

典型河口坝沉积演化过程与沉积水动力机制

赵俊威¹, 周 健², 邹俭巍³, 孙海航⁴, 郑晓丽¹, 张明晨¹

(1. 长江大学 录井技术与工程研究院, 湖北 荆州 434020; 2. 中国石化 胜利油田分公司 勘探开发研究院, 山东 东营 257000; 3. 中国石油 大庆油田分公司 第一采油厂, 黑龙江 大庆 163000; 4. 中国石油 塔里木油田分公司 油气开发部, 新疆 库尔勒 841000)

摘要:河口坝砂体是三角洲沉积体系的重要油气储层, 受限于露头、现代沉积及地下储层资料维度、尺度及分辨率, 其内部沉积演化过程及构型特征的系统表征一直面临挑战。利用沉积数值模拟技术与现代沉积相结合的方法, 分析了典型河口坝的沉积演化过程, 建立了河口坝内部构型模式, 并深入探讨了发育区的水动力数学模型与机制。研究结果表明: ①典型河口坝的沉积演化过程可划分为垂向加积期、前积期、侧向加积期、稳定期及复合河口坝形成期, 不同演化阶段的河口坝形态特征存在差异, 依次呈现小型长舌状、近菱形、三角状或“V”状、心滩状和长椭圆状等形态。②河口坝沉积演化过程受水动力变化特征控制, 在射流、盆底摩擦力及水体浮力的综合作用下, 形成了不同的加积方式与河口坝平面形态。③水动力条件的差异还导致河口坝内部构型模式的分异, 其内部加积方式可分为垂积式、前积式及侧积式, 单一河口坝不同部位内部构型发育模式具有空间分异性, 中心部位以垂向加积为主, 前端表现为前积特征, 侧翼则呈现侧向披覆及侧向加积特征。本研究为河控三角洲内部河口坝内部构型的精细表征提供了理论依据, 对地下河口坝储层构型解析具有一定指导意义。

关键词: 储层构型; 河口坝; 三角洲; 水动力机制; 沉积数值模拟

中图分类号: TE121.3

文献标识码: A

Exploring the sedimentary evolution processes and hydrodynamic mechanisms of typical mouth bars

ZHAO Junwei¹, ZHOU Jian², ZOU Jianwei³, SUN Haihang⁴, ZHENG Xiaoli¹, ZHANG Mingchen¹

(1. Institute of Mud Logging Technology and Engineering, Yangtze University, Jingzhou, Hubei 434020, China; 2. Exploration and Development Research Institute, Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Dongying, Shandong 257000, China; 3. No. 1 Oil Production Plant, Daqing Oilfield Company, PetroChina, Daqing, Heilongjiang 163000, China; 4. Petroleum Development Division, Tarim Oilfield Company, PetroChina, Korla, Xinjiang 841000, China)

Abstract: Mouth-bar sand bodies serve as significant hydrocarbon reservoirs in the deltaic sedimentary system. However, due to the limitations of the dimensions, scales, and resolutions of data on outcrops, modern deposits, and underground reservoirs, the systematic characterization of both the internal sedimentary evolution processes and the architectural characteristics of the mouth-bar sand bodies remains challenging. By integrating sedimentary numerical simulations and modern sediment observations, we analyze the sedimentary evolution of typical mouth bars, reveal their internal architectural patterns, and thoroughly explore the hydrodynamic mathematical models and mechanisms in their development areas. The results indicate that the sedimentary evolution of typical mouth bars can be divided into five stages: vertical aggradation, progradation, lateral aggradation, stabilization, and the formation of composite mouth bars. These mouth bars exhibit varying morphological characteristics across these evolutionary stages, appearing small elongated tongue-shaped, nearly rhombus, triangular or V-shaped, mid-channel bar-shaped, and long ellipse-shaped sequentially. The sedimentary evolution of mouth bars is governed by hydrodynamic variations. The combined action of jets, basin-floor friction, and water buoyancy, results in the formation of varying aggradational styles and diverse planar morphologies of the existing mouth bars. Additionally, variations in hydrodynamic conditions lead to differentiation in

收稿日期: 2024-08-07; 修回日期: 2025-06-06。

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

基金项目: 国家自然科学基金项目(41902155, 41502126)。

the internal architectural patterns of mouth bars. Accordingly, their internal aggradational styles can be classified into vertical aggradation, progradation, and lateral aggradation. For an individual mouth bar, the developmental model of its internal architecture shows spatial differentiation, featuring vertical aggradation-predominated central part, progradation-dominated front end, and lateral draping and aggradation-prevalent side wings. This study provides a theoretical basis for the fine-scale characterization of the internal architectures of mouth bars in fluvial-dominated deltas while also serving as a guide for analyzing the subsurface architectures of mouth-bar reservoirs.

Key words: reservoir architecture, mouth bar, delta, hydrodynamic mechanism, sedimentary numerical simulation

引用格式:赵俊威,周健,邹俭巍,等. 典型河口坝沉积演化过程与沉积水动力机制[J]. 石油与天然气地质, 2025, 46(5): 1646–1663. DOI: 10. 11743/ogg20250516.

ZHAO Junwei, ZHOU Jian, ZOU Jianwei, et al. Exploring the sedimentary evolution processes and hydrodynamic mechanisms of typical mouth bars[J]. Oil & Gas Geology, 2025, 46(5): 1646–1663. DOI: 10. 11743/ogg20250516.

河口坝是指携带沉积物的河流进入蓄水盆地后,在河流惯性力、蓄水体浮力及盆底摩擦力综合作用下所形成的沉积体。不同的河口沉积环境中起主导因素的作用力存在差异,可发育不同形态特征的河口坝,如舌状、三角状及指状河口坝等^[1-3]。典型河口坝通常呈舌状或三角状,在现代沉积与野外露头中较为常见,广泛发育于曲流河与辫状河三角洲前缘。与指状河口坝相比,典型河口坝的形成主要受控于盆底摩擦力,携带沉积物的河流以湍流状态的平面射流注入蓄水盆地,在底部摩擦力的作用下,河流负载逐渐发生沉积。河口坝为河控三角洲沉积体系的重要沉积单元,可形成较好的油气储集体,是油气开发阶段储层精细表征的重点目标^[4-6],在中国大型含油气盆地及其不同含油层系均广泛分布,前人对河口坝沉积特征和储层内部构型进行了大量研究^[7-15]。张昌民等(2010)探讨了河口坝的形成对分支河道的影响,认为河口坝的发育对初级分支河道造成遮挡,使分支河道分叉,在次级分支河道的河口处发育次级河口坝,最终形成分支河道-河口坝体系^[1]。前人通过野外露头、沉积物理模拟及现代沉积等技术手段,讨论了三角洲沉积体系内河口坝的沉积特征及影响因素^[16-20],分析了河口坝内部构型模式及定量关系,建立了河口坝长度与宽度的定量关系特征,在此基础上对河口坝储层构型进行了精细表征,探讨了河口坝构型分级、单砂体识别、河口坝内部夹层分布模式及构型对剩余油的影响等问题,提出了河口坝间叠置样式及河口坝内部前积式夹层的分布特征,建立了河口坝储层表征方法,有效指导了地下储层解剖^[21-26]。

截至目前,针对河口坝的研究多集中于野外露头、现代沉积及地下储层构型的分析,虽通过不同维度、时间尺度及分辨率等地质信息建立了较多的河口坝内部构型模式,但仍存在局限性,如野外露头剖面可能只反映河口坝储层在某剖面方向的构型变化特征,现代沉积

观测可能为河口坝沉积体在某特定阶段的特征,未能从河口坝形成演化全过程来分析其在三维空间内的构型特征。同时,对于典型河口坝形成的沉积演化过程、沉积水动力变化特征及成因机制缺乏研究,因而难以阐明河口坝内部构型的变化差异、分布模式及形成机制,而基于流体力学的三维水动力场沉积数值模拟可动态表征砂体尺度沉积体的沉积演化过程及沉积水动力特征,有效弥补目前研究手段的不足^[27-32]。本文针对以上问题,对典型河口坝的沉积演化过程进行了模拟,分析了典型河口坝在不同演化阶段的构型特征及所形成水动力条件的变化,探讨了河口坝发育区的水动力数学模型与机制,并将沉积模拟结果与现代沉积卫星影像资料进行了对比性分析,建立了典型河口坝的沉积演化模式。此研究有助于深化三角洲内部河口坝沉积学理论,指导河口坝储层的精细表征及剩余油的有效挖潜。

1 研究方法及条件参数

1.1 沉积数值模拟基本原理

沉积数值模拟是定量表征沉积体的沉积过程、分布模式及内部沉积结构的有效手段。依据模拟结果尺度的不同,可分为沉积盆地与层序尺度、沉积微相与砂体尺度以及沉积事件尺度,不同尺度的模拟可分为沉积体系模拟、沉积微相模拟及微相内部的层理模拟^[33-34]。随着计算机技术及数学模型的发展,沉积数值模拟已由早期的一维、二维模拟发展到三维空间模拟,并涌现出多个沉积模拟模型及软件平台,如Dionisos, Delft3D, Sedsim, Strata和GPM等。

在沉积微相与砂体尺度模拟领域, Delft3D模型具有典型代表性。该模型以Navier-Stokes方程组及物质平衡方程为基础,可有效模拟三维空间内水流事件以

及沉积物搬运、沉积和侵蚀过程,其原理是通过求解 Navier-Stokes 方程组所获得的水动力参数结果,在预设边界条件和初始沉积底形的约束下,定量计算水体以悬浮载荷及床底推移形式存在的沉积物运移与沉降变化^[35]。

在沉积物沉降模型中,Delft3D模型考虑了黏性和非黏性沉积颗粒的搬运与沉积过程。具体而言,将粒径(D_0) $\leq 64 \mu\text{m}$ 的颗粒视为黏性颗粒,以悬浮方式搬运;而 $D_0 > 64 \mu\text{m}$ 的颗粒归为非黏性颗粒,以悬浮及床底推移方式搬运。对于悬浮搬运的沉积物,黏性颗粒的沉降速度采用 Stokes 定律计算,而非黏性颗粒则依据 Van Rijn (1993) 方程,按不同粒度级次($64 \mu\text{m} < D_0 \leq 100 \mu\text{m}$, $100 \mu\text{m} < D_0 \leq 1\,000 \mu\text{m}$, $D_0 > 1\,000 \mu\text{m}$)分别计算其沉降速度。对于床底推移搬运的沉积物,则应用 Van Rijn (1993) 方程中针对推移颗粒的方法进行计算。

在沉积物侵蚀方面,Delft3D 采用 Partheniades Krone 公式(1965)计算侵蚀速率,并根据悬浮沉积物与河床之间的沉积物沉降量和侵蚀量,最终确定河床底形沉积物的变化,进而依据沉积物沉降的差异变化计算床底高度^[35]。

本文基于 Delft3D 模型开展河口坝内部构型的演化模拟分析。在模拟过程中,通过设定合理的初始边界条件及沉积底形,对三维空间内的水动力方程进行求解,并采用逐步迭代方法计算沉积物的搬运、沉积及侵蚀过程。

1.2 模型条件参数

为完整呈现河口坝沉积演化过程的模拟结果,本研究采用 $1.5 \text{ km} \times 1.5 \text{ km}$ 的模拟网格系统。考虑到总网格数量与模拟时长,将每个网格单元尺寸设定为 $25 \text{ m} \times 25 \text{ m}$,使湖盆区域每层平面总网格数量为 3 600 个,垂向划分为 10 层,以确保对河口坝内部沉积演变的精细刻画。为准确模拟河口区的沉积过程,模型西边界设置为封闭边界兼供给边界(代表陆地边界),北、南、东 3 侧边界为开放边界,允许水体自由流动。在模型左侧中部设置了初始供给河道,其长度、宽度和深度分别为 150, 100 和 3 m(图 1)。沉积盆地底部由厚度为 5 m 的非黏性及黏性沉积物组成,其沉积组分与供给河道沉积物输送特征相似。

综合参考现代三角洲水文数据,结合供给河道的实际规模,设定供给河道流量(Q)为 $900 \text{ m}^3/\text{s}$,流速为 1.5 m/s ,模拟过程中供给河道流量保持恒定。参考河口坝较为发育的 Mossy 和 Goose 三角洲现代沉积特征,供给河道沉积物粒径变化范围在 $0.125 \sim 0.400 \text{ mm}$,粒径

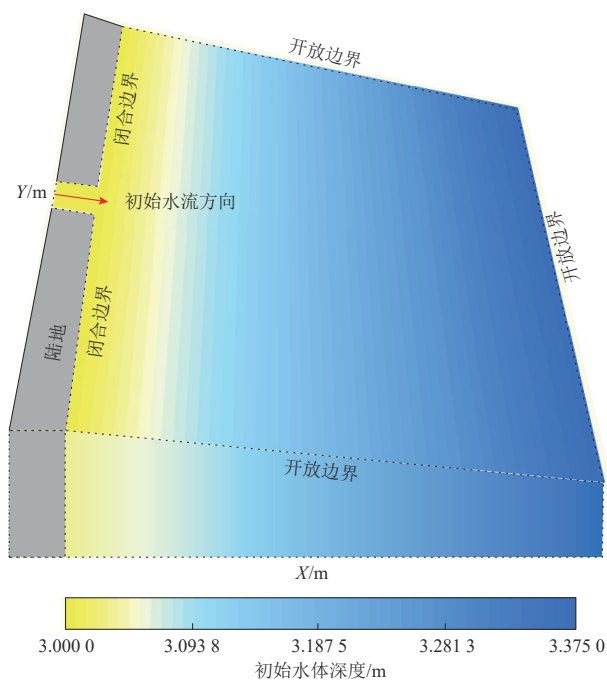


图1 河口坝沉积数值模拟的水深变化及边界分布模型

Fig. 1 Initial water-depth variation and boundary distribution model involved in the sedimentary numerical simulation of mouth bars (X和Y分别代表模型的横坐标和纵坐标。)

中值取 0.250 mm ,沉积物浓度为 3 kg/m^3 ,砂/泥比设定为 10:2(图 2a,b)。模拟过程中涉及的物理性及控制性参数(如砂质与泥质沉积物干容量、沉积与侵蚀临界剪切应力及背景水平涡流黏度等)均借鉴前人的模拟经验参数^[27-32],另外还包含了部分参数如时间步长、侵蚀剪切力和地貌加速因子等(表 1)。本次模拟未考虑波浪、潮汐及海平面变化对河口坝沉积的改造作用。

通过综合对比全球典型河控三角洲的沉积底形坡度发现,河口坝发育较好的三角洲其底形坡度变化范围较大。以距离岸线 16 km 处水深为基准,坡度较缓型三角洲的水深通常为 $2 \sim 5 \text{ m}$,而坡度较陡型可达 $30 \sim 50 \text{ m}$ 。石富伦等(2013)通过物理模拟实验研究了河口坝发育的控制因素,认为底形坡度及水深是影响河口坝形态和保存状况的关键因素^[23],但该研究未能准确描述底形坡度及水深对河口坝内部构型特征的具体影响。为此,本研究进一步讨论了不同坡降条件下河口坝内部沉积演化的差异,选取的坡降分别为 1:4 000 和 1:250。图 1 展示了缓坡条件下水深的变化,下文对模拟结果的解析也以缓坡条件的模拟结果为例进行说明。

1.3 模拟结果解析

通过模拟获取了多类型数据体,如水体深度、沉积厚度、砂/泥沉积分布和水体流速分布等。其中,河口

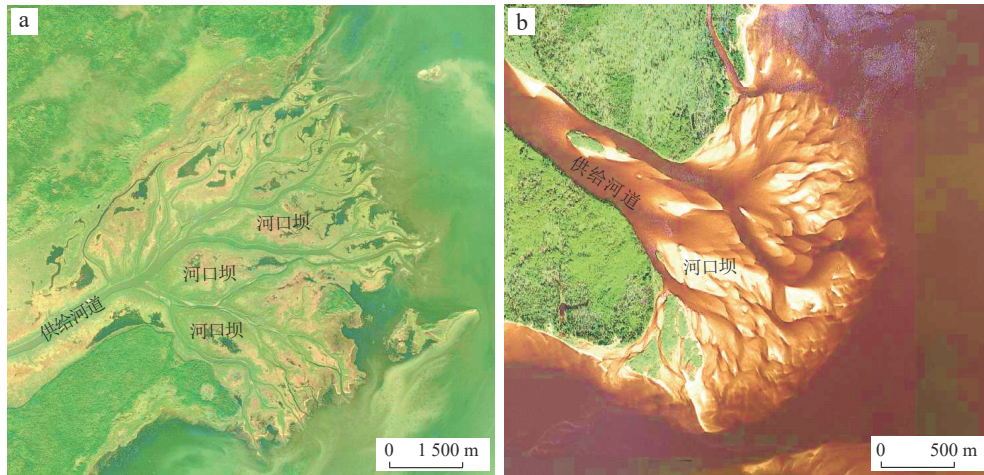


图2 典型现代沉积边界条件参考区

Fig. 2 Analogs representing typical modern sedimentary boundary conditions

a. 加拿大南部 Mossy 三角洲, 粒径中值为 0.125 mm, 砂/泥比为 10:2 ~ 10:1; b. 加拿大东部 Goose 三角洲, 粒径中值为 0.300 ~ 0.400 mm, 砂/泥比为 10:2 ~ 10:1

表1 河口坝沉积数值模拟的关键边界条件

Table 1 Key boundary conditions applied in the sedimentary evolution simulation of mouth bars

边界参数	参数值
开放边界水位	0 m
沉积物厚度变化记录下限	0.1 m
单次模拟时间步长	0.2 min
地貌加速因子	96
地貌形态更新前的时间间隔	720 min
粗糙度	$45 \text{ m}^{1/2} \text{ s}^{-1}$
背景水平涡流黏度和扩散率	$0.0001 \text{ m}^2/\text{s}$
砂质沉积物干容量	$1650 \text{ kg}/\text{m}^3$
泥质沉积物干容量	$500 \text{ kg}/\text{m}^3$
黏性沉积物侵蚀临界剪切应力	$1 \text{ N}/\text{m}^2$
黏性沉积物沉积临界剪切应力	$1000 \text{ N}/\text{m}^2$

坝沉积厚度的变化可反映演化过程中沉积作用过程, 水体流速的矢量分布可反映河口坝沉积演化过程中水动力条件变化。通过解析沉积厚度和水体流速等重点参数, 提取河口坝关键横剖面及纵剖面数据信息, 讨论了典型河口坝沉积演化特征及水动力成因机制。

2 典型河口坝沉积演化

河口坝的形成受河流惯性力、蓄水体浮力及盆底摩擦力的共同控制, 其中典型河口坝的发育主要受盆底摩擦力主导。当携带沉积物的河道水流进入静止的蓄水体内时, 水流特征由限制流向无限制流迅速变化, 表现为扩散的射流特征, 河道中心的射流中心线区及其周缘区域的流速急剧衰减, 在底部摩擦力的作用下,

河流搬运的沉积物发生卸载并最终形成河口坝。基于沉积数值模拟与现代沉积体系分析, 将典型河口坝的发育过程分为以下5个阶段: 垂向加积期、前积期、侧向加积期、稳定期和复合河口坝发育期。不同沉积演化阶段对应的河口坝内部构型特征存在显著差异。

2.1 河口坝垂向加积期

河口坝最初以小型长舌状形态出现于河口向盆地方向(图3a), 并持续发生垂向加积。由于注入蓄水体的河流惯性力急剧减弱, 盆底摩擦力相对增强, 导致在某一临界位置处, 盆底摩擦力大于河流惯性力, 使携带沉积物的水流在距河口一定距离处发生沉积(图3b, c)。在射流中心线的位置, 首先发育小型舌状坝, 其坝前、坝体侧翼及坝后的坡度较平缓。在舌状坝形成后, 射流中心线周围的水体流速并未发生显著变化, 此时沉积物不断发生垂向加积作用(图3d, e), 坝体宽度及长度不断增加, 坝体前、后及侧翼坡降增加, 可达1:500 ~ 1:200。

随着坝顶部位持续加积, 河口坝上方水体深度不断减小。在河道供给条件不变的情况下, 坝体上方水流速度不断增加, 增强了射流水体的负载能力, 此时存在一个沉积与剥蚀的临界点: 超过此临界点时, 坝顶不发生沉积作用, 水体携带沉积物从坝顶冲刷路过并搬运至坝体前端部位沉积。而在达到沉积临界点之前, 河口坝的沉积总体表现为典型的垂向加积作用。

模拟实验结果表明, 在初始时刻, 河口坝雏形出现于距离河口100 m处。当射流进入蓄水体后速度迅速减缓, 流速由初始的1.5 m/s降至0.5 ~ 1.0 m/s, 射流扩散范围约为400 m(宽度) × 1000 m(长度)。此时河口

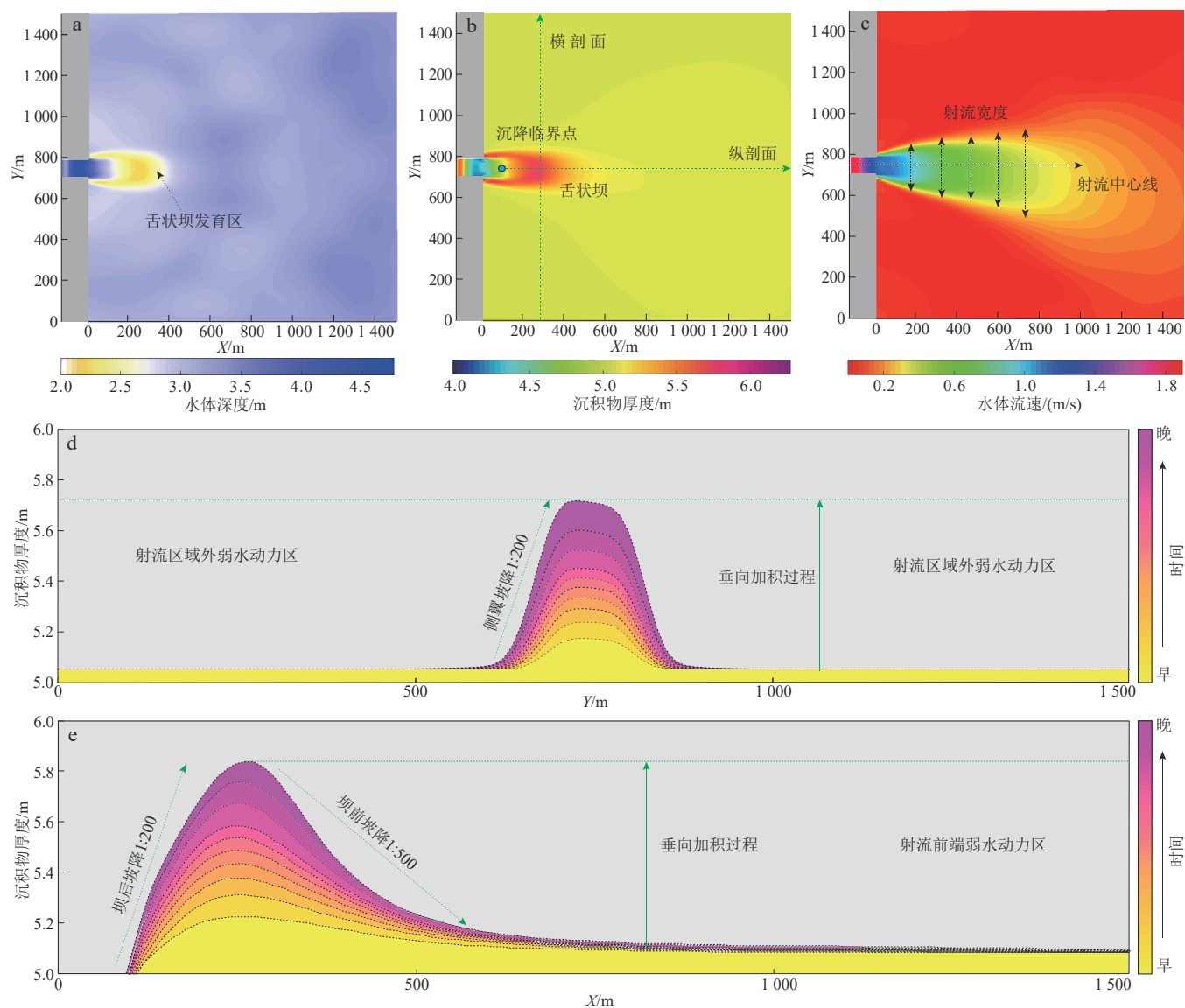


图3 沉积数值模拟中河口坝垂向加积期沉积演化特征及水动力定量分布

Fig. 3 Sedimentary evolution characteristics and quantitative distribution of hydrodynamics for mouth bars at the vertical aggradation stage in sedimentary numerical simulation

a. 水体深度平面分布; b. 沉积物厚度平面分布; c. 水体流速平面分布; d. 沉积演化横剖面; e. 沉积演化纵剖面

坝的初始形态尺寸为500 m(长度)×200 m(宽度),沉积物厚度较薄。随着垂向加积作用的持续进行,河口坝长度和宽度在此阶段后期趋于稳定,但厚度显著增加。在此过程中,坝体上方水流速度逐渐增加,坝体厚度达到0.7~0.9 m,同时坝体上方水体深度减至2.0~2.5 m。最终,河口坝发育为典型的小型长舌状形态。

2.2 河口坝向前进积期

在初始舌状坝形成之后,由于射流与坝体间的相互作用,河流惯性力与盆底摩擦力的相对作用力大小发生变化,使初始舌状坝的沉积方式由垂向加积转变为向前进积(图4)。具体为:小型长舌状河口坝形成

之后,由于坝顶水体变浅(图4a),水体阻碍作用减弱,河流惯性力相对较大,导致射流在坝顶流速变快,水体负载能力提升,此时坝顶水流速度产生的惯性力足以克服床底产生的摩擦阻力,导致坝顶区域发生沉积过路或侵蚀作用(图4b,c)。随着坝体前端水深增加,水体压力梯度发生变化,射流在坝体前端水流速度减小,沉积物在坝体前端发生卸载,持续的沉积作用使该阶段的坝体呈现典型的前积特征(图4d)。Atchafalaya三角洲在1984—1987年的观测数据很好地验证了这一现象,显示河口坝向盆地地方快速进积(图5a—c)。

需要指出,本次模拟是基于稳定持续的水流条件。在实际河口坝形成过程中,河流流量处于不稳定状态,

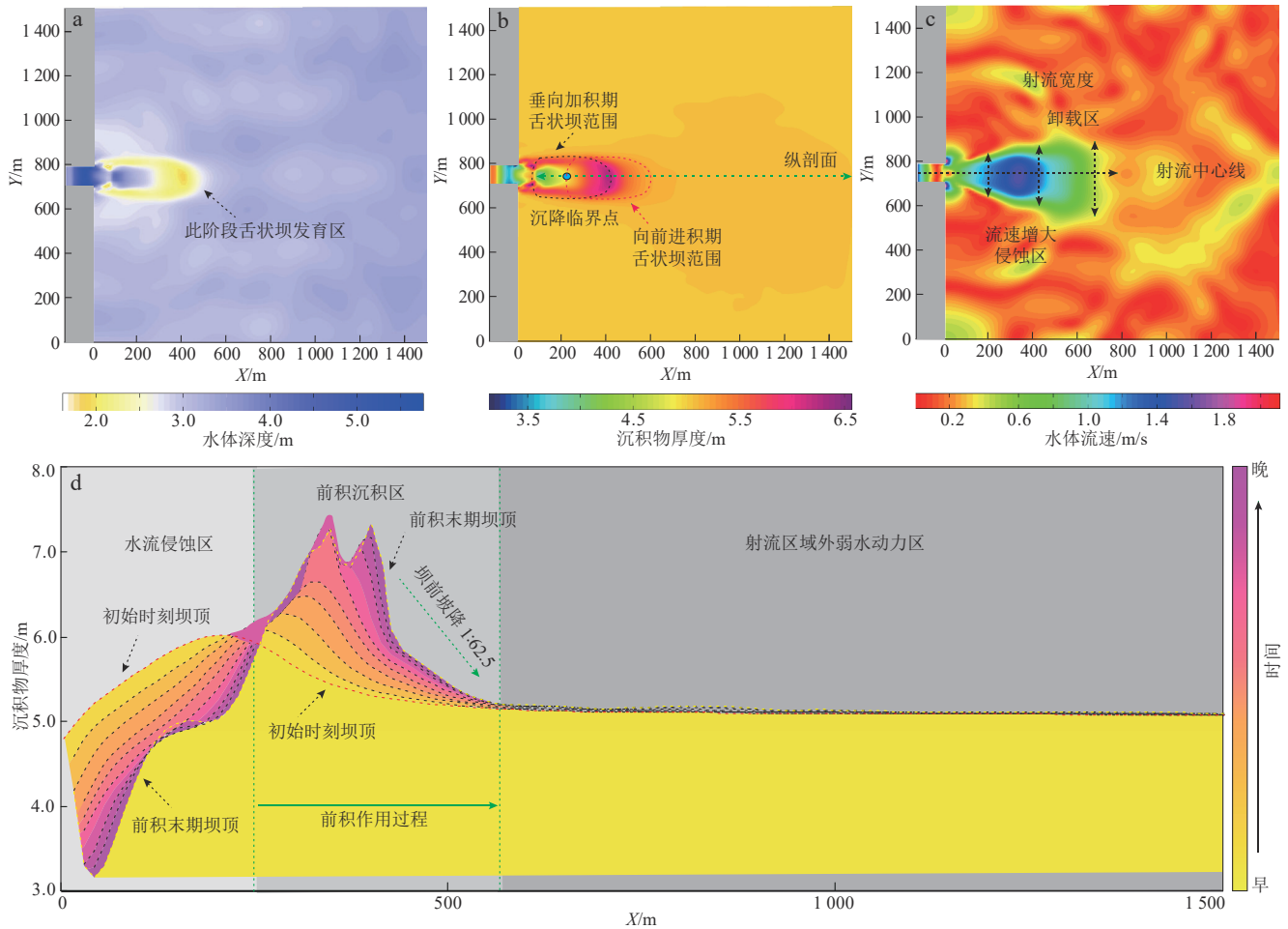


图4 沉积数值模拟中河口坝向前进积期沉积演化特征及水动力定量分布

Fig. 4 Sedimentary evolution characteristics and quantitative distribution of hydrodynamics for mouth bars at the progradation stage in sedimentary numerical simulation

a. 水体深度平面分布; b. 沉积物厚度平面分布; c. 水体流速平面分布; d. 沉积演化纵剖面

在中-高流量期,河口坝表现为上述典型沉积过程;而在低流量期,坝顶水深减小或暴露于水面,形成较多泥质或粉砂质沉积物,披覆于河口坝表面,并随着河口坝加积方式的不同呈现差异分布。在此阶段,舌状坝规模发生显著变化:长度持续增加而宽度基本稳定,前端坡降增加,坡降可达到1:62.5。

当实验模拟步长达到35后,通过对步长20—35的沉积剖面对比分析发现,该阶段河口坝呈现典型的前积式沉积特征,坝顶沉积速率减缓,以前积作用为主(图4d)。射流在坝顶的流速约为1.5 m/s,到达河口坝前端后迅速降至0.6 m/s,导致沉积物发生沉降;随着前积作用的持续进行,河口坝长度及宽度分别达到700 m和200 m,坝体厚度分布在1.5~2.5 m。

2.3 河口坝侧向加积期

在河口坝发生垂向加积与向前进积作用后,其规模持续扩大。受河口坝垂向规模影响,当坝顶水体深

度足够小时,河口坝上方水体流速产生的惯性力不足以克服床底摩擦阻力,迫使水流在河口坝的两侧形成一定的流体压力差。此时坝顶水体流速降低,部分水流绕过坝体顶部,进入河口坝两侧的侧面流动通道,河口坝停止向前进积,携带沉积物的水流进入侧向通道,表现为水流发生明显分叉,在侧向通道中沉积物以一定侧积倾角披覆于河口坝表面,发生披覆侧积作用(图6a—c),使河口坝在规模上不断加宽,坝体形态呈近菱形状。同时,在水流分叉后的一定时间内会形成新的射流及河口坝雏形(图6d—f),而射流是以平行于河道中心线的初始方向进入蓄水体的,在先、后两个期次河口坝的限制下,当水流方向发生偏转时,水流呈典型的侧向搬运侵蚀及沉积作用,使侧翼的分流河道呈一定的低曲率特征,水流携带沉积物在第一期河口坝的侧部及尾部发生进一步的侧积作用(图6g),使河口坝侧翼及尾端增宽、加长,此阶段的侧积作用使河口坝形态发生明显变化,呈现典型的底部缺失的三角状或

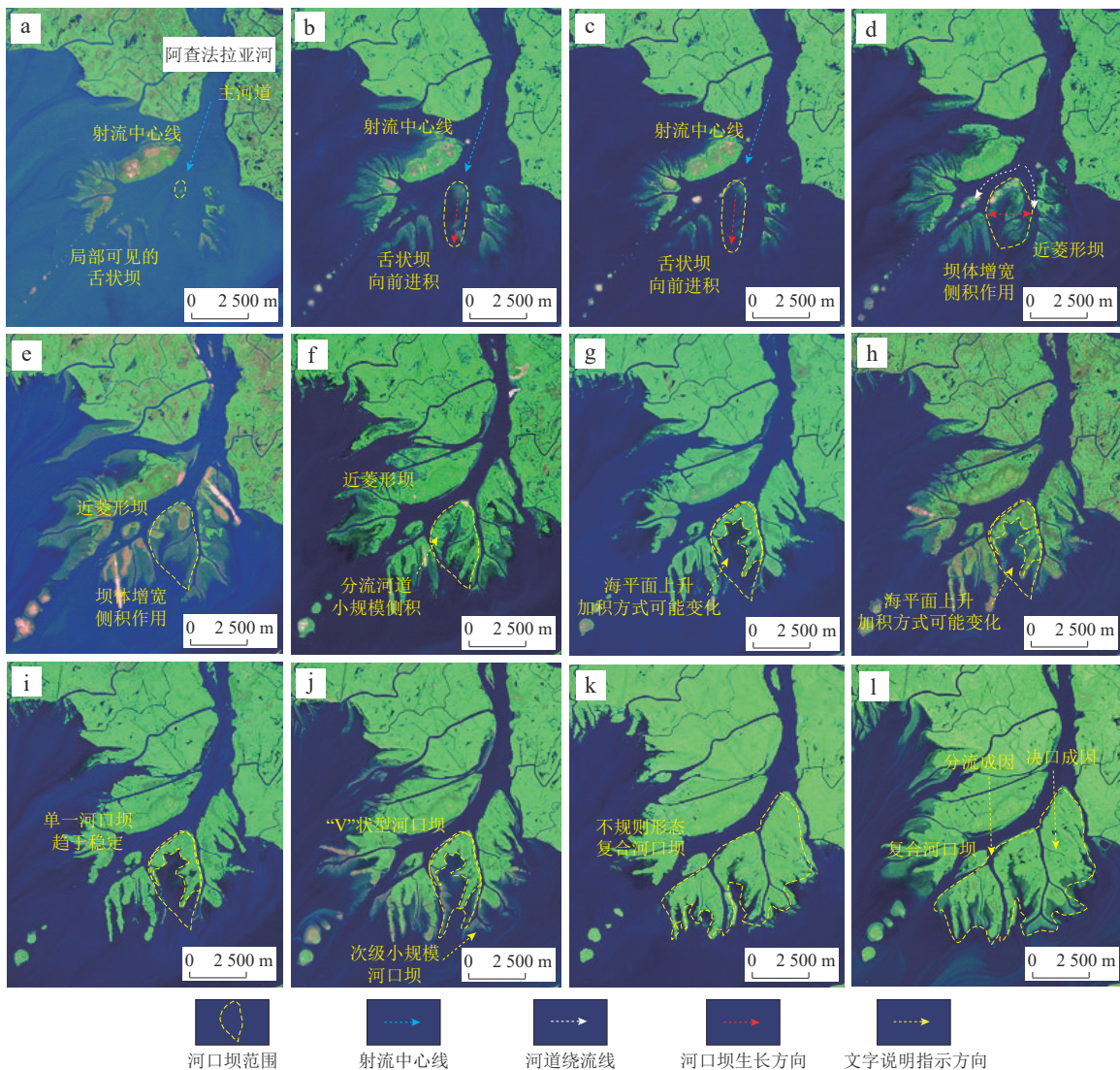


图5 美国墨西哥湾 Atchafalaya 三角洲河口坝沉积演化过程(修改自文献[21,36])

Fig. 5 Evolutionary process of the mouth bars in the Atchafalaya delta in the Gulf of Mexico, USA (modified after references [21, 36])

a. 1984年,发育局部可见的舌状坝;b. 1986年,可见舌状坝相前进;c. 1987年,可见舌状坝向前进;d. 1989年,近菱形状坝,坝体明显增宽;e. 1994年,坝体明显增宽;f. 1999年,分流河道发生小规模侧积;g. 2004年,海平面上升导致加积方式可能发生变化;h. 2006年,海平面上升导致加积方式可能发生变化;i. 2007年,单一河口坝趋于稳定;j. 2011年,“V”状河口坝;k. 2015年,不规则形态的复合河口坝;l. 2016年,复合河口坝内部分流成因及决口成因的分流河道

“V”状,该形态特征在现代沉积环境中具有广泛的对应实例(图5d—f)。

研究表明,河口坝的平面形态演化遵循从长条形、近菱形到“V”状的序列规律,这一过程本质上受控于其沉积动力学机制。具体而言,坝体的沉积过程取决于水流量、湖平面变化与坝体自身的综合作用,特别是在侧向加积阶段,当水流量显著增大或湖平面升高时(图5g—j),坝体沉积过程可由侧向加积转变为垂向加积或前积,从而形成由这3种不同方式共同构成的复合结构。

在实验模拟步长达到为600后,河口坝上方水体深度大幅度减小,导致射流在接近河口坝区域发生明

显方向偏转。此时,坝顶水体流动近乎停滞,流速降至 $0 \sim 0.4 \text{ m/s}$ 的低值范围,而坝体侧翼则维持较强的水动力条件,流速分布在 $1.4 \sim 1.8 \text{ m/s}$ 。随着侧翼沉积作用的持续进行,河口坝进入典型的横向扩展阶段,其宽度增至约600 m,厚度分布在 $2 \sim 3 \text{ m}$ 。射流在分叉后,主流线呈现低曲率特征,其流动模式与曲流河的水流轨迹相似。当水流抵达河口坝尾端时,形成新的次级射流,流速降低至 $0.5 \sim 1.0 \text{ m/s}$ 。在此阶段,河口坝的平面形态逐渐向典型的“V”状转变。

2.4 单一河口坝趋于稳定期

在主河口形成的三角状或“V”状河口坝发育成熟

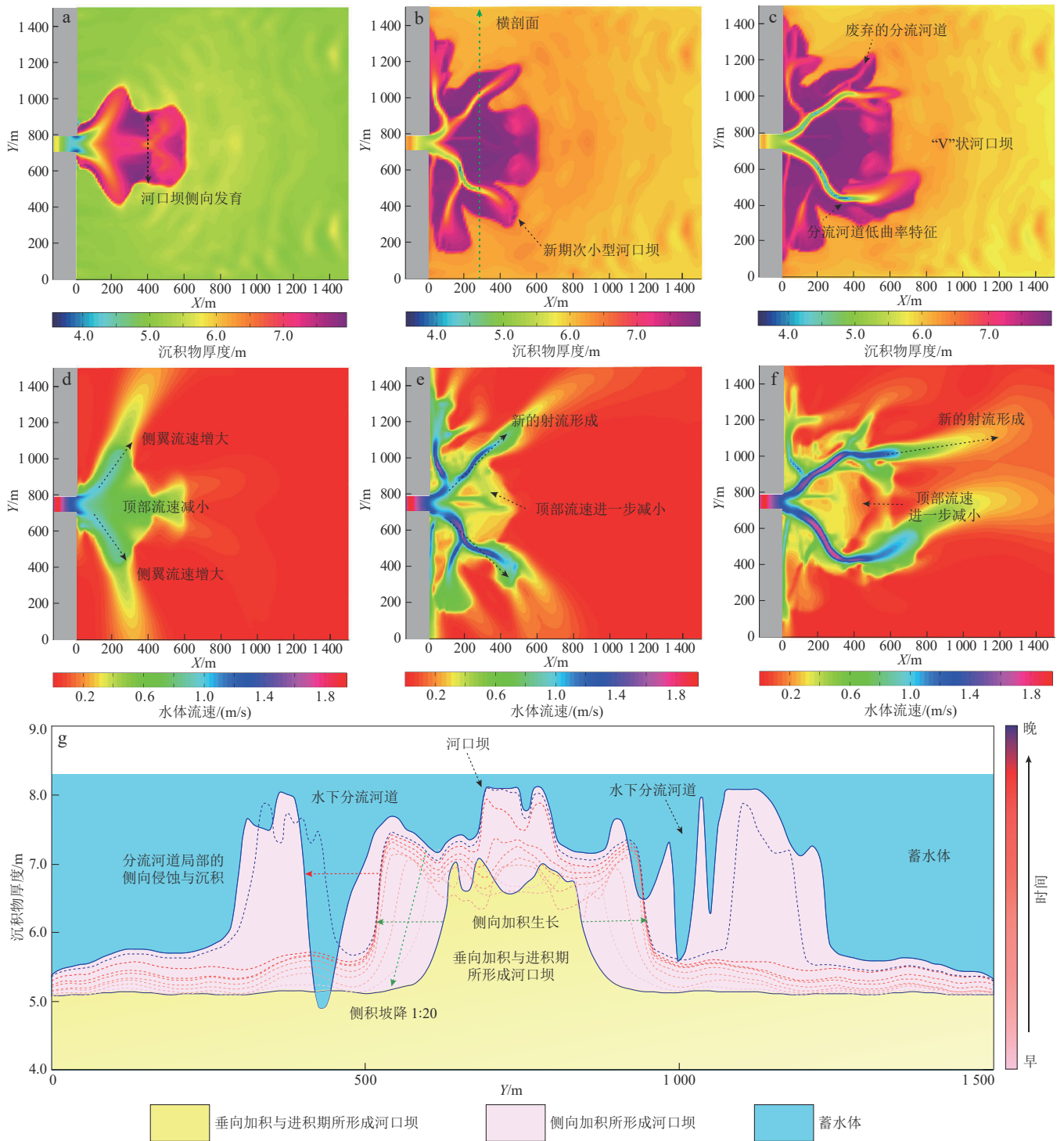


图6 沉积数值模拟中河口坝侧向加积期沉积演化特征及水动力定量分布

Fig. 6 Sedimentary evolution characteristics and quantitative distribution of hydrodynamics for mouth bars at the lateral aggradation stage in sedimentary numerical simulation

a—c. 沉积厚度平面分布,模拟步长分别为250,500和600;d—f. 水体流速平面分布,模拟步长分别为250,500和600;g. 沉积演化横剖面

之后,其形态趋于稳定,沉积速率显著降低。受两侧河口坝沉积体的控制,形成了相对稳定的分流河道体系。这些分流河道会对主河口坝进行局部侵蚀或沉积改造。受水流方向变化影响,侧翼的分流河道在初期呈低弯曲特征;随着分流河道的持续演化,其曲率逐渐增

大。分流河道的侧向侵蚀作用会在主河口坝边缘形成小规模的侧积体(图7a—c),其发育强度取决于床底坡度、沉积物粒径及组分特征,但影响范围有限,仅能对河口坝进行局部改造(图8a—e)。

与此同时,河口坝两侧的分流河道携带沉积物在河

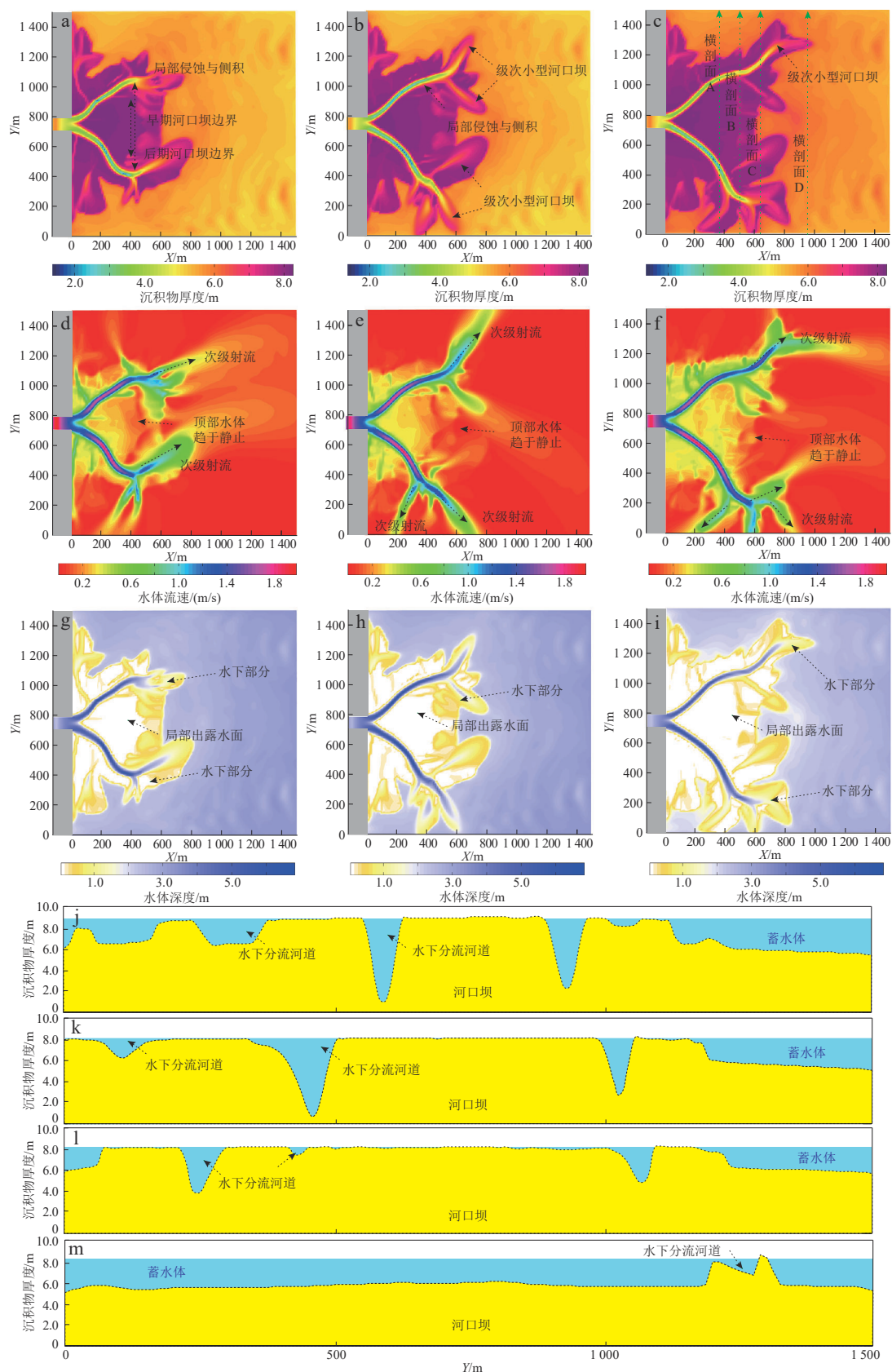


图7 沉积数值模拟中河口坝趋于稳定期沉积演化特征及水动力定量分布

Fig. 7 Sedimentary evolution characteristics and quantitative distribution of hydrodynamics for mouth bars at the stabilization stage in sedimentary numerical simulation

a—c. 沉积厚度平面分布,模拟步长分别为650,750和900;d—f. 水流流速平面分布,模拟步长分别为650,750和900;g—i. 水体深度平面分布,模拟步长分别为650,750和900;j—m. 沉积演化横剖面,分别为图7c中所示剖面A—剖面D

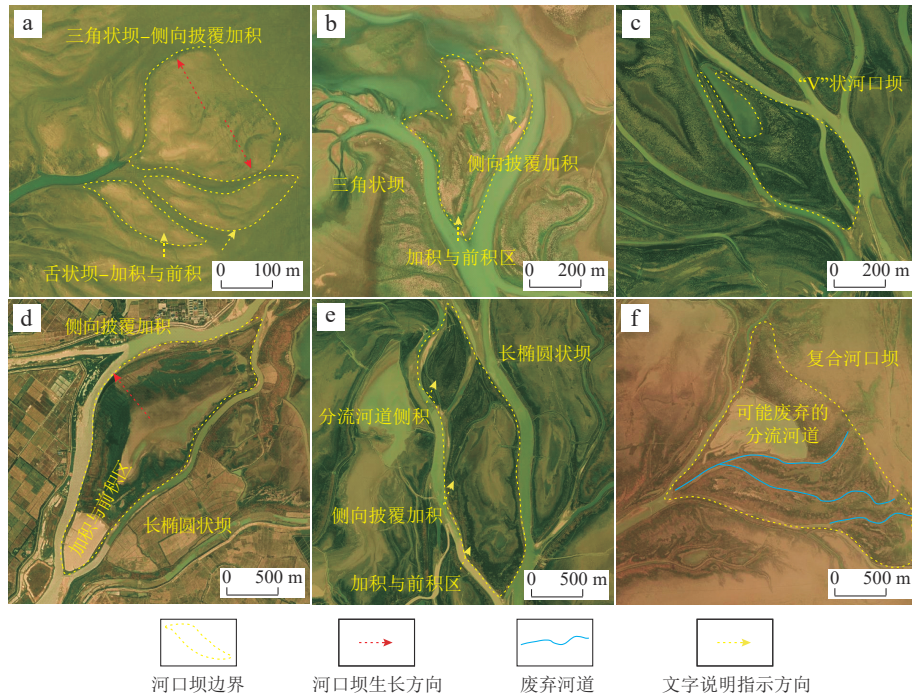


图8 江西省北部鄱阳湖河口坝现代沉积

Fig. 8 Modern mouth bars deposited in Poyang Lake, northern Jiangxi Province

a. 三角状河口坝与舌状河口坝; b. 三角状河口坝; c. “V”状河口坝; d. 长椭圆状河口坝; e. 长椭圆状河口坝; f. 复合河口坝

道末端形成新的射流(图7d—f),由于河道分流作用,小型分流河道规模及能量相应减弱。随着向盆地方向水体深度逐渐增加,河流惯性力降低而水体阻力增强,导致次级河口坝的规模可能减小。受沉积基准面升高影响,主河口坝局部可出露水面(图7g—i)。在小型分流河道的规模及河流惯性力足够小时,其河口坝沉积动力因素可能发生变化,可由河流惯性力-床底摩擦力为主导演变为以浮力-床底摩擦力为主。在此情况下,沉积物在小型分流河道附近扩散沉积,形成一定范围的河口坝,小型分流河道镶嵌于河口坝内部(图7j—m)。

在实验模拟步长达到为900后,河口坝上方水体深度在0~1 m,部分出露水面,整体沉积趋于稳定。在此期间(600—900模拟步长),河口坝侧翼的分流河道曲率持续增大,侧向迁移距离约100 m。迁移过程中,分流河道对主河口坝边缘产生小规模侧向侵蚀与沉积作用,导致局部新增约100 m的侧积体宽度。整体而言,河口坝的改造面积占总面积的5%~20%。类似现象在鄱阳湖三角洲沉积体系中较为常见(图8a—e)。

2.5 大型复合河口坝发育期

随着多个次级河口坝的形成,主、次河口坝共同构成了大面积分布的河口坝砂体复合体系(图9)。这些分流河道的成因机制可能存在差异,主要包括分流型与决口型两种。决口型分流河道通常发育在主分流河

道的弯曲段,在高流量条件下形成决口通道。此类河道规模较小,在后期易发生废弃,河道内部常被泥质或细粒沉积物充填(图9b)。而分流型分流河道在后期受水流量变化及分流网络系统流量分配的影响,小规模的分流河道也可逐渐废弃,内部充填细粒沉积物。

当多期分流河道相继废弃后,平面上便形成了由多个河口坝组合而成的复合河口坝体系。这类复合体规模较大,其内部常保留有废弃的分流河道遗迹。现代沉积实例显示,单一河口坝侧翼分流河道的废弃是形成复合河口坝的典型过程(图5k,图5l,图8f)。复合河口坝的平面形态多样,包括心滩状、长椭圆状和三角形等多种类型。

随着复合河口坝的发育,三角洲前缘的可容纳空间逐渐减小,促使分流河道继续向盆地方向延伸,形成新一期次的复合河口坝沉积。与此同时,早期的复合河口坝逐渐出露水面,演变为三角洲平原,并持续接受后期分流河道的改造(图9c)。

在实验模拟步长达到1 100后,在模拟区域内形成了2~3级分流河道,分流型分流河道规模大,决口型分流河道规模小(图9b)。在主分流河道末端,可发育若干小型分流型分支河道,这些小型分支河道可逐渐废弃,其内部水流速度接近零值。多个河口坝在此阶段形成了相对整齐的复合河口坝体系,面积约1.2 km²,长度及宽度分别可达1 200 m和1 400 m。

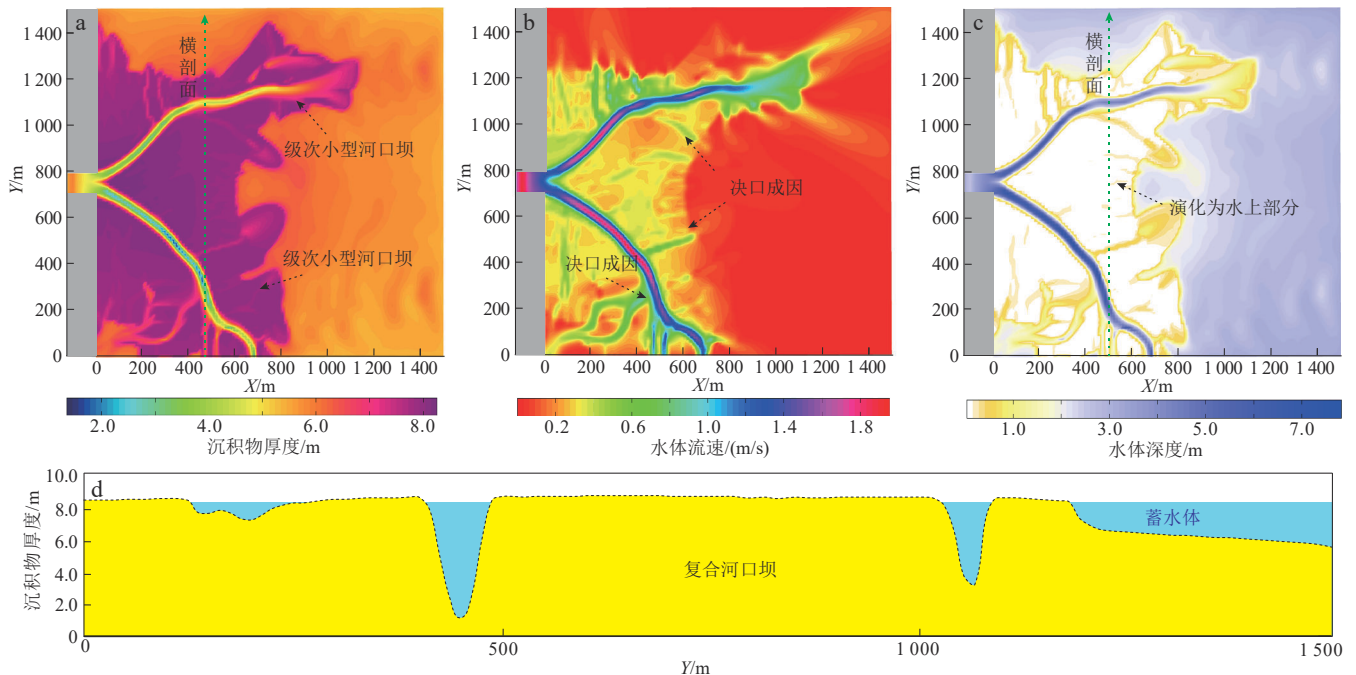


图9 沉积数值模拟中复合河口坝沉积演化特征及水动力定量分布

Fig. 9 Sedimentary evolution characteristics and quantitative distribution of hydrodynamics for composite mouth bars in sedimentary numerical simulation

a. 沉积物厚度平面分布; b. 水体流速平面分布; c. 水体深度平面分布; d. 沉积演化横剖面

3 河口坝构型特征

河口坝的演化过程分析表明,在波浪及潮汐作用较弱的沉积环境中,典型河口坝可呈现多种形态特征,包括小型长舌状、近菱形状、三角状、“V”状、不规则的心滩状及长椭圆形状等。这些不同形态反映了河口坝在不同发育阶段受水动力作用的差异,在现代沉积环境中均可观测到。由于形态的多样性,难以用单一的长/宽比参数来定量表征其几何特征。值得注意的是,河口区水动力条件的差异不仅控制着坝体外部形态,也深刻影响着其内部构型特征。虽然前人通过地下储层和野外露头研究对河口坝内部构型已有一定认识,认为其内部夹层主要以前积作用为主,但由于地下储层的多解性和露头剖面的局限性,目前对河口坝内部构型的系统认识仍存在不足。

从沉积过程来看,小型长舌状河口坝代表发育初期,此时坝体完全处于水下环境,在现代沉积中较难直接观测。该阶段河口坝具有典型的底平顶凸剖面形态。早期以垂向加积作用为主,随着物源供给或水动力条件的变化,垂向上可见明显的粒度变化。在低能环境下,垂向加积层之间可发育粉砂质或泥质夹层,这些夹层呈近水平分布(图10a,f,g)。随着发育进入中

后期,受上部水动力条件改变的影响,沉积方式逐渐转变为以前积作用为主(图10b,h),前积层间可能发育细粒夹层,其产状与坝顶面倾角相近。由此可见,在河口坝发育初期,在可形成坝内夹层的沉积条件下,夹层分布模式呈现从垂向加积式向前积式的演化趋势。

近菱形状、三角状或“V”状河口坝代表发育中期,是在小型长舌状坝基础上通过侧翼和尾端的侧积作用发展而来。这一过程可能包括侧向披覆沉积(图10c,i)和侧向加积沉积(图10d,j)。此时坝体可能部分出露水面,但仍保持底平顶凸的剖面特征。在侧积过程中可能形成细粒夹层,夹层倾向转变为近垂直于射流中心线方向。在此阶段,河口坝内部可同时发育三种夹层类型:垂积式、前积式和侧积式,导致同一坝体内夹层产状存在显著差异(图10e,k),因此在不同的剖面方向和河口坝不同部位,夹层的表征应遵从其构型特征,此认识对地下河口坝储层的解剖具有一定指导意义。

复合河口坝形成于发育后期,形态多呈不规则心滩状、长椭圆状或其他组合形态,由若干废弃分流河道及河口坝构成。这类坝体规模较大,具有“河在坝上”的典型特征,即废弃分流河道镶嵌于复合河口坝内部。关于分流河道与河口坝的叠置关系已有大量研究^[37],在此不作讨论。

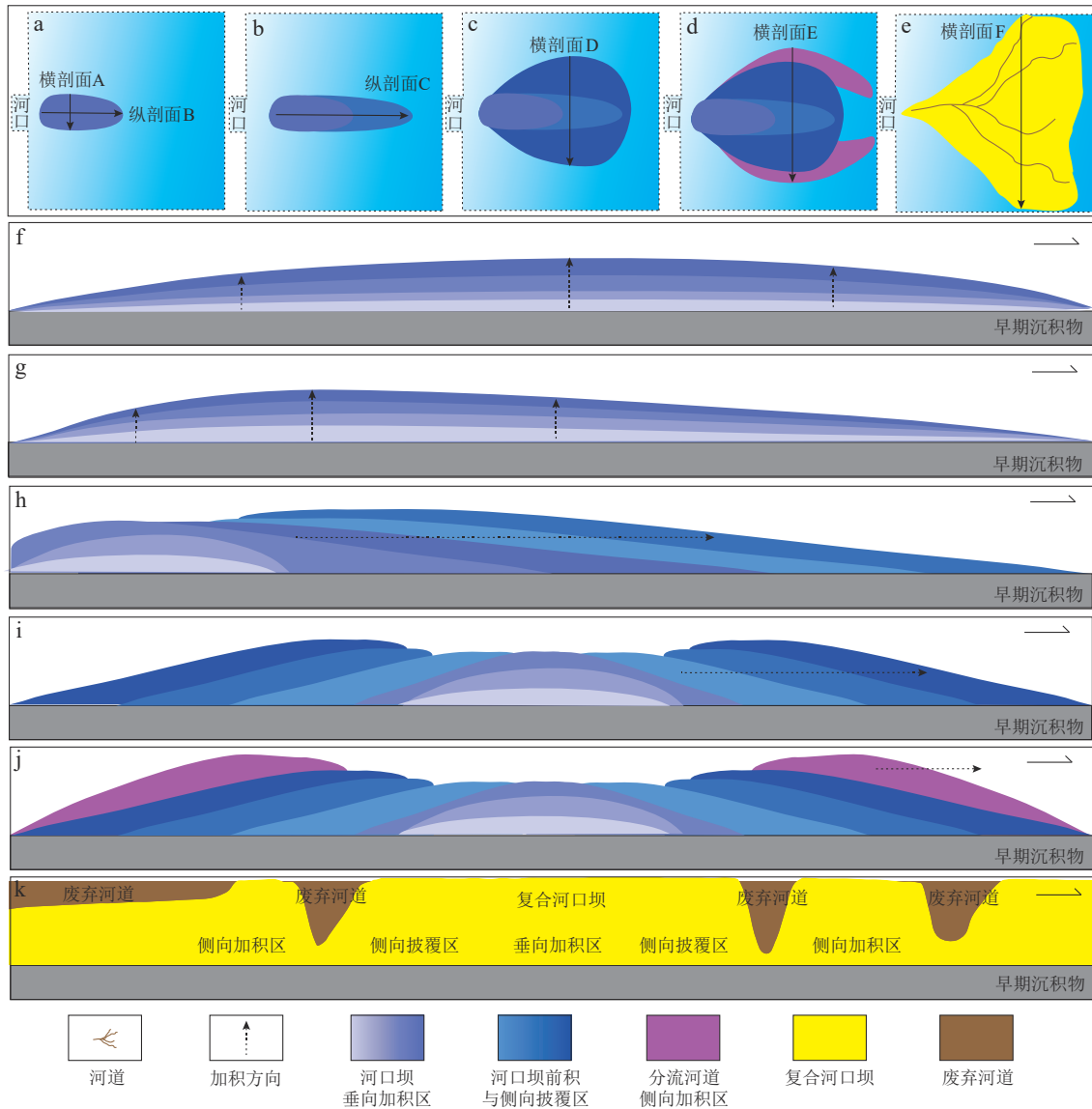


图10 沉积数值模拟中典型河口坝构型剖面特征示意图

Fig. 10 Schematic diagram showing the profile characteristics of typical mouth-bar architectures in sedimentary numerical simulation

a. 舌状坝时期, 加积阶段; b. 舌状坝长度增加, 前积阶段; c. 三角状坝宽度增加, 侧向披覆加积阶段; d. “V”状坝宽度增加, 侧向加积阶段; e. 复合坝阶段; f. 舌状坝时期, 加积阶段, 横剖面 A; g. 舌状坝时期, 加积阶段, 纵剖面 B; h. 舌状坝长度增加, 前积阶段, 纵剖面 C; i. 三角状坝, 侧向披覆加积阶段, 横剖面 D; j. “V”状坝, 侧向加积阶段, 横剖面 E; k. 复合坝阶段, 横剖面 F

4 河口坝沉积水动力特征及成因机制

4.1 沉积水动力特征

Bates (1953) 基于湍流射流理论对河口区水动力进行研究, 提出当携带沉积物的河流进入蓄水体时, 可形成平面喷流或轴状喷流。当河水与蓄水体密度相近时, 二者在三维空间内发生混合, 使河流水体流速减缓, 沉积物在河口处发生堆积^[38]。这一理论较好地解释了河流和蓄水体交界处的水动力变化^[39] (图 11a),

但未能系统阐述河口坝形成过程中水动力特征的动态演变及其相互作用机制。本研究基于沉积数值模拟实验, 定量表征水动力矢量场, 对河口坝沉积过程中的水动力变化特征进行分析和总结。

对初始时刻河道射流中心线水流速度分析可知, 当河流在进入蓄水体后以一定速度向前运动, 呈现明显的扩散射流特征。射流分布长度和宽度分别约 1 000 m 和 400 m, 但流速逐渐减慢, 与距河口的距离呈显著的负相关关系。在此阶段, 水动力作用主导了沉积物的垂向加积过程 (图 11b)。随着河口坝沉积体的持续发育, 坝顶水深逐渐减小, 导致该区域射流流速相对增

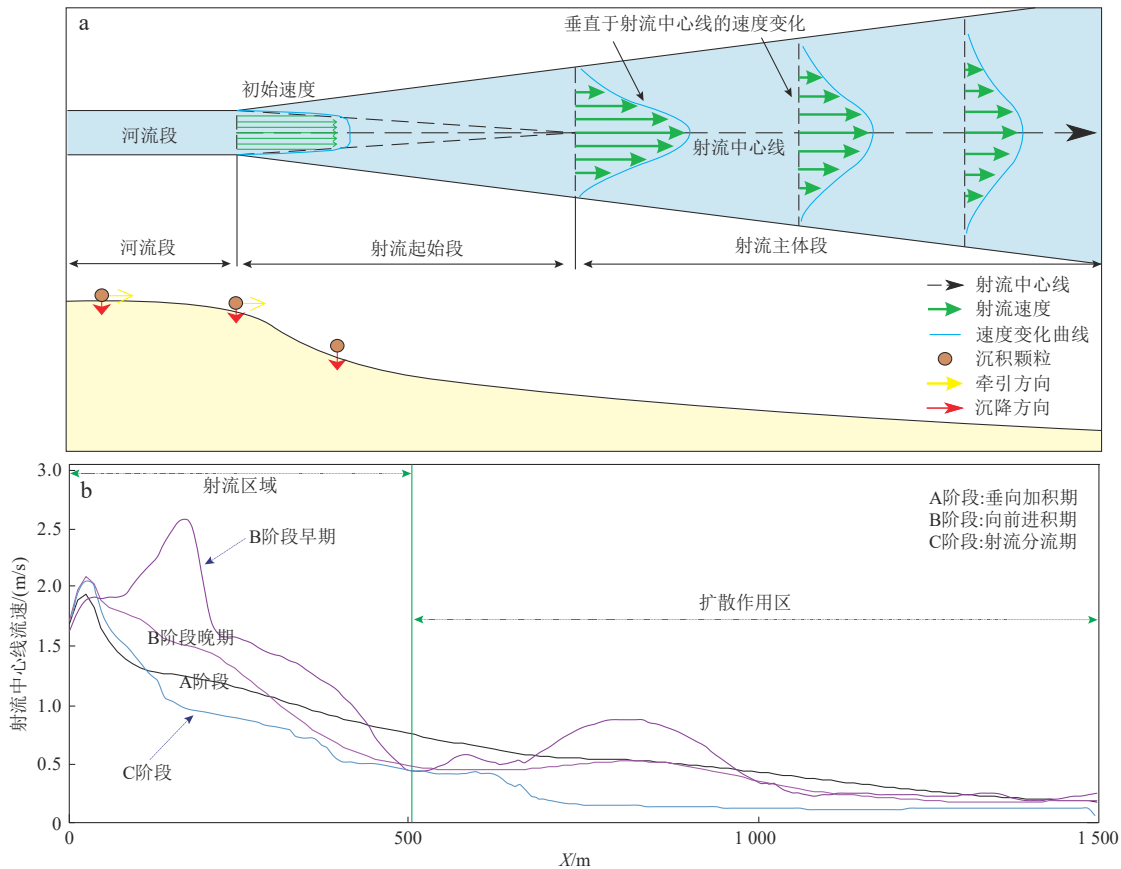


图 11 射流中心线速度变化与沉积数值模拟中演化方式

Fig. 11 Changes in flow rate along the jet centerline and corresponding sedimentary numerical simulation evolution patterns

a. 河口动力场及水动力运动模式; b. 实验模拟不同阶段射流中心线速度变化特征

大,流速剖面显示速度衰减率明显降低。水流以较高流速抵达河口坝前端,使得射流在河道中心线方向运动的距离增加,射流分布范围扩大,水动力条件变化后沉积物发生前积作用(图 11b)。当坝顶水体深度减小到一定程度后,水流在河口坝两侧形成流体压差,坝顶水流速度大幅度降低,射流在河口坝两侧发生分流,射流方向相对于原始中心线发生一定角度的偏转(图 11b),在偏转射流和沉积物限制的影响下,河口坝主体及尾端发生侧积作用。分流河道形成后,水流在河道内形成环流特征,在环流作用下分流河道局部发生迁移演化,造成河口坝局部的侵蚀及沉积。因此,射流流速及流向的动态变化是控制河口坝沉积过程的关键因素,射流流速总体呈现指数型衰减规律,但随着河口坝的发育,坝体顶部流速衰减速率逐渐减缓,促使沉积模式从垂向加积转变为前积作用;后期射流分流及河道环流的形成,则导致河口坝不同部位发育差异化的侧积作用。

4.2 河口坝发育影响因素

底形坡度、物源供给、流量大小以及蓄水体深度等

因素均可显著影响河口坝的沉积特征^[40]。物理模拟实验研究表明,物源供给与流量大小直接影响河口坝的发育规模,特别是在黏性组分含量低、物源供给稳定且流量持续保持中-高水平的条件下,更易形成规模较大的河口坝^[23]。然而,这些研究尚未能对河口坝内部结构的演化进行定量分析。本次通过对比实验,在排除黏性组分影响的条件下,发现盆底坡度差异是决定河口坝内部沉积结构特征的关键因素。

目前,学术界对于盆底坡度的缓坡与陡坡分类尚未形成统一的标准。为探讨坡度变化对河口坝沉积过程的影响,本文对比分析了坡降分别为 1:4 000(缓坡条件)和 1:250(坡度增大条件)两种情况下河口坝的沉积过程(图 12)。实验结果表明,在坡度较缓的沉积盆地中,河口坝的垂向加积与向前进积作用持续时间相近(图 12a),河口坝相应部位表现为垂向加积与向前进积共同发育,垂向加积使河口坝垂向厚度增大,向前进积使河口坝向前不断生长。初始阶段,河口坝的长度和宽度分别为 500 m 和 200 m,经历前积作用后,长度增加 200 m,最终达到 700 m,而宽度基本保持不

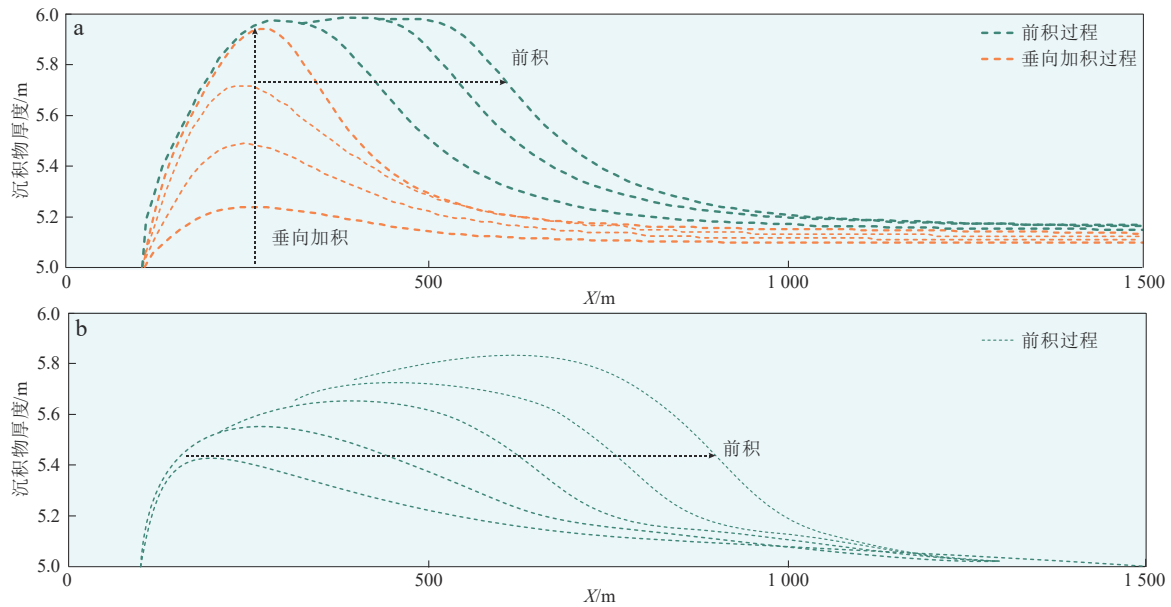


图12 沉积数值模拟中不同坡度条件下河口坝内部沉积过程对比

Fig. 12 Comparison of sedimentary processes inside mouth bars under varying slopes in sedimentary numerical simulation

a. 缓坡条件,坡降为1:4 000;b. 坡度增大条件,坡降为1:250

变。相比之下,在坡度较大的沉积盆地中,河口坝的垂向加积作用时间较短,前积作用占据主导地位(图12b)。其沉积过程主要表现为前缘快速延伸,最终使河口坝长度增至1 000 m,宽度仍维持在200 m。这种构型差异主要受控于沉积水动力条件的变化:与缓坡条件相比,坡度增大时,尽管流速仍随距离河口远近呈负相关关系,但其衰减速率减缓,相同位置的水流速度更高,使得射流能够携带更多沉积物持续向前推进,且流速变化未呈现明显的阶段性特征。此外,不同坡度条件下,河口坝的侧积作用差异较小。因此,河口坝的最终形态是垂向加积、前积和侧积共同作用的结果,但在不同坡度条件下,垂向加积与前积作用的相对贡献存在显著差异。

5 典型河口坝沉积演化与构型模式

河口坝的形成受沉积条件变化影响显著,不同环境背景下其沉积动力学特征及演化过程存在明显差异。例如,在高黏性组分主导的沉积环境中,往往形成数量较少但相对稳定的分流河道及指状河口坝。本文基于数值模拟与现代沉积观测,系统总结了典型河口坝的沉积演化模式及其构型特征(图13)。研究表明,在河口区复杂的水动力环境中,水流受惯性力、蓄水体浮力及底床摩擦力的综合作用,其流动特征由受限流逐渐转变为非受限流,呈现典型的扩散射流模式。在此过程中,以河道为中心的射流核心区及其周

边流速显著衰减,这种射流-坝体相互作用主导了河口坝的完整演化序列,包括垂向加积期、前积期、侧向加积期、稳定期及复合发育期等阶段。不同水动力条件下,河口坝可呈现小型长舌状、近菱形状、三角状或“V”状、心滩状及长椭圆状等多种形态特征。这些形态差异本质上是水动力作用方式的外在表现:在垂向加积过程中,在距离河口一定位置处盆底摩擦力大于河流惯性力,使沉积物发生沉降,形成了小型长舌状的河口坝,且坝体沉积后上方水体流速并未发生显著变化,沉积物发生垂向加积作用(图13a);在向前加积发育之前,由于坝顶水体变浅,使坝顶河流惯性力大于盆底摩擦力,坝顶水体流速变快,沉积物向前进积,形成长度增加的小型长舌状坝体(图13b);随着河口坝定量规模逐渐增大,坝体上方水体流速的惯性力不足以克服床底摩擦阻力,使水流绕过坝体顶部,水流分叉进入侧向通道,以一定侧积倾角披覆于河口坝表面,发生侧积作用,此时河口坝形态呈三角状或“V”状(图13c);在后期的分流河道逐渐废弃后,形成了心滩状、长椭圆形状或不规则形状等多形态的复合坝体(图13d)。

河口坝内部不同部位的构型模式存在显著区别:与射流中心线平行的河口坝中心部位呈垂向加积特征,河口坝前端呈前积特征,河口坝侧翼表现为类似于曲流河的侧向加积特征,这与河口坝形成时期的水流惯性力、蓄水体浮力及盆底摩擦力相互作用造成的水动力变化密切相关。复合河口坝由废弃的小型分流河

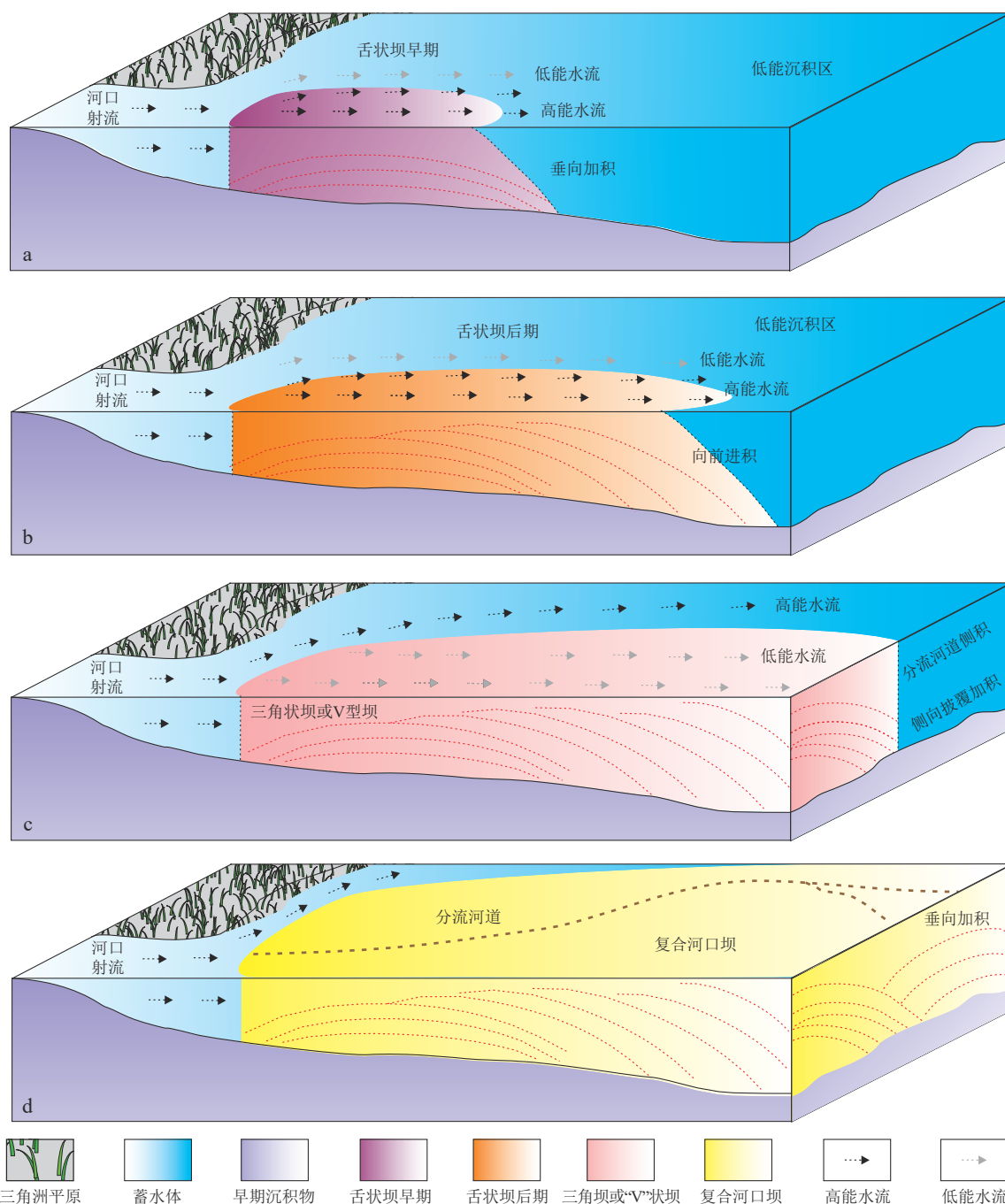


图13 基于沉积数值模拟及现代沉积的典型河口坝沉积演化与构型模式

Fig. 13 Schematics showing the sedimentary evolution and architectural patterns of typical mouth bars based on sedimentary numerical simulation and modern deposits

a. 垂向加积; b. 前积; c. 侧向披覆加积、分流河道侧积; d. 复合坝内部多种加积方式分区发育

道演变而来,其内部呈现分流河道与坝体的垂向叠置关系,在平面上由多个单一河口坝组合构成,且各单一坝体内部构型亦可存在明显差异。上述构型模式代表了完整的河口坝演化序列,但在实际地质记录中,受构造背景、物源供给及气候条件等多因素控制,通常仅能观察到某一发育阶段的河口坝沉积体,完整序列在现代沉积或地下储层中较为罕见。

6 结论

1) 基于多源信息综合分析,系统探讨了典型河口坝的沉积演化过程,其发育阶段包括垂向加积、前积、侧向加积、稳定期及复合河口坝形成期,不同时期形态特征存在差异,表现为小型长舌状、近菱形状、三角状

或“V”状、心滩状和长椭圆状等形态变化特征。单一河口坝内部是垂向加积、进积及侧积多种沉积过程共同作用的结果,垂向加积与向前进积发育程度受盆底坡度的差异控制。

2) 河口坝沉积演化过程受水动力变化特征控制,在不同水动力条件下形成不同的加积方式与河口坝平面形态。水流进入蓄水体后呈扩散射流,其流速呈负指数特征衰减,在盆底摩擦力作用下沉积物发生垂向加积作用。随着河口坝持续沉积,河口坝上部水深减小导致射流流速相对增大,射流在河道中心线方向运动的距离增加,射流携带沉积物运动到河口坝前端发生前积。当坝顶水深减小到一定程度,在河口坝两侧存在流体压差,坝体顶部水流速度大幅度降低,射流发生分流以及一定角度的偏转,发生侧积作用。

3) 受沉积水动力变化影响,河口坝内部构型模式存在显著区别。河口坝内部加积方式分为垂积式、前积式及侧积式,单一河口坝的不同部位构型发育模式存在差异,河口坝中心部位呈垂向加积特征,河口坝前端呈前积特征,河口坝侧翼呈类似于曲流河的侧向加积特征,在低能期形成的细粒夹层呈现与砂质沉积类似的特征,复合河口坝内部呈废弃的分流河道-坝体的叠置关系。典型河口坝沉积演化分析对地下河口坝储层构型表征具有一定借鉴意义。

参 考 文 献

- [1] 张昌民,尹太举,朱永进,等. 浅水三角洲沉积模式[J]. 沉积学报, 2010, 28(5): 933-944.
ZHANG Changmin, YIN Taiju, ZHU Yongjin, et al. Shallow-water deltas and models[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2010, 28(5): 933-944.
- [2] 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.
- [3] 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 Shenghe, XU Zhenhua, LIU Zhao. Depositional architecture of fluvial-dominated shoal water delta [J]. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 2019, 21(2): 202-215.
- [4] 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 Xiaomin, LIU Yuan, FANG Qing, 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.
- [5] 刘宗堡,李雪,郑荣华,等. 浅水三角洲前缘亚相储层沉积特征及沉积模式——以大庆长垣萨北油田北二区萨葡高油层为例[J]. 岩性油气藏, 2022, 34(1): 1-13.
LIU Zongbao, LI Xue, ZHENG Ronghua, et al. Sedimentary characteristics and models of shallow water delta front subfacies reservoirs: A case study of Sapugao oil layer in north- II block of Sabei oilfield, Daqing placanticline [J]. Lithologic Reservoirs, 2022, 34(1): 1-13.
- [6] 李志鹏,林承焰,董波,等. 河控三角洲水下分流河道砂体内部建筑结构模式[J]. 石油学报, 2012, 33(1): 101-105.
LI Zhipeng, LIN Chengyan, DONG Bo, et al. An internal structure model of subaqueous distributary channel sands of the fluvial-dominated delta[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(1): 101-105.
- [7] 王旭影,姜在兴,岳大力,等. 河控三角洲河口坝储层内部隔夹层分布样式研究[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2017, 39(2): 9-17.
WANG Xuying, JIANG Zaixing, YUE Dali, et al. Patterns of barrier-interlayers in mouth bar of fluvial dominated delta reservoirs [J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2017, 39(2): 9-17.
- [8] 张友,侯加根,曹彦清,等. 基于构型单元的储层质量分布模式——以胜坨油田二区沙二段8砂组厚层河口坝砂体为例[J]. 石油与天然气地质, 2015, 36(5): 862-872.
ZHANG You, HOU Jiagen, CAO Yanqing, et al. Distribution patterns of reservoir quality based on configuration unit of mouth bar sandbody: A case study from the 8th sand group of the 2nd member of the Shahejie Formation in Shenger Block of Shengtuo Oilfield, East China [J]. Oil & Gas Geology, 2015, 36(5): 862-872.
- [9] 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 Fan, KONG Qingyuan, ZHANG Xuecai, 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.
- [10] 范璎宁,李胜利,梁星如,等. 浅水湖泊河口坝型三角洲前缘沉积特征与模式——以文安斜坡西5井区沙河街组三段为例[J]. 东北石油大学学报, 2017, 41(4): 43-52, 98.
FAN Yingning, LI Shengli, LIANG Xingru, et al. Sedimentary characteristics and pattern of mouth-bar delta front in the shallow lacustrine: A case of the 3rd member of Shahejie formation in Well X5 area in Wen'an slope of Baxian [J]. Journal of Northeast Petroleum University, 2017, 41(4): 43-52, 98.
- [11] 印森林,陈恭洋,戴春明,等. 河口坝内部储层构型及剩余油分布特征——以大港油田枣南断块长轴缓坡辫状河三角洲为例[J]. 石油与天然气地质, 2015, 36(4): 630-639.
YIN Senlin, CHEN Gongyang, DAI Chunming, et al. Reservoir

- architecture and remaining oil distribution in mouth bar—A case study on the braided delta of long-axis gentle slope in Zaonan fault block of Dagang Oilfield[J]. *Oil & Gas Geology*, 2015, 36(4): 630–639.
- [12] 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 Chenglong, WANG Yanzhong, YANG Huaiyu, 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.
- [13] 武毅, 李蔓, 崔洁. 河口坝厚层砂体内隔夹层对剩余油的控制作用[J]. *长江大学学报(自然科学版)*, 2011, 8(3): 58–60, 11, 10.
- WU Yi, LI Man, CUI Jie. Effect of interbeds within the thick debouch bar sandbody on remaining oil distribution[J]. *Journal of Yangtze University (Natural Science Edition)*, 2011, 8(3): 58–60, 11, 10.
- [14] 国景星, 张勇. 梁11断块沙河街组二段河口坝砂岩体夹层特征[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2010, 34(5): 7–11.
- GUO Jingxing, ZHANG Yong. Interlayer characteristics of estuary dam reservoir of the 2nd member of Shahejie Formation in L11 fault block[J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2010, 34(5): 7–11.
- [15] 辛治国. 河控三角洲河口坝构型分析[J]. *地质论评*, 2008, 54(4): 527–531, 581.
- XIN Zhiguo. Architecture analyses of debouch bar of fluvial dominated Delta[J]. *Geological Review*, 2008, 54(4): 527–531, 581.
- [16] LEONARDI N, CANESTRELLI A, SUN Tao, et al. Effect of tides on mouth bar morphology and hydrodynamics[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2013, 118(9): 4169–4183.
- [17] NARDIN W, FAGHERAZZI S. The effect of wind waves on the development of river mouth bars [J]. *Geophysical Research Letters*, 2012, 39(12): L12607.
- [18] NARDIN W, MARIOTTI G, EDMONDS D A, et al. Growth of river mouth bars in sheltered bays in the presence of frontal waves [J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2013, 118(2): 872–886.
- [19] EDMONDS D A, SLINGERLAND R L. Mechanics of river mouth bar formation: Implications for the morphodynamics of delta distributary networks[J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2007, 112(F2): F02034.
- [20] ESPOSITO C R, GEORGIU I Y, KOLKER A S. Hydrodynamic and geomorphic controls on mouth bar evolution[J]. *Geophysical Research Letters*, 2013, 40(8): 1540–1545.
- [21] 张阳, 邱隆伟, 杨保良, 等. 河控三角洲河口坝沉积特征及其形成过程中受水位变化的影响[J]. *天然气地球科学*, 2016, 27(5): 809–819.
- ZHANG Yang, QIU Longwei, YANG Baoliang, et al. Research on sedimentary characteristics of river dominated delta mouth bar and influences affected by water level fluctuations during the formation[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2016, 27(5): 809–819.
- [22] 李少华, 胡晓玲, 王军, 等. 单一河口坝砂体规模的定量表征[J]. *岩性油气藏*, 2015, 27(5): 1–5.
- LI Shaohua, HU Xiaoling, WANG Jun, et al. Quantitative characterization of single mouth bar [J]. *Lithologic Reservoirs*, 2015, 27(5): 1–5.
- [23] 朱金起, 杨朝强, 杨燕, 等. 海上稀疏井网油田储层连通性研究——以北部湾盆地涠西南凹陷A油田涸三段为例[J]. *石油实验地质*, 2025, 47(3): 680–692.
- ZHU Jinqi, YANG Zhaoqiang, YANG Yan, et al. Reservoir connectivity of offshore oilfields with a sparse well pattern: A case study of the third member of Weizhou Formation of oilfield A in Weixinan Sag, Beibuwan Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2025, 47(3): 680–692.
- [24] 李想, 丁雅洁, 李俊飞, 等. 前陆盆地系统中隆后盆地沉积特征——以准噶尔盆地腹部侏罗系三工河组为例[J]. *石油实验地质*, 2024, 46(6): 1253–1264.
- LI Xiang, DING Yajie, LI Junfei, et al. Sedimentary characteristics of post-uplift basins in foreland basin system: A case study of Jurassic Sangonghe Formation in hinterland of Junggar Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2024, 46(6): 1253–1264.
- [25] 张春生, 刘忠保, 施冬, 等. 三角洲分流河道及河口坝形成过程的物理模拟[J]. *地学前缘*, 2000, 7(3): 168–176.
- ZHANG Chunsheng, LIU Zhongbao, SHI Dong, et al. Physical simulation of formation process in distributary channels and debouch bars in delta[J]. *Earth Science Frontiers*, 2000, 7(3): 168–176.
- [26] 王俊辉, 姜在兴, 张元福, 等. 三角洲沉积的物理模拟[J]. *石油与天然气地质*, 2013, 34(6): 758–764.
- WANG Junhui, JIANG Zaixing, ZHANG Yuanfu, et al. Physical simulation of deltaic deposits[J]. *Oil & Gas Geology*, 2013(6): 758–764.
- [27] 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.
- [28] 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.
- [29] 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.
- [30] EDMONDS D A, SLINGERLAND R L. Significant effect of sediment cohesion on delta morphology [J]. *Nature Geoscience*, 2010, 3(2): 105–109.
- [31] 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.
- 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.
- [32] 冯文杰, 吴胜和, 张可, 等. 曲流河浅水三角洲沉积过程与沉积模式探讨——沉积过程数值模拟与现代沉积分析的启示[J]. *地质学报*, 2017, 91(9): 2047–2064.
- FENG Wenjie, WU Shenghe, ZHANG Ke, et al. Depositional process and sedimentary model of meandering-river shallow delta: Insights from numerical simulation and modern deposition [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2017, 91(9): 2047–2064.
- [33] 林承焰, 陈柄屹, 任丽华, 等. 沉积数值模拟研究现状及实例[J]. *地质学报*, 2023, 97(8): 2756–2773.
- LIN Chengyan, CHEN Bingyi, REN Lihua, et al. A review of depositional numerical simulation and a case study [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2023, 97(8): 2756–2773.
- [34] 杜威, 纪友亮, 张艺楼, 等. 湖泊缓坡带细粒河控三角洲沉积演化 and 形态特征——沉积正演数值模拟和现代沉积实例的启示[J]. *石油学报*, 2021, 42(1): 33–44.
- DU Wei, JI Youliang, ZHANG Yilou, et al. Depositional evolution and geometrical features of lacustrine fine-grained river-dominated deltas at the gentle slope zone: Insights from sedimentary forward numerical modeling and modern case analyses [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2021, 42(1): 33–44.
- [35] CALDWELL R L, EDMONDS D A. Delft3D-flow: Simulation of multi-dimensional hydrodynamic flows and transport phenomena, including sediments-user manual [J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2014, 119: 961–982.
- [36] NASA. World of change: Growing deltas in Atchafalaya Bay [EB/OL]. [网络访问日期缺失]. http://earthobservatory.nasa.gov/Features/WorldOfChange/wax_lake.php.
- [37] 段冬平, 侯加根, 刘钰铭, 等. 河控三角洲前缘沉积体系定量研究——以鄱阳湖三角洲为例[J]. *沉积学报*, 2014, 32(2): 270–277.
- DUAN Dongping, HOU Jiagen, LIU Yuming, et al. Quantitative research of fluvial-dominated delta front sedimentary system: A case study of Poyang Lake delta [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2014, 32(2): 270–277.
- [38] BATES C C. Rational theory of delta formation [J]. *AAPG Bulletin*, 1953, 37(9): 2119–2162.
- [39] 齐亚林, 赵彦德, 邵晓州, 等. 河控三角洲生长的动力和沉积模式[J]. *沉积学报*, 2021, 39(2): 374–382.
- QI Yalin, ZHAO Yande, SHAO Xiaozhou, et al. Dynamic and sedimentary models of river-dominated delta growth [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2021, 39(2): 374–382.
- [40] 楼章华, 兰翔, 卢庆梅, 等. 地形、气候与湖面波动对浅水三角洲沉积环境的控制作用——以松辽盆地北部东区葡萄花油层为例[J]. *地质学报*, 1999, 73(1): 83–92.
- LOU Zhanguhua, LAN Xiang, LU Qingmei, et al. Controls of the topography, climate and lake level fluctuation on the depositional environment of a shallow-water delta——A case study of the Cretaceous Putaohua reservoir in the northern part of Songliao Basin [J]. *Acta Geologica Sinica*, 1999, 73(1): 83–92.

(编辑 张玉银)