): 106-118.
- [43] 彭光荣, 蔡国富, 李洪博, 等. 珠江口盆地深水区陆缘地壳细颈化带构造变形及其油气地质意义[J]. 石油勘探与开发, 2025, 52(4): 830-841.
- PENG Guangrong, CAI Guofu, LI Hongbo, et al. Tectonic deformation and its petroleum geological significance of continental margin necking zone in deepwater area of Pearl River Mouth Basin, South China Sea [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2025, 52(4): 830-841.
- [44] 高阳东, 刘军, 彭光荣, 等. 珠江口盆地油气勘探新领域及资源潜力[J]. 石油学报, 2024, 45(1): 183-201.
- GAO Yangdong, LIU Jun, PENG Guangrong, et al. New fields and resource potential of oil and gas exploration in Pearl River Mouth Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2024, 45(1): 183-201.
- [45] 高阳东, 龙祖烈, 陈聪, 等. 珠江口盆地开平凹陷南部区域中深层原油地球化学特征及成因[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2024, 54(6): 1883-1895.
- GAO Yangdong, LONG Zulie, CHEN Cong, et al. Geochemical Characteristics and Genesis of Middle and Deep Oil in Southern Region of Kaiping Sag, Pearl River Mouth Basin. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2024, 54(6): 1883-1895.
- [46] 李宏涛. 基于井-震联合的辫状河沉积微相分析——以鄂尔多斯盆地东胜气田锦77井区为例[J]. 石油与天然气地质, 2025, 46(1): 91-107.
- LI Hongtao. Microfacies analysis of braided river deposits based on seismic-to-well ties: A case study of the Jin-77 well block in the Dongsheng gas field, Ordos Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2025, 46(1): 91-107.
- [47] MIALD A D. Architectural-element analysis: A new method of facies analysis applied to fluvial deposits [J]. *Earth-Science Reviews*, 1985, 22(4): 261-308.

(编辑 董奕含)