

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

刘常妮^{1,2}, 吴胜和^{1,2*}, 徐振华^{1,2}, 岳大力^{1,2}, 王武荣^{1,2}, 陈亚坤^{1,2}, 孙以德³, 崔文富³, 李克利³

1 中国石油大学(北京)油气资源与工程全国重点实验室, 北京 102249

2 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249

3 中国石化胜利油田分公司, 东营 257001

* 通信作者, reser@cup.edu.cn

收稿日期: 2025-01-16; 修回日期: 2025-04-09

中国石油大学(北京)科研基金(2462023YJRC034)资助

摘要 浅水三角洲广泛发育于湖泊环境中, 受到波浪的改造作用, 可在其前端形成离岸滩坝沉积。湖盆浅水三角洲—离岸滩坝体系可作为重要的油气储层类型, 其构型特征尚不清楚。本文综合利用岩心与密井网资料, 对渤海湾盆地东营凹陷胜坨油田二区沙河街组二段 2 砂组砂体开展了精细构型解剖, 结合基于 Delft3D 的沉积数值模拟结果, 阐明了湖盆浅水三角洲—离岸滩坝体系构型特征与形成机理。研究认为, 浅水三角洲—离岸滩坝体系在顺源方向上具有明显的相带分异特征, 呈现浅水三角洲前缘—小规模滩砂—大规模坝砂—小规模滩坝砂的顺源演变规律。浅水三角洲前缘与大规模的离岸坝砂同时形成, 两者之间发育后期形成小型滩砂。浅水三角洲前缘表现出波浪影响的特点, 分流河道分支数量少、深切于河口坝中部, 河口坝呈朵状, 分流河道在前进到一定距离后决口在侧向形成新的河口坝。大规模透镜状的厚层坝砂形成于破浪带附近, 最先发育于三角洲的侧前方滩砂两侧部位, 由两个小型坝砂生长、拼接而成, 具有平面双厚中心、剖面驼峰状的特点。河口坝与大规模坝砂的规模相对较大、宽厚比高, 前者的长宽比较低, 而后者的长宽比较大; 近端与远端滩砂的规模较小, 长宽比与宽厚比也较小。本文研究为东营凹陷胜坨油田剩余油的精细挖潜提供参考和借鉴。

关键词 浅水三角洲; 离岸滩坝; 湖浪改造; 构型; 胜坨油田; 沉积数值模拟

中图分类号: P618.13; TE122

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

LIU Changni^{1,2}, WU Shenghe^{1,2}, XU Zhenhua^{1,2}, YUE Dali^{1,2}, WANG Wurong^{1,2}, CHEN Yakun^{1,2}, SUN Yide³, CUI Wenfu³, LI Keli³

引用格式: 刘常妮, 吴胜和, 徐振华, 岳大力, 王武荣, 陈亚坤, 孙以德, 崔文富, 李克利. 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. 石油科学通报, 2025, 10(03): 430–445

LIU Changni, WU Shenghe, XU Zhenhua, YUE Dali, WANG Wurong, CHEN Yakun, SUN Yide, CUI Wenfu, LI Keli. 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. Petroleum Science Bulletin, 2025, 10(03): 430–445. DOI: 10.3969/j.issn.2096-1693.2025.01.010

1 State Key Laboratory of Petroleum Resources and Engineering, China University of Petroleum, Beijing 102249, China

2 College of Geosciences, China University of Petroleum, Beijing 102249, China

3 Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Dongying 257001, China

Received: 2025-01-16; Revised: 2025-04-09

Abstract Shallow water deltas are widely developed in lake environments. Under the modification of waves, offshore beach-bar deposits can be formed at the delta front. The shallow water delta-offshore beach-bar system in the lacustrine basin can be an important oil and gas reservoir type, and its architectural characteristics are still unclear. In this paper, the sand bodies of the 2nd submember of the 2nd member of the Eocene Shahejie Formation (E_{s2}) in the 2nd Block of Shengtuo Oilfield, Dongying Sag, Bohai Bay Basin were finely dissected by using core and abundant well data. Combined with the results of sedimentary numerical simulation based on Delft3D, the architectural characteristics and formative mechanism of the shallow water delta-offshore beach-bar system in the lacustrine basin were explained. The study believes that the shallow water delta-offshore beach-bar system has obvious facies differentiation characteristics along the provenance direction, showing the evolution law of shallow water delta front to small-scale beach sand to large-scale bar sand to small-scale beach-bar sand. The shallow water delta front and large-scale offshore bar sand were formed simultaneously, while the small-scale beach sands developed later in areas between them. The front of the shallow delta shows the characteristics of wave influence. The number of distributary channel branches is small and the distributary channel is deeply cut in the middle of the mouth bar. The mouth bar is in the shape of a fan. After the distributary channel has extended a certain distance, it avulses and forms a new mouth bar laterally. Large-scale lenticular thick bar sands are formed proximal to the surf zone, initially developing on both sides of delta-front shoreline sands through the growth and coalescence of two small bar units. These composite features display biconvex thickness maxima (dual-thick centers) with a characteristic humpbacked morphology. The scale of the mouth bar and the large-scale bar sand is relatively large and the aspect ratio is high. The length-to-width ratio of the former is low, while the length-to-width ratio of the latter is large; the scale of the proximal and distal beach sand is small, and the aspect ratio is also small. This study provides reference for the fine-scale potential tapping of remaining oil in the Shengtuo Oilfield of the Dongying Sag.

Keywords shallow water delta; offshore beach-bar; lake wave modification; architecture; Shengtuo Oilfield; sedimentary numerical simulation

DOI: 10.3969/j.issn.2096-1693.2025.01.010

0 引言

湖盆浅水三角洲是在构造稳定、地形相对平缓的浅水湖泊环境中形成的三角洲,其河—盆水深比一般大于等于 1^[1-5],可形成于拗陷湖盆或断陷湖盆拗陷期湖盆中^[6-8]。这类三角洲易形成面积较广的砂体,是我国重要的油气储层类型,已发现于鄂尔多斯、渤海湾、四川、松辽等多个大型含油气盆地,资源潜力巨大^[1-2,9-10]。

湖盆浅水三角洲的沉积特征会受到河流与湖浪作用的共同影响。前人指出,河流流量与携带沉积物特征直接影响着浅水三角洲的形态、规模与河—坝组合关系^[11-14]。湖浪则通过改造浅水三角洲影响着三角洲的沉积特征,导致分流河道的数量减少^[15-16]、河口坝的发育程度较低^[17-19]、三角洲岸线平滑^[20-21],在三角洲前缘可发育席状砂^[22],也可在侧缘形成与三角洲交织叠加的沿岸砂坝^[8,23]。此外,三角洲前端常见由湖浪携带改造的沉积物形成的、与湖岸线斜交或平行的离岸滩坝,呈条带状或者透镜状展布^[24-27]。前人研

究认为,水动力条件、物源、古地貌形态和湖平面升降等多种因素共同控制了离岸滩坝的形成和发育,有学者概括性提出了“风场—物源—盆地”系统,认为滩坝的形成是“风场—物源—盆地”系统的统一作用^[25,28-30]。其中不同波浪水动力带会形成分带明显的滩坝相间的格局^[30-31],波浪能量大小会影响滩坝的规模^[32],湖平面升降往往控制着滩坝的发育位置^[33-34],物源供应强度控制着砂质滩坝的发育程度^[35-37],古地貌形态控制着滩坝发育位置与分布范围^[38-39]。前人分别针对浅水三角洲与离岸滩坝的沉积构型持续开展相关研究^[14,40-43],但对两者之间的耦合作用考虑不足,浅水三角洲与离岸滩坝体系的沉积构型与形成机理仍需要进一步研究。

本文以胜坨油田二区古近系沙河街组二段 2 砂组储层为例,综合应用岩心、密井网与动态资料,探讨浅水三角洲与离岸滩坝体系的沉积构型特征;基于沉积数值模拟,分析其沉积过程;基于此,探讨浅水三角洲与离岸滩坝体系的沉积模式与形成机理,这将对该类油气藏精细勘探和开发具有实际意义,同时对于

深化湖盆三角洲沉积学具有一定的理论意义。

1 区域地质概况

胜坨油田位于山东省东营市垦利县境内,构造上处于渤海湾盆地济阳坳陷东营凹陷北部(图 1a),为一个被断层复杂化的逆牵引背斜构造油田,总面积约 230 km²^[44-45](图 1b)。根据断块分布,胜坨油田被划分为一区、二区和三区,本次研究区为胜二区东部的开发调整试验区块(图 1c),位于胜坨油田东部高点西南翼,为一个自北东向南西方向倾伏的单斜断块油藏,含油面积约为 22.6 km²^[46-47]。

胜二区古近系自下而上发育孔店组、沙河街组和东营组,其中,沙河街组内部自下而上划分为沙四段

至沙一段 4 个岩性段,沙二段(Es₂)又可分为上下 2 个亚段、15 个砂组^[48](图 2a~b)。本文关注的目的层段为沙二段 2 砂组 2⁴ 小层,细分为 2⁴⁽¹⁾和 2⁴⁽²⁾单层^[47](图 2c)。在沙二段沉积晚期,东营凹陷表现为坳陷特征,水体相对较浅、构造稳定,发育浅水三角洲平原及前缘沉积,主要依据如下:①沙二段 1 砂组顶部发育红色泥岩(“红层”),1~2 砂组内部发育紫红色与灰绿色泥岩(图 3a~b),反映沉积期氧化环境和还原环境并存,为水下与水上交互环境;②目的层段发育较多的完整螺化石(图 3c),反映浅水沉积环境;③顺物源方向单层地层厚度变化很小,平均地层厚度变化率<16%,单层平均厚度小于 5 m,反映缓坡环境。以上均表明研究区在 1~2 砂组时期为浅水环境。研究区物源来自北东方向,受湖浪改造作用,三角洲前端发育

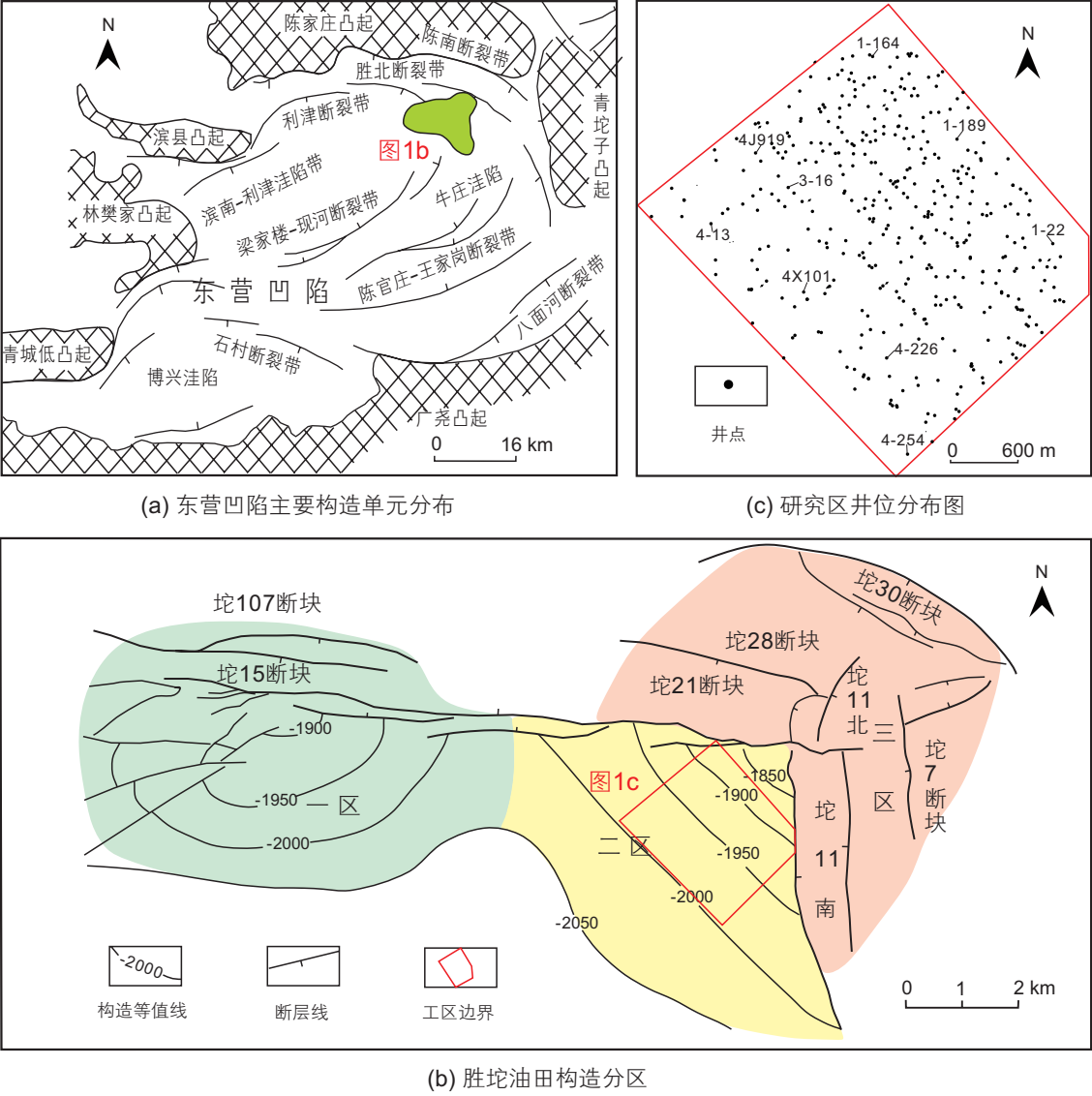


图 1 东营凹陷与研究区区域位置图(据文献[47]修改)
Fig. 1 Location map of the Dongying Sag and the study area (modified from reference[47])

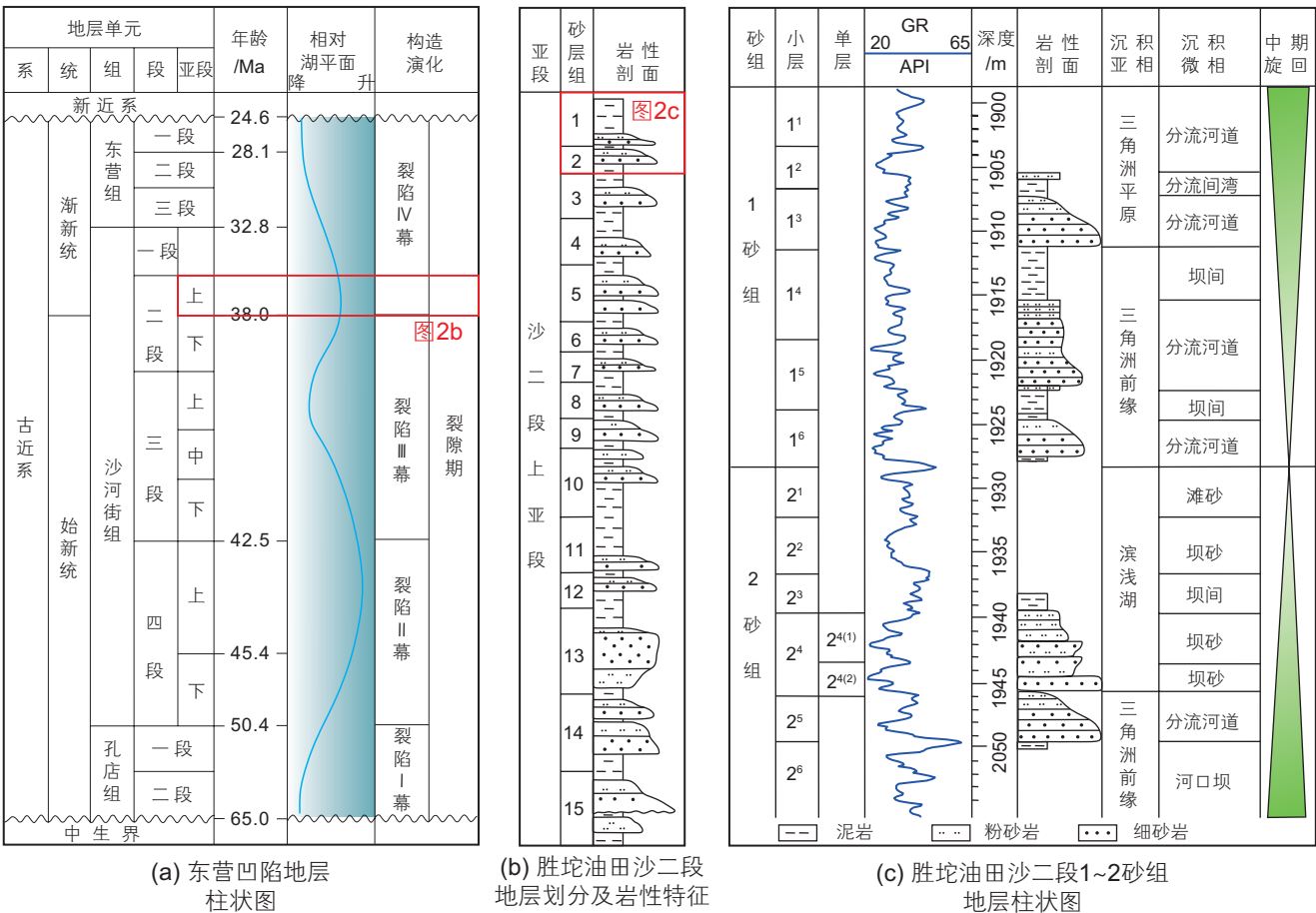


图 2 东营凹陷沙河街组综合地层柱状图 (据文献 [47] 修改)

Fig. 2 Comprehensive stratigraphic column of the Shahejie Formation of Dongying Sag (modified from reference[47])

离岸滩坝沉积 [47,49–50]。研究区砂体岩性以细砂岩及粉砂岩为主，成岩作用较弱，粒间孔隙较为发育，平均孔隙度约为 30%，平均渗透率约为 1400 mD，为高孔高渗透储层 [51–52]。前人针对研究区的浅水三角洲与离岸滩坝分别开展了一定的研究，但是两者之间的耦合配置关系与构型特征仍需进一步研究。

2 研究方法

2.1 构型表征方法

研究区具有三维地震资料，主频 32 Hz；井资料丰富，取心井 13 口，目的层段取心长度超 500 m，具有常见的分析化验资料；钻井 489 口井，平均井距为 70 m，最近井距仅为 16 m，各类测井曲线较为齐全。研究区生产动态资料也较为丰富，除了生产数据，还包括示踪剂立体监测数据 63 个井对、吸水剖面共 25 口井与饱和度测井 15 口井。基于上述资料，可实现研究区三角洲—离岸滩坝精细构型解剖，具体思路为：首先，采用井震结合、标志层与旋回对比的方法，分

级次开展等时地层对比，建立单层级次的精细等时地层格架；然后，基于岩心资料，识别不同的构型单元类型，确定测井解释标准并完成单井解释；最后，根据密井网资料与生产动态资料，结合地震属性分析结果，采用动静结合、平剖互动的方式，识别单一构型单元的边界，绘制 2 砂组 2⁴ 小层内部 2 个单层的构型单元平面分布图与剖面图，表征浅水三角洲—离岸滩坝体系构型特征。

2.2 沉积数值模拟方法

Delft3D(V. 4.04.01)是荷兰代尔夫特理工大学 (TUDelft) 开发的一套三维水动力数值模拟软件，能够有效模拟波浪影响的浅水三角洲形成过程，再现滩坝的形成过程 [21]。本文利用该软件，基于研究区的沉积条件，分析浅水三角洲—离岸滩坝的沉积过程。

2.2.1 基本原理

Delft3D 软件利用 Flow 模块完成河流作用过程的模拟，主要基于流体流动和泥沙输运的数值模型 [53]，遵循物质平衡原理，应用沉积及侵蚀方程求解实现沉

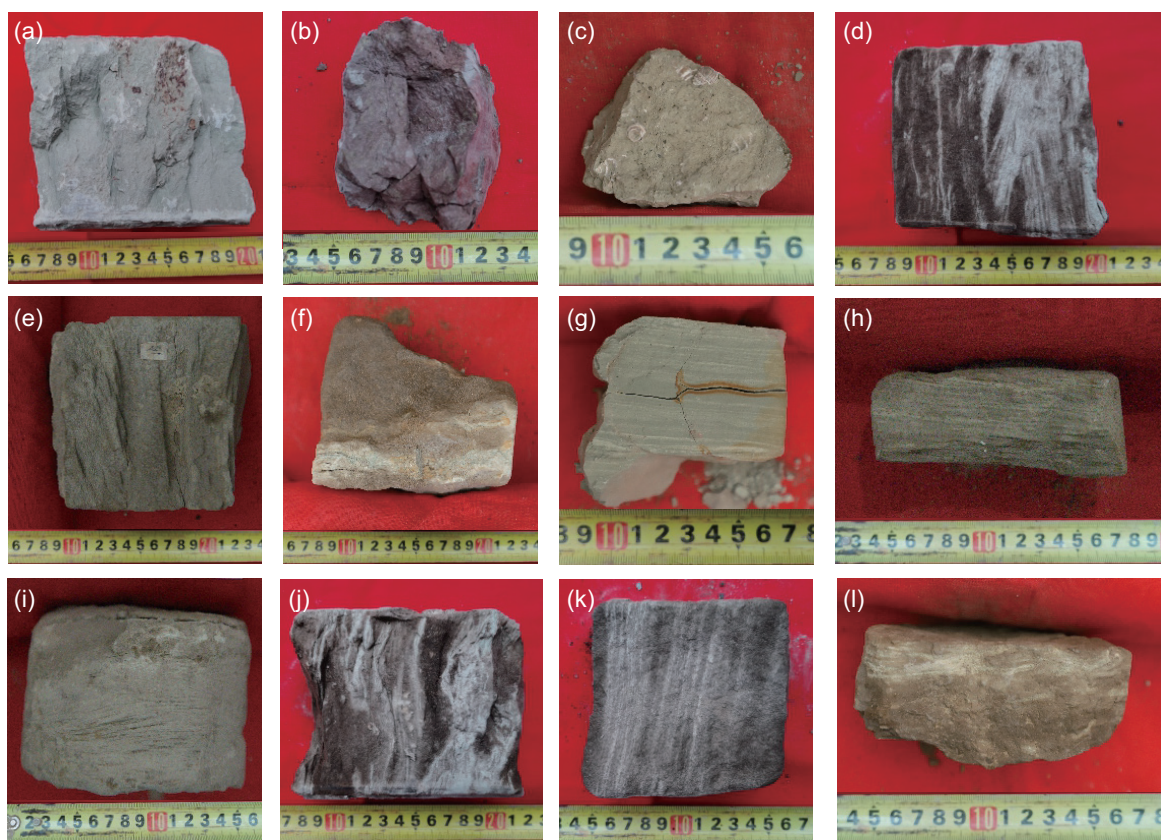


图 3 东营凹陷胜二区沙二段 1~2 砂组沉积构造特征

(a)灰绿色泥岩, ST2-4J919, 1958.2 m; (b)紫红色泥岩, ST2-3J1503, 1948 m; (c)完整螺化石, ST2-5J1502, 2030 m; (d)槽状交错层理, ST2-4J919, 2005.3 m; (e)板状交错层理, ST2-3-189, 2014 m; (f)冲刷面, ST2-3J1803, 1920 m; (g)水平层理粉砂岩, ST2-3-189, 2011 m; (h)板状交错层理, ST2-4-91, 2030 m; (i)槽状交错层理, ST2-4-91, 1992 m; (j)砂泥互层, 波状层理, ST2-3-169, 1996 m; (k)平行层理, ST2-3J1503, 1980 m; (l)波状交错层理, ST2-3J1503, 1970 m

Fig. 3 Sedimentary structure features of the 1st and 2nd members of Es₂ in the 2nd Block of Shengtuo Oilfield, Dongying Sag

积物搬运与沉积过程、沉积特征的三维模拟^[54]。

Delft3D 软件利用 Wave 模块完成波浪作用过程的模拟^[21]。该模块采用 SWAN 模型较系统地模拟波浪产生、传播及耗散过程,并考虑了风力产生波浪、白浪消散、底部摩擦过程以及深度引起的波浪破碎和非线性波浪相互作用^[55]。波浪谱通过谱作用密度方程来表示:

$$\frac{\partial N(\sigma, \theta)}{\partial t} + \frac{\partial c_x N(\sigma, \theta)}{\partial x} + \frac{\partial c_y N(\sigma, \theta)}{\partial y} + \frac{\partial c_\sigma N(\sigma, \theta)}{\partial \sigma} + \frac{\partial c_\theta N(\sigma, \theta)}{\partial \theta} = \frac{S(\sigma, \theta)}{\sigma} \quad (1)$$

式中, σ 为波浪频率, Hz; θ 为波浪方向; $N(\sigma, \theta)$ 为作用密度, m^2/Hz^2 ; c_x , c_y 分别为波浪在 x , y 方向上的传播速度, m/s ; c_σ , c_θ 分别为波浪在 σ , θ 上的传播速度, Hz/s , $^\circ/\text{s}$; $S(\sigma, \theta)$ 为在源或汇处的能量密度, m^2/Hz 。

Wave 与 Flow 模块具有动态交互作用,通过两者

的交互式计算,实现浅水三角洲-离岸滩坝的复杂水动力模拟。

2.2.2 模拟参数

参考研究区的三角洲与滩坝的规模与水动力条件,设置沉积数值模拟参数。根据研究区规模设定模拟的工区大小为 $7.5 \text{ km} \times 5.625 \text{ km}$,共包含 300×225 个网格,网格大小为 $25 \text{ m} \times 25 \text{ m}$ 。研究区三角洲-滩坝形成于浅水湖盆,根据密井网资料估算坡降范围介于 $0.5\text{‰} \sim 1\text{‰}$,因此,设置模拟湖盆初始平坦底形,坡降为 0.8‰ ,湖盆水位高度设置为 0 m ,湖平面不变,湖盆最大水深为 4 m (图 4)。根据岩心资料,统计了研究区中砂岩、细砂岩和粉砂岩比例,近似为 10% 、 80% 、 10% ,砂岩与泥岩发育程度相似,据此,模拟中设置粒度中值为 $200 \mu\text{m}$,砂泥比为 $1:1$ 。根据 Schumm(1972)提出的经验公式^[56],估算研究区河口处的水排量约为 $200 \sim 250 \text{ m}^3/\text{s}$,故模拟中设置水排量为 $200 \text{ m}^3/\text{s}$ 。沉积物浓度估算难度较大,本次参考

鄱阳湖赣江三角洲现代沉积含沙量特征^[57], 设置浓度为 0.1 kg/m³。参考前人对东营凹陷沙河街组古波浪的恢复结果^[58-59], 设置了波浪相关模拟参数, 包括波浪方向(垂直于岸线方向)、浪高(0.5 m)与周期(5 s)。此

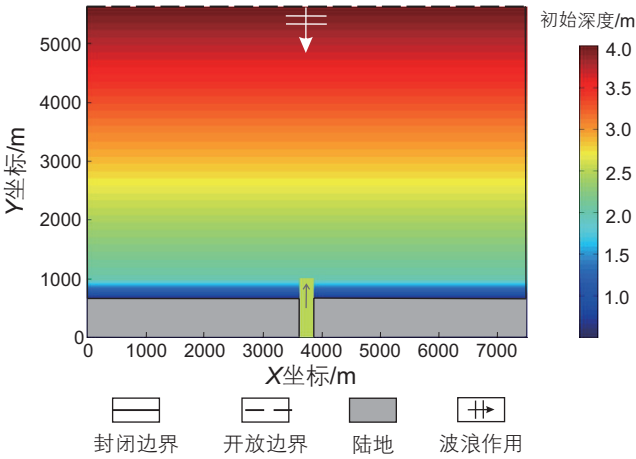


图 4 模拟区初始水深分布图
Fig. 4 Initial water depth distribution map of the simulation area

外, 设置了波浪携带沉积物, 沉积物粒度与浓度与河流供给相同, 反映沿岸流改造所携带而来的沉积物。

为了保证模拟精度, 模拟的时间步长为 0.1 min。模拟过程中, 可以通过增加形态尺度因子, 加速沉积物的沉积, 从而提高模拟效率^[13], 本次设定该因子为 120, 保证模拟的可信性, 模拟结果反映的真实沉积时间应为模拟时长的 120 倍。

3 构型单元类型与特征

研究区目的层段主要发育中砂岩、细砂岩、粉砂岩及泥岩等沉积。通过沙二段的岩心观察与描述, 目的层段内识别了 5 种主要的储层构型单元类型, 即分流河道(包括平原分流河道和前缘分流河道)、溢岸、河口坝、坝砂、滩砂, 并确定了各构型单元特征(见图 5)。

分流河道为浅水三角洲的主体微相, 岩性以中砂岩、细砂岩和粉细砂岩为主, 可见少量粗砂岩及含砾砂岩, 沉积构造可见楔状、板状、槽状交错层理(图 3d~e)和冲刷面(图 3f)。单砂体厚度较大, 多大于

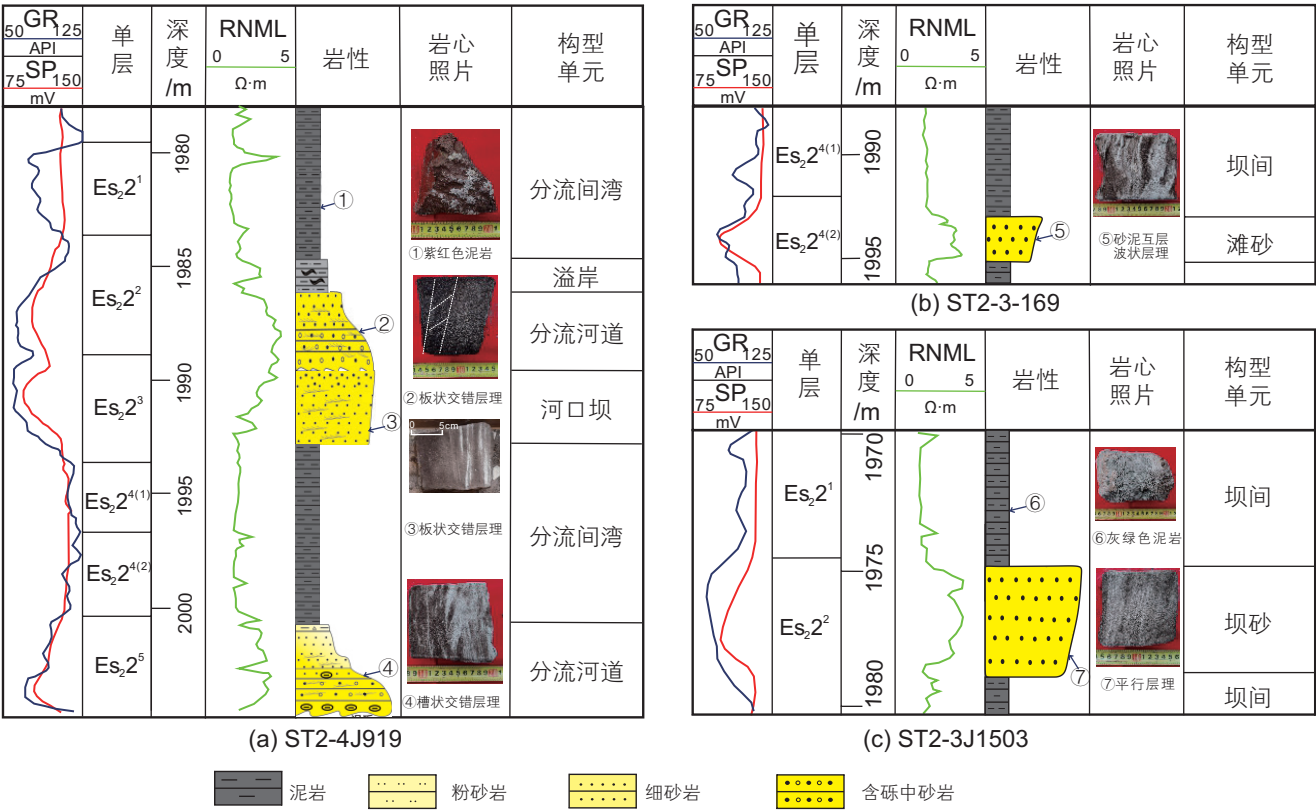


图 5 东营凹陷胜二区不同类型构型单元的测井及岩心特征 (a) 分流河道和河口坝的测井及岩心特征; (b) 滩砂和坝间泥岩的测井及岩心特征; (c) 坝砂和坝间泥岩的测井及岩心特征
Fig. 5 Well logging and core characteristics of different types of architectural units in the 2nd Block of Shengtuo Oilfield, Dongying Sag (a) well logging and core characteristics of distributary channel and mouth bar; (b) well logging and core characteristics of beach-sand and interbar-mud; (c) well logging and core characteristics of bar-sand and interbar-mud

2 m, 垂向上呈正韵律(图 5a)。

溢岸为分流河道两侧天然堤、决口水道、决口扇等的统称, 岩性以粉砂岩和泥质粉砂岩为主, 多为砂泥互层, 发育小型交错层理和波状层理(图 3g)。单砂体厚度较薄, 多小于 2 m, 垂向上呈弱正韵律(图 5a)。

河口坝发育于浅水三角洲前缘, 岩性以中细砂岩为主, 含少量粗砂岩, 发育板状层理、平行层理(图 3h、i); 单砂体厚度较小, 多介于 1.5~3 m, 垂向上呈反韵律(图 5a)。

滩坝可以细分为滩砂与坝砂。滩砂是滩坝中在相对低能的水动力条件下形成的较薄砂体, 岩性以粉细砂、细砂岩为主, 分选性相对好, 发育波状层理(图 3j)。单砂体厚度较小, 多小于 3 m, 垂向上韵律不明显(图 5b); 坝砂是滩坝中在相对高能的水动力条件下形成的较厚砂体。岩性以中砂岩为主, 分选性好, 发育波状交错层理、平行层理(图 3k~l)。单砂体厚度较大, 多介于 3~6 m, 垂向上呈均质韵律或反韵律(图 5c)。从沉积过程上来看, 薄层的滩砂先形成, 在滩砂之上逐渐沉积增厚形成了坝砂, 事实上, 滩砂与坝砂之间没有明确的物理界面, 本文根据厚度差异及水动力强弱, 在侧向上区分滩砂与坝砂, 随着滩砂的加积增厚, 达到坝砂的厚度标准后, 认为滩砂已转变为了坝砂。

此外, 在平原分流河道间发育着分流间湾, 前缘河

口坝之间与滩坝之间发育着坝间沉积, 其岩性均为泥质岩类, 包括泥质粉砂岩、粉砂质泥岩与泥岩(图 5a~c)。

通过岩电标定, 确定了不同类型构型单元的测井响应特征, 并建立单井解释标准(图 6), 完成了研究区单井构型单元解释。

4 浅水三角洲 – 离岸滩坝体系构型特征

在单井构型单元类型识别的基础上, 利用密井网资料, 对研究区浅水三角洲 – 离岸滩坝体系的内部构型进行解剖, 绘制了构型单元平面与剖面分布图(图 7~8), 明确了分布样式及定量规模。

4.1 分布样式

基于 2 砂组 2⁴ 小层内部 2 个单层的构型单元平面分布图(图 7), 可以发现, 研究区表现为小三角洲前缘 – 大滩坝的宏观分布特征。顺源方向上具有明显的相带分异特征, 向湖盆方向, 主要的构型单元类型表现为分流河道 – 河口坝 – 滩砂 – 坝砂 – 滩砂的演变规律(图 8A–A')。

近源端浅水三角洲平原主要发育平原分流河道砂体, 数量较多, 可分叉与交汇, 呈交织状, 平原分流河道两侧可见少量离散透镜状的溢岸沉积(图 7)。垂



图 6 东营凹陷胜二区不同类型构型单元的测井解释模板

Fig. 6 Well logging interpretation templates for different types of architectural units in the 2nd Block of Shengtuo Oilfield, Dongying Sag

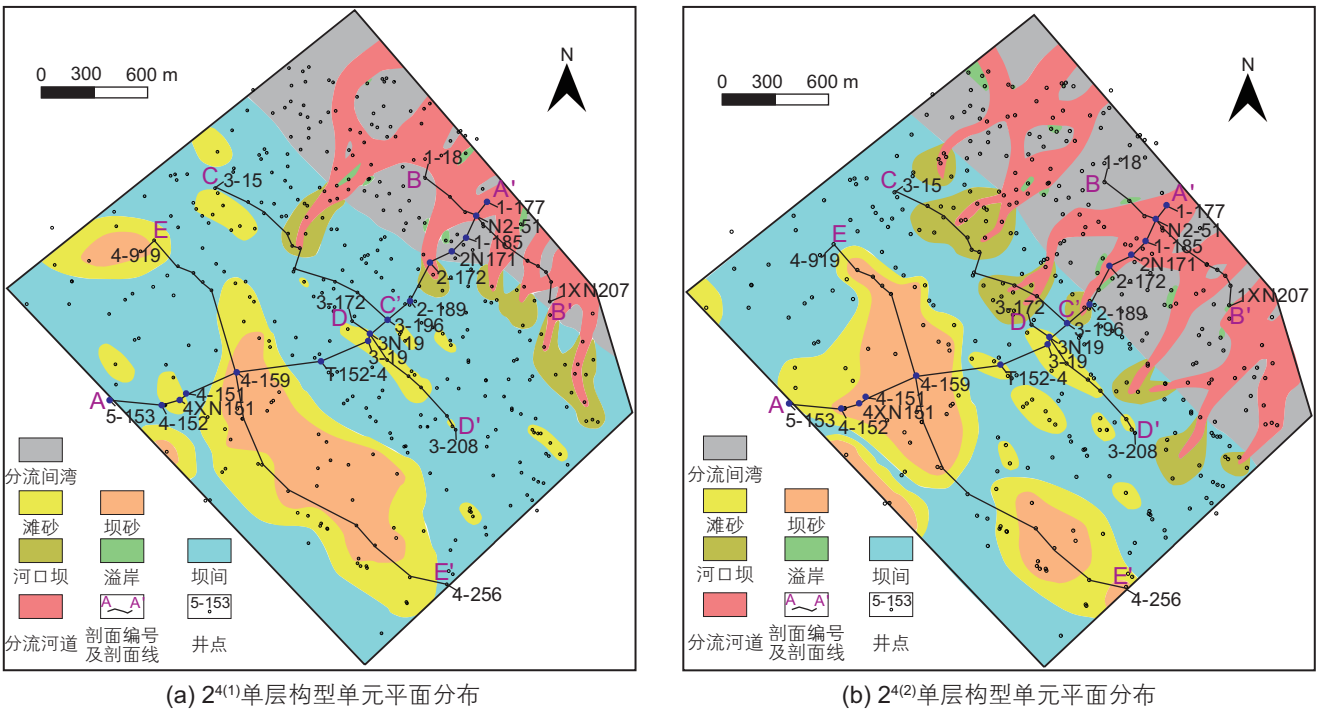


图 7 东营凹陷胜二区单层构型单元平面分布

Fig. 7 Planar distribution of single-layer architectural units in the 2nd Block of Shengtuo Oilfield, Dongying Sag

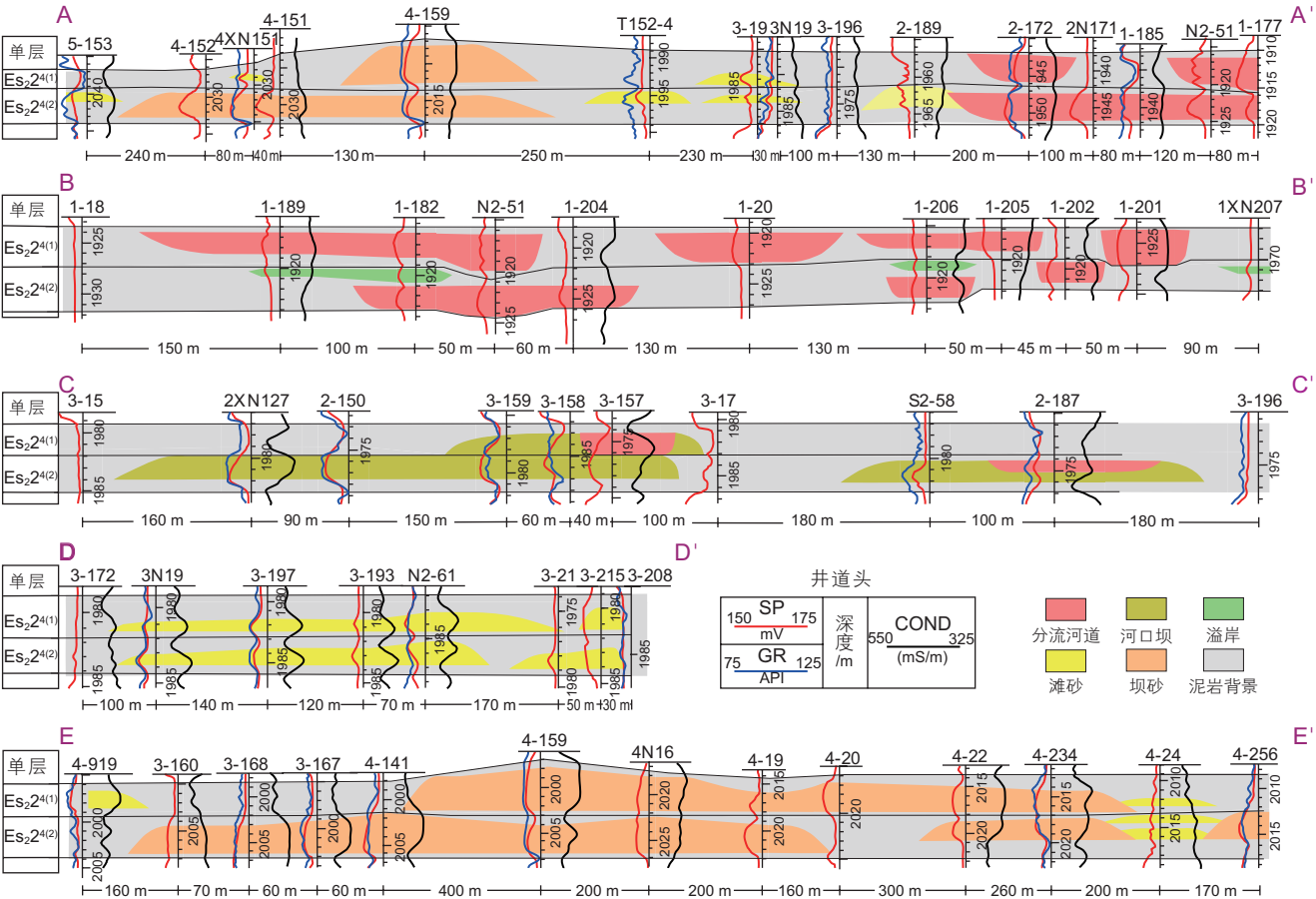


图 8 东营凹陷胜二区 2⁴ 小层的构型剖面图

Fig. 8 Architectural profile of the Es₂ 2⁴⁽¹⁾ layer in the 2nd Block of Shengtuo Oilfield, Dongying Sag

向上, 平原分流河道侧向迁移叠置, 多期平原分流河道之间多发育泥岩隔层, 部分水道之间由于下切作用垂向相接(图 8B-B')。

平原分流河道延伸至河口处, 形成三角洲前缘朵叶砂体, 延伸不远, 表现出较低的长宽比, 岸线较为光滑, 规模较小。朵叶由前缘分流河道与河口坝组成, 前缘分流河道的分流程度低, 多为 1~2 支, 延伸较短, 分布于河口坝中部, 河口坝呈朵状, 向湖方向撒开(图 7)。前缘分流河道深切于河口坝中部, 河口坝呈翼状分布于前缘分流河道两侧, 表现出河在坝上走的样式(图 8C-C')。河口坝的侧向迁移程度较弱, 表现出垂向叠置样式(图 8C-C')。

三角洲前端的湖盆近端, 形成小规模零星分布的透镜状滩坝, 沿岸方向展布, 宽度较窄, 长宽比较大, 滩坝由较薄的滩砂组成, 坝砂不发育(图 7)。滩坝之间离散分布, 侧向与垂向上不接触, 由坝间泥岩沉积相隔(图 8D-D')。

在湖盆中端, 发育大规模的透镜状滩坝, 沿岸方

向展布, 长度与宽度均较大, 滩坝主要由较厚的坝砂组成, 滩砂分布于坝砂周缘呈裙带状(图 7)。坝砂在侧向上具有双厚中心, 呈现驼峰状(图 8E-E')。滩坝之间较为离散, 侧向与垂向上由泥质湖相沉积相隔(图 7、图 8E-E')。

湖盆远端, 再次发育小规模透镜状滩坝, 沿岸方向展布, 宽度较小, 主要由较薄的滩砂组成, 坝砂发育程度较低, 滩坝之间也由坝间泥岩沉积相隔(图 7)。

4.2 定量规模

基于构型解剖结果, 本文测量了平原分流河道、前缘分流河道、河口坝、近端滩、中端坝与远端滩的发育位置与定量规模。基于统计结果发现, 研究区浅水三角洲-离岸滩坝体系的顺源相带分异明显, 随着岸线距离增加, 依次发育平原分流河道、前缘分流河道-河口坝、滩砂、坝砂、滩砂, 且河口坝、近端滩、中端坝与远端滩之间存在着一定的间距(图 9a)。

不同相带的构型单元的规模特征也不相同。从宽

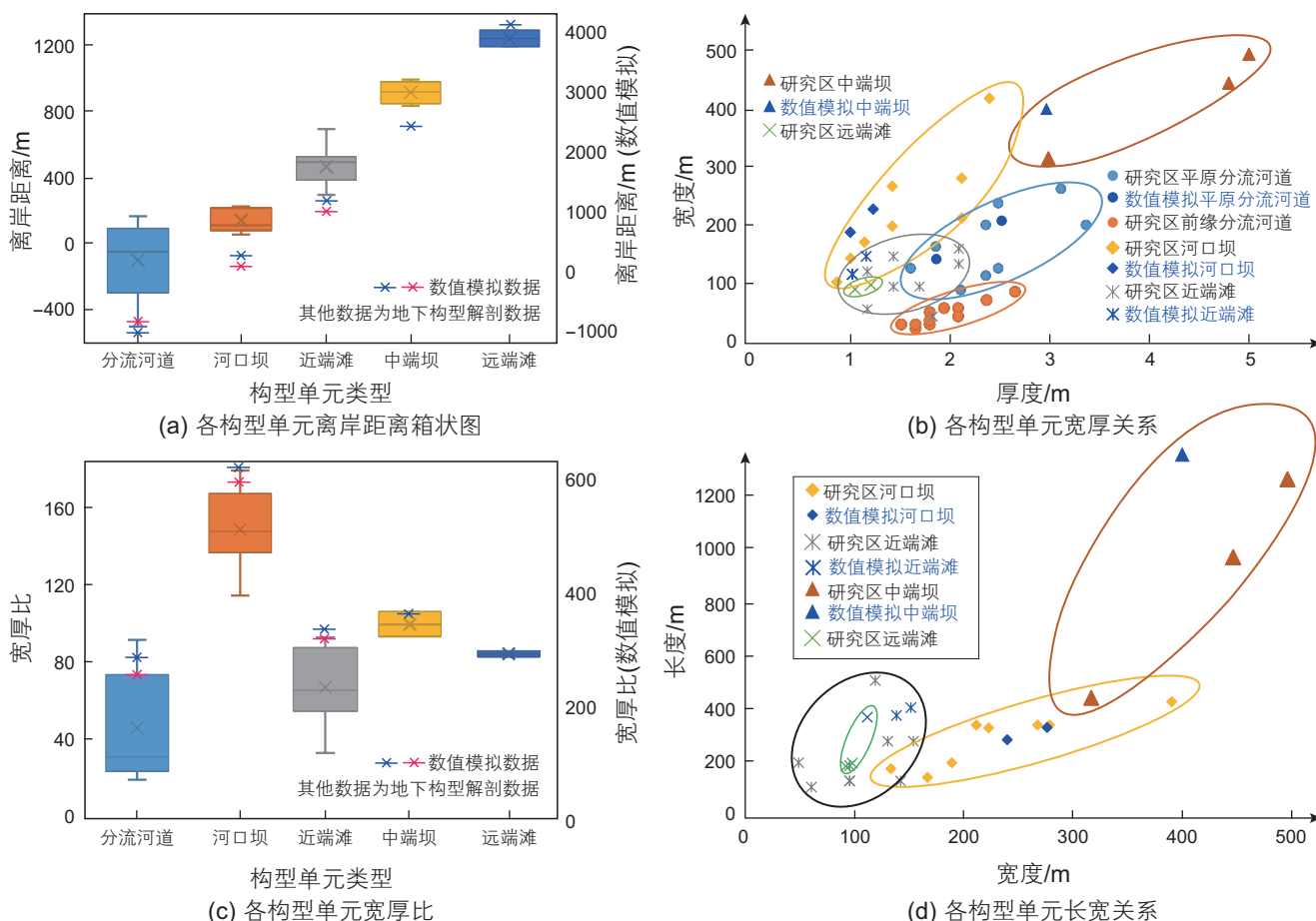


图 9 东营凹陷胜二区与数值模拟的浅水三角洲-滩坝内部不同构型单元规模的统计关系图

Fig. 9 Statistical relationship of dimensions of different architectural units in the 2nd Block of Shengtuo Oilfield of Dongying Sag and simulation domain

厚关系来看,中端坝砂的宽度与厚度最大,分别大于300 m与3 m,宽厚比相对高;河口坝的宽度与厚度较大,分别介于100~400 m与1~3 m,宽厚比最大;平原与前缘的分流河道的宽度窄、厚度较大,分别介于0~300 m与1~4 m,宽厚比最小;近端滩与远端滩的宽度与厚度均最小,分别小于200 m与2 m,宽厚比较低(图9b、c)。基于河口坝、近端滩、中端坝与远端滩的长宽关系可以看出,中端坝砂的长度最大,多大于400 m,长宽比最高;河口坝、近端滩与远端滩的长度小,多小于400 m,长宽比较小(图9d)。

5 浅水三角洲—离岸滩坝体系的沉积过程

基于研究区沉积条件,利用Delft3D软件模拟了浅水三角洲—离岸滩坝体系的沉积过程(图10)并分析

了其定量规模(图9),其分布样式与研究区较为相似,表现出小三角洲前缘—大滩坝的宏观分布特征,顺源也表现出与研究区相似的相带分异特征(图9a)。数值模拟与研究区实际的浅水三角洲—滩坝定量规模统计关系规律性一致,数据均位于相同区间内。宽厚关系上,依旧是中端坝砂的宽度与厚度最大,分别大于400 m与3 m,宽厚比最大的是河口坝,其宽度与厚度较大,分别介于100~400 m和1~2.5 m(图9b、c);长宽关系上,中端坝砂长度最大,大于1200 m,长宽比最高,而河口坝、近端滩长度小,多小于400 m,长宽比较小(图9d)。从数值模拟的整个沉积过程上来看,浅水三角洲与湖盆中的大规模的离岸滩坝是同时生长并形成的(图10)。

一方面,河流入湖,形成浅水三角洲前缘沉积,随着分流河道不断向前延伸,河口坝也不断向前延伸,

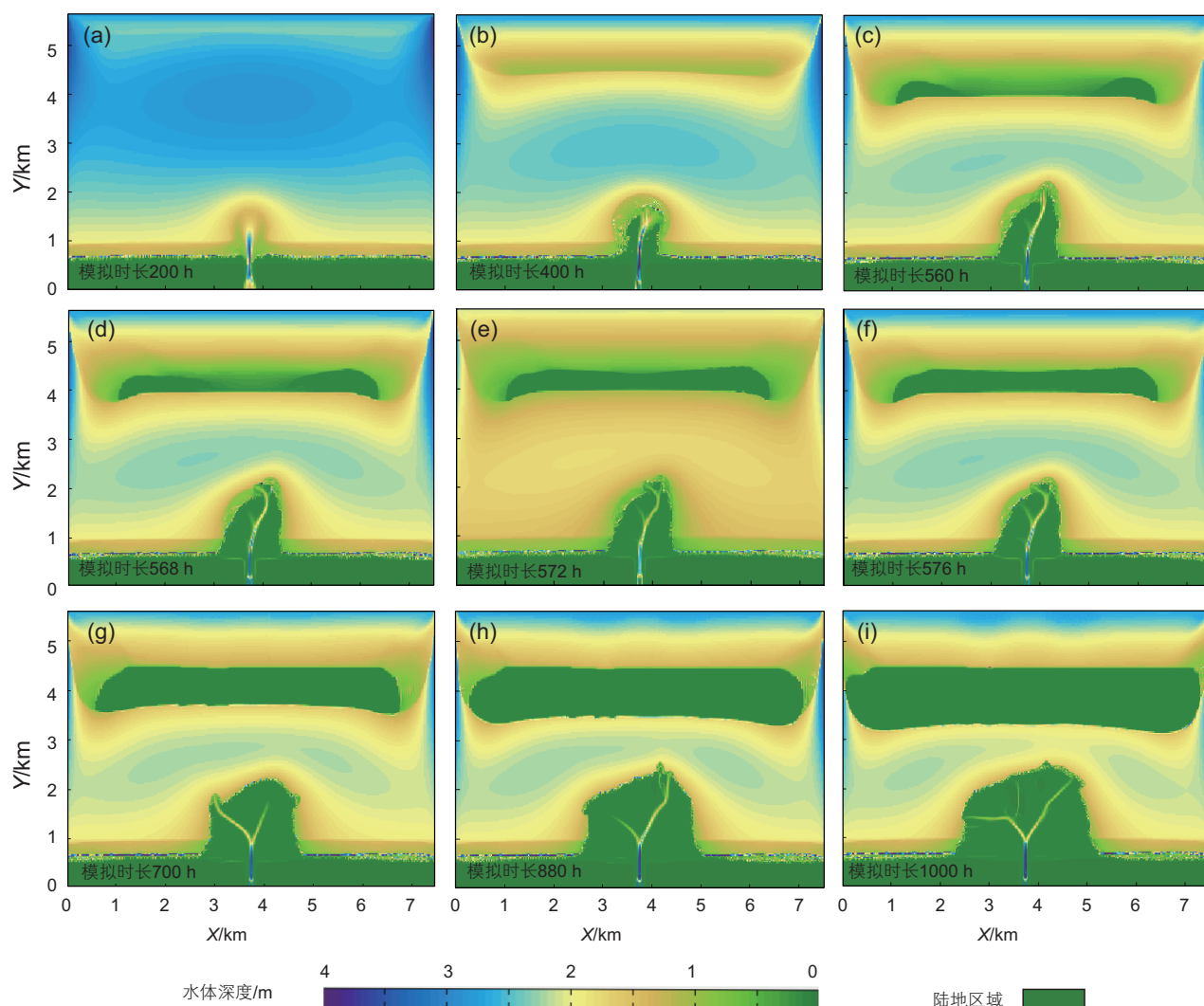


图10 湖盆浅水三角洲—离岸滩坝体系沉积数值模拟结果

Fig. 10 Numerical simulation results of sedimentation in shallow delta-offshore beach-bar system in lacustrine basins

但是分流河道未发生分流作用,持续深切于河口坝中部,形成河在坝上走的样式(图 10a~c)。在波浪长时间持续的改造作用下,形成的浅水三角洲的岸线糙度较低(糙度定义为岸线长度与面积的平方根之比^[60]),约为 2~4,呈现小规模朵状形态的朵叶体。在浅水三角洲前积到 2 km 左右时,延伸速度明显降低,并在延伸至 2.5 km 时基本停止前积。此时,分流河道开始决口,在左侧形成新的分流河道与河口坝沉积,发育一个新的朵叶(图 10d~f)。相似地,在河口坝延伸至 2.5 km 左右时,向前延伸基本停止,分流河道继续决口并形成新的朵叶体(图 10g~h)。

另一方面,波浪携带改造沉积物在浅水三角洲前端形成沿岸展布的离岸滩坝沉积(图 10)。滩坝的形成可细分为 4 个阶段:首先,在湖盆中形成规模较大、相对连片、沿岸分布的滩砂,不断加积增厚、向岸加宽(图 10a~b);然后,滩砂停止整体加积增厚与向岸加宽,而在两侧形成厚度较大、露出水面的小规模透镜状坝砂(图 10c~d);进一步,两侧坝砂开始快速向中部伸长,并最终拼接为一个大型坝砂(图 10e);最后,大型坝砂开始继续向岸方向加宽,在达到 0.8 km 宽度时,加宽开始变得缓慢,在此过程中,在离岸滩坝与浅水三角洲之间可见少量的滩砂沉积(图 10f~i)。

最终,浅水三角洲形成于河口一侧,大型离岸滩坝形成于湖盆一侧,两者之间由湖泊相隔,可见少量的滩砂沉积(图 10g)。在离岸滩坝的向湖一侧,也可见滩砂沉积。相比研究区,浅水三角洲与大型离岸滩坝之间的小规模滩砂发育程度要低一些,这可能是由于模拟中底形相对平坦,水流的不规模扰动较弱。湖盆远端的连片滩砂可能也与此相关,并与北部的边界效应相关。

6 讨论

6.1 浅水三角洲-离岸滩坝体系的形成机理

波浪是重要的湖泊营力,对浅水三角洲形成具有直接的影响,导致分流河道的数量减少^[15-16]、河口坝的发育程度较低^[17-19]、三角洲岸线平滑^[20-21],也可直接改造前缘沉积形成席状砂^[22,61]。在波浪能量较强时,浅水三角洲被改造的程度很强,改造沉积物在前端中形成了大量的离岸滩坝沉积^[20,25,62],或在侧缘形成多列线状沿岸砂脊^[8,62]。在波浪能量中等的情况时,浅水三角洲部分被改造,形成浅水三角洲-离岸滩坝体系。

基于沉积数值模拟发现,浅水三角洲与离岸滩坝是同时形成的(图 10)。在研究区浅水三角洲与大型的

离岸滩坝沉积没有明显的高程差(图 8)。受到波浪的持续改造,浅水三角洲的规模往往较小、岸线糙度较低。值得注意的是,在同一个体系内部,不同浅水三角洲的进积距离是相似的,河口坝在向前延伸达到这一距离后,分流河道开始决口并在两侧形成新的河口坝。因此,河口坝表现出相似的长度,而宽度差异比较大(图 9d)。与此同时,大规模离岸坝砂形成于破浪带附近,与三角洲相隔一定的距离。前人基于破浪模型解释这一成因,即沉积物从波浪对床底的扰动开始,在向岸流与离岸流的作用下向破浪带聚集开始形成滩砂,并在水动力、沉积物搬运、沙坝形态的相互反馈作用下生长,并在破浪带处加积形成坝砂^[63-64]。浪高越大,底形坡度越缓,破浪带的位置越远离岸线^[31,64],那么大规模离岸坝砂与三角洲的间距越大。有意思的是,大规模离岸坝砂并不是均匀加积而成的,在分流河道延伸至破浪带一定距离后,河流作用开始影响到破浪带并导致该处波浪流发生偏转,携带沉积物向滩砂两侧部位优先堆积,以致坝砂最先发育于三角洲的侧前方滩砂两侧部位(图 10c),这一沉积特点与前人的水槽实验结果相似^[38]。随后,两侧坝砂垂向加积并向中部加长拼接为一个大规模坝砂。因此,离岸滩坝表现出双厚中心的特点,剖面上呈驼峰状(图 8、图 10),长宽比与宽厚比较大(图 9)。从田吉兹湖现代沉积中也可看出,很多大型的离岸坝砂似乎是由两个小型坝砂侧向拼接而成(图 11)。浅水三角洲与大型的离岸坝砂之间,可发育一些小规模的滩砂(图 7、图 10),这种现象在田吉兹湖现代沉积中也可以看到(图 11)。

6.2 浅水三角洲-离岸滩坝体系的构型模式

前人针对波浪影响下的浅水三角洲与离岸滩坝的构型特征分别开展过研究,并提出过相应的构型模式^[18,22,26,42,43,60]。事实上,在湖浪作用下,浅水三角洲-离岸滩坝体系在现代沉积(如田吉兹湖、青海湖)



图 11 哈萨克斯坦田吉兹湖现代沉积卫星地图

Fig. 11 Satellite map of modern sediments in the Lake Tengiz, Kazakhstan

与地下储层(如胜坨油田沙河街组、扎哈泉地区上干柴沟组、哈萨克斯北布扎奇油田下白垩统)中较为常见 [23,27,59,65-66],但其构型模式尚未建立。本文基于胜坨油田二区沙河街组二段 2 砂组构型解剖结果与沉积数值模拟结果,建立了湖盆浅水三角洲—离岸滩坝体系的构型模式(图 12),具体特征如下:

1) 顺源方向上具有明显的相带分异特征,随着岸线距离增加,呈现浅水三角洲前缘—小规模滩砂—大规模坝砂—小规模滩坝砂的演变规律。

2) 浅水三角洲前缘延伸距离短、岸线糙度较低,为 2~4;分流河道分支数量少,一般为 1~2 条;河口坝呈朵状,分流河道深切于河口坝中部,河口坝呈翼状分布于分流河道两侧,表现出河在坝上走的样式。

河口坝的延伸距离相近,在达到这一距离后,分流河道决口在侧向形成新的河口坝。总体上,河口坝的侧向迁移程度较弱,表现出垂向叠置样式。

3) 大规模的厚层坝砂主要发育于湖盆中端破浪带附近,呈透镜状,沿岸方向展布,滩砂分布于坝砂周缘呈裙带状。大规模坝砂多由两侧小型坝砂生长、拼接而成,具有平面双厚中心、剖面驼峰状的特点,坝砂之间由泥质湖相沉积相隔。

4) 大规模坝砂的长、宽、厚均较大,表现出较高的长宽比与宽厚比,分别介于 1.5~2.5 和 80~100;近端与远端滩砂的规模较小,长宽比与宽厚比均较小,分别介于 1~1.5 和 50~80;浅水三角洲前缘河口坝的规模也较大,宽厚比大而长宽比低,其值分别介于

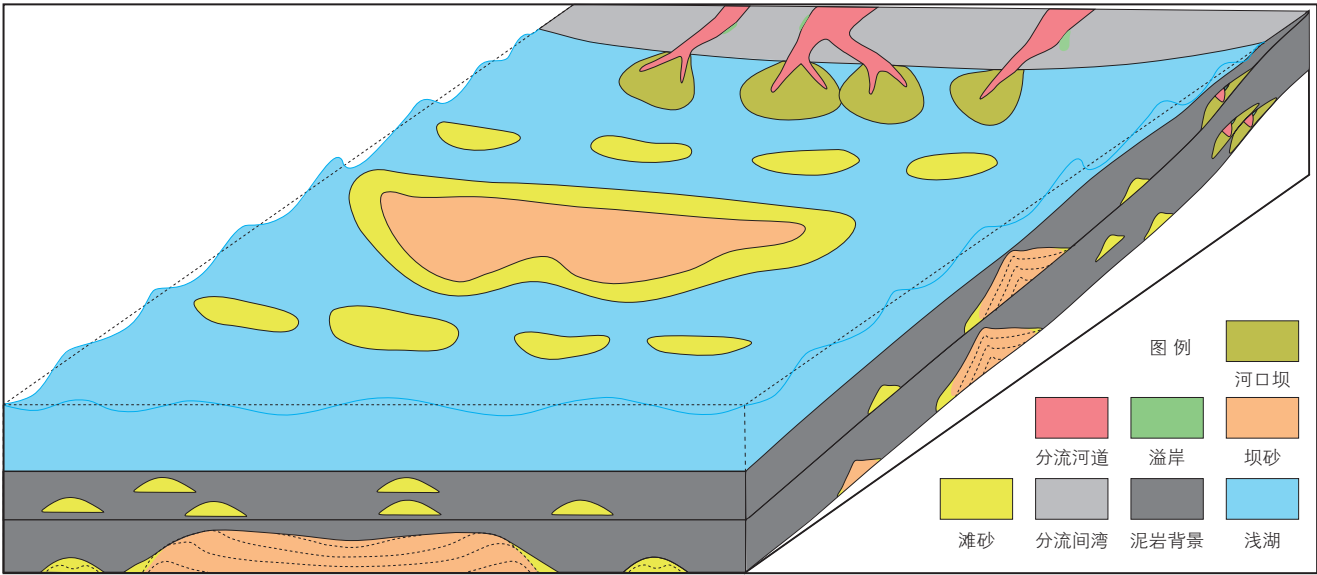


图 12 湖盆浅水三角洲—离岸滩坝体系构型模式图

Fig. 12 Architectural model of lacustrine basins shallow delta-offshore beach-bar system

130~160 和 1~1.2。

7 结论

1) 浅水三角洲—离岸滩坝体系顺源方向上具有明显的相带分异特征,随着岸线距离增加,呈现浅水三角洲前缘—小规模滩砂—大规模坝砂—小规模滩坝砂的演变规律。

2) 在湖浪的持续作用下,浅水三角洲前缘与大规

模的离岸坝砂同时形成。浅水三角洲前缘分流河道分支数量少,河口坝呈朵状,分流河道深切于河口坝中部。在延伸到一定距离后,河口坝停止向前延伸,分流河道决口在侧向形成新的河口坝,因此河口坝的长宽比较低。大规模透镜状的厚层坝砂主要发育于湖盆中端破浪带附近,多由两侧小型坝砂生长、拼接而成,具有平面双厚中心、剖面驼峰状的特点,长宽比较大。浅水三角洲与离岸滩坝之间相距一定的距离,其间发育后期形成小型滩砂。

参考文献

[1] 邹才能, 赵文智, 张兴阳, 等. 大型敞流坳陷湖盆浅水三角洲与湖盆中心砂体的形成与分布[J]. 地质学报, 2008, 82(6): 813-825.
[ZOU C N, ZHAO W Z, ZHANG X Y, et al. Formation and distribution of shallow-water deltas and centra-basin sandbodies in large

- open depression lake basins[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2008, 82(6): 813–825.]
- [2] 朱筱敏, 刘媛, 方庆, 等. 大型坳陷湖盆浅水三角洲形成条件和沉积模式——以松辽盆地三肇凹陷扶余油层为例[J]. *地学前缘*, 2012, 19(1): 89–99. [ZHU X M, LIU Y, FANG Q, et al. Formation and sedimentary model of shallow delta in large-scale lake: Example from Cretaceous Quantou Formation in Sanzhao Sag, Songliao Basin[J]. *Earth Science Frontiers*, 2012, 19(1): 89–99.]
- [3] 舒梁锋, 张丽丽, 雷胜兰, 等. 珠江口盆地白云南洼珠海组陆架边缘三角洲储层发育特征与主控因素及有利储层预测[J]. *石油科学通报*, 2022, 7(3): 309–320. [SHU L F, ZHANG L L, LEI S L, et al. Reservoir sedimentary characteristics and reservoir prediction in the shelf margin delta of the Zhuhai Formation in the southern subsag of the Baiyun sag in the Pearl River Mouth Basin[J]. *Petroleum Science Bulletin*, 2022, 7(3): 309–320.]
- [4] 金振奎, 李燕, 高白水, 等. 现代缓坡三角洲沉积模式——以鄱阳湖赣江三角洲为例[J]. *沉积学报*, 2014, 32(4): 710–723. [JIN Z K, LI Y, GAO B S, et al. Depositional model of modern gentle-slope delta: A case study from Ganjiang Delta in Poyang Lake[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2014, 32(4): 710–723.]
- [5] 吴胜和, 徐振华, 刘钊. 河控浅水三角洲沉积构型[J]. *古地理学报*, 2019, 21(2): 202–215. [WU S H, XU Z H, LIU Z, et al. Depositional architecture of fluvial-dominated shoal water delta[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2019, 21(2): 202–215.]
- [6] 宋璠, 孔庆圆, 张学才, 等. 干旱型浅水三角洲沉积特征及沉积模式——以准噶尔盆地腹部永进地区侏罗系齐古组为例[J]. *石油与天然气地质*, 2024, 45(5): 1275–1288. [SONG F, KONG Q Y, ZHANG X C, et al. Sedimentary characteristics and models of shallow-water deltas in arid settings: A case study of the Jurassic Qigu Formation in the Yongjin area within the hinterland of the Junggar Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2024, 45(5): 1275–1288.]
- [7] 张家强, 李士祥, 周新平, 等. 志丹地区长 8₂ 砂层组缓坡浅水三角洲前缘砂体发育模式及成因[J]. *岩性油气藏*, 2020, 32(1): 36–50. [ZHANG J Q, LI S X, ZHOU X P, et al. Development pattern and genesis of gentle slope shallow water delta front sand bodies of Chang 8₂ sand set in Zhidan area, Ordos Basin. *Lithologic Reservoirs*, 2020, 32(1): 36–50.]
- [8] 张佩, 钱其豪, 姜明忠, 等. 干旱湖盆边缘浅水三角洲沉积特征与沉积模式——以青海尕斯库勒油田下油砂山组 VI 油组为例[J]. *沉积学报*, 2023, 41(3): 839–854. [ZHANG P, QIAN Q H, JIANG M Z, et al. Depositional characteristics and sedimentary model of a shallow water delta at the lake margin in an arid climate: A case study based on the VI oil zone of the Lower Youshashan Formation, Gaskule Oilfield, Qinghai[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2023, 41(3): 839–854.]
- [9] 赵汉卿, 李超, 郭诚, 等. 河控型浅水三角洲前缘河道砂体结构特征——以渤海湾盆地黄河口凹陷 BZ34 油区明下段 II 油组为例[J]. *海洋地质前沿*, 2024, 40(2): 20–27. [ZHAO H Q, LI C, GUO C, et al. Geomorphology of channel sandbodies in fluvially dominated shallow water delta front: Taking the Lower Member of the Minghuazhen Formation in BZ34 Oilfield of the Huanghekou Sag, Bohai Bay Basin as an example[J]. *Marine Geology Frontiers*, 2024, 40(2): 20–27.]
- [10] 陈贺贺, 朱筱敏, 施瑞生, 等. 断陷盆地缓坡带物源转换与沉积响应——以渤海湾盆地饶阳凹陷蠡县斜坡古近系源—汇系统为例[J]. *石油与天然气地质*, 2023, 44(3): 689–706. [CHEN H H, ZHU X M, SHI R S, et al. Provenance transformation and sedimentary response of ramp facies in downfaulted basins: A case study on the Paleogene source-to-sink system in Lixian slope, Raoyang Sag, Bohai Bay Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2023, 44(3): 689–706.]
- [11] EDMONDS D A, SLINGERLAND R L. Significant effect of sediment cohesion on delta morphology[J]. *Nature Geoscience*, 2010, 3(2): 105–109.
- [12] CALDWELL R L, EDMONDS D A. The effects of sediment properties on deltaic processes and morphologies: A numerical modeling study[J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2014, 119(5): 961–982.
- [13] BURPEE A P, SLINGERLAND R L, EDMONDS D A, et al. Grain-size controls on the morphology and internal geometry of river-dominated deltas[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2015, 85(6): 699–714.
- [14] 徐振华, 邓航, 吴胜和, 等. 河控浅水三角洲前缘树枝状沙坝沉积构型与形成机理[J]. *古地理学报*, 2024, 26(6): 1338–1351. [XU Z H, DENG H, WU S H, et al. Depositional architecture and formative mechanism of dendritic bars within river-dominated shallow-water delta front[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2024, 26(6): 1338–1351.]
- [15] ANTHONY E J. Wave influence in the construction, shaping and destruction of river deltas: A review[J]. *Marine Geology*, 2015, 361: 53–78.
- [16] GAO W, SHAO D, WANG Z B, et al. Combined effects of unsteady river discharges and wave conditions on river mouth bar morphodynamics[J]. *Geophysical Research Letters*, 2018, 45(23): 903–912.
- [17] LIU Y, CHEN H, WANG J, et al. Numerical simulation for the effects of waves and grain size on deltaic processes and morphologies[J]. *Open Geosciences*, 2020, 12(1): 1286–1301.
- [18] HU T, LI Z, ZENG C, et al. Applications of EMD to analyses of high-frequency beachface responses to Storm Bebinca in the Qing'an Bay, Guangdong Province, China[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2022, 41(5): 147–162.
- [19] ZĂINESCU F, STORMS J E A, VESPREMEANU - STROE A, et al. Wave-influenced delta morphodynamics, long-term sediment bypass and trapping controlled by relative magnitudes of riverine and wave-driven sediment transport[J]. *Geophysical Research Letters*, 2024, 51(19): e2024GL111069.

- [20] JEROLMACK D J, SWENSON J B. Scaling relationships and evolution of distributary networks on wave-influenced deltas[J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34(23): L23402.
- [21] GELEYNSE N, STORMS J E A, WALSTRA D J R, et al. Controls on river delta formation: Insights from numerical modelling[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2011, 302(1–2): 217–226.
- [22] 冯怀伟, 许淑梅, 王金铎, 等. 浅水三角洲物源、砂体构型与储层特征研究——以准噶尔盆地永进—莫西庄地区侏罗系三工河组二段为例[J]. *地质论评*, 2024, 70(1): 330–345. [FENG H M, XU S M, WANG J D, et al. Study on shallow water delta provenance, sandbody architecture and reservoir characteristics: A case of the 2nd Member of the Jurassic Sangonghe Formation in Yongjin-Moxi-zhuang region, Junggar Basin[J]. *Geological review*, 2024, 70(1): 330–345.]
- [23] 王昕, 魏思源, 吕奇奇, 等. 基于物理模拟的三角洲前缘横向砂坝发育过程及形成机理[J]. *沉积学报*, 2023, 41(3): 818–827. [WANG X, WEI S Y, LV Q Q, et al. Development process and formation mechanism of transverse sand bar in delta front based on physical simulation[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2023, 41(3): 818–827.]
- [24] 王永诗, 邱阳博, 茆书巍, 等. 济阳坳陷东营凹陷古近系隐蔽油气藏勘探实践及展望[J]. *中国海上油气*, 2023, 35(3): 12–24. [WANG Y S, QIU Y B, MAO S W, et al. Exploration practice and prospect of Paleogene subtle oil and gas reservoirs in Dongying Sag, Jiyang Depression[J]. *China offshore oil and gas*, 2023, 35(3): 12–24.]
- [25] 胡慧, 朱红涛, 杜晓峰, 等. 陆相湖盆多级缓坡地貌约束下的滩坝沉积体系特征与沉积模式[J]. *海洋学报*, 2024, 46(12): 40–52. [HU H, ZHU H T, DU X F, et al. Development characteristics and models of beach-bar depositional system constrained by multistage gentle slope landform in continental lacustrine basin[J]. *Haiyang Xuebao*, 2024, 46(12): 40–52.]
- [26] 刘成龙, 王艳忠, 杨怀宇, 等. 高精度层序约束下三角洲—滩坝沉积体系精细刻画与岩性圈闭分布规律——以渤海湾盆地济阳坳陷东营凹陷南坡东段沙河街组四段上亚段为例[J]. *石油与天然气地质*, 2024, 45(4): 1121–1141. [LIU C L, WANG Y Z, YANG H Y, et al. Fine characterization and lithologic trap distribution patterns of delta-beach bar sedimentary system under high-precision sequence constraints: A case study of the upper submember of the 4th member of the Shahejie Formation in the eastern segment of the southern gentle slope of Dongying Sag, Jiyang Depression, Bohai Bay Basin[J]. *Oil & gas geology*, 2024, 45(4): 1121–1141.]
- [27] 李嘉伟, 徐振华, 程立华, 等. 内陆坳陷湖盆远岸砂质滩坝沉积模式[J/OL]. *沉积学报*, 2024. [LI J W, XU Z H, CHENG L H, et al. A Depositional model of a sandy beach bar on the far bank of an inland depression lake basin[J/OL]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2024.]
- [28] 李国斌. 东营凹陷西部古近系沙河街组沙四上亚段滩坝沉积体系研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2009. [LI G B. Study on the sedimentary system of beach and bar in the upper Fourth Member of Shahejie Formation of the Paleogene in the Western Dongying Sag[D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing), 2009.]
- [29] 李国斌, 姜在兴, 陈诗望, 等. 利津洼陷沙四上亚段滩坝沉积特征及控制因素分析[J]. *中国地质*, 2008, (5): 911–921. [LI G B, JIANG Z X, CHEN S W, et al. Sedimentary characteristics and controlling factors of beach bars in the Upper Submember of the Fourth Member of the Shahejie Formation in the Lijin subbasin[J]. *Geology in China*, 2008, (5): 911–921.]
- [30] 王俊辉. 东营凹陷始新统风场—物源—盆地系统沉积动力学研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2016. [WANG J H. Sedimentary dynamics of a wind-source-basin system in the Eocene Dongying Depression[D]. Beijing: China university of geosciences(Beijing), 2009.]
- [31] KOMAR P D. Beach Processes and Sedimentation [M]. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 1998.
- [32] HILLEN M. Wave reworking of a delta[D]. Delft: Delft University of Technology, 2009.
- [33] KOMAR P D. Nearshore cell circulation and the formation of giant cusps [J]. *GSA Bulletin*, 1971, 82(9): 2643–2650.
- [34] KOMAR P D, Inman D L. Longshore sand transport on beaches [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1970, 75(30): 5914–5927.
- [35] 邵长印, 宋璠, 邱隆伟, 等. 渤海湾盆地沾化凹陷古近系沙河街组二段滩坝沉积规律、主控因素及油气勘探潜力[J/OL]. *石油学报*, 2025. [SHAO C Y, SONG P, QIU L W, et al. Sedimentary regularities, main controlling factors, and hydrocarbon exploration potential of the beach-bars of the Member 2 of Paleogene Shahejie Formation in Zhanhua Sag, Bohai Bay Basin[J/OL]. *Acta petrolei sinica*, 2025.]
- [36] 郭文建, 郭瑞婧, 唐勇, 等. 准噶尔盆地二叠系上乌尔禾组退覆式扇(辫状河)三角洲前缘—滩坝复合砂砾岩沉积特征及控制因素[J]. *古地理学报*, 2024, 26(3): 584–599. [GUO W J, GUO R J, TANG Y, et al. sedimentary characteristics, controlling factors and genesis of retrogradational fan (braided) delta front-beach bar composite gravel body in the Permian Upper Urho Formation in Junggar Basin[J]. *Journal of palaeogeography (Chinese edition)*, 2024, 26(3): 584–599.]
- [37] 杜晓峰, 庞小军, 黄晓波, 等. 辽西凹陷北部古近系沙河街组二段源—汇系统及其对滩坝砂体的控制[J]. *石油与天然气地质*, 2023, 44(3): 662–674. [DU X F, PANG X J, HUANG X B, et al. Characteristics of the source-to-sink system for the Paleogene Sha 2 Member of northern Liaoxi Sag, offshore Bohai Bay Basin and its control on beach bar sands[J]. *Oil & gas geology*, 2023, 44(3): 662–674.]
- [38] SOREGHAN M J, COHEN A S. Textural and compositional variability across littoral segments of Lake Tanganyika: The effect of asymmetric basin structure on sedimentation in large rift lakes [J]. *AAPG Bulletin*, 1996, 80(3): 382–409.
- [39] 姜在兴. 沉积体系及层序地层学研究现状及发展趋势[J]. *石油与天然气地质*, 2010(b), 31(5): 535–541. [JIANG Z X. Studies of

- depositional systems and sequence stratigraphy: The present and the future[J]. *Oil & gas geology*, 2010(b), 31(5): 535–541.]
- [40] 李强强, 王喜鑫, 许月明, 等. 湖平面变化对浅水三角洲前缘砂体构型的控制——来自数字露头的启示[J/OL]. *沉积学报*, 2024. [LI Q Q, WANG X X, XU Y M, et al. Influence of rising lake level on shallow-water delta front sandbody architecture: Insights from digital outcrops[J/OL]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2024.]
- [41] 杨征, 吴胜和, 段冬平, 等. 西湖凹陷花港组浅水三角洲平原分流河道沉积构型[J]. *古地理学报*, 2024, 26(3): 525–544. [YANG Z, WU S H, DUAN P P, et al. Architecture characteristics of distributary channels in shallow water delta plain of the Huagang Formation in Xihu Sag, East China Sea[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2024, 26(3): 525–544.]
- [42] 赵俊威, 孙海航, 方惠京, 等. 海相砂质滩坝储层内部构型模式及表征——以哈得逊油田东河砂岩为例[J/OL]. *沉积学报*, 2024. [ZHAO J W, SHUN H H, FANG H J, et al. Architecture patterns and characterization of marine sandy beach-bar reservoirs: A case study of the Donghe sandstone in the Hudson Oilfield[J/OL]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2024.]
- [43] 邵长印, 宋璠, 张世奇, 等. 渤海湾盆地黄河口凹陷 SC7 区块古近系东营组二段下亚段滩坝储集体构型特征[J]. *石油与天然气地质*, 2024, 45(2): 486–501. [SHAO C Y, SHONG F, ZHANG S Q, et al. Architectural characteristics of beach-bar reservoirs in the lower submember of the 2nd member of the Paleogene Dongying Formation in block SC7, Huanghekou Sag, Bohai Bay Basin[J]. *Oil & Gasgeology*, 2024, 45(2): 486–501.]
- [44] 崔文富, 沈志晗, 姜在兴, 等. 东营凹陷胜坨油田一区沙河街组二段 1 砂组砂体微相研究[J]. *地学前缘*, 2023, 30(3): 452–464. [CUI W F, SHEN Z H, JIANG Z X, et al. Microfacies analysis of sand formation in Shengyi District, Shengtuo Oilfield, Dongying Sag[J]. *Earth Science Frontiers*, 2023, 30(3): 452–464.]
- [45] 宋明水. 胜坨油田成藏条件及勘探开发关键技术[J]. *石油学报*, 2021, 42(1): 128–142. [SONG M S. Accumulation conditions and key technologies for exploration and development of Shengtuo oilfield in Bohai Bay Basin[J]. *Acta petrolei sinica*, 2021, 42(1): 128–142.]
- [46] 王云龙. 胜坨油田沙二段浅水三角洲—滩坝体系三维构型建模研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2023. [WANG Y L. Study on three-dimensional architectural modeling of shallow-water delta and beach-bar in Es₂ Formation in Shengtuo Oilfield[D]. Beijing: China University of Petroleum, 2023.]
- [47] 孙以德, 刘常妮, 李浩男, 等. 基于密井网和井间示踪剂资料的浅水三角洲单砂体沉积构型研究——以东营凹陷胜坨油田二区沙二段 1–2 砂组为例[J]. *油气地质与采收率*, 2024, 31(2): 39–47. [SUN Y D, LIU C N, LI H, et al. Study on sedimentary architecture of single sand body in shallow water deltas based on dense well pattern and interwell tracer data: A case study of Es₂1 and Es₂2 in Shenger District of Shengtuo Oilfield, Dongying Sag[J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2024, 31(2): 39–47.]
- [48] 张友, 侯加根, 沈安江, 等. 济阳拗陷胜二区古近系沙河街组二段 8 砂组三角洲砂体储层构型分析[J]. *延安大学学报(自然科学版)*, 2015, 34(2): 8–13. [ZHANG Y, HOU J G, SHEN A J, et al. Reservoir architecture of lacustrine delta sandbody: A case study from the 8 Sandgroup of paleocene Shahejie Formation Member 2 of shenger block of Shengtuo Oilfield, Jiyang Depression, East China[J]. *Journal of Yanan University (Natural Science Edition)*, 2015, 34(2): 8–13.]
- [49] 王居峰. 济阳拗陷东营凹陷古近系沙河街组沉积相[J]. *古地理学报*, 2005, 7(1): 45–58. [WANG J F. Sedimentary facies of the Shahejie Formation of Paleogene in Dongying Sag Jiyang Depression[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2005, 7(1): 45–58.]
- [50] 蒋诗宁. 胜坨油田二区沙二段 1 砂组储层构型研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2019. [JIANG S N. Reservoir architecture characterization of the 1st sand group of Es₂ in the second area of Shengtuo Oilfield[D]. Beijing: China University of Petroleum, 2019.]
- [51] 杨勇. 胜利油田勘探开发大数据及人工智能技术应用进展[J]. *油气地质与采收率*, 2022, 29(1): 1–10. [YANG Y. Application progress of big data & AI technologies in exploration and development of Shengli Oilfield[J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2022, 29(1): 1–10.]
- [52] 蒋越. 东营凹陷胜坨油田储层古流体演化及其成岩响应[J]. *中国石油大学胜利学院学报*, 2021, 35(3): 27–35. [JIANG Y. Paleofluid evolution and diagenetic response of reservoirs in Shengtuo Oilfield, Dongying Depression[J]. *Journal of Shengli College China university of petroleum*, 2021, 35(3): 27–35.]
- [53] MARCIANO R, WANG Z B, HIBMA A, et al. Modeling of channel patterns in short tidal basins[J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2005, 110: F01001.
- [54] CALDWELL R L, EDMONDS D A. The effects of sediment properties on deltaic processes and morphologies: A numerical modeling study[J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2014, 119(5): 961–982.
- [55] HASSELMANN K, BARNETT T P, BOUWS E, et al. Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP)[J]. *Ergaenzungsheft zur Deutschen Hydrographischen Zeitschrift, Reihe A*, 1973, 12.
- [56] SCHUMM S A, KHAN H R. Experimental study of channel patterns[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1972, 83(6): 1755–1770.
- [57] XU Z H, WU S H, LIU M C, et al. Effects of water discharge on river-dominated delta growth[J]. *Petroleum Science*, 2021, 18(6): 1630–1649.
- [58] JIANG Z, WANG J, FULTHORPE C S, et al. A quantitative model of paleowind reconstruction using subsurface lacustrine longshore

- bar deposits: An attempt[J]. *Sedimentary geology*, 2018, 371: 1–15.
- [59] 姜在兴, 王俊辉, 张元福, 等. “风—源—盆”三元耦合油气储集体预测方法及其应用——对非主力物源区储集体的解释与预测[J]. *石油学报*, 2020, 41(12): 1465–1476. [JIANG Z X, WANG J H, ZHANG Y F, et al. Ternary” Windfield-Source-Basin” system for the prediction of hydrocarbon reservoirs: Interpretation and prediction of hydrocarbon reservoirs deviated from the main provenance areas[J]. *Acta Petrolei Sinica*. 2020, 41(12): 1465–1476.]
- [60] 秦润森, 岳红林, 周凤军, 等. 河控浅水三角洲前缘席状砂沉积特征及沉积模式探讨——以黄河口凹陷渤中 34 地区明下段为例[J]. *沉积学报*, 2020, 38(2): 429–439. [QIN R S, QUE H L, ZHOU F J, et al. Characteristics and sedimentary models of sheet sand in shallow lacustrine fluvial dominated delta front: A case study from lower member of Minghuazhen Formation in BZ34 area, Huanghekou Sag[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2020, 38(02): 429–439.]
- [61] 李姝睿, 孙高远, 茅昌平, 等. 江苏沿岸辐射沙脊物源分析——来自碎屑重矿物与锆石年代学的证据[J]. *沉积学报*, 2022, 40(4): 931–943. [LI S R, SUN G Y, MAO C P, et al. The provenance analysis of radial sand ridges off the Jiangsu Coast, East China: Evidence from the heavy mineral compositions and zircon geochronology[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2022, 40(4): 931–943.]
- [62] 尹力, 冯文杰, 尹艳树, 等. 波浪作用下砂质滩坝的沉积过程与沉积模式——基于水槽沉积模拟实验研究[J]. *沉积学报*, 2022, 40(5): 1393–1405. [YIN L, FENG W J, YIN Y S, et al. Process and model of sedimentation of sandy beach bar due to wave action: An experimental study based on sink sedimentation simulation[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2022, 40(5): 1393–1405.]
- [63] COCO G, MURRAY A B. Patterns in the sand: From forcing templates to self-organization[J]. *Geomorphology*, 2007, 91(3–4): 271–290.
- [64] WRIGHT L D, SHORT A D. Morphodynamic variability of surf zones and beaches: A synthesis[J]. *Marine geology*, 1984, 56(1–4): 93–118.
- [65] 王涛, 景亚菲, 岳大力, 等. 北布扎奇油田下白垩统三角洲前缘砂体构型及剩余油分布模式[J]. *东北石油大学学报*, 2019, 43(6): 52–61+8. [WANG T, JING Y F, YUE D L, et al. Delta front reservoir architecture characterization of Lower Cretaceous and remaining oil distribution patterns in North Buzachi Oilfield[J]. *Journal of Northeast Petroleum University*, 2019, 43(6): 52–61+8.]
- [66] 夏晓敏, 吴颜雄, 张审琴, 等. 湖相滩坝砂体构型及对致密油甜点开发的意义——以柴达木盆地扎哈泉地区扎 2 井区为例[J]. *天然气地球科学*, 2019, 30(8): 1158–1167. [XIA X M, WU Y X, ZHANG S Q, et al. Study on sand body architecture of lacustrine beach-bar and significance for development of tight oil sweet areas: Case study of Well Za-2 area in Zahaquan area, Qaidam Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2019, 30(8): 1158–1167.]

(编辑 付娟娟)

第一作者: 刘常妮(1991 年—), 博士研究生, 从事沉积学、储层表征与建模研究, CN6809110@163.com。

通信作者: 吴胜和(1963 年—), 博士, 教授, 主要从事沉积古地理、储层表征与建模研究, reser@cup.edu.cn。