

典型海相砂质临滨坝沉积演化过程及成因机制

赵俊威¹, 孙海航², 张东伟³, 王恒⁴

(1. 长江大学 录井技术与工程研究院, 湖北 荆州 434020; 2. 中国石油 塔里木油田分公司 勘探开发研究院, 新疆 库尔勒 841000;
3. 中国石油 辽河油田分公司 勘探开发研究院, 辽宁 盘锦 124000; 4. 长江大学 地球科学学院, 湖北 武汉 430100)

摘要: 滩坝砂体是重要的油气储层, 其形成的水动力机制复杂多变, 受露头及现代沉积等资料的局限性影响, 坝体的发育过程、几何形态、动态演化模式及构型叠置关系尚不明确。针对以上问题, 利用沉积数值模拟与现代沉积相结合的方法, 对典型正向线性临滨坝的沉积演化过程及成因机制进行了探讨。研究表明: 典型海相临滨坝完整的发育阶段包括锥形坝形成期、弯月坝发育期、条带状复合坝形成期、条带状复合坝扩大生长期以及条带状复合坝停止发育期, 现代沉积中可见不同发育阶段的坝体。不同演化阶段的坝体受向岸流、环流、沿岸流和底流等水动力控制。锥形坝及弯月坝为多个小规模、近等间距规则排列的坝体, 受向岸流及沿岸环流不断冲刷, 锥形坝演化为弯月坝。锥形坝及弯月坝间发育裂流凹槽, 坝顶可发育回流沟槽, 为典型的顶积式沉积过程。弯月坝坝体及坝间凹槽不断被沉积充填, 形成相对整合的条带状复合坝, 此阶段表现为典型的侧积式沉积过程。复合坝在向岸流及底流改造下变宽、变厚, 最终出露水面形成障壁型滨岸。复合坝内部构型可由多个锥形坝、弯月坝及坝间凹槽构成, 呈锥形坝-裂流凹槽-锥形坝或弯月坝-裂流凹槽-弯月坝的构型叠置关系, 剖面上呈厚—薄—厚的叠置特征。

关键词: 沉积数值模拟; 沉积构型; 沉积水动力机制; 临滨坝; 海相滩坝; 现代沉积

中图分类号: TE121.3

文献标识码: A

Sedimentary evolution and genetic mechanisms of typical marine nearshore sandbars

ZHAO Junwei¹, SUN Haihang², ZHANG Dongwei³, WANG Heng⁴

(1. Institute of Mud Logging Technology and Engineering, Yangtze University, Jingzhou, Hubei 434020, China;
2. Exploration and Development Research Institute, Tarim Oilfield Company, PetroChina, Korla, Xinjiang 841000, China;
3. Exploration and Development Research Institute, Liaohe Oilfield Company, PetroChina, Panjin, Liaoning 124000, China;
4. School of Geosciences, Yangtze University, Wuhan, Hubei 430100, China)

Abstract: Beach-bar sandbodies are important hydrocarbon reservoirs formed under complex and varied hydrodynamic mechanisms. However, due to the limitations of data on outcrops and modern analogs, the understanding of their developmental processes, geometric morphologies, dynamic evolutionary patterns, and superposition within internal architectures remains unclear. Given this, we analyze the sedimentary evolution and hydrodynamic mechanisms of typical shore-normal, linearly distributed nearshore bars using sedimentary numerical simulations combined with modern analogs. Furthermore, we delineate the developmental and evolutionary patterns of these typical nearshore bars. The results show that a typical marine nearshore bar undergoes five stages of development: the formation of tapered bars, the development of crescentic bars, and the formation, expansion, and developmental termination of a banded compound bar. Modern analogs reveal bars at various developmental stages, which were formed under diverse coastal hydrodynamic conditions. Tapered bars and crescentic bars are a series of small-scale bars that are roughly equally spaced. The tapered bars evolve into crescentic bars due to the continuous erosion from uprush and longshore currents. In between the tapered and crescentic bars, there exhibit inter-bar rip channels and backflow trenches on the top. Both bar types represent typical topset deposits. Over time, the crescentic bars and their inter-bar rip channels receive

收稿日期: 2023-09-05; 修回日期: 2023-10-16。

第一作者简介: 赵俊威(1988—), 男, 博士、副教授、硕士生导师, 储层沉积学、油气藏开发地质和油藏建模。E-mail: zhaojunwei0201@126.com。

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(41902155)。

deposits, forming a relatively uniform banded compound bar, demonstrated as typical lateral deposit. This bar, after widening and thickening under the action of onshore and bottom currents, finally emerges above water and constitutes barrier shorelines. The internal architecture of a compound bar, which may comprise several tapered bars, crescentic bars and inter-bar channels, displays the tapered bar, interbar channel and tapered bar deposits superimposition or the crescentic bar, interbar channel and crescentic bar deposits superimposition that, corresponding to thick-thin-thick sequences on profiles.

Key words: sedimentary numerical simulation, sedimentary architecture, hydrodynamic mechanism of deposition, nearshore bar, marine beach-bar, modern sediments

引用格式: 赵俊威, 孙海航, 张东伟, 等. 典型海相砂质临滨坝沉积演化过程及成因机制[J]. 石油与天然气地质, 2024, 45(1): 65-80. DOI: 10. 11743/ogg20240105.

ZHAO Junwei, SUN Haihang, ZHANG Dongwei, et al. Sedimentary evolution and genetic mechanisms of typical marine nearshore sandbars[J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(1): 65-80. DOI: 10. 11743/ogg20240105.

滩坝砂体是滨海带发育的重要沉积体, 是受沿岸复杂水动力作用形成的高成熟度砂岩沉积。中国对滩坝的定义最早由吴崇筠(1981)^[1]提出, 认为滩坝砂体由滩砂与坝砂构成, 并对滩砂与坝砂形态特征及形成进行了描述。随后众多学者也对滩坝砂体进行了大量研究^[2-9], 从滩砂与坝砂的沉积水动力条件、沉积特征及成因等方面开展了分析, 提出了滩砂与坝砂形成所受的的水动力、形态及发育位置等差异^[10-18], 认为滩砂受波浪冲洗而呈席状展布, 坝砂多为细长的脊或隆起物, 而临滨坝是滩坝砂体中主要的构型单元, 沉积物粒度较粗, 物性较临滨滩更好。由于临滨坝形成条件及演化阶段的差异, 坝体类型较多, 根据坝体展布方向、形态及坝体是否出露水面, 可将其分为正向线性坝、斜向线性坝、斜交状砂坝嘴、湾坝、沿岸坝、水下砂坝、岛状坝等多类型^[19-26], 不同类型的临滨坝体形态及特征存在差异, 其中以正向线性坝或近正向线性坝较为常见。对于砂坝的成因, 前人认为其形成的水动力机制包括亚重力波成因、破浪带成因、冲浪成因及沿岸螺旋流成因等^[27-32], 不同类型的成因机制对砂坝进行了不同角度的水动力解释。

截至目前, 针对坝体的研究多聚焦于地下储层、现代滨岸水动力条件分析及沉积特征描述, 且对湖相坝砂研究较多。针对典型海相临滨坝体的形成过程、发育演化过程中的水动力机制及成因模式缺少研究, 这主要受限于海相临滨坝体在形成过程中长期处于海面之下, 较难观测其沉积演化过程, 对不同演化阶段的坝体形态及水动力机制缺少分析, 对其演化特征及形成机制也缺少研究。现代沉积观测结果往往为坝体在某一阶段的发育特征, 不能代表坝体的完整演化过程。而基于流体力学的沉积数值模拟方法可动态表征沉积体的沉积过程、演化特征及沉积动力特征^[33-35], 有效弥

补了现代沉积及野外露头观测的不足。本文对典型海相砂质滨岸沉积过程进行了模拟, 对典型正向线性临滨坝体的形成过程及成因机制进行探讨, 在现代沉积约束的边界条件下, 分析其形成过程及不同演化阶段的水动力机制, 并结合现代沉积卫星影像资料, 建立了典型正向线性临滨坝体的动态沉积演化模式。此研究有助于深化海相滨岸沉积学理论, 指导滨岸相储层开发措施的科学调整及剩余油的高效挖潜。

1 沉积数值模拟方法

1.1 基本原理

Delft3D模型以Navier-Stokes方程组为基础, 可模拟水流事件或沉积构型尺度下沉积物的搬运、沉积和侵蚀过程, 实现沉积物搬运及沉积地貌变化的模拟^[36]。Navier-Stokes方程组简称N-S方程组, 而N-S方程由纳维在1827年首先提出, 该方程可描述流体的运动, 随后在多位学者推动下形成了系统的N-S方程组, 此方程组在流体力学中起着基础与决定性作用, 在计算机问世和迅速发展之后, N-S方程组被广泛应用到航空和水力等各领域。Delft3D模型可用于沿海、河流和河口地区的3D模拟, 能够模拟水流、泥沙输送、波浪、水质等过程, 由多个交互式模块构成, 本文主要使用了FLOW及WAVE子模块。FLOW模块在初始边界条件下, 采用有限差分法在三维空间内求解非稳态方程组, 在模拟过程中通过输入边界条件、沉积底形对流动方程进行求解, 计算沉积物的搬运及沉积状况, 并通过不断的迭代计算进行逐步模拟。WAVE模块采用第三代SWAN模型, 能够较系统准确地模拟波浪产生、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,被广泛应用于近海岸、湖泊及河口等地区的波浪研究。WAVE与FLOW模块具有动态交互作用,通过两者的交互式计算,完成近海岸地区的复杂水动力模拟。

1.2 模型建立及条件参数

本文选取资料较为丰富的山东半岛莱州湾作为实验模型的边界条件获取区。莱州湾位于山东半岛与黄河三角洲之间,东西向跨度60 km,海湾东部岸线近10 km海岸内形态丰富,风力作用强烈,海水以波浪作用为主,潮汐作用很弱,为典型的砂质海岸沉积,发育多条水下砂坝,以龙口湾砂坝较为典型^[37](图1)。根据山东省海洋志记录可知,龙口湾砂坝位于龙口镇西海岸,砂坝平行于海岸线呈北西-南东向,呈三角形分布,长约2.5 km,底部宽约2.1 km,岩性以成熟度较高的细砂岩为主。砂坝内、外两侧坡度存在差异,近岸侧坡度较缓,坡降约1:150,离岸侧坡度较陡,坡降约1:10~1:50,砂坝顶部可出露水面,顶部可见发育若干条砂脊,其形成水深在5 m以内。为了能较好地分析临滨坝的形成过程,同时保证模型计算量处于合理范围,使模型顺利计算达到收敛,须设定合理的模型网格大小,如网格过大,则建立的网格所模拟形成的临滨坝体分辨率会较低。本次模拟设定网格大小为20 m×20 m,垂向网格数为5个,模拟区域大小16 km×5 km,即沿海岸线方向长度为16 km,垂直于海岸线方向长度为5 km,模型规模与实际情

况较为相似。

海岸线形态是影响临滨坝沉积的因素之一,海岸线形态变化多样,包括基岩海岸线、砂泥质海岸线等多种类型^[38-39]。受海岸的地质构造、气候条件、沉积水动力和沉积物供给量的影响,利用卫星地图对砂质海岸线形态进行了分析,将砂质海岸线形态分为近平直状(图2c)、港湾状(图2b)、肩岬状(图2d)3种基本类型,这3种基本类型之间以不同的规模相互组合,构成了自然界中复杂的海岸线形态。从宏观上看,海岸线呈弯曲状展布;从局部看,弯曲的海岸线则由平直段、港湾段及肩岬段构成(图2)。在本次模拟中,依据自然界中海岸线形态的特点,设计了较为常见的弯曲型海岸线形态。海岸坡度受海岸构造特征影响,据地矿部海洋地质研究所实测资料显示,莱州湾海岸坡降最小约1:1 000,距离岸线5 km处测量的最大海水深度约5 m,此种海岸坡降较为常见,而最大海岸坡降约1:200,距离岸线2 km处测量的最大海水深度约10 m。自然界中海岸坡降主要分布在1:10~1:10 000,本次研究设计的海岸坡降为1:1 000。利用水文观测数据,搜集了1980年以来区域的相关地质参数,如砂样粒度、砂/泥比、水体含砂量等参数。同时,参考了前人的部分模拟参数^[40-42],根据以上参数设定沉积数值模拟的边界条件(表1)。

2 典型临滨坝形成与演化过程

临滨坝的发育受滨岸水动力作用控制,受海岸地

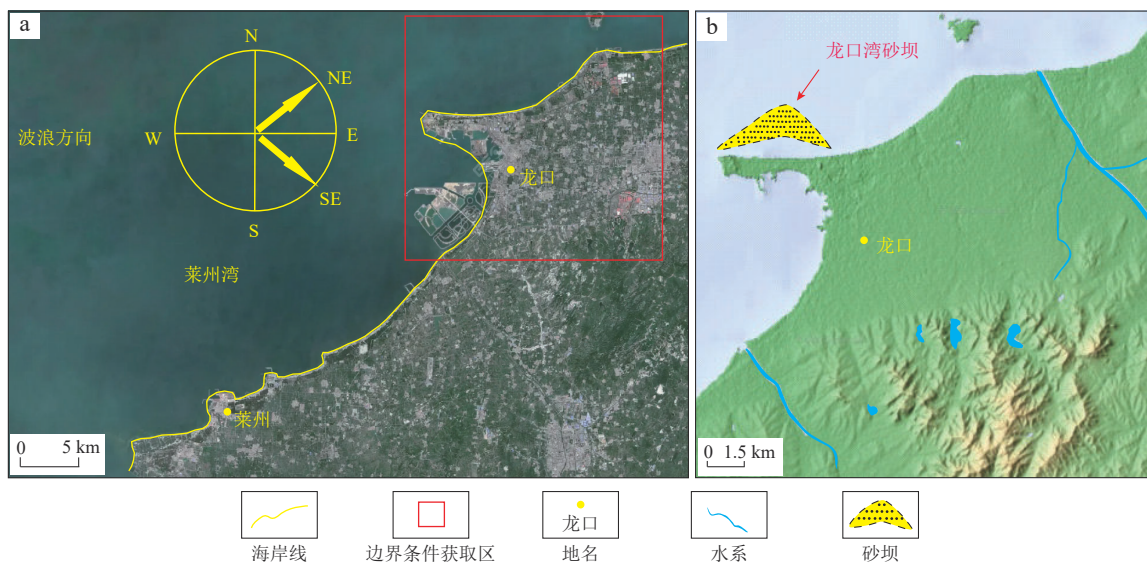


图1 山东半岛莱州湾龙口湾砂坝分布示意图

Fig. 1 Schematic diagram showing the distribution of the Longkou Bay sandbar in Laizhou Bay, Shandong Peninsula

a. 山东半岛莱州湾卫星图; b. 龙口湾砂坝分布示意图

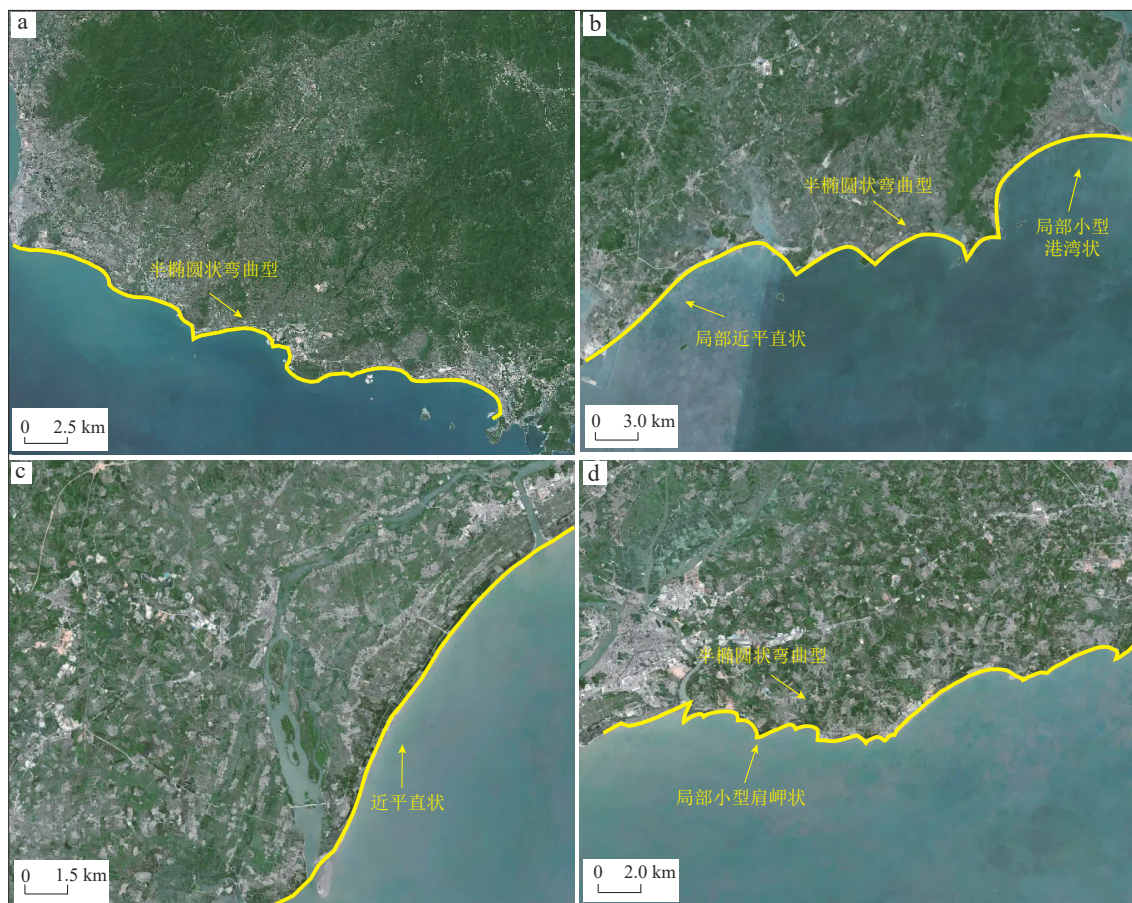


图2 现代海岸线形态特征卫星照片

Fig. 2 Photos showing the morphological characteristics of modern shorelines

a. 海南省三亚市崖州区与乐东黎族自治县海岸; b. 广东省阳西县海岸; c. 广东省吴川市东部海岸; d. 广东省吴川市东北部海岸

表1 浪控砂质临滨沉积数值模拟边界条件

Table 1 Boundary conditions for numerical simulation of wave-dominated sandy nearshore deposits

边界参数	参数值
模拟区域大小	5 km×16 km
模拟平均网格大小	20 m×20 m
总网格数量	250×800×5
粒度中值	0.2 mm
水体密度	1 000 kg/m ³
砂/泥比	10:1
重力加速度	9.81 m/s ²
砂质沉积物干容量	1 650 kg/m ³
泥质沉积物干容量	500 kg/m ³
沉积物厚度变化记录下限	0.1 m
模拟时间步长	0.2 s
模拟总时长	1 a
地貌加速因子	96

形、物源供给、波浪强度、海平面变化等多因素综合影响。其中,海洋滨岸水动力系统较复杂,是波浪、潮

汐、风暴综合作用的产物,不同类型海岸地带这3类水动力的强度存在差异,大部分海岸以波浪作用为主,本部分主要讨论了典型浪控条件下正向线性临滨坝的形成与演化。根据沉积数值模拟结果及现代沉积分析,将典型的临滨坝的形成分为以下几个阶段:锥形坝发育期、弯月坝发育期、条带状复合坝发育期、条带状复合坝扩大生长期以及条带状复合坝停止发育期。

2.1 锥形坝发育期

临滨坝发育锥形阶段以小型锥状砂坝的产生为特征,平面形态为小型的锥形,锥形底部靠近海岸方向,顺着海岸方向呈正锥形分布,锥形的两翼分别与海岸呈近45°角分布(图3)。小型锥状砂坝的发育受到沿岸水流形态的控制,在底流、沿岸流及裂流构成的复杂环流系统下(图3),海水携带的沉积物在向岸运动的过程中发生沉积,砂坝的初始沉积形态受水流方向的控制。水流在向岸运动的过程中,受岸线形态及沉积底形影响,部分水流方向发生改变,逐渐形成斜交岸线的

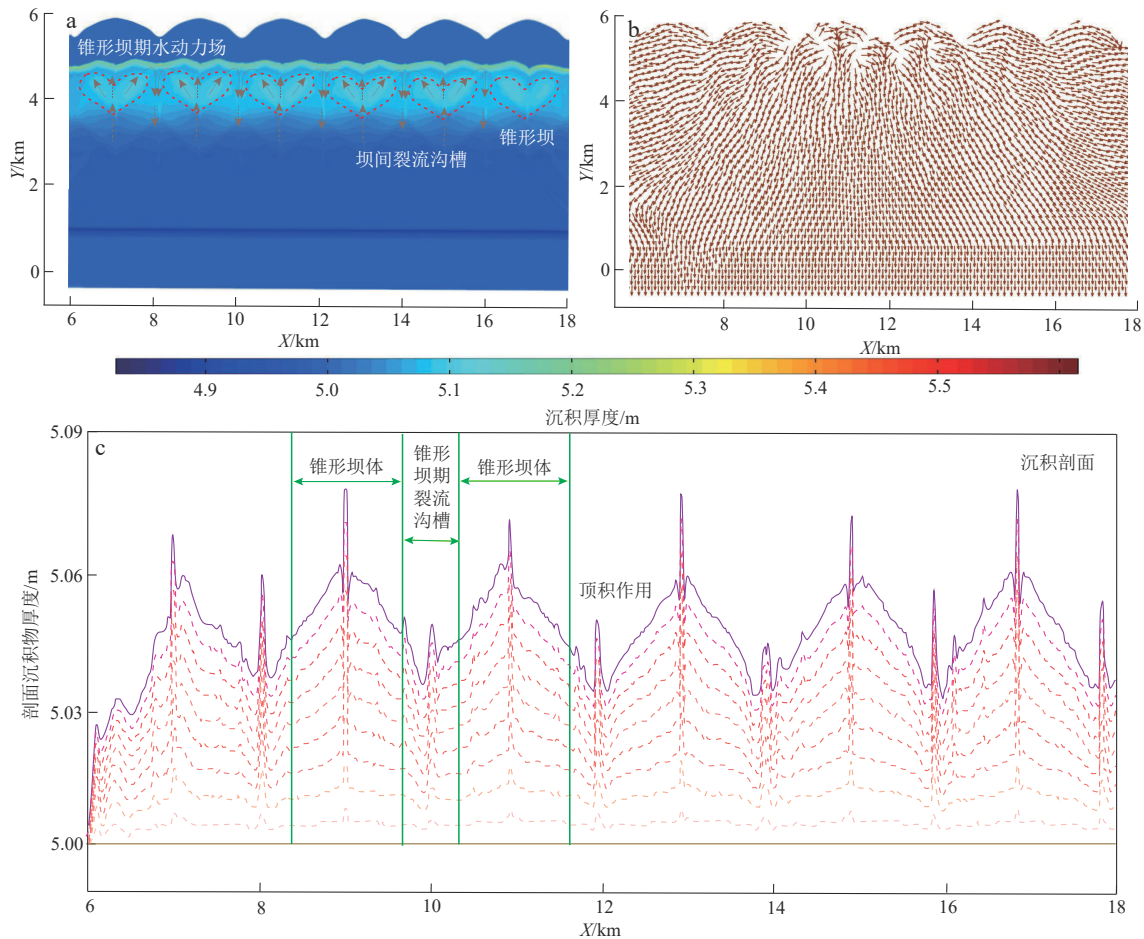


图3 锥形坝发育期沉积及水动力场特征

Fig. 3 Sedimentary and hydrodynamic field characteristics at the stage of tapered-bar formation

a. 沉积厚度平面图; b. 水动力矢量场; c. 平行于岸线方向的沉积厚度剖面

水流,在平面上形成了局部环流系统,在此过程中形成了受环流系统的水流方向影响的小型锥形坝(图4a)。在沿岸环流系统的持续作用下,海水中的沉积物不断地在锥形坝顶部发生沉积,使锥形坝逐渐增大,此阶段表现为典型的顶积沉积作用(图3)。同时,在锥形坝向岸方向存在一个弱沉积区,此区域为相对静水区,受到锥形坝的隔离影响,水体较坝体部位深。在本次模拟工区范围之内发育多个锥形坝,锥形坝间发育早期裂流沟槽,锥形坝发育的数量达到6个,锥形坝的数量受环流系统个数控制,单一锥形坝规模为 $1\,500\text{ m} \times 1\,000\text{ m}$,在砂坝沿岸方向最宽约 $1\,500\text{ m}$,垂直岸线方向延伸长度约 $1\,000\text{ m}$ 。在本次模拟中,当实验模拟步长为50时,由于水体流速减小,在单一环流的两侧发生沉积物卸载,而在单一环流两侧的底部发生沉积作用,沉积物平面分布形态为小型锥状砂坝两侧的初始形态,沉积物厚度较薄,厚度分布在 $0.1 \sim 0.2\text{ m}$;当模拟步长达到140时,由于受水流条件影响,在环流中心及两侧不断发生沉积物沉降,此时形成了锥状的小型

砂坝,此为临滨坝发育的初始形态,坝体厚度分布在 $0.2 \sim 0.4\text{ m}$ 。

2.2 弯月坝发育期

在锥形坝发育之后,由于波浪的不断作用,使锥形坝不断地接受沉积与改造作用,最终形成弯月坝。受水流影响,在靠近锥尖部位的先期沉积物受到冲刷作用影响,锥顶不断向岸迁移,水体携带后期沉积物不断发生沉积,在迁移过程中锥顶形态消失,发育成了弯月状的平滑顶部。而锥体两侧角度在沉积过程中也不断变小,最终发育成了弯月坝,弯月坝发育期为典型的顶积沉积作用(图5)。弯月坝与锥形坝的形态有较大差异,整体呈弯月状分布。在单一弯月坝间发育裂流凹槽,凹槽部位水体变深,沉积作用相对较弱,是环流系统中裂流的发育部位,在裂流向海运动的过程中,前期不易沉积的较细沉积物发生沉积,形成坝间裂流凹槽,裂流凹槽宽度约为 300 m 。同时,在单一弯月状砂坝顶部可见沟槽,沟槽宽度较小,宽度为 10 m 左右,其形



图4 现代滨岸沉积中不同发育阶段坝体卫星照片

Fig. 4 Photos showing the nearshore bars at different developmental stages in modern coastal deposits

a. 海南省崖州湾海岸; b. 法国西海岸, Ttuc Vert (地名), 修改自 Castelle^[43]; c. 海南省崖州湾海岸; d. 海南省万宁市海岸; e. 海南省头咀港海岸; f. 南澳大利亚州南部海岸

成原因为环流系统的底部回流的向海运动(图5), 弯月坝是环流综合作用的结果。

在本次模拟中, 当实验模拟步长达到280时, 形成了较典型的弯月坝, 弯月坝沿岸方向长度约1 500 m, 垂直岸线方向延伸长度约500 m, 总共发育6个完整的弯月坝。弯月坝沉积物厚度增大, 厚度分布在0.7~

1.0 m。弯月坝是常见的临滨坝类型, 可在现代沉积中观测到其发育(图4a—d)。

2.3 窄条带状复合坝发育期

在弯月坝形成后, 随着沉积物的不断供给及波浪的不断作用, 弯月坝不断地接受沉积及改造, 形成近似

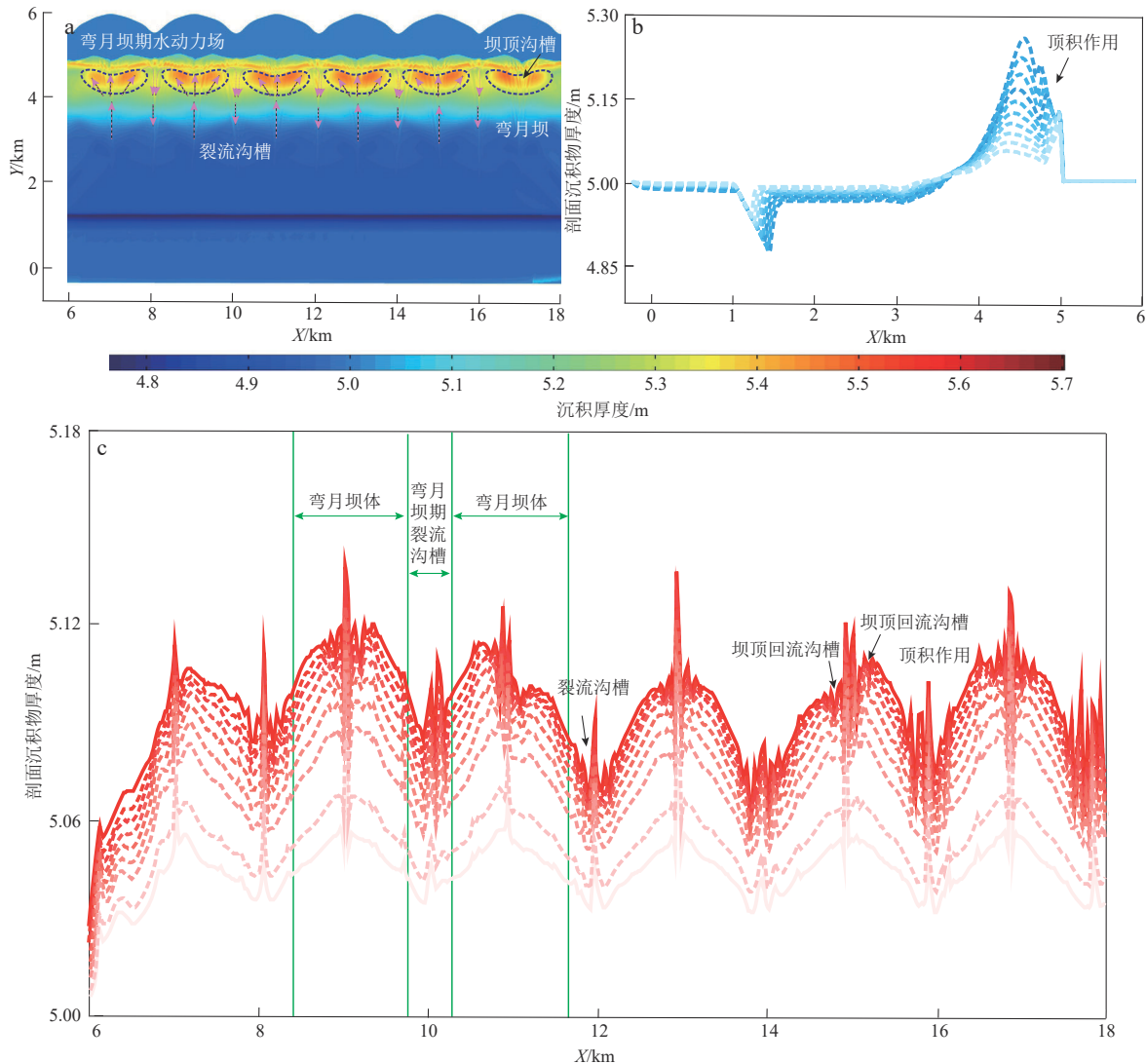


图5 弯月坝发育期沉积平面及剖面特征

Fig. 5 Planar and sectional views showing the sedimentary characteristics at the stage of crescentic-bar development

a. 沉积厚度平面图; b. 垂直于岸线方向的沉积厚度剖面; c. 平行于岸线方向的沉积厚度剖面

于条带状的复合坝,复合坝是临滨坝发育的后期阶段,由多个单期次弯月坝改造形成(图6)。在弯状坝形成之后,由于波浪的不断作用,弯月坝的迎水面受到波浪的冲洗,向海岸发生迁移,使坝体的宽度不断减小。本次模拟中其宽度从500 m减小到250 m,同时在弯月坝侧翼发生沉积,侧翼长度不断增大,使单一弯月坝的基础形态不断变长、变窄。在此阶段,由于弯月坝沉积厚度达到一定规模,在单一弯月坝间的裂流凹槽部位发生填平补齐的沉积作用,坝间的裂流凹槽沉积厚度不断增大,裂流凹槽部位不断接受沉积,进而连接平面上不同位置的弯月坝,形成初具条带状形态的复合坝(图6),复合坝的形成代表了临滨坝发育的高级阶段。复合坝厚度较大,平面上分布呈窄条带状分布(图4e),分布面积较大。

在本次模拟中,当实验模拟步长达到380时,形成了初具形态的复合坝,厚度可达1.0~1.5 m,内部由若干弯月坝构成,形成平面形态为窄条带状的坝体,复合坝沿着岸线方向延伸长度可达10 km,而坝体的宽度较小,约为250 m;当实验模拟步长达到480时,形成了典型的复合坝形态,此时复合坝内部的弯月坝已受到改造完全消失,形成结构较完整的复合坝形态。

2.4 条带状复合坝生长扩大期

在复合坝形成之后,在物源供给条件不变的前提下,复合坝不断扩大生长,主要表现为复合坝的厚度快速增加,沿岸及垂直岸线方向上的长度、宽度增加,平面形态也由形成初期的窄条带状发育为宽条带状,坝

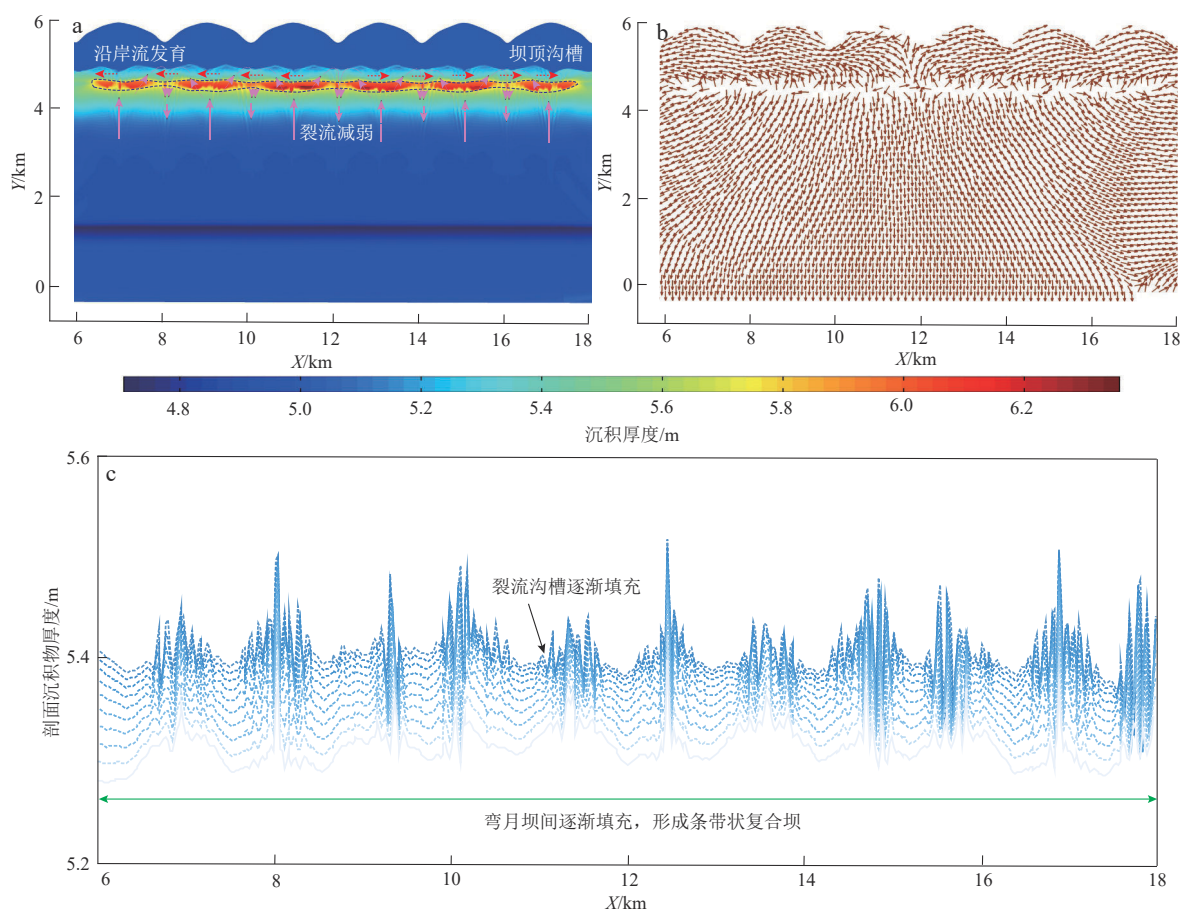


图6 窄条带状复合坝发育期沉积及水动力场特征

Fig. 6 Sedimentary and hydrodynamic field characteristics at the stage of the formation of a narrow banded compound bar

a. 沉积厚度平面图; b. 水动力矢量场; c. 平行于岸线方向的沉积厚度剖面

体分布面积变大。宽条带状复合坝的形成受控于此沉积过程中的侧积作用,沉积过程由典型的顶积式转化为侧积式(图7)。近岸水动力条件在此阶段发生典型变化,由于复合坝的形成,早期的裂流凹槽部位不断发生沉积填充,直至裂流凹槽消失,此时裂流随之消失,水流向海运动变化为以底流为主。波浪所形成的底流不断改造复合坝的形态,在复合坝近岸侧,底流在向海运动的过程中对复合坝进行沉积、冲刷,持续的沉积作用使复合坝厚度增加,在此过程中同时受到底流的冲刷作用,使复合坝近岸侧沉积坡度变缓,携带的部分沉积物运动到复合坝离岸侧,由于水体变深而发生沉积作用。复合坝近岸侧由于底流的不断冲刷,导致砂坝近岸侧的坡降较小,离岸侧坡降较大,如山东龙口湾尖子头砂坝两侧坡降存在显著差异,近岸侧坡降较缓,近岸侧坡降约1:150,离岸侧坡降较陡,离岸侧坡降约1:10~1:50(图7)。在后期砂坝顶部可出露水面,形成局部平坦的地形,此时复合坝分隔了近岸水体与开阔海洋水体,在复合坝与岸线间形成了水体较安静的弱水动力区,同时复合坝两端不断地向岸线生长延伸,当

复合坝体完全连接岸线时,可形成较典型的与复合坝伴生的封闭潟湖(图4f)。

在本次模拟中,当实验模拟步长达到1 200时,形成较成熟的复合坝,厚度可达1.5~3.0 m,为厚度增大的主体期,沿岸及垂直岸线方向上的长度和宽度分别为16.0 km和0.8 km,坝体宽度较大幅度地增加;在实验模拟步长达到1 400时,复合坝由于不断地生长,其两端与岸线相接,在复合坝与岸线间形成局部封闭的水体,形成较典型的潟湖沉积,封闭水域宽度约300 m,水体深度在0.5~0.8 m。

2.5 条带状复合坝停止发育期

当复合坝发育到一定规模时,复合坝顶部出露水面,坝体与岸线间合围形成封闭的静水潟湖区域,此时先期的海岸线与开阔海水间分隔开,在海平面保持不变的条件下,海岸线向海方向迁移,复合坝离岸侧与海水水体接触带形成了新的海岸线,先期形成的复合坝停止生长。在单一复合坝停止发育期,在新一期海岸线靠海一侧可见临滨坝发育雏形,即产生锥形坝,在海

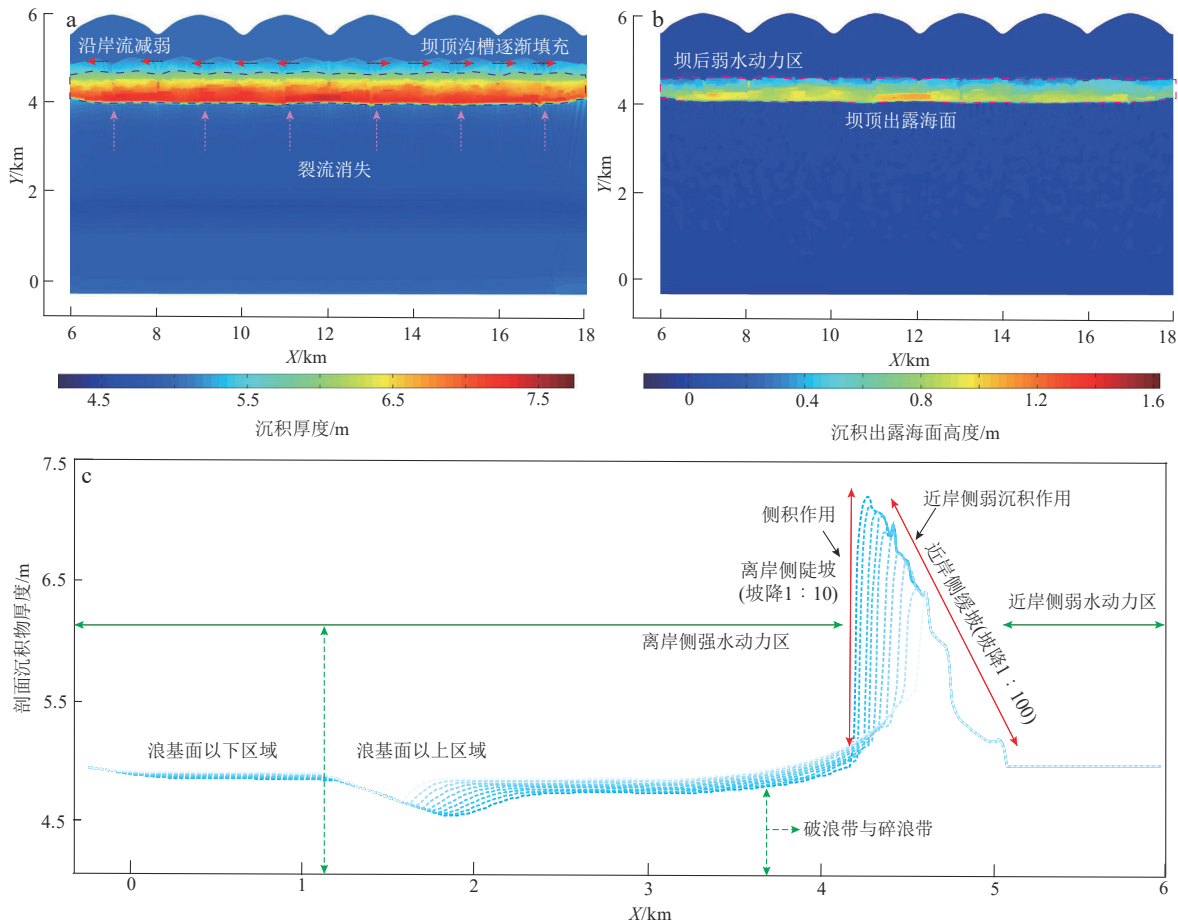


图7 复合坝扩大生长期沉积平面及剖面特征

Fig. 7 Planar and sectional views showing the sedimentary characteristics at the stage of compound-bar expansion

a. 沉积厚度平面图; b. 沉积出露海面高度; c. 垂直于岸线方向的沉积厚度剖面

岸带发育多个锥形坝,原始坝体在经历不同阶段的沉积过程后,形成新期次的单一坝复合体。平面上,不同阶段形成的单期次复合坝体间隔分布,临滨坝不断向海方向进积,形成了面积分布较广的临滨坝复合体(图8)。单期次复合坝体之间可能发育在封闭性水体中沉积的细粒沉积物,粉砂质和泥质等细粒沉积物分隔了平面上不同期次的复合坝。在本次模拟中,当实验模拟步长达到1400时,复合坝停止生长,形成了较成熟的复合坝。

3 不同发育阶段临滨坝沉积构型特征

根据临滨坝演化过程可知,典型条件下浪控砂质临滨坝主要类型包括锥形坝、弯月坝、复合坝,不同类型的坝体是不同演化阶段的产物(图9)。现代沉积所观测的坝体可能为某一发育阶段的产物,基于沉积模拟可有效再现不同演化阶段坝体的发育特征。由于不同海岸带在物源供给、水动力条件等方面存在差

异,不同海岸带临滨坝发育的程度存在区别,在现代沉积中可观测到3类坝体发育,形成了不同的沉积构型特征。

锥形坝是临滨坝发育雏形阶段的产物,在平面上若干个锥形坝间隔发育,锥形坝间发育裂流形成的凹槽,通常发育在水体之下,因此较难从现代沉积中观测到。锥形坝的沉积构型特征较简单,坝体平面上呈锥状,剖面上呈底平顶凸的形态,其与裂流凹槽相接,呈锥形坝—裂流凹槽—锥形坝的侧向叠置关系(图10a),裂流凹槽的沉积厚度较锥形坝小,在剖面上呈厚—薄—厚的叠置特征。锥形坝内部受环流影响,呈顶积式沉积特征。

弯月坝是临滨坝发育中期阶段的产物,是在锥形坝的基础上发育形成,弯月坝是一种常见的临滨坝类型,在现代滨岸沉积中可见,受沿岸环流影响,平面上改造为弯月状。弯月坝与裂流凹槽的构型侧向叠置关系更为明显,与锥形坝类似,呈现厚—薄—厚的叠置特征(图10b)。

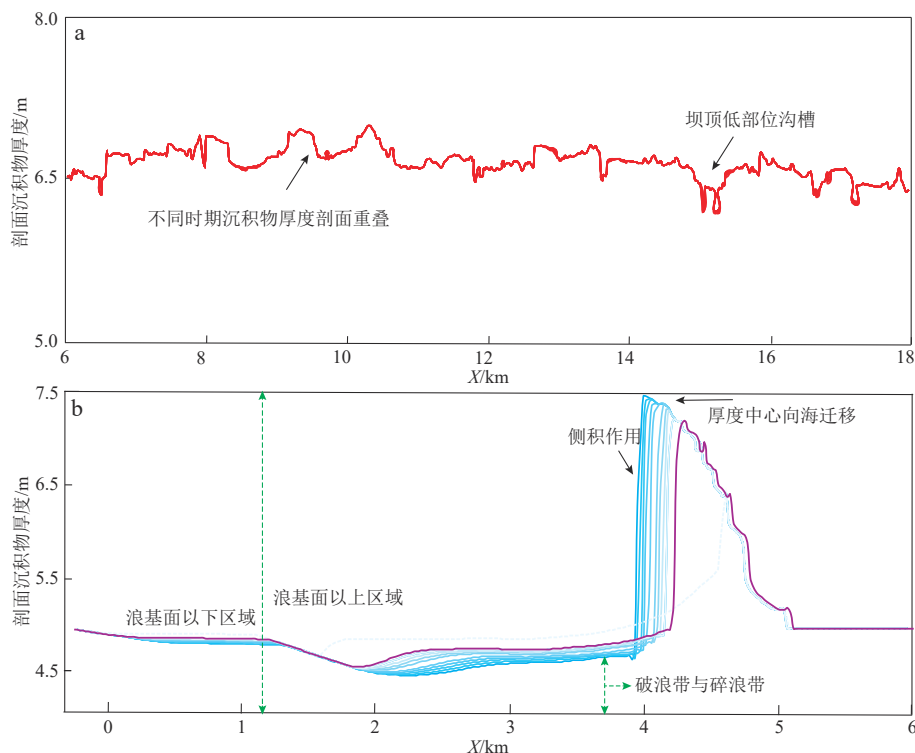


图8 复合坝停止发育期沉积剖面特征

Fig. 8 Planar and sectional views showing the sedimentary characteristics at the stage of compound-bar developmental termination

a. 平行于岸线方向; b. 垂直于岸线方向

复合坝是临滨坝发育后期阶段的产物,在现代沉积中最为常见,是临滨坝发育成熟的沉积产物。在复合坝内部,裂流凹槽被细粒沉积物填充,所形成的复合坝不断增长,坝宽不断增加,平面上由窄条带状演化为宽条带状,呈底平顶凸状展布。复合坝内部构型特征较复杂,据其形成原因可知,其内部构型单元可分为坝体与被填充的裂流凹槽,呈现坝体—裂流凹槽—坝体的侧向叠置关系。由于填平补齐的沉积作用,构型剖面上厚度变化较小,但裂流凹槽部位沉积物粒度较细(图10c,d)。

在单期复合坝形成之后,多期复合坝在平面上相互叠置,在复合坝向岸侧形成静水区,可发育泥质、粉砂质等细粒沉积物。在垂直于岸线的构型剖面上呈复合坝—潟湖(或静水细粒沉积区)—复合坝的叠置关系,静水区域厚度较薄,呈现厚—薄—厚的侧向叠置特征。

4 典型临滨坝形成的水动力特征及机制

海岸水动力特征较复杂,波浪在破浪后向岸运动形成碎浪,在近岸带形成了向岸流—回流系统与环流

系统。环流系统以沿岸流、裂流为特征,向岸流、底流、沿岸流和裂流构成了近岸复杂的水动力系统。本次研究以典型海岸沉积条件为基础,根据沉积模拟形成的沉积物堆积特征、水体流动方向及强度,分析了波浪垂直于海岸线条件下,不同类型临滨坝形成的水动力条件及变化特征(图11)。

锥形坝形成于较平坦的海岸底形之上,波浪在破碎之后形成向岸流,向岸流垂直于岸线流动,且流动方向逐渐发生变化,方向变化过程为垂直海岸—斜交海岸 45° —平行海岸,形成平行岸线方向的沿岸流。在水流由向岸流向沿岸流转变过程中,水体流速显著变小,在本次模拟中流速约 0.2 m/s ,水流所携带的沉积物发生局部卸载,在向岸流与沿岸流的转化部位发生沉积,沉积物初始形态呈锥形,锥形两翼与岸线呈 45° ,与水流的变化方向一致。卸载了部分沉积物的沿岸流在局部汇聚,以裂流的方式垂直于岸线向海流动,此时裂流向海移动速率显著变大,在本次模拟中流速约 0.8 m/s ,沉积物较难沉降,形成了位于锥形坝两侧的裂流凹槽。因此,锥形坝的形成主要受控于向岸流向沿岸流水流变化的影响,在水流形态转变过程中,受到沿岸阻力作用,流速显著降低,发生沉积形成锥形坝(图11a)。

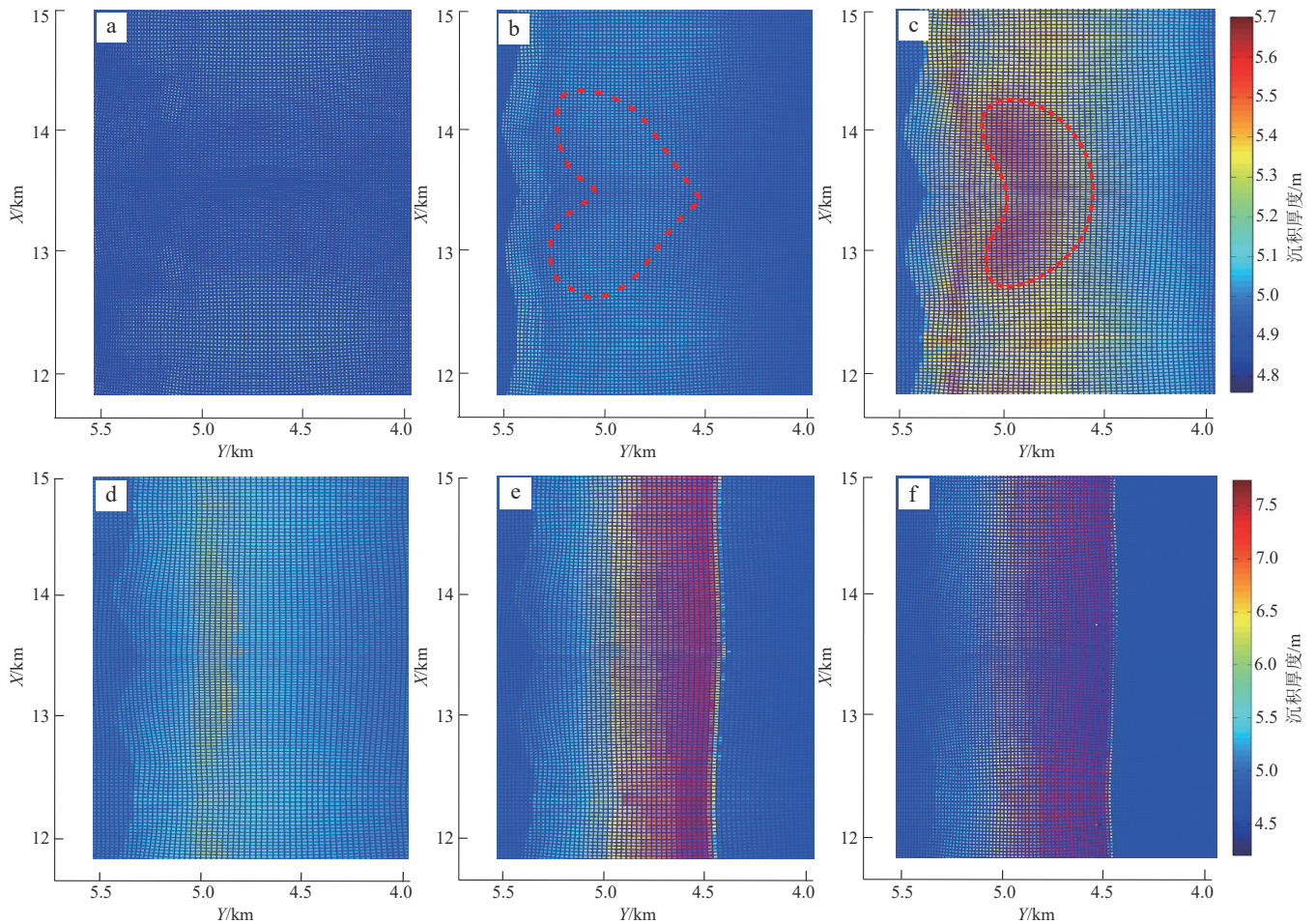


图9 坝体发育过程局部特征对比

Fig. 9 Comparison of local characteristics of a nearshore bar at various developmental stages

a. 初始时期; b. 锥形坝发育期; c. 弯月坝发育期; d. 窄条带状复合坝发育期; e. 宽条带状复合坝发育期; f. 复合坝停止发育期

弯月坝形成于锥形坝发育之后,由于锥形坝厚度不断增大,向岸流向沿岸流转变过程中,水流不断冲刷早期形成的锥形坝,在锥尖发生侵蚀作用,在锥侧翼发生沉积作用。随着锥尖侵蚀、锥尾沉积作用不断进行,坝体的形态由锥形向弯月形转化,转化为弯月形后形态趋于稳定(图 11b)。此时水流系统仍以向岸流、沿岸流、裂流为特征,坝体上部的水体流速进一步减小,导致沉积物不断发生卸载。裂流大小与锥形坝形成时期相似,裂流流速较大,导致沉积速率较小,裂流凹槽仍较发育。因此,弯月坝的形成主要受向岸流—沿岸流与坝体相互作用的影响,在水流对坝体的侵蚀、沉积达到平衡时,形成弯月坝。

复合坝发育在弯月坝成熟之后,此时弯月坝的厚度及宽度达到一定规模,沉积物在水流的沉积—侵蚀作用下处于动态平衡状态。在向岸流—沿岸流变化为裂流时,沉积物浓度增大,在裂流凹槽部位发生沉积,坝间的裂流凹槽部位沉积厚度不断增加,裂流凹槽的

宽度不断变小,此时裂流凹槽演化为裂流沟槽,对裂流的流动形成遮挡,导致裂流流速不断减小,裂流凹槽的填充导致弯月坝相互连接形成复合坝(图 11c)。当复合坝成熟之后,由于坝体遮挡使裂流的形态发生变化,促使裂流逐渐消失,水流在向海运动过程中不断冲刷复合坝顶部,造成复合坝向岸侧与离岸侧的坡度存在显著差异,此时水流形态以底流为主(图 11 e, d)。因此,复合坝的形成导致裂流活动减弱,坝体主要受到向岸流、底流的控制与改造。

5 典型临滨坝发育演化模式探讨

在正向波浪作用下,海相砂质滨岸坝体的发育经历了锥形坝—弯月坝—复合坝多个演化阶段,不同演化阶段坝体的形态、展布及特征存在较大差异(图 12),现代滨岸沉积中可见不同演化阶段的坝体(图 4)。临滨坝形成早期发育小型锥形坝,其形成受

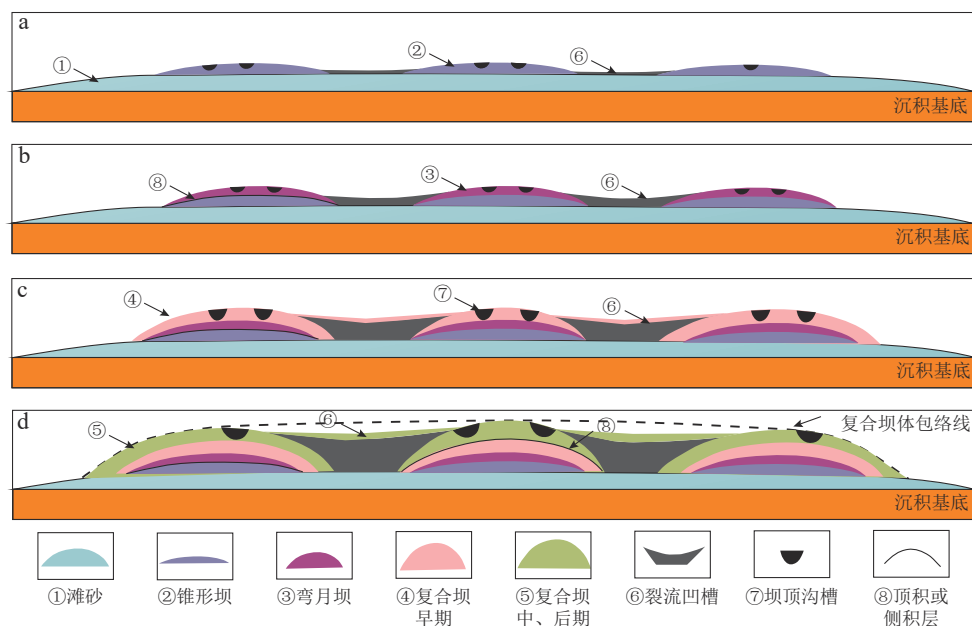


图 10 典型坝体不同演化阶段平行于岸线方向沉积构型剖面特征

Fig. 10 Profiles showing the sedimentary architectures of a typical nearshore bar at various developmental stages

a. 锥形坝期; b. 弯月坝期; c. 复合坝初期; d. 复合坝中、后期

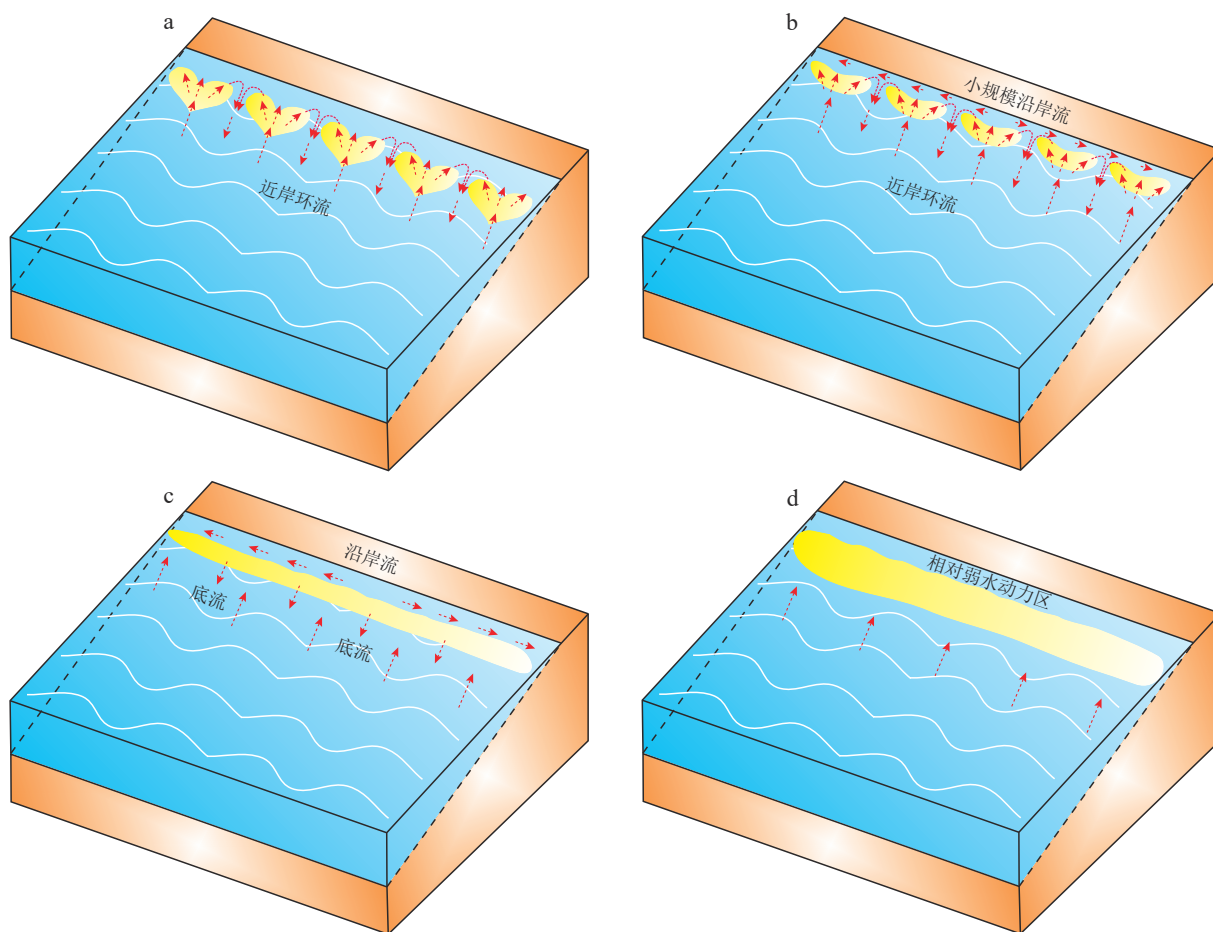


图 11 典型坝体不同演化阶段沉积水动力特征示意图

Fig. 11 Hydrodynamic characteristics of a typical nearshore bar at various developmental stages

a. 锥形坝发育期; b. 弯月坝发育期; c. 条带状复合坝发育早期; d. 条带状复合坝发育末期

向岸流与沿岸流活动的影响,在沿岸环流系统影响下发生沉积,形成多个等间距排列的锥形坝,此时坝体厚度较薄,规模较小。在波浪的作用下,向岸流及沿岸流不断冲刷先期形成的锥形坝,使锥形坝坝顶向岸迁移,在迁移过程中锥顶形态消失,演化为多个等间距排列的弯月坝,在弯月坝间发育裂流凹槽,裂流凹槽内部沉积物粒度较细,水动力较弱时可发育泥质凹槽沉积。复合坝为坝体发育的成熟阶段,由多个弯月

坝沉积而成,弯月坝间的裂流凹槽不断发生沉积填充,直至裂流凹槽消失,形成复合坝体。在滨岸物源供给不足时,复合坝体处于动态变化中,但始终发育在水面之下,形成水下砂坝,此时滨岸发育为无障壁型滨岸。在物源供给足够充足时,波浪作用较稳定,复合坝体不断生长发育,宽度及长度增加,当复合坝顶部出露水面时,坝体与岸线间可形成封闭的静水潟湖区,早期形成的复合坝接受波浪作用发生动态变

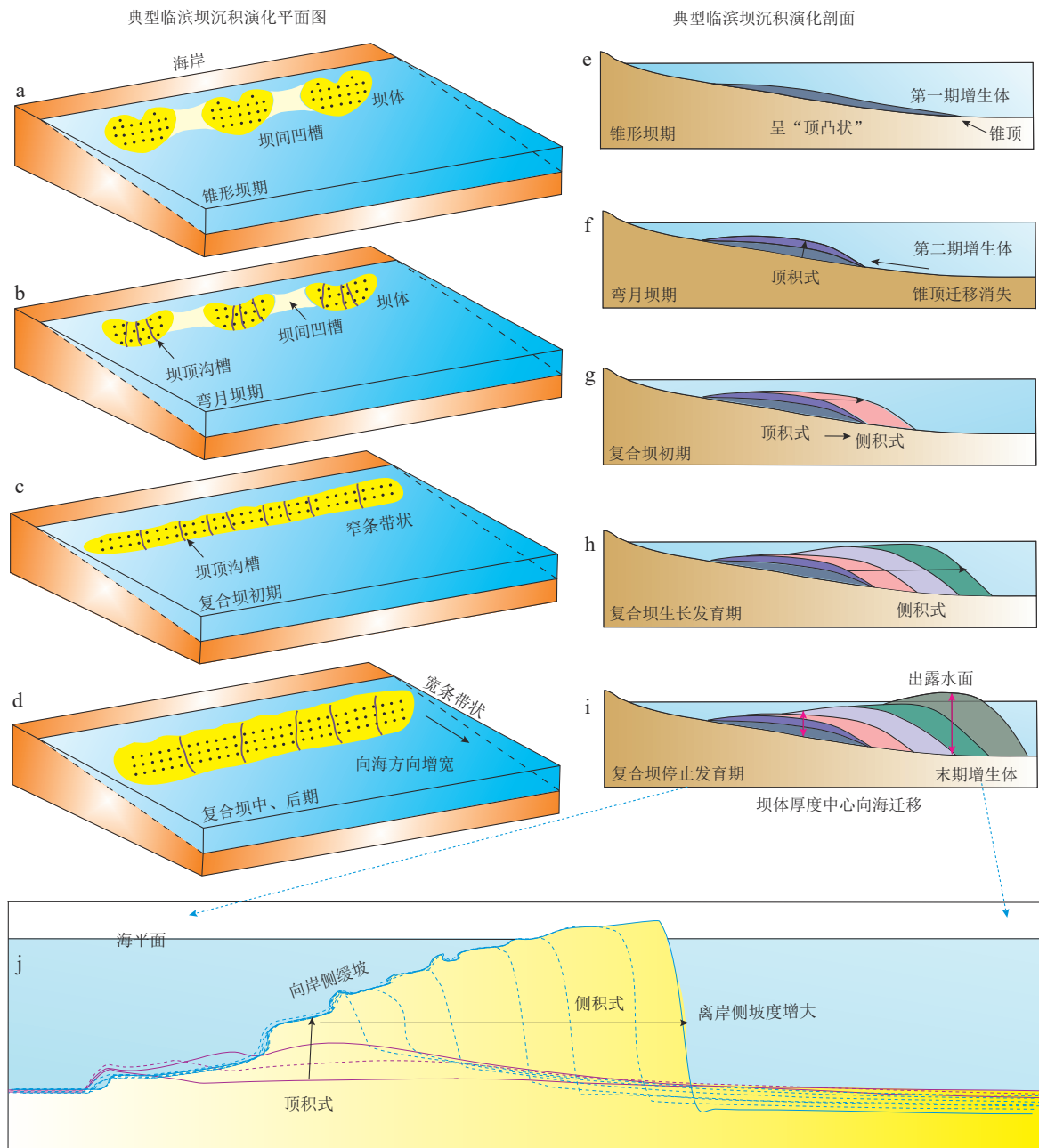


图12 典型海相砂质坝体演化模式

Fig. 12 Evolutionary model of a typical marine sandbar

a. 锥形坝期平面图; b. 弯月坝期平面图; c. 复合坝初期平面图; d. 复合坝中、后期平面图; e. 锥形坝期剖面; f. 弯月坝期剖面; g. 复合坝初期剖面; h. 复合坝生长发育期剖面; i. 复合坝停止发育期剖面; j. 砂坝内部沉积方式由顶积式向侧积式变化

化,但基本停止生长,多期次的复合坝体与潟湖构成了障壁型滨岸。

6 结论

1) 采用沉积数值模拟与滨岸现代沉积结合的方法,探讨了典型正向线性临滨坝的形成与演化过程,有效弥补了现代沉积观测的不足。典型海相临滨坝的发育包括锥形坝形成期、弯月坝发育期、条带状复合坝形成期、条带状复合坝扩大生长期、条带状复合坝停止发育期。锥形坝是临滨坝体发育的雏形,复合坝是临滨坝体发育的成熟期,不同发育阶段的坝体在现代沉积中皆可见发育,是否可演化为较成熟的复合坝体受物源供给、波浪强度等多因素控制。需要指出,本文所讨论的正向线性临滨坝发育在弯曲型海岸线、波浪垂直于岸线入射的条件下,当岸线形态为大型港湾状、肩岬状或近平直状,或波浪斜交于岸线入射时,坝体的类型及发育演化过程可能存在差异。此外,大型风暴事件也会对坝体进行改造。

2) 不同演化阶段坝体的成因受多种滨岸水动力控制,在沉积水动力条件控制下,锥形坝及弯月坝时期为典型的顶积式沉积过程,条带状复合坝时期由顶积式向侧积式变化。锥形坝的形成受向岸流向沿岸流变化影响,在沿岸环流系统下发生锥形坝的初始沉积,形成多个小规模、近等间距规则排列的锥形坝,受向岸流及沿岸环流不断冲刷,其坝顶向岸迁移,坝体形态发生变化而形成弯月坝。锥形坝或弯月坝之间发育裂流凹槽沉积,沿岸环流在此部位水动力减缓,发育较多细粒沉积物。弯月坝坝主体及坝间裂流凹槽不断接受沉积,直至裂流凹槽消失,形成条带状复合坝,此时裂流消失,水流向海运动以底流为主,复合坝不断增宽增厚。底流不断改造复合坝,使复合坝向岸侧坡度较缓,离岸侧坡度较陡。当复合坝露出水面且与岸线形成封闭区域时,复合坝体可与坝后静水区构成了障壁型滨岸。

3) 不同演化阶段临滨坝体形成了复杂的沉积构型特征,锥形坝或弯月坝与裂流凹槽相接,发育锥形坝-裂流凹槽-锥形坝及弯月坝-裂流凹槽-弯月坝的构型侧向叠置关系,剖面上呈厚—薄—厚的叠置特征。复合坝内部可发育坝体-早期的裂流凹槽-坝体的构型叠置关系,而多期复合坝可在平面上相互叠置。对于典型临滨坝体演化及构型特征的分析,可有效指导滨岸储层的构型解剖研究,为其提供较为可靠的原型模型。

参 考 文 献

- [1] 吴崇筠,刘宝珺,王德发,等. 碎屑岩沉积相模式[J]. 石油学报, 1981, 2(4): 1-10.
WU Chongjun, LIU Baojun, WANG Defa, et al. Patterns of sedimentary facies of clastics in China[J]. Acta Petrolei Sinica, 1981, 2(4): 1-10.
- [2] HEWARD A P. A review of wave-dominated clastic shoreline deposits[J]. Earth-Science Reviews, 1981, 17(3): 223-276.
- [3] 朱筱敏,信荃麟,张晋仁. 断陷湖盆滩坝储集体沉积特征及沉积模式[J]. 沉积学报, 1994, 12(2): 20-28.
ZHU Xiaomin, XIN Quanlin, ZHANG Jinren. Sedimentary characteristics and models of the beach-bar reservoirs in faulted down lacustrine basins[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1994, 12(2): 20-28.
- [4] 宋明水,王永诗,郝雪峰,等. 渤海湾盆地东营凹陷古近系深层油气成藏系统及勘探潜力[J]. 石油与天然气地质, 2021, 42(6): 1243-1254.
SONG Mingshui, WANG Yongshi, HAO Xuefeng, et al. Petroleum systems and exploration potential in deep Paleogene of the Dongying Sag, Bohai Bay Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2021, 42(6): 1243-1254.
- [5] CLIFTON H E. A reexamination of facies models for clastic shorelines [M]//POSAMENTIER H W, WALKER R G. Facies Models Revisited. Tulsa: SEPM Society for Sedimentary Geology, 2006: 293-338.
- [6] PETERSON C D, VANDERBURGH S, ROBERTS M C, et al. Composition, age, and depositional rates of shoreface deposits under barriers and beach plains of the Columbia River littoral cell, USA[J]. Marine Geology, 2010, 273(1/4): 62-82.
- [7] 杨勇强,邱隆伟,姜在兴,等. 陆相断陷湖盆滩坝沉积模式——以东营凹陷古近系沙四上亚段为例[J]. 石油学报, 2011, 32(3): 417-423.
YANG Yongqiang, QIU Longwei, JIANG Zaixing, et al. A depositional pattern of beach bar in continental rift lake basins: A case study on the upper part of the fourth member of the Shahejie Formation in the Dongying Sag[J]. Acta Petrolei Sinica, 2011, 32(3): 417-423.
- [8] 商晓飞,侯加根,孙福亭,等. 砂质滩坝储集层内部结构特征及构型模式——以黄骅坳陷板桥油田古近系沙河街组为例[J]. 石油学报, 2014, 35(6): 1160-1171.
SHANG Xiaofei, HOU Jiagen, SUN Futing, et al. Architectural characteristics and sedimentary models of beach-bar sandstone reservoirs: A case study of the Paleogene Shahejie Formation in Banqiao Oilfield, Huanghua Depression[J]. Acta Petrolei Sinica, 2014, 35(6): 1160-1171.
- [9] 姜在兴,王俊辉,张元福. 滩坝沉积研究进展综述[J]. 古地理学报, 2015, 17(4): 427-440.
JIANG Zaixing, WANG Junhui, ZHANG Yuanfu. Advances in beach-bar research: A review [J]. Journal of Palaeogeography,

- 2015, 17(4): 427-440.
- [10] 郭金华, 张哲, 王柏轩. 东营凹陷沙一段滩坝-泻湖沉积体系和层序发育的控制特点[J]. 地球科学, 1998, 23(1): 21-26.
WU Jinhua, ZHANG Zhe, WANG Boxuan. Barrier-lagoon sedimentary system and sequence development control of Shahejie Formation Member 1 of Dongying Sag[J]. Earth Science, 1998, 23(1): 21-26.
- [11] 马立祥, 邓宏文, 林会喜, 等. 济阳坳陷三种典型滩坝相的空间分布模式[J]. 地质科技情报, 2009, 28(2): 66-71.
MA Lixiang, DENG Hongwen, LIN Huixi, et al. Three kinds of spatiotemporal models of typical beach and bar sedimentary facies in Jiyang Depression [J]. Geological Science and Technology Information, 2009, 28(2): 66-71.
- [12] 操应长, 王健, 刘惠民, 等. 东营凹陷南坡沙四上亚段滩坝砂体的沉积特征及模式[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2009, 33(6): 5-10.
CAO Yingchang, WANG Jian, LIU Huimin, et al. Sedimentary characteristics and models of beach-bar sandbodies in the upper part of the fourth member of Paleogene in the south slope of Dongying Depression[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2009, 33(6): 5-10.
- [13] 操应长, 王健, 刘惠民. 利用环境敏感粒度组分分析滩坝砂体水动力学机制的初步探讨——以东营凹陷西部沙四上滩坝砂体沉积为例[J]. 沉积学报, 2010, 28(2): 274-284.
CAO Yingchang, WANG Jian, LIU Huimin. Preliminary study on the hydrodynamic mechanism of beach-bar sandbodies with environmentally sensitive grain size components: A case study from beach-bar sandbody sediments of the upper part of the fourth Member of the Shahejie Formation in the western Dongying Depression[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2010, 28(2): 274-284.
- [14] 纪友亮, 卢欢, 刘玉瑞. 苏北盆地高邮凹陷古近系阜宁组一段浅水三角洲和滩坝沉积模式[J]. 古地理论, 2013, 15(5): 729-740.
JI Youliang, LU Huan, LIU Yurui. Sedimentary model of shallow water delta and beach bar in the Member 1 of Paleogene Funing Formation in Gaoyou Sag, Subei Basin [J]. Journal of Palaeogeography, 2013, 15(5): 729-740.
- [15] 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.
- [16] 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 Xiaofeng, PANG Xiaojun, HUANG Xiaobo, 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.
- [17] 杜一帆, 朱筱敏, 叶蕾, 等. 饶阳凹陷蠡县斜坡沙一下亚段混积滩坝沉积特征与发育模式[J]. 地球科学, 2020, 45(10): 3759-3778.
DU Yifan, ZHU Xiaomin, YE Lei, et al. Features and model of mixed sediments in lower submember of first member of Shahejie Formation in Lixian slope, Raoyang Sag [J]. Earth Science, 2020, 45(10): 3759-3778.
- [18] 张自力, 李琦, 朱筱敏, 等. 陆相断陷湖盆滩坝沉积特征与地震沉积学响应——以渤海湾盆地霸县凹陷古近系沙河街组一段为例[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(4): 970-989.
ZHANG Zili, LI Qi, ZHU Xiaomin, et al. Sedimentary characteristics and seismic sedimentologic responses of beach-bar deposits in a downfaulted lacustrine basin: A case study of Es¹ in the Palaeogene Baxian Sag, Bohai Bay Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(4): 970-989.
- [19] 蔡爱智. 刁龙咀海岸的发育[J]. 海洋与湖沼, 1980, 11(3): 204-210.
CAI Aizhi. Development of the accumulative geomorphology of the spits diaolongzui [J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 1980, 11(3): 204-210.
- [20] 王为. 香港海湾沙坝发育过程中的风沙作用[J]. 中国沙漠, 1996, 16(2): 120-126.
WANG Wei. Aeolian action in the development of bay barriers of Hong Kong [J]. Journal of Desert Research, 1996, 16(2): 120-126.
- [21] 赵希涛, 陈欣树, 郑范, 等. 海南三亚鹿回头半岛珊瑚礁和连岛坝的发育[J]. 第四纪研究, 1996, 16(1): 48-58.
ZHAO Xitao, CHEN Xinsu, ZHENG Fan, et al. Development of the coral reefs and tombolo of Luhuitou Peninsula, Sanya City, Hainan Province [J]. Quaternary Sciences, 1996, 16(1): 48-58.
- [22] 蔡进功, 李从先. 海岸砂坝-泻湖沉积体系中砂体分布及其预测[J]. 同济大学学报(自然科学版), 1998, 26(4): 425-429.
CAI Jingong, LI Congxian. Sandbody distribution and prediction of coastal barrier-lagoon depositional systems [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 1998, 26(4): 425-429.
- [23] DYER K R, HUNTLEY D A. The origin, classification and modelling of sand banks and ridges [J]. Continental Shelf Research, 1999, 19(10): 1285-1330.
- [24] 杜国云. 莱州湾东岸动力地貌对陆海相互作用的响应研究[J]. 海洋科学, 2016, 40(8): 70-75.
DU Guoyun. Dynamic geomorphological response to land-sea interaction on the eastern coast, Laizhou Bay [J]. Marine Sciences, 2016, 40(8): 70-75.
- [25] SLOSS C R, JONES B G, MCCLENNEN C E, et al. The geomorphological evolution of a wave-dominated barrier estuary: Burrill Lake, New South Wales, Australia [J]. Sedimentary Geology, 2006, 187(3/4): 229-249.
- [26] PENDLETON E A, BROTHERS L L, THIELER E R, et al. Sand

- ridge morphology and bedform migration patterns derived from bathymetry and backscatter on the inner-continental shelf offshore of Assateague Island, USA [J]. *Continental Shelf Research*, 2017, 144: 80–97.
- [27] COLOMBINI M, SEMINARA G, TUBINO M. Finite-amplitude alternate bars[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1987, 181: 213–232.
- [28] FALQUÉS A, COCO G, HUNTLEY D A. A mechanism for the generation of wave-driven rhythmic pattern in the surf zone [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2000, 105(C10): 24071–24087.
- [29] AAGAARD T. Infragravity waves and nearshore bars in protected, storm-dominated coastal environments [J]. *Marine Geology*, 1990, 94(3): 181–203.
- [30] YU Jie, MEI C C. Formation of sand bars under surface waves [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2000, 416: 315–348.
- [31] SCHWARTZ R K. Bedform, texture, and longshore bar development in response to combined storm wave and current dynamics in a nearshore helical flow system[J]. *Journal of Coastal Research*, 2012, 28(6): 1512–1535.
- [32] 孟凡昌, 李本霞. 裂流的研究综述[J]. *海洋预报*, 2017, 34(1): 82–89.
- MENG Fanchang, LI Benxia. Review on the study of the rip current[J]. *Marine Forecasts*, 2017, 34(1): 82–89.
- [33] 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.
- [34] 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.
- [35] WILLIAMS R D, MEASURES R, HICKS D M, et al. Assessment of a numerical model to reproduce event-scale erosion and deposition distributions in a braided river [J]. *Water Resources Research*, 2016, 52(8): 6621–6642.
- [36] EDMONDS D A, SLINGERLAND R L. Significant effect of sediment cohesion on delta morphology [J]. *Nature Geoscience*, 2010, 3(2): 105–109.
- [37] 战超. 莱州湾东岸岬间海湾海岸地貌演变过程与影响机制 [D]. 烟台: 中国科学院大学, 2017.
- ZHAN Chao. Evolution of coastal geomorphology and influence mechanism of headland bay along eastern Laizhou Bay [D]. Yantai: Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, 2017.
- [38] 索安宁, 曹可, 马红伟, 等. 海岸线分类体系探讨[J]. *地理科学*, 2015, 35(7): 933–937.
- SUO Anning, CAO Ke, MA Hongwei, et al. Discussion on classification system of coastline [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2015, 35(7): 933–937.
- [39] 李君, 康颖, 尹春英, 等. 青岛-崂山南部海岸形成的控制因素及与构造线方向的几何分类[J]. *海洋湖沼通报*, 2016(3): 55–61.
- LI Jun, KANG Ying, YIN Chunying, et al. Qingdao-Laoshan Formation on the south coast of control factors and classification and the direction of the tectonic line geometry [J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2016(3): 55–61.
- [40] SCHUURMAN F, MARRA W A, KLEINHANS M G. Physics-based modeling of large braided sand-bed rivers: Bar pattern formation, dynamics, and sensitivity [J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2013, 118(4): 2509–2527.
- [41] 张可, 吴胜和, 冯文杰, 等. 砂质辫状河心滩坝的发育演化过程探讨——沉积数值模拟与现代沉积分析启示[J]. *沉积学报*, 2018, 36(1): 81–91.
- ZHANG Ke, WU Shenghe, FENG Wenjie, et al. Discussion on evolution of bar in sandy braided river: Insights from sediment numerical simulation and modern bar [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2018, 36(1): 81–91.
- [42] 雷涛, 任广磊, 李晓慧, 等. 砂质辫状河心滩沉积演化规律与沉积构型特征——基于沉积数值模拟的认识[J]. *石油与天然气地质*, 2023, 44(6): 1595–1608.
- LEI Tao, REN Guanglei, LI Xiaohui, et al. Sedimentary evolution pattern and architectural characteristics of mid-channel bars in sandy braided rivers: Understanding based on sedimentary numerical simulation [J]. *Oil & Gas Geology*, 2023, 44(6): 1595–1608.
- [43] CASTELLE B, BONNETON P, SÉNÉCHAL N, et al. Dynamics of wave-induced currents over an alongshore non-uniform multiple-barred sandy beach on the Aquitanian Coast, France [J]. *Continental Shelf Research*, 2006, 26(1): 113–131.

(编辑 张玉银)