

浅水三角洲沉积物理模拟与数值模拟的对比研究

李恬恬¹, 胡光明¹, 徐佑德², 张亚金³, 王军⁴, 薛辉⁵, 刘先录¹,
张庭瑀¹, 周玉钦¹

1.长江大学地球科学学院, 武汉 430100

2.胜利油田勘探开发研究院, 山东东营 257061

3.大庆油田勘探开发研究院, 黑龙江大庆 163712

4.长庆油田第四采油厂, 银川 750000

5.长庆油田勘探开发研究院, 西安 710021

摘要 【目的】沉积物理模拟与数值模拟的融合是沉积模拟技术发展的必然趋势, 笔者以浅水三角洲为例, 开展沉积物理模拟和数值模拟的对比研究, 探索二者一体化中存在的问题。【方法】选取泥沙比、岸线迁移速度(湖平面下降速度)、入口流量三个影响因素, 分别采用沉积物理模拟与数值模拟方法对浅水三角洲进行模拟, 并对两种模拟中沉积体长宽比、面积、前缘粗糙度进行对比分析。【结果与讨论】(1)泥沙比、岸线迁移速度(湖平面下降速度)和入口流量对浅水三角洲的长宽比、面积和前缘粗糙度的变化都有明显的影响;(2)从宏观形态上看, 物理模拟与数值模拟结果具有一致性, 且数值模拟显示 $1\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$ 的河口流量是浅水三角洲形态从方格状变为叶状的参考阈值;(3)在浅水三角洲形成的具体过程中, 物理模拟与数值模拟有所不同, 物理模拟显示浅水三角洲有两种发育机制, 其一是分流河道分流与扇面片流交替所致的朵体与前缘交替生长, 其二是河口不断改道所致的朵体交替生长, 而在数值模拟中, 浅水三角洲的成长过程始终伴随着决口导致旧分流河道的废弃、新分流河道和河口砂坝(朵体)的快速形成, 朵体主要表现为指状, 鲜见扇形朵体。这一研究对探索沉积物理模拟与沉积数值模拟的一体化具有参考意义。

关键词 沉积; 物理模拟; 数值模拟; 浅水三角洲; 泥沙比; 岸线迁移; 入口流量; 前缘粗糙度

第一作者简介 李恬恬, 女, 1998年出生, 硕士研究生, 应用沉积学, E-mail: 1972325927@qq.com

通信作者 胡光明, 男, 教授, 沉积储层、层序地层学和沉积模拟, E-mail: hugm@yangtzeu.edu.cn

中图分类号 文献标志码 A

0 引言

根据露头、岩心、测井和地震资料研究沉积体的展布规律和形成机理, 是一种基于沉积结果进行反推的反演方法, 而沉积模拟则提供了一种基于沉积过程的正演方法来研究这一问题, 它包括沉积物理模拟和沉积数值模拟。沉积物理模拟是指在实验室环境下, 通过控制物理边界条件, 直观地再现沉积体的发育和演化过程。早期的沉积物理模拟实验依赖于玻璃水槽(flume), 研究沉积构造^[1-2]、流动状态^[3]、速度—粒径—水深关系^[4]、河流形态与分类^[5-6], 后来与能源勘探相关的冲积扇、三角洲、重力流、细粒沉积以及“源—汇”体系等受到重视,

收稿日期: 2024-04-01; 收修改稿日期: 2024-07-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(41472097) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No. 41472097]

以盆地内沉积体模拟为目的的各种大型沉积模拟装置应运而生,如美国明尼苏达大学 Jurassic Tank、荷兰乌特列支大学的 Eurotank、长江大学 DPS (Depositional Processes Simulator) 实验室等。实验装置从规模较小的 flume 演变为大型的 tank,研究视角也从二维升级到三维,配备各种技术手段(3D 激光扫描仪、水下摄像机、高清运动相机、流速仪、浓度计等),可以完整地再现碎屑物的侵蚀、搬运和沉积过程,可以根据需要切出不同方向的剖面进行观测,并结合检测数据分析各种沉积现象,可为沉积体预测、构型分析、水文特征等提供经验参数,但是沉积物理模拟实验受到时间和空间的制约,且大型沉积物理模拟实验的经济、人力和时间成本也是相当惊人的。

沉积数值模拟指的是用数学方法描述和归纳在形成某种沉积体系过程中各因素的相互作用关系,由此建立其确定的数学模型,然后求解此模型^[7-8]。沉积数值模拟起源于 20 世纪 60 年代 Sloss 等提出的沉积概念模型^[9],80 年代末,斯坦福大学研发了 SEDSIM 软件^[10],标志着沉积数值模拟从层序地层模拟走向颗粒的沉积过程模拟^[11],随后又出现了 Sedflux^[12]、Dionisos^[13]、Delft3D^[14]等三维数值模拟软件,目前专门针对某一沉积环境和沉积相类型开发沉积数值模拟软件日渐成为一种趋势^[11]。沉积数值模拟常用到基于水动力方程和基于扩散理论的模型,需要建立一套完整的控制方程、闭合条件和计算方法,对操作者的数学能力有一定的要求。沉积数值模拟需要高性能电脑和软件,不需要专门的实验室,能节省大量的人力、物力和经济成本,且模拟的时间和空间跨度大。对地下沉积体进行数值模拟所需的水文参数,可以通过类比沉积物理模拟或现代沉积来获取。另外数值模拟中如何再现沉积物的搬运过程一直没有得到很好的解决。

沉积物理模拟与数值模拟有很好的互补性。物理模拟是数值模拟的基础,可以为数值模拟提供经验参数,并对数值模拟进行验证,数值模拟则可以扩展物理模拟的时间和空间,是物理模拟的延伸。沉积物理模拟与沉积数值模拟的结合是沉积模拟技术发展的必然趋势^[15-16]。

本文以浅水三角洲为对象,分别对其进行物理模拟和数值模拟,总结浅水三角洲发育的控制因素、沉积演化规律、形态展布特征等,比较物理模拟和数值模拟结果的相似性,探索沉积物理模拟和数值模拟一体化中存在的问题,对沉积学研究方法和油气勘探技术的发展具有重要意义。

1 浅水三角洲沉积物理模拟实验

1.1 实验设计

1.1.1 实验装置设计

鄱阳湖赣江三角洲湖底很平缓，在 0.1° 左右，平均水深 8.4 m ^[17-18]；松辽盆地北部葡萄花油层浅水三角洲沉积时期，盆地地形平缓，倾角只有 $0.4^\circ \sim 0.57^\circ$ ^[19]；美国阿拉法拉亚三角洲坡度小于 0.1° ，沉积水深只有 3 m ^[20]；鄂尔多斯盆地三叠系延长组长 8 油层组浅水三角洲坡度一般不足 0.5° ^[21]。基于这些典型浅水三角洲实例，笔者设计了一个单斜坡沉积物理模拟实验装置（图 1），模拟水池长 3 m 、宽 2.6 m 、高 0.4 m ，斜坡坡度为 1° （物理模拟中水流速比自然界小很多倍，但泥沙的粒径并没有小相同的倍数，因此需要适当增加坡度以利于泥沙的输送，这也是国外常用的做法^[22]），河口呈人字形。实验装置还包括水箱、进水管、流量计、出水口、比例尺、水泵、照相机、加砂器、旋桨式流速仪和浮子流量计等。

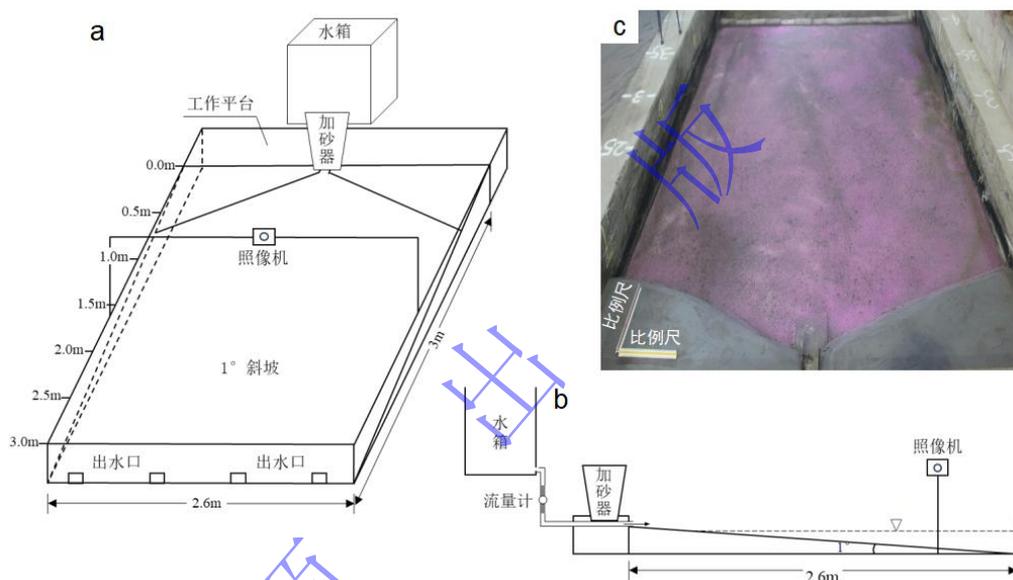


图 1 实验装置图

(a) 设计图；(b) 侧视图（图中角度为 1° ，在纵向上有放大）；(c) 实物图

Fig.1 Experimental setup

(a) setup design drawing; (b) side view of the setup (the slope of 1° is with magnification in the longitudinal direction); (c) real view of the setup

1.1.2 实验参数设计

本次实验设计沉积物组分为中细砂（粒径为 $0.125\sim 0.2\text{ mm}$ ，以细砂为主）和泥浆（主要为煤粉和高岭石，含量为 $60\%\sim 80\%$ ），共进行 10 组模拟实验（表 1），分别改变沉积物泥沙比（实验 1~4）、岸线迁移速度（实验 3、5、6、7）和入口流量（实验 3、8、9、10）这 3 个因素^[23]，观察记录沉积体的形态变化。

1.1.3 观测方案设计

按照实验设计进行实验，每分钟拍照一次，以记录浅水三角洲平面形态的变化，以及河道、泥沙运动以及流速等特征。每个实验以 8 L 泥沙为一个周期，每个周期结束将水池中的

水排干，测量浅水三角洲的长度、宽度并拍照记录。然后从出口处补水，使岸线恢复到测量和拍照前的位置，再继续实验。

浅水三角洲的长宽比，用现场测量的实际长度和宽度计算而得。面积通过比例计算得到，即在 Photoshop 软件中，分别圈出浅水三角洲的面积和两个比例尺围成的直角三角形的面积所得到像素值，并求取二者比值，再乘以两个比例尺围成的直角三角形的实际面积。假设理想的三角洲前缘是光滑的，为以三角洲宽度为直径的圆弧的弧长，实际上的前缘因朵体发育而呈锯齿状，将锯齿状前缘的长度比上理想的圆弧弧长定义为前缘粗糙度，反映浅水三角洲前缘朵体发育造成的分叉程度，舍去常数后具体计算公式简化为前缘边界长度/（沉积体面积）^{1/2}，前缘边界长度是在 CAD 软件中测量并结合比例尺计算的。

表 1 实验参数设计
Table 1 Design of the experimental parameters

序号	泥沙比	中细砂/L	泥浆/L	泥沙浓度/%	流量/L/h	初始岸线/m	每加 16L 泥沙岸线向湖迁移距离/m
实验 1	1:5	53	11	2	1 500	0.4	0.10
实验 2	2:5	46	18	2	1 500	0.4	0.10
实验 3	3:5	40	24	2	1 500	0.4	0.10
实验 4	4:5	36	28	2	1 500	0.4	0.10
实验 5	3:5	40	24	2	1 500	0.4	0.15
实验 6	3:5	40	24	2	1 500	0.4	0.20
实验 7	3:5	40	24	2	1 500	0.4	0.25
实验 8	3:5	40	24	2	1 100	0.4	0.10
实验 9	3:5	40	24	2	1 900	0.4	0.10
实验 10	3:5	40	24	2	2 300	0.4	0.10

注：表中初始岸线是从工作平台向水池一侧边缘起算（图 1a），该边缘为 0 m，到出水口处为 3 m，岸线迁移速度（每加 16 L 泥沙岸线迁移距离）亦按此计算。

1.2 实验结果

1.2.1 泥沙比与浅水三角洲形态关系实验

图 2 中每一行代表一个实验，每一列代表不同泥沙比实验在相同泥沙量条件下浅水三角洲的形态。随着泥沙量的增多，不同泥沙比的浅水三角洲的长宽比、面积和前缘粗糙度都有明显的变化。

整体上沉积体的长宽比与泥沙比的大小呈正相关（图 3a）。在沉积体长宽比随加入泥沙量变化的过程中，从开始到累计加入泥沙总量达 32 L 时，长宽比差异明显，且泥沙比大的长宽比也明显偏大；累计泥沙量为 40 L~56 L 时，浅水三角洲处于发育调整阶段，虽然泥沙比与长宽比没有严格遵循正相关关系，但泥沙比为 4:5、3:5 和 2:5 的三角洲的长宽比有相同的变化趋势；累计泥沙量达 64 L 时，不同泥沙比的浅水三角洲的长宽比差异缩小，有趋

同的特点，说明浅水三角洲的发育趋于稳定，此时长宽比与泥沙比恢复到正相关。说明高泥沙比有利于流水对沉积物的搬运，有利于浅水三角洲的纵向延伸。

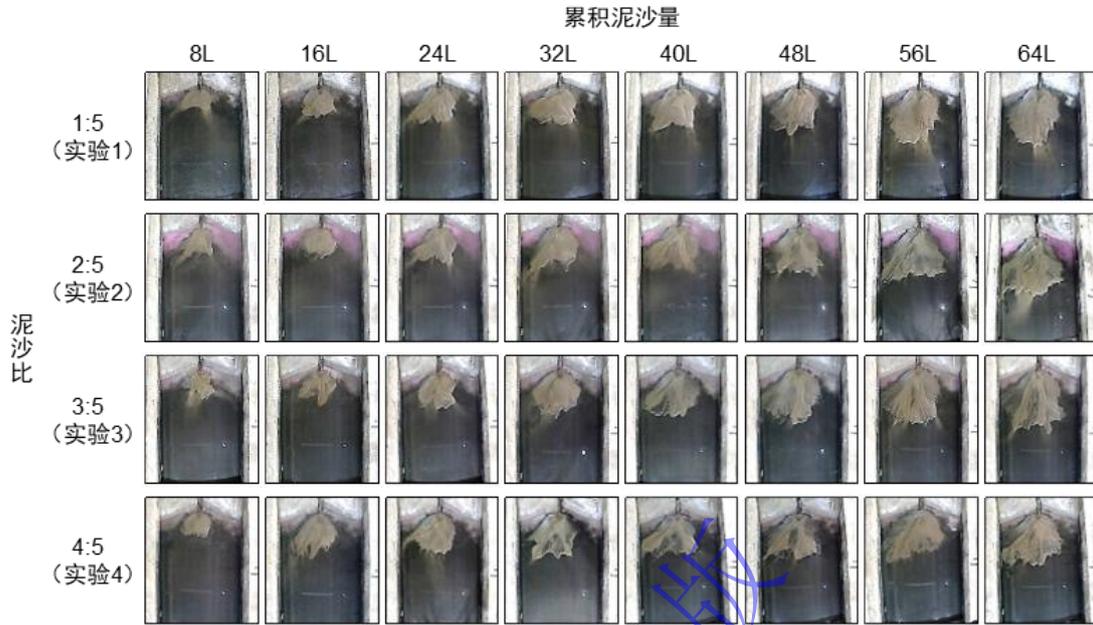


图2 不同泥沙比条件下浅水三角洲形态变化
Fig.2 Shape changes of the shoal water delta with different sediment ratios

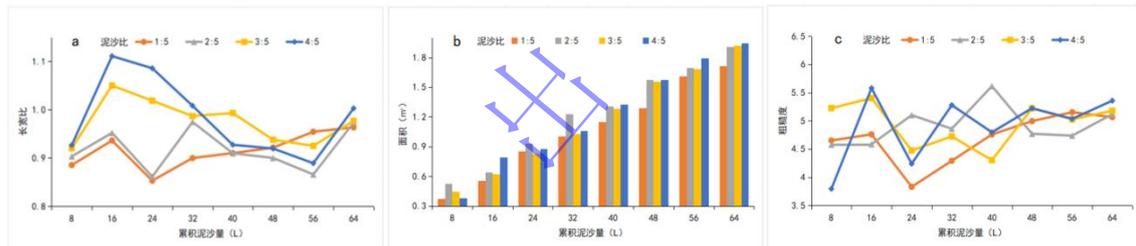


图3 不同泥沙比条件下浅水三角洲形态参数变化
(a) 长宽比变化图；(b) 面积变化图；(c) 粗糙度变化图
Fig.3 Shape changes of the shoal water deltas with different sediment ratios
(a) aspect ratio change chart; (b) area change chart; (c) roughness change chart

浅水三角洲的面积随泥沙比的增大而增大（图 3b）。当加入的泥沙总量达 64 L 时，泥沙比为 1:5 时所形成的沉积体面积最小，泥沙比为 4:5 时所形成的沉积体面积最大。也就是说，其他条件相同，泥沙比大，所形成浅水三角洲的展布面积也越大。说明高泥沙比更容易搬运，有利于沉积物在面上铺平展开。

整体上浅水三角洲泥沙比与前缘粗糙度略有正比例关系（图 3c）。虽然在浅水三角洲生长发育过程中，不同泥沙比条件下前缘粗糙度的变化没有明显规律（这种现象可能与测量和计算方式有关，测量前缘长度和三角洲面积本身误差较大，且二者是比值关系，作为分母的面积出现较小的误差，往往会引起前缘粗糙度发生较大的变化），但最终都稳定在 5 左右，并且泥沙比为 1:5 时，最终前缘粗糙度最小，而泥沙比为 4:5 时，最终前缘粗糙度最大。总体上，泥沙比与前缘粗糙度有正比关系，但这种关系直到三角洲发育稳定后才比较显著，同

时也说明泥质含量增加，更有利于浅水三角洲前缘朵体的形成。

1.2.2 岸线迁移速度与浅水三角洲形态关系实验

图 4 中每一行代表一个实验，每一列代表不同岸线迁移速度实验在相同泥沙量条件下沉积体的形态。

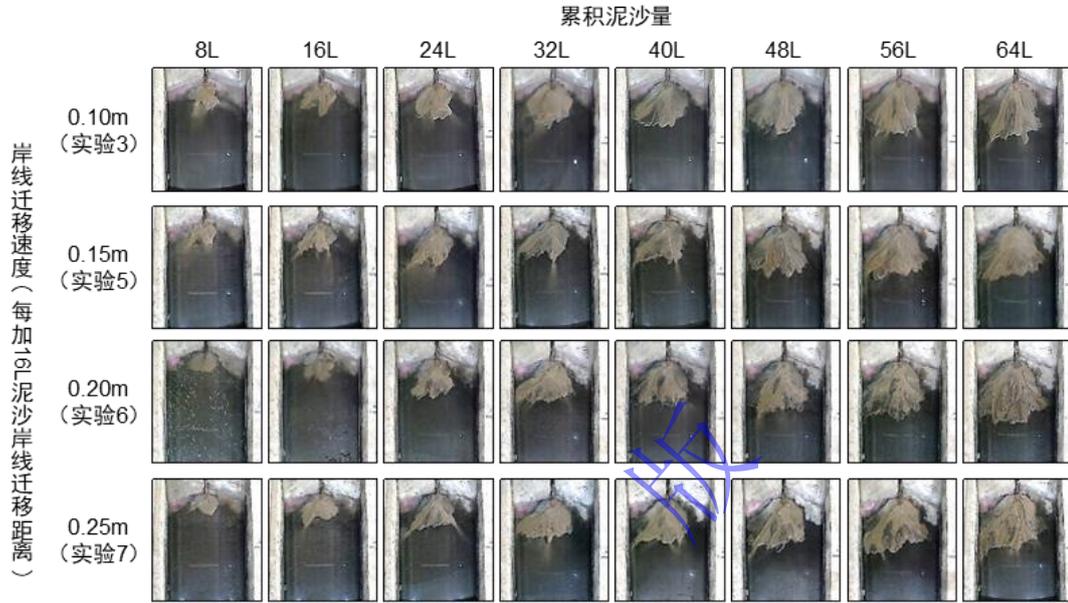


图 4 不同岸线迁移速度条件下浅水三角洲形态变化

Fig.4 Shape changes of the shoal water delta under different shoreline migration rates

在沉积体长宽比随加入泥沙量变化的过程中，沉积体长宽比表现出先增大后减小再增大的趋势（图 5a）。累积泥沙量达到 64 L 时，岸线迁移速度为 0.25 m/16 L 的沉积体长宽比最大，岸线迁移速度为 0.15 m/16 L 的沉积体长宽比最小，岸线迁移速度分别为 0.15 m/16 L、0.2 m/16 L 和 0.25 m/16 L 时，沉积体长宽比逐渐增大，只有岸线迁移速度为 0.1 m/16 L 的沉积体是个例外。

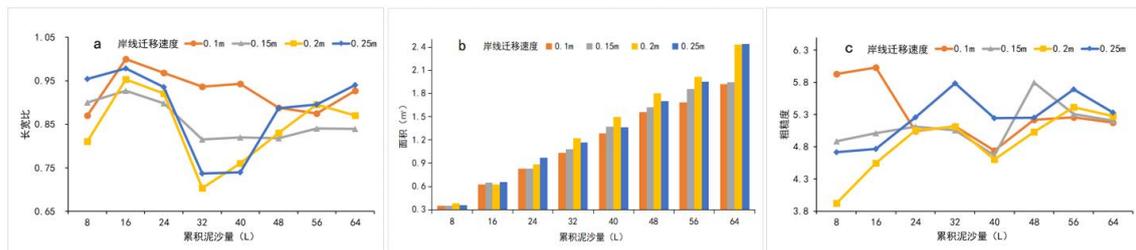


图 5 不同岸线迁移速度下浅水三角洲形态参数变化

(a) 长宽比变化图；(b) 面积变化图；(c) 粗糙度变化图

Fig.5 Shape changes of the shoal water delta with shoreline migration rates (a) aspect ratio change chart; (b) area change chart; (c) roughness change chart

在沉积体面积随加入泥沙量变化的过程中（图 5b），当泥沙量从 24 L 增加到 56 L，岸线迁移速度为 0.2 m/16 L 时，沉积体的面积始终最大，岸线迁移速度为 0.15 m/16 L 时的沉积体面积次之，岸线迁移速度为 0.1 m/16 L 时，沉积体面积始终最小。加入泥沙总量为 64 L

时，岸线迁移速度分别为 0.1 m/16 L、0.15 m/16 L、0.2 m/16 L 和 0.25 m/16 L 时所形成沉积体的面积依次增大。由此可知，其他条件相同，岸线迁移速度越快，越有利于沉积物的搬运和展布，所形成的浅水三角洲的面积较大。

浅水三角洲发育早期（泥沙量 8~24 L），不同岸线迁移速度条件下，前缘粗糙度非常离散，前缘粗糙度与岸线迁移速度没有相关性；浅水三角洲发育中期（泥沙量 24 L~56 L），前缘粗糙度与岸线迁移速度的关系有大致相同的趋势；浅水三角洲发育晚期（56 L~64 L），浅水三角洲逐渐稳定，前缘粗糙度与岸线迁移速度有明显的正相关性，即岸线迁移速度越大，前缘粗糙度越大，这是因为岸线迁移速度越大，越有利于引导分支河道纵向延伸形成朵体（图 5c）。

1.2.3 入口流量与浅水三角洲形态关系实验

图 6 中每一行代表一个实验，每一列代表不同河口流量实验在相同泥沙量条件下沉积体的形态。

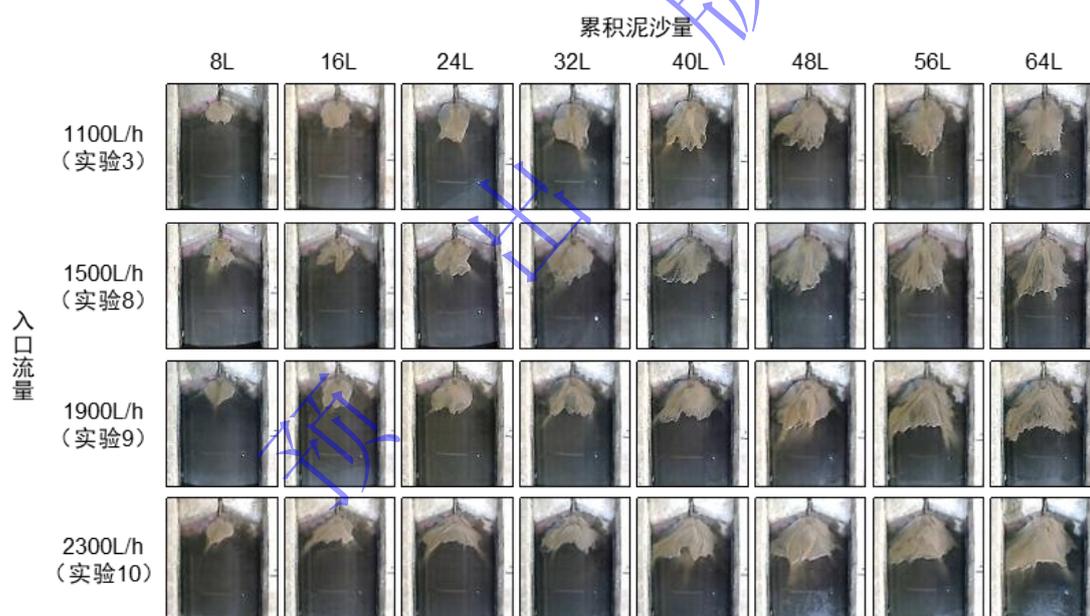


图 6 不同入口流量条件下浅水三角洲形态变化

Fig.6 Shape changes of the shoal water delta with different inlet discharges

在浅水三角洲长宽比随加入泥沙量变化的过程中（图 7a），越过浅水三角洲发育前期的调整阶段后，从泥沙量为 48 L 开始，进入稳定阶段，泥沙量从 48 L 增加到 64 L，入口流量为 1 100 L/h 时沉积体的长宽比始终最大，入口流量为 2 300 L/h 时沉积体的长宽比始终最小，整体上沉积体长宽比与入口流量呈负相关。

当加入的泥沙总量达 64 L 时，入口流量为 1 100 L/h 时沉积体面积最小，入口流量为 2 300 L/h 时沉积体面积最大（图 7b）。因此，入口流量越大，越有利于泥沙在平面上展开，所形成浅水三角洲的展布面积也越大。

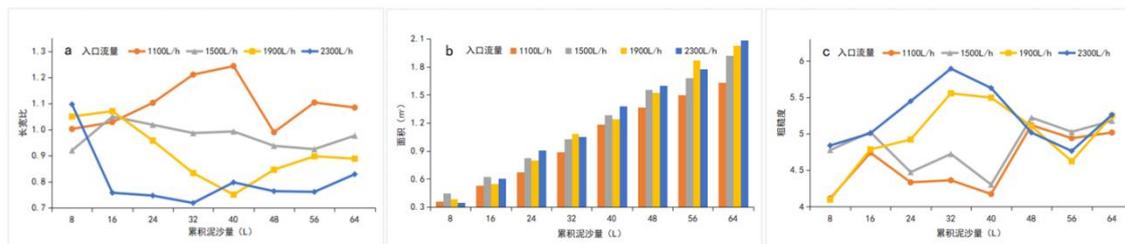


图7 不同入口流量条件下浅水三角洲形态参数变化

(a) 长宽比变化图; (b) 面积变化图; (c) 粗糙度变化图

Fig.7 Shape changes of the shoal water delta with different inlet discharges

(a) aspect ratio change chart; (b) area change chart; (c) roughness change chart

在浅水三角洲发育的前期(泥沙量 8 L~48 L), 入口流量与前缘粗糙度关系不明显, 但入口流量为 1 900 L/h 和 2 300 L/h 时前缘粗糙度变化较为一致, 而入口流量为 1 100 L/h 和 1 500 L/h 时前缘粗糙度变化较为一致(图 7c)。在浅水三角洲发育的后期(泥沙量 48 L~64 L), 不同入口流量条件下, 前缘粗糙度逐渐趋同, 有相似的变化趋势, 最终在泥沙量为 64 L 时表现为入口流量大小与前缘粗糙度呈正相关关系(图 7c)。

2 浅水三角洲沉积数值模拟实验

2.1 Delft3D 数值模拟原理

Delft3D 软件主要包括 Flow (水动力模块)、Wave (波浪模块)、Waq (水质模块)、Part (颗粒跟踪模块)、Eco (生态模块)、Mor (动力地貌模块)、Sed (泥沙输移模块) 七个模块^[24], 软件还带有一些工具和插件, 如前处理工具 Rgfgrid, Quickin, 后处理工具 Quickplot、Gpp 等。Delft3D 软件采用正交贴体网格, 能够很好地适应研究区域地形和边界条件的变化。同时, 该软件的网格功能强大, 支持修改和编辑操作, 且模拟数据体兼容性好, 可导出进行后续处理。该软件以 Navier-Stokes 方程(N-S 方程)为基础, 结合物质平衡方程实现了沉积物的搬运、沉积和地貌演变。

2.2 模型参数设定

本次研究的模型是针对无构造沉降、无波浪以及潮汐影响的浅水三角洲进行设置的, 主要讨论河流作用对浅水三角洲的形成演变产生的影响。所以, 在模型中没有设置波浪和潮汐作用, 只设定了进口边界(类型为入口流量)和出口边界(类型为水位)。

为了在可接受耗时内尽可能真实地模拟浅水三角洲的演化过程, 设计如下: (1) 模拟区长 4.3 km, 宽 6 km, 是一个底形平缓、向盆地倾斜的矩形水槽; (2) 模拟区水深由物源区 3 m 线性增加至沉积区 6 m, 坡度约为 0.04° ; (3) 长 300 m, 宽 300 m, 深 3 m 的河道; (4) 河道区域划分为 12×12 个网格, 湖盆区域划分为 238×158 个网格, 共计 37 748 个网格, 网格分辨率为 $25 \text{ m} \times 25 \text{ m}$ 。

目前国内较为典型的浅水三角洲是鄱阳湖赣江中支形成的现代沉积三角洲，其规模大，形态完整。参考 2012~2022 年《中国河流泥沙公报》中鄱阳湖赣江河流流量、泥沙含量等数据以及前人进行的类似模拟参数^[25-27]，设定了本次实验的泥沙动力学参数（表 2），其中沉积物组分包括中细砂（非黏性）和泥（黏性），砂质沉积物中值粒径为 150 μm ，河流流量为 800~1 400 m^3/s ，湖水位的设置基于模型参数间的匹配。为充分观察不同条件下浅水三角洲砂体及其河道的演化特征，设置了 12 组模型参数（表 3），其中模型 A₃ 和 C₂ 参数设置相同。

表 2 数值模拟模型参数设计

Table 2 Parameter design for the numerical simulation models

参数	取值
网格规模	37 748
网格分辨率	25 m×25 m
模拟时长/d	30
时间步长/s	30
地貌演化系数	150
河流长度/m	300
河流宽度/m	300
河流深度/m	3
沉积物组分	2
沉积物浓度/(kg/m^3)	0.01
砂质沉积物中值粒径/ μm	150
砂质沉积物干容重/(kg/m^3)	1 600
泥质沉积物干容重/(kg/m^3)	500
泥质沉积物沉降速率	0.25 mm/s

表 3 数值模拟实验设计

Table 3 Numerical simulation experimental design

对比条件	实验编号	泥沙比	湖水位降速/($\text{m}/721\text{h}$)	入口流量/(m^3/s)
泥沙比变化	A ₁	1:5	0.1	1 000
	A ₂	2:5	0.1	1 000
	A ₃	3:5	0.1	1 000
	A ₄	4:5	0.1	1 000
湖水位变化	B ₁	3:5	0.2	1 000
	B ₂	3:5	0.4	1 000
	B ₃	3:5	0.6	1 000
	B ₄	3:5	0.8	1 000
入口流量变化	C ₁	3:5	0.1	800
	C ₂	3:5	0.1	1 000
	C ₃	3:5	0.1	1 200
	C ₄	3:5	0.1	1 400

2.3 模拟结果

按照实验设计在 Delft3D 软件中进行数值模拟实验，模拟过程中每 1 小时保存一次，最终每个模型均得到 721 张时间切片，选择沉积厚度来表现浅水三角洲的展布形态，每一列代表一个模型，每一行代表每个模型在相同时刻的切片。参照沉积物理模拟的处理方法，获取每个数值模型的长宽比、面积和前缘粗糙度。

2.3.1 泥沙比数值模型

对比分析 A₁、A₂、A₃、A₄ 这 4 个模型发现，沉积物中泥质含量越高，分流河道稳定性越强（图 8）。但是这 4 个模型的沉积物供给都是砂质组分含量大于泥质组分含量，于是笔者又设计了沉积物中泥沙比为 5:1 的模型 A₅（图 9），沉积物中泥质含量高达 83.3%，对富含泥质组分的物源供给条件下沉积物的沉积演化进行研究。

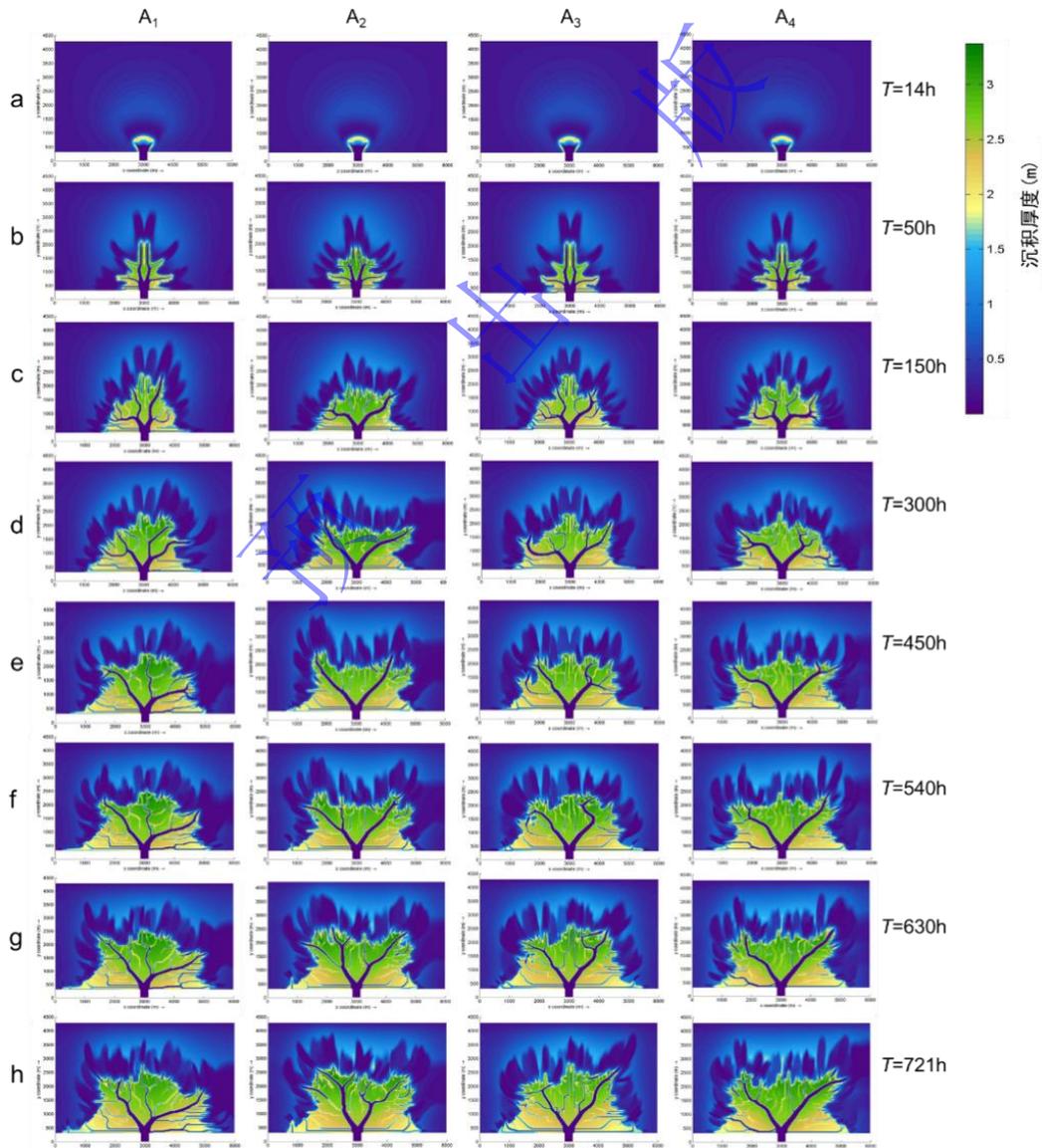


图 8 不同泥沙比条件下浅水三角洲的沉积厚度
 实验 A₁、A₂、A₃ 和 A₄ 的泥沙比分别为 1:5、2:5、3:5 和 4:5
 Fig.8 Deposition thickness of the shoal water delta with different sediment ratios
 The sediment ratio of model A₁, A₂, A₃ and A₄ is 1:5, 2:5, 3:5 and 4:5 respectively

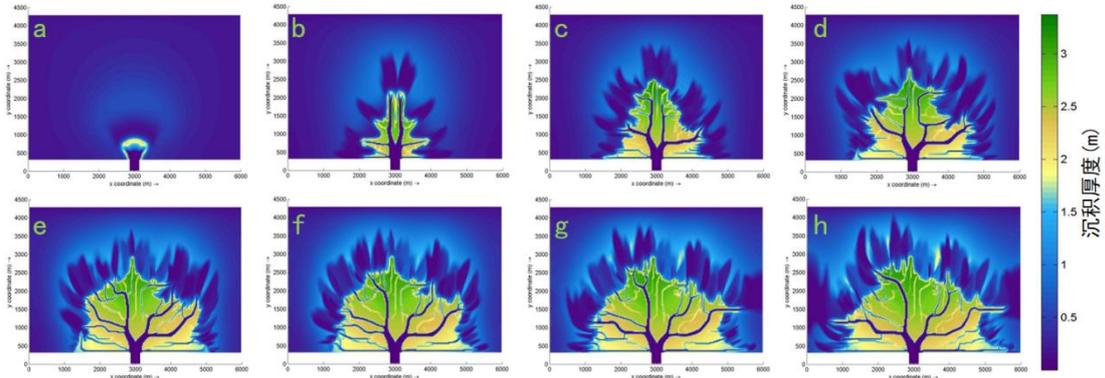


图 9 泥沙比为 5:1 时浅水三角洲的沉积厚度
 Fig.9 Deposition thickness of the shoal water delta with the sediment ratio of 5:1

对比 5 个模型 A₁、A₂、A₃、A₄ 和 A₅ 发现，在富含砂质组分 A₁、A₂、A₃、A₄ 模型中，浅水三角洲大多形成 2 条流速较大的河道，整体呈“头尾平均”，呈方格状（图 8），而在富含泥质组分 A₅ 中，浅水三角洲形成了 4 条流速较大的河道，整体为“头小尾大”，更接近朵叶状（图 9）。

统计 T=14、T=50、T=150、T=300、T=450、T=540、T=630、T=721 时刻 4 个模型 A₁、A₂、A₃、A₄ 沉积体的最大长度、最大宽度以及面积，得到其在平面展布上的分布规律。

根据沉积体长宽比变化可知，浅水三角洲长宽比变化整体上呈现先增大再减小最后再增大的趋势，最终表现为泥沙比高的，长宽比大（图 10a）。对比 4 个模型典型时刻沉积体的面积变化发现，泥沙比越高，沉积体面积越大（图 10b）。4 个模型的前缘粗糙度对比也表明，尽管 4 个模型在 540 h 前泥沙比与前缘粗糙度没有稳定的关系，但在 540 h 以后基本表现为泥沙比高，前缘粗糙度大（图 10c）。

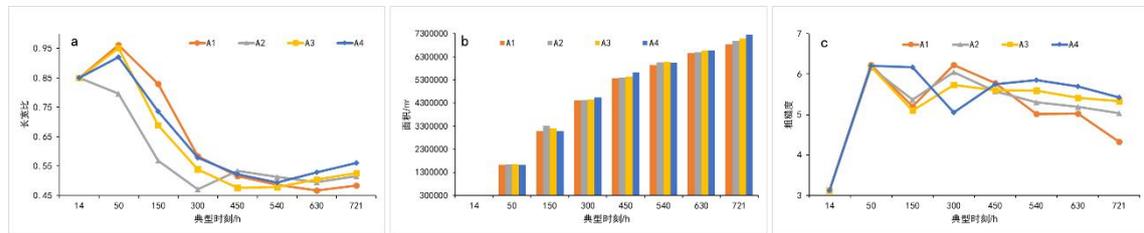


图 10 不同泥沙比条件下典型时刻的浅水三角洲形态变化
 (a) 长宽比变化图；(b) 面积变化图；(c) 粗糙度变化图
 Fig.10 Shape changes of the shoal water delta with different sediment ratios at typical times
 (a) aspect ratio change chart; (b) area change chart; (c) roughness change chart

2.3.2 湖平面降速数值模型

需要说明的是，物理模拟中设置的每加 16 L 泥沙岸线向湖迁移距离和数值模拟中湖平

面降速，虽然表述不同，但表达的内涵都是相同的，可以进行对比。

沉积条件相同的情况下，随着湖水位降速的增加，沉积体最终的整体形状从“头尾平均”变为“头小尾大”，浅水三角洲前缘粗糙度变大。并且湖水位降速越大，浅水三角洲所形成的河道数量多（图 11）。

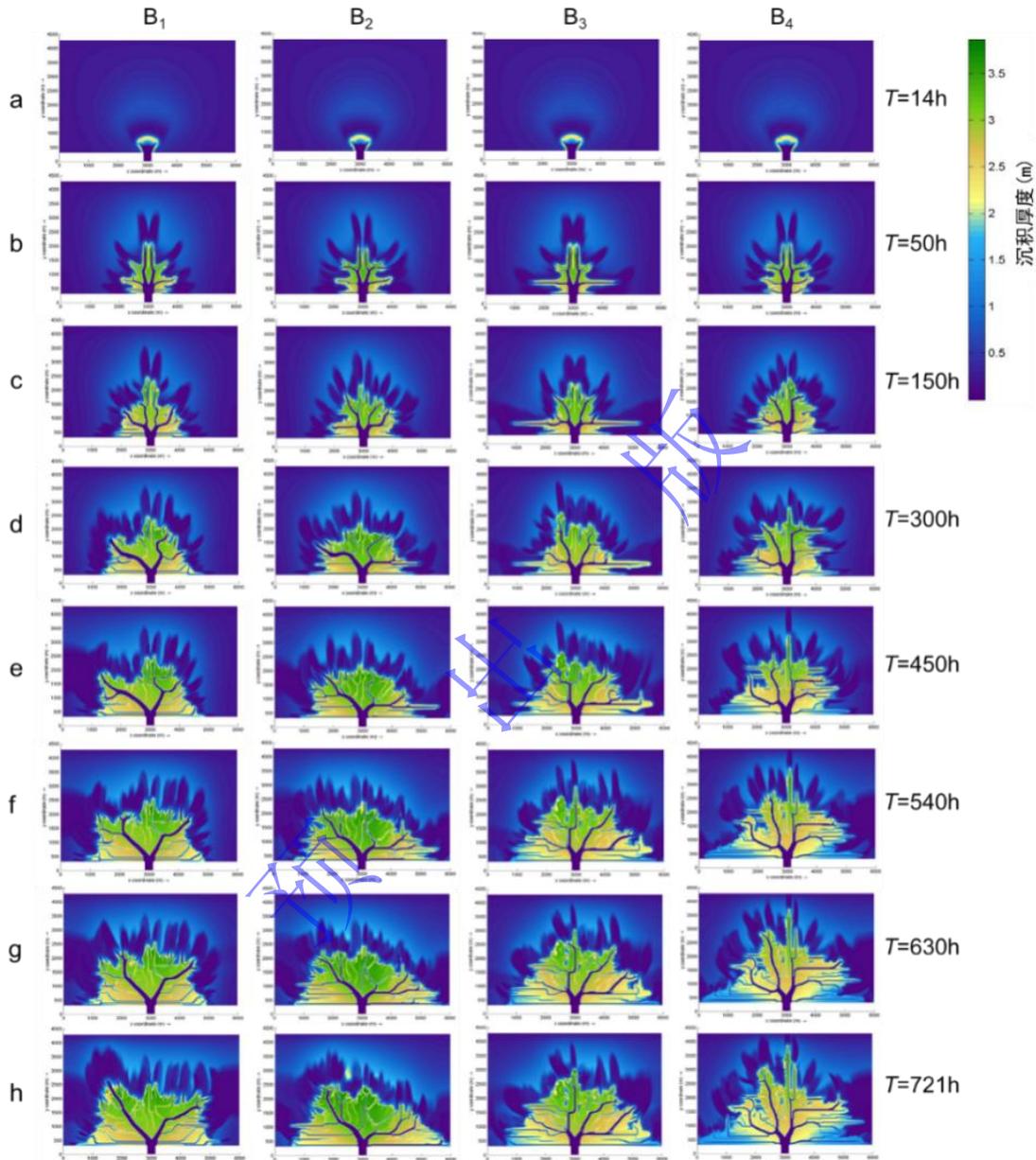


图 11 不同湖平面降速条件下浅水三角洲的沉积厚度

模型 B₁、B₂、B₃ 和 B₄ 中湖平面下降速度分别为 0.2 m/721h、0.4 m/721h、0.6 m/721h 和 0.8 m/721h

Fig.11 Deposition thickness of the shoal water delta with different lake level fall rates

The lake level fall rate of model B₁, B₂, B₃ and B₄ is 0.2 m/721 h, 0.4 m/721 h, 0.6 m/721 h, and 0.8 m/721 h, respectively

统计典型时刻 4 个模型 B₁、B₂、B₃、B₄ 沉积体的形态参数，得到其在平面展布上的分布规律。沉积体长宽比变化显示，除了湖水位降速为 0.2 m/721h（模型 B₁）这种情况以外，其他模型中湖平面下降速度与浅水三角洲长宽比呈正相关（图 12a）。对比 4 个模型典型时刻沉积体的面积发现，随着浅水三角洲的生长发育，其展布面积逐渐增大，且湖平面降速越

快，沉积体面积越大（图 12b）。由前缘粗糙度随时间的变化可知，在 450 h 后模型前缘粗糙度逐渐趋于稳定，此后，除了在最终时刻（T=721h）B₁ 和 B₂ 的前缘粗糙度一致外，前缘粗糙度基本上表现出了与泥沙比的正相关性（图 12c）。

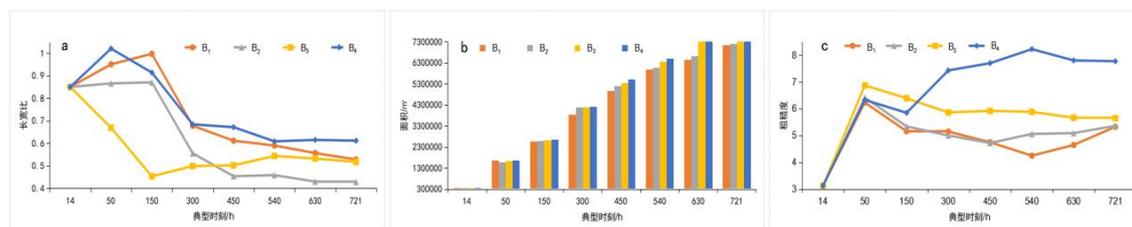


图 12 不同湖平面下降速度条件下典型时刻的浅水三角洲形态变化

(a) 长宽比变化图；(b) 面积变化图；(c) 粗糙度变化图

Fig.12 Shape changes of the shoal water delta with different lake level fall rate at typical times

(a) aspect ratio change chart; (b) area change chart; (c) roughness change chart

2.3.3 入口流量数值模型

沉积条件相同的情况下，入口流量大，河道数量多，尤其是决口分流河道的数量，且浅水三角洲的展布范围也会更大，长度更长，宽度更宽；入口流量小则反之（图 13）。随着入口流量的增大，沉积体形状从“头尾平均”的方格状逐渐变为“头小尾大”的叶状，且入口流量越大越有助于形成叶状浅水三角洲（图 13）。

从数值模拟结果来看，1 000 m³/s 的入口流量可能是浅水三角洲形态转变的一个参考阈值，入口流量小于 1 000 m³/s 时，浅水三角洲形状较为方正，呈“头尾平均”方格状；入口流量大于 1 000 m³/s 时，浅水三角洲为“头小尾大”的叶状。为验证这个猜想，笔者又设计了以下几个模型参数（表 4）。

选取 T=721 时刻 3 个模型 C₅、C₆、C₇ 沉积体最终的沉积厚度图（图 14），观察分析浅水三角洲在平面上的展布形态。入口流量小于 1 000 m³/s 时，浅水三角洲呈方格状，沉积体头部和尾部宽度大致相等；入口流量大于 1 000 m³/s 小于 1 200 m³/s 时，浅水三角洲形态开始从方格状向朵叶状转变；入口流量大于 1 200 m³/s 时，浅水三角洲为叶状，沉积体呈现头部窄尾部宽的形态。与笔者之前猜想一致，1 000 m³/s 的入口流量是浅水三角洲形态转变的一个临界值，沉积体形态从方格状转变为叶状。

统计典型时刻 4 个模型 C₁、C₂、C₃、C₄ 沉积体的形态参数，得到其在平面展布上的分布规律。

对比 4 个模型典型时刻沉积体的长宽比(图 15a)发现，入口流量从 800 m³/s 增加到 1 000 m³/s 时，沉积体长宽比减小；入口流量从 1 000 m³/s 增加到 1 200 m³/s 时，沉积体长宽比增大；入口流量从 1 200 m³/s 增加到 1 400 m³/s 时，沉积体长宽比减小。笔者猜想，整体上河口流量大小与沉积体长宽比成反比，但 1 000 m³/s 是一个阈值，在这个阈值附近，河口流量

大小与沉积体长宽比成正比。为了验证这个猜想，笔者又统计了其他几组河口流量条件下沉积体的最大长度和最大宽度（图 16），事实证明，河口流量大于 $1\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$ 小于 $1\ 200\ \text{m}^3/\text{s}$ 时，浅水三角洲处于形态转变的过渡期，其长宽比逐渐增大，二者呈正相关；小于 $1\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$ 和大于 $1\ 200\ \text{m}^3/\text{s}$ 这两种情况下，河口流量大小与浅水三角洲长宽比呈负相关。

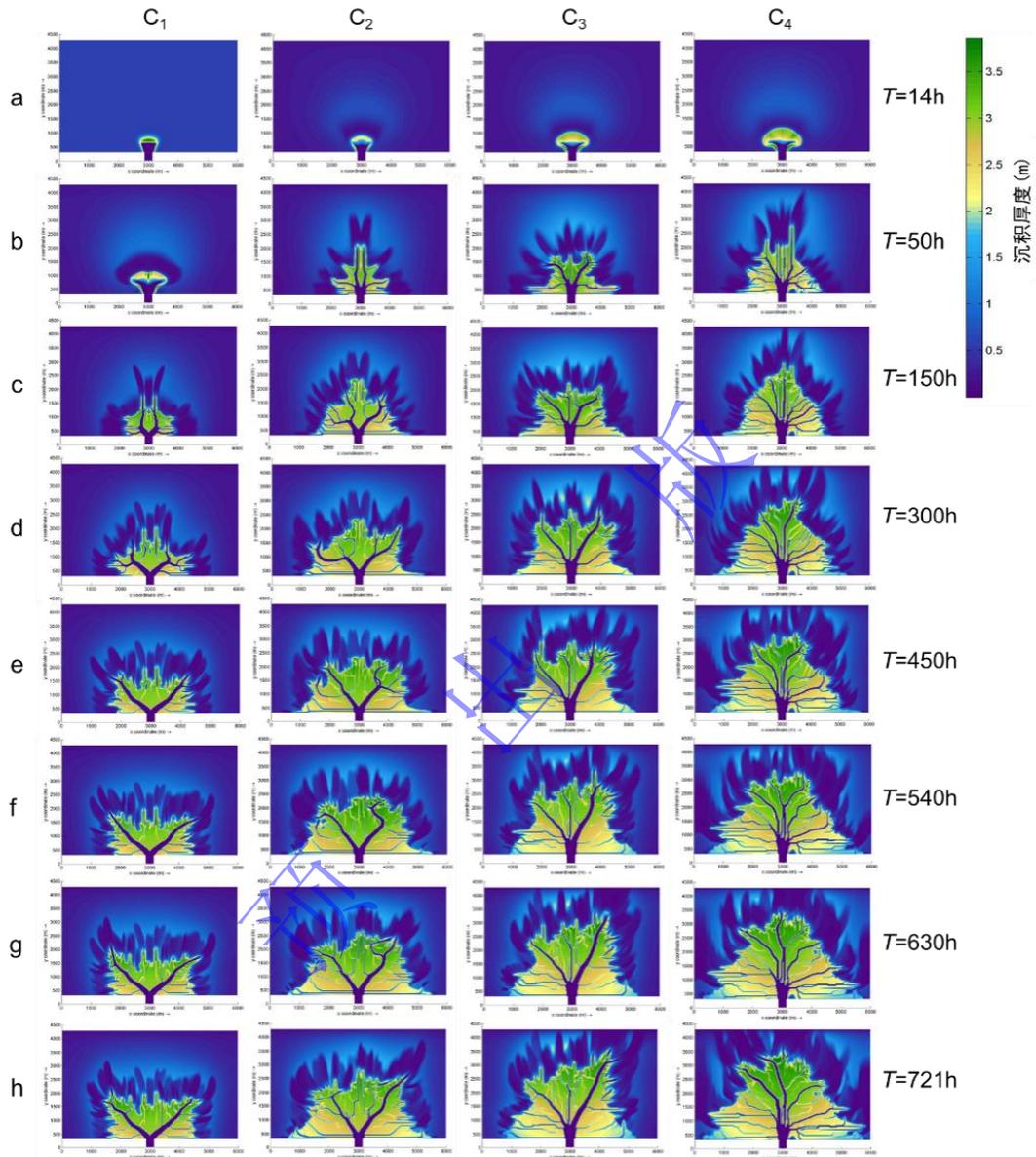


图 13 不同入口流量条件下浅水三角洲的沉积厚度

模型 C_1 、 C_2 、 C_3 和 C_4 中入口流量分别为 $800\ \text{m}^3/\text{s}$ 、 $1\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$ 、 $1\ 200\ \text{m}^3/\text{s}$ 和 $1\ 400\ \text{m}^3/\text{s}$

Fig.13 Deposition thickness of the shoal water delta with different inlet discharges

The estuary discharge of model C_1 , C_2 , C_3 and C_4 is $800\ \text{m}^3/\text{s}$, $1\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$, $1\ 200\ \text{m}^3/\text{s}$, and $1\ 400\ \text{m}^3/\text{s}$, respectively

表 4 模型 C_5 、 C_6 和 C_7 参数设置

Table 4 Parameter design of models C_5 , C_6 , and C_7

编号	泥沙比	湖水位降速/(m/721h)	入口流量/(m^3/s)
C_5	3:5	0.1	900
C_6	3:5	0.1	1 100
C_7	3:5	0.1	1 300

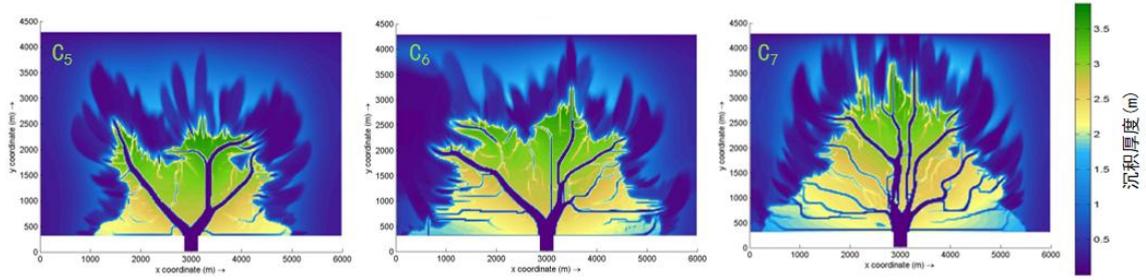


图 14 模型 C₅、C₆ 和 C₇ 的沉积厚度
Fig. 14 Deposition thickness of models C₅, C₆, and C₇

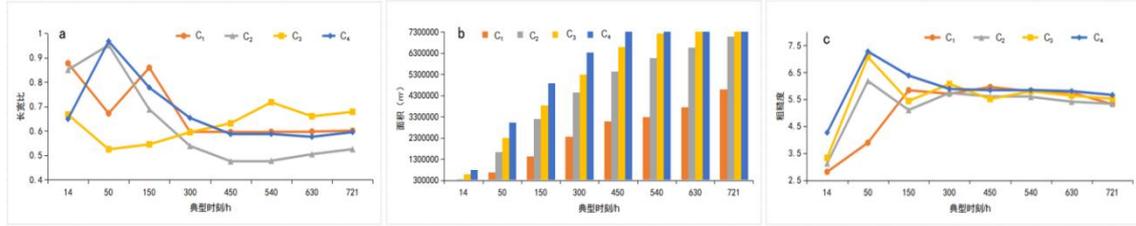


图 15 不同入口流量条件下典型时刻浅水三角洲形态变化
(a) 长宽比变化图; (b) 面积变化图; (c) 粗糙度变化图
Fig.15 Shape changes of the shoal water delta with different inlet discharge at typical times
(a) aspect ratio change chart; (b) area change chart; (c) roughness change chart

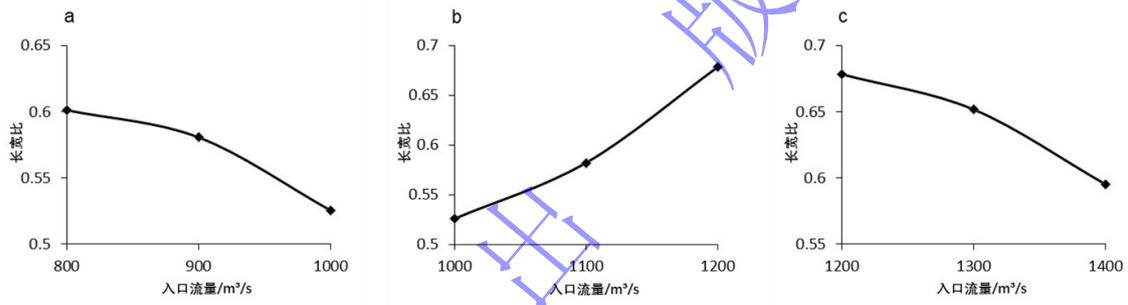


图 16 不同入口流量条件下沉积体长宽比分布
从左 (a) 至右 (c) 入口流量分别是 800~1 000m³/s, 1 000~1 200m³/s, 1 200~1 400m³/s
Fig.16 Distribution of deposit length-width ratio under different inlet discharge conditions
From left (a) to right (c), inlet discharge is 800–1 000 m³/s, 1 000–1 200 m³/s, and 1 200–1 400 m³/s, respectively

对比 4 个模型典型时刻沉积体的面积发现 (图 15b), 随着浅水三角洲的生长发育, 其展布面积逐渐增大, 且入口流量越大, 沉积体面积越大。

由前缘粗糙度随时间的变化 (图 15c) 可知, 4 个模型前缘粗糙度变化趋势基本一致。在模拟最终时刻, 模型 C₄ 的前缘粗糙度最大, 模型 C₁ 的前缘粗糙度最小。因此, 入口流量与前缘粗糙度成正比, 入口流量越大, 前缘粗糙度越大, 浅水三角洲前缘越不光滑, 朵体数量也越多。

3 讨论与分析

3.1 与前人研究结果的对比

沉积物理模拟结果表明, 高泥沙比、岸线迁移速度快、充足的来水量有利于浅水三角洲展布范围的扩大以及前缘朵体的发育, 这一结论与很多学者的实验结果相吻合。例如, 潘双

幸^[28]采用沉积物理模拟实验的方法,以准噶尔盆地盆1井西凹陷三叠系百口泉组粗碎屑沉积为研究对象,利用单斜坡沉积模拟试验装置,对比了泥沙比为0.3和0.6这两种情况下扇体的展布特征,结果表明,泥沙比越大,扇体的长宽比越大,且高泥沙比有利于扇体前端形成小朵体。肖红平^[29]依据鄂尔多斯盆地山西组一盒8段沉积地质背景相关地质资料,通过设计和开展浅水湖盆沉积充填动力学演化过程模拟实验研究,认为湖平面高频大幅下降,水流在前期沉积砂体的基础上进行侵蚀、搬运、再沉积作用,导致三角洲平原面积逐渐扩大;当注入水量充足,对应有足量的沉积物供给时,分支河道发育,整个区域过水面积增大,被侵蚀区及沉积区范围变大,也有利于三角洲面积的增加。这些与本文物理模拟中岸线迁移速度、入口流量与浅水三角洲的面积成正比的结论是一致的。

数值模拟结果也与Liang *et al.*^[30]、徐振华^[31]、臧东升^[32]等学者的研究结论相一致。Liang *et al.*^[30]通过Delft3D软件,分别模拟了泥沙比3:1、1:1、1:3的扇三角洲的发育和沉积过程,发现高泥沙比有利于扇体前端形成多条分支水道及小朵体,而当泥沙比含量较低时,其难以形成小朵体。徐振华等^[31]选用Delft3D软件,采用模拟和现代沉积物,分析了排水量对河流三角洲生长发育的影响,低水量导致指状三角洲的形成,高水量有利于叶状三角洲的形成,排水量达1 000 m³/s是一个参考阈值,这与本次研究中1 000 m³/s的入口流量是浅水三角洲形态从方格状向叶状转变的临界值这一结论相似。臧东升^[32]依托于Dionisos软件平台,以松辽盆地南部泉四段为例,对浅水三角洲沉积的影响因素进行了分析,在其他条件保持不变的情况下,将沉积物的泥质含量增加,则三角洲沉积范围更大。

综上,本文的沉积物理模拟和数值模拟结果均与前人结果具有较高相似性,说明本文的物理模拟和数值模拟结果是可靠的。

目前关于沉积物理模拟和数值模拟的对比研究,周涵^[33]采用沉积数值模拟与物理模拟相结合方法,通过现代钱塘江河口沉积数值模拟,获得砂坝发育最优的水动力条件、底床坡度和沉积物供给组合,以该最优参数为基础,采用相似性理论,设计沉积物理模拟实验方案,进行沉积物理模拟,以进一步揭示砂坝成因和分布。最后将数值模拟实验中不同时期呈现出的砂坝形态与沉积物理模拟实验中沉积物的搬运过程、河道的变迁及砂坝演化过程进行比对,发现二者模拟的河流形态一致,耦合度较高。但关于浅水三角洲的物理模拟和数值模拟对比研究鲜见文献报道,本文对比沉积物理模拟和数值模拟的实验结果,比较二者之间的相似程度,可以验证数值模拟的可靠性,为探索物理模拟与数值模拟的一体化中存在的问题提供参考。

3.2 不同因素对浅水三角洲形态影响对比

对比沉积物理模拟和数值模拟中，不同影响因素条件下浅水三角洲的长宽比变化（图 17），其结果具有较高的相似性。不论是沉积物理模拟还是数值模拟，在其他沉积条件一致的情况下，泥沙比都与浅水三角洲长宽比呈正相关关系，湖平面变化都与长宽比成二次函数关系。沉积物理模拟中，入口流量大小与浅水三角洲长宽比呈负相关，数值模拟中，在浅水三角洲形态转变的过渡时期，入口流量大小与沉积体长宽比呈正相关，其余情况下，入口流量大小与浅水三角洲长宽比呈负相关。

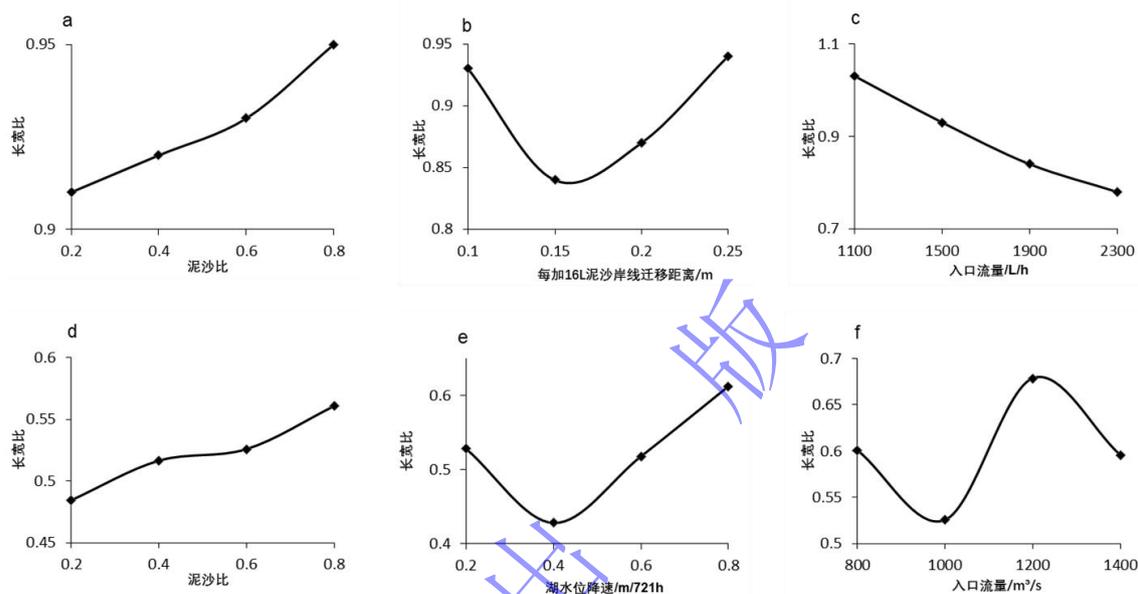


图 17 物理模拟和数值模拟中控制因素与沉积体长宽比的关系

a~c 为物理模拟，d~f 为数值模拟

Fig.17 Relationship between controlling factors and length-width ratio of deposition body in deposition physical and numerical simulation

a to c are the results of deposition physical simulation, and d to f are the results of deposition numerical simulation

对比两种模拟中不同影响因素条件下浅水三角洲的面积变化（图 18），在其他沉积条件一致的情况下，泥沙比、湖平面变化和河口流量均与浅水三角洲面积呈正相关关系，即高泥沙比、湖平面下降快、入口流量大有利于浅水三角洲展布范围的扩大。

对比两种模拟中不同影响因素条件下浅水三角洲的前缘粗糙度变化（图 19），在其他沉积条件一致的情况下，泥沙比、湖平面变化和河口流量均与浅水三角洲前缘粗糙度呈正相关关系，即高泥沙比、湖平面下降快、入口流量大有利于浅水三角洲前缘生成朵体，前缘较不规则。

总之，在泥沙比、湖平面降速、入口流量对浅水三角洲的长宽比、面积、前缘粗糙度的影响方面，沉积物理模拟实验与沉积数值模拟实验表现出了较好的一致性。这一对比结果说明，在利用沉积模拟预测浅水三角洲的形态和规模方面，基本可以用成本较低的沉积数值模拟代替沉积物理模拟。

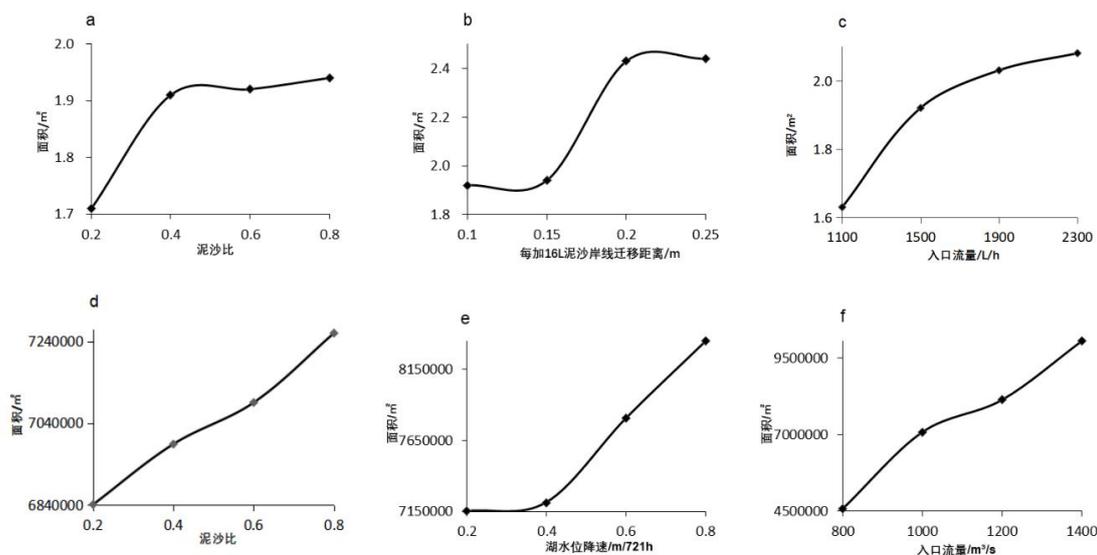


图 18 物理模拟和数值模拟中控制因素与沉积体面积的关系

a~c 为物理模拟, d~f 为数值模拟

Fig.18 Relationship between control factors and deposition body area in deposition physical and numerical simulation

a to c are the results of deposition physical simulation, and d to f are the results of deposition numerical simulation

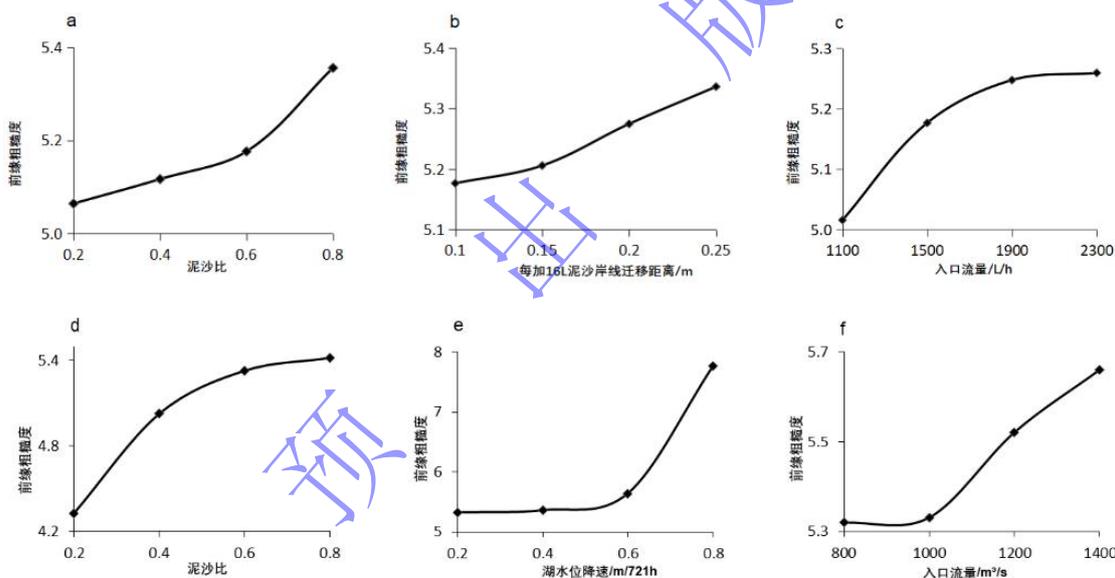


图 19 物理模拟和数值模拟中控制因素与前缘粗糙度的关系

a~c 为物理模拟, d~f 为数值模拟

Fig.19 Relationship between control factors and shoreline roughness in deposition physical and numerical simulation

a to c are the results of deposition physical simulation, and d to f are the results of deposition numerical simulation

3.3 浅水三角洲生长发育过程对比

选取沉积物理模拟实验 3 和沉积数值模拟实验 A₃, 比较浅水三角洲的形成过程。

在沉积物理模拟实验 3 中, 携带泥沙的水流进入水池后能量降低, 泥沙沉积下来, 形成河口坝, 累积泥沙量达到 8 L 时 (图 20a), 强流冲决河口坝, 形成了 3 条较浅的分流河道, 各自在河口处形成了小型朵体。累积泥沙量达到 16 L 时 (图 20b), 左侧分流河道逐渐与中间分流河道合并为一个宽而浅的分流河道, 河口处小朵体也逐渐合并; 右侧分流河道得以

继承并加宽，河口处朵体逐渐加大。累积泥沙量达到 24 L 时（图 20c），合并后的中间分流河道变浅、加宽，逐渐弱化，前端河口处朵体分别向两侧迁移形成一个较大的扇形朵体；而右侧分流河道变窄，更多的水流溢出河道，以扇面片流的形式流向两侧，最终进入湖区，所携泥沙在扇面和前缘沉积并形成一系列流沟。这一阶段中间和右侧的强分流河道夹角较小（图 20c），使得这一阶段浅水三角洲以纵向延伸为主，长宽比较大。当泥沙量达到 32 L 时（图 20d），中间分流河道完全消失，以扇面片流为主，流向原中间河道两侧水流，携带泥沙在原朵体两侧沉积，逐渐补齐了与原朵体的差异，使得朵体整体向左前方推进；由于原中间河道消失，更多的水流向右侧分流河道，使得右侧分流河道加宽加深，流向从向右前改为向左前。

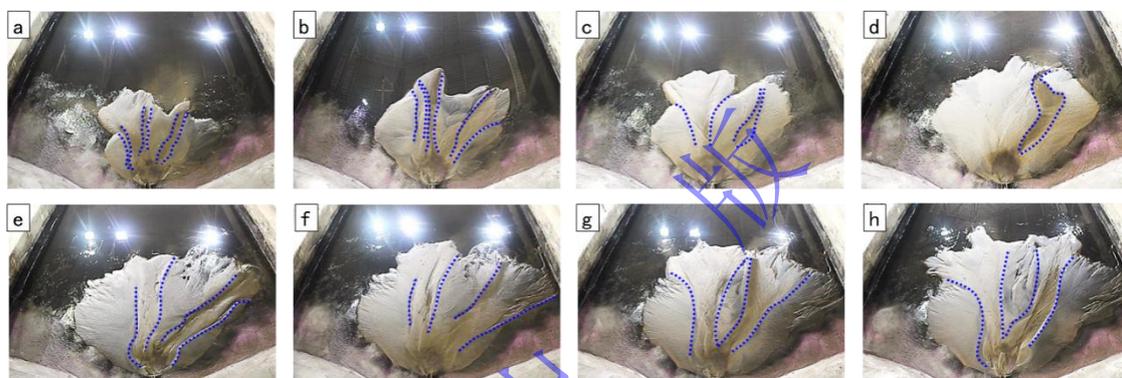


图 20 物理模拟实验 3 浅水三角洲形成过程

a-h 分别对应的累积泥沙量为 8 L、16 L、24 L、32 L、40 L、48 L、56 L 和 64 L

Fig.20 Formation process of the shoal water delta in the physical simulation experiment 3

a to h are the corresponding physical models when the accumulate sediment volume is 8 L, 16 L, 24 L, 32 L, 40 L, 48 L, 56 L, and 64 L, respectively

此后，累积泥沙量达到 40 L 时（图 20e），中间分流河道复活，河道较浅，大量水流过河道在扇面形成片流，携带的泥沙在左前缘沉积，并在左扇面留下一系列流沟；右侧分流河道加深，前端冲决而变直，直接入湖，原来向左前入湖形成的河口朵体废弃。累积泥沙量达到 48 L 时（图 20f），中间分流河道继承发育，河道略有加深，前端朵体向前突出超过原有前缘，并再次变为扇形；右侧分流河道加宽并激活废弃的左前河口，形成左前和右前两个河口，中间夹一朵体。累积泥沙量达到 56 L 时（图 20g），中间河道继续加深，漫过河道的扇面片流减少，更多的泥沙被河道带到朵体两侧沉积，使得扇形朵体进一步向前延伸、向两侧加宽，从而拉开与左前缘的差距；右侧分流河道再次废弃右前的河口，重新转向左前入湖，并在左前形成新的朵体雏形。当累积泥沙量达到 64 L 时（图 20h），前述情形得以继续，中间和右侧分流河道的前端朵体进一步向湖生长。

数值模拟实验 A₃ 中，在浅水三角洲的早期发育阶段，入口附近快速形成了一个初始河口坝（图 21a）。由于初始河口坝的阻挡，水流向初始河口坝两侧分流，形成两个不均衡的

次级分流河道（图 21a）。当流速较大时，强分流河道突破前端河口坝的阻挡（图 21b），径直向湖区快速推进（图 21c），沉积体在纵向上快速延长；而侧向次级分流河道相对较弱，向湖侧向推进相对较慢（图 21c）。这一阶段，浅水三角洲以纵向延长为主，长宽比较大。径直向湖区快速推进的强分流河道受到湖水的顶托而减速，河口出现淤塞，进而出现决口，形成决口分流河道（图 21c），原来径直向湖区快速推进的强分流河道被弱化甚至消失，沉积体纵向延伸逐渐减弱甚至停止；侧向次级分流河道逐渐成为主角，形成两大分支，因此横向展宽成为主要的生长方式（图 21d~图 21f）。这一阶段浅水三角洲整体以展宽为主，长宽比较小。

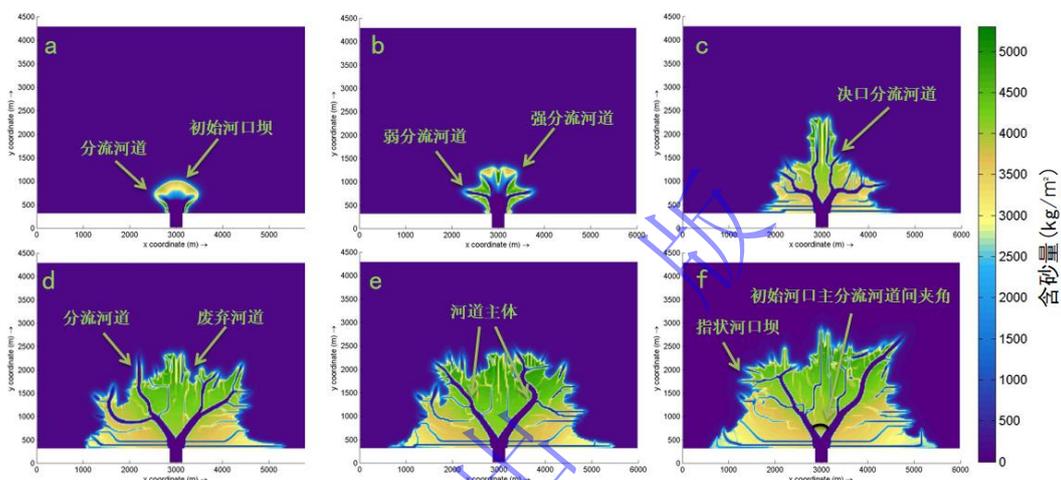


图 21 数值模拟实验 A₃ 浅水三角洲沉积演化过程

a~f 对应的 T 分别是 15 h、20 h、100 h、350 h、500 h 和 721 h

Fig.21 Deposition evolution of the shoal water delta in the numerical simulation experiment A₃
a to f are the corresponding numerical models at 15 h, 20 h, 100 h, 350 h, 500 h ,and 721 h

物理模拟左中右三条主要的分流河道，左侧分流河道与中间分流河道合并后经历废弃、复活，并与右侧分流河道一起得以保留，最终形成两大主要分流河道。数值模拟中径直向湖区快速推进的中间分流河道最终消失，而两条侧向分流河道成长为主要的分流河道。物理模拟与数值模拟的过程中，最终都保留了两条主要分流河道（图 22），成为控制浅水三角洲发育的主角。但在物理模拟中，两条主要的分流河道主导了浅水三角洲发育的整个过程，而在数值模拟中，两条分流河道在早期不明显（图 21a~c），在晚期才稳定下来（图 21d~f），即相较于数值模拟，物理模拟中两条主要的分流河道的稳定性更强。

物理模拟和数值模拟揭示的浅水三角洲发育过程明显不同。物理模拟中，中间分流河道与左侧分流河道合并以后，河道加深时，漫出河道的扇面片流较少，水流主要经由分流河道流向湖区，大量泥沙在河口处卸载，泥沙前积的同时也发生侧积，形成突出前缘的扇形朵体；当河道逐渐变宽淤浅以至消失后，扇面的片流为主，大量泥沙被扇面片流搬运至前缘沉积，逐渐补齐与突出的扇形朵体之间的差距；当分流河道复活后，再重复上述过程。另外，右侧

河道的河口左右迁移改道，每次改道均形成一个朵体，如此朵体交替前进，使得前缘不断发育生长。因此，在物理模拟中，浅水三角洲有两种发育机制，其一是分流河道分流与扇面片流交替导致的河口朵体与前缘交替生长，其二是河口不断改道导致的朵体交替生长。而在数值模拟中，浅水三角洲的成长始终伴随着决口导致旧分流河道的废弃、新分流河道和河口砂坝（朵体）的快速形成，几乎没有发生河道和朵体的侧向迁移，决口时形成的朵体主要表现为指状，鲜见扇形朵体。



图 22 物理模拟实验 3 与数值模拟实验 A₃ 结果对比

Fig.22 Result comparison of physical simulation experiment 3 and numerical simulation experiment A₃

综上所述，对浅水三角洲而言，在相同输入条件下，物理模拟与数值模拟所形成沉积体的宏观形态及其演化有很好的相似性，但在具体建造细节上仍有明显的差别，说明沉积物理模拟与数值模拟虽有互补性，但二者的一体化还面临很多需要解决的问题。

4 结论

(1) 浅水三角洲的沉积物理模拟实验和沉积数值模拟实验表明，泥沙比、岸线迁移速度（湖平面下降速度）和入口流量对浅水三角洲的长宽比、面积和前缘粗糙度等的变化都有明显的影响，是影响浅水三角洲发育的关键因素。

(2) 在泥沙比、岸线迁移速度、入口流量对浅水三角洲的长宽比、面积、前缘粗糙度等宏观形态的影响上，沉积物理模拟实验与沉积数值模拟实验表现出了较好的一致性，而且沉积物理模拟显示入口流量与浅水三角洲的长宽比整体呈负相关，而数值模拟对此则有更为细致的描述，即河口流量大于 1 000 m³/s 小于 1 200 m³/s 时，浅水三角洲处于形态转变的过渡期，河口流量与浅水三角洲的长宽比正相关，小于 1 000 m³/s 和大于 1 200 m³/s 这两种情况下，河口流量与浅水三角洲长宽比呈负相关。因此，在利用沉积模拟预测浅水三角洲的形态和规模方面，基本可以用成本较低的沉积数值模拟代替沉积物理模拟。

(3) 在浅水三角洲形成的具体过程中，沉积物理模拟与数值模拟有所不同。沉积物理模拟显示，浅水三角洲有分流河道分流与扇面片流交替所致的河口朵体与扇缘交替生长、河口不断改道所致的朵体交替生长两种发育机制。在数值模拟中，浅水三角洲的成长过程始终

伴随着决口导致旧分流河道的废弃、新分流河道和河口砂坝（朵体）的快速形成，朵体主要表现为指状，鲜见扇形朵体。

参考文献 (References)

- [1] Deacon G F. Discussion. The training of rivers and estuaries[J]. Minutes of the Proceedings of the Institution of Civil Engineers, 1894, 118: 78-103.
- [2] Gilbert G K, Murphy E C. The transportation of debris by running water[R]. Washington: U.S. Geological Survey, 1914: 263-267.
- [3] Simons D B, Richardson E V. Resistance to flow in alluvial channels[J]. Transactions of the American Society of Civil Engineers, 1962, 127(1): 927-954.
- [4] Southard J B. Representation of bed configurations in depth-velocity-size diagrams[J]. Journal of Sedimentary Petrology, 1971, 41(4): 903-915.
- [5] Schumm S A, Khan H R. Experimental study of channel patterns[J]. Geological Society of America Bulletin, 1972, 83(6): 1755-1770.
- [6] Rosgen D L. A classification of natural rivers[J]. CATENA, 1994, 22(3): 169-199.
- [7] 顾晓忠, 马立桥. 三角洲沉积体系的数值模拟及其应用[J]. 石油学报, 1993, 14(2): 1-11. [Gu Xiaozhong, Ma Liqiao. Numerical simulation of a delta depositional system and its applications[J]. Acta Petrolei Sinica, 1993, 14(2): 1-11.]
- [8] 张春生. 碎屑岩沉积模拟技术[M]. 北京: 石油工业出版社, 2003: 23-40. [Zhang Chunsheng. Sedimentary simulation technology for clastic rocks[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2003: 23-40.]
- [9] Sloss L L. Stratigraphic models in exploration[J]. Journal of Sedimentary Petrology, 1962, 32(3): 415-422.
- [10] Tetzlaff D M, Harbaugh J W. Simulating clastic sedimentation[M]. New York: Springer, 1989.
- [11] 林承焰, 陈炳屹, 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.]
- [12] Hutton E W H, Syvitski J P M. *Sedflux 2.0*: An advanced process-response model that generates three-dimensional stratigraphy[J]. Computers & Geosciences, 2008, 34(10): 1319-1337.
- [13] Granjeon D, Joseph P. Concepts and applications of a 3-D multiple lithology, diffusive model in stratigraphic modeling[M]//Harbaugh J W, Lynn Watney W, Rankey E C, et al. Numerical experiments in stratigraphy: Recent advances in stratigraphic and sedimentologic computer simulations. Tulsa: SEPM Society for Sedimentary Geology, 1999: 197-210.
- [14] Lesser G R, Roelvink J A, Van Kester J A T M, et al. Development and validation of a three-dimensional morphological model[J]. Coastal Engineering, 2004, 51(8/9): 883-915.
- [15] 严秀瑾. 沉积数值模拟技术的发展与应用[J]. 石化技术, 2019, 26(4): 55. [Yan Xiujin. Development and application of sedimentary numerical simulation[J]. Petrochemical Industry Technology, 2019, 26(4): 55.]
- [16] 邹才能, 邱振. 中国非常规油气沉积学新进展: “非常规油气沉积学”专辑前言[J]. 沉积学报, 2021, 39(1): 1-9. [Zou Caineng, Qiu Zhen. Preface: New advances in unconventional petroleum sedimentology in China[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2021, 39(1): 1-9.]
- [17] 高志勇, 周川闽, 董文彤, 等. 浅水三角洲动态生长过程模型与有利砂体分布: 以鄱阳湖赣江三角洲为例[J]. 现代地质, 2016, 30(2): 341-352. [Gao Zhiyong, Zhou Chuanmin, Dong Wentong, et al. Sedimentary processes, depositional model and sandbody prediction of lacustrine shallow water delta: A case study of Ganjiang River delta in Poyang Lake[J]. Geoscience, 2016, 30(2): 341-352.]
- [18] 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 Zhenkui, Li Yan, Gao Baishui, 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.]

- [19] 王建功, 王天琦, 梁苏娟, 等. 松辽盆地北部葡萄花油层浅水湖泊三角洲沉积特征及对油气分布的控制[J]. 中国石油勘探, 2008, 13(1): 11-16. [Wang Jianguo, Wang Tianqi, Liang Sujuan, et al. Sedimentary features of shallow lacustrine delta and their control on distribution of oil and gas pools in Putaohua reservoir of northern Songliao Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2008, 13(1): 11-16.]
- [20] 朱筱敏, 潘荣, 赵东娜, 等. 湖盆浅水三角洲形成发育与实例分析[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2013, 37(5): 7-14. [Zhu Xiaomin, Pan Rong, Zhao Dongna, et al. Formation and development of shallow-water deltas in lacustrine Basin and typical case analyses[J]. Journal of China University of Petroleum, 2013, 37(5): 7-14.]
- [21] 李元昊, 刘池洋, 独有国, 等. 鄂尔多斯盆地西北部上三叠统延长组长 8 油层组浅水三角洲沉积特征及湖岸线控砂[J]. 古地理学报, 2009, 11(3): 265-274. [Li Yuanhao, Liu Chiyang, Du Yuguo, et al. Sedimentary characteristics of Shallow water delta and lake shoreline control on sandbodies of Chang 8 oil-bearing interval of the Upper Triassic Yanchang Formation in northwestern Ordos Basin[J]. Journal of Palaeogeography, 2009, 11(3): 265-274.]
- [22] 潘双苹, 胡光明, 唐友军, 等. 断裂组合导流作用对扇三角洲形态的影响: 基于盆 1 井西凹陷百口泉组的沉积物理模拟实验[J]. 沉积学报, 2023, 41(3): 867-878. [Pan Shuangping, Hu Guangming, Tang Youjun, et al. Influences of restricted flow by fault assemblage on fan delta morphology: Evidence from a depositional physical simulation experiment of the Baikouquan Formation in the well Pen-1 west Sag, Junggar Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2023, 41(3): 867-878.]
- [23] 吴太霏, 王华, 刘恩涛, 等. 珠三坳陷珠江组一段沉积体系演化过程及其控制因素[J]. 地质科技通报, 2024, 43(2): 111-112. [Wu Taifei, Wang Hua, Liu Entao, et al. Evolutionary and controlling factors of sedimentary system in the first member of the Zhujiang Formation in the Zhu III Depression[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2024, 43(2): 111-112.]
- [24] 王华, 魏乾坤. Delft 3D 模型理论及应用[M]. 北京: 海洋出版社, 2018. [Wang Hua, Wei Qiankun. Theory and application of delft 3D model[M]. Beijing: China Ocean Press, 2018.]
- [25] 宋亚开, 尹太举, 张昌民, 等. 分支河道型三角洲的数值模拟[J]. 大庆石油地质与开发, 2021, 40(3): 42-50. [Song Yakai, Yin Taiju, Zhang Changmin, et al. Numerical simulation of a branch-channel delta[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2021, 40(3): 42-50.]
- [26] 杜威, 纪友亮, 李其海, 等. 不同沉积过程尺度下正演数值模拟研究进展及油气地质意义[J]. 油气地质与采收率, 2020, 27(2): 62-71. [Du Wei, Ji Youliang, Li Qihai, et al. Sedimentary forward numerical modeling at different sedimentary scales: Progress and hydrocarbon significance[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2020, 27(2): 62-71.]
- [27] 王杨君, 尹太举, 邓智浩, 等. 水动力数值模拟的河控三角洲分支河道演化研究[J]. 地质科技情报, 2016, 35(1): 44-52. [Wang Yangjun, Yin Taiju, Deng Zhihao, et al. Terminal distributary channels in fluvial-dominated delta systems from numerical simulation of hydrodynamics[J]. Geological Science and Technology Information, 2016, 35(1): 44-52.]
- [28] 潘双苹. 盆 1 井西凹陷三叠系百口泉组粗碎屑沉积模拟实验[D]. 荆州: 长江大学, 2022. [Pan Shuangping. Deposition simulation experiment of coarse clastic in Baikouquan Formation, Triassic in the well Pen 1 west Sag[D]. Jingzhou: Yangtze University, 2022.]
- [29] 肖红平. 鄂尔多斯盆地山西组一盒 8 段沉积体系与有利储层研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2020. [Xiao Hongping. Depositional system and favorable reservoir of Shanxi Formation-He 8 member in Ordos Basin[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2020.]
- [30] Liang M, Voller V R, Paola C. A reduced-complexity model for river delta Formation - Part 1: Modeling deltas with channel dynamics[J]. Earth Surface Dynamics, 2015, 3(1): 67-86.
- [31] 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.
- [32] 臧东升. 浅水三角洲储层砂体构型与剩余油分布: 以松辽盆地南部泉四段为例[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2021. [Zang Dongsheng. Sandbody architecture and remaining oil distribution in shallow water delta reservoirs: a case study based on the 4th member of Quantou Formation, southern Songliao Basin[D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2021.]

[33] 周涵. 基于沉积数值模拟和物理模拟的潮控河口湾储层砂坝成因分析[D]. 荆州: 长江大学, 2020. [Zhou Han. Genetic analysis of sand bar in tidal estuary reservoir based on numerical and physical simulation of sedimentation[D]. Jingzhou: Yangtze University, 2020.]

Comparative Study on Physical and Numerical Simulations of Deposition in a Shoal Water Delta

LI TianTian¹, HU GuangMing¹, XU YouDe², ZHANG YaJin³, WANG Jun⁴, XUE Hui⁵, LIU XianLu¹, ZHANG TingYu¹, ZHOU YuQin¹

1. School of Geosciences, Yangtze University, Wuhan 430100, China

2. Research Institute of Exploration and Development, Shengli Oilfield, Dongying, Shandong 257061, China

3. Exploration and Development Research Institute of Daqing Oilfield, Daqing, Heilongjiang 163712, China

4. The Fourth Oil Production Plant of Changqing Oilfield, Yinchuan 750000, China

5. Exploration and Development Research Institute of Changqing Oilfield, Xi'an 710021, China

Abstract: [Objective] The integration of physical and numerical deposition simulations is an inevitable trend in the development of deposition simulation technology. In recent years, shoal water deltas have gradually become the focus of research by various experts and scholars. The main factors affecting the growth and development of shoal water deltas include ancient structures, topography, climate, and water flow. Previous scholars have conducted relevant research, but there is a lack of a more comprehensive quantitative analysis of the specific impact of the main controlling factors. In this study, the author takes the shoal water delta as an example for conducting a comparative study of physical and numerical deposition simulations, exploring the problems in the integration of the two. **[Methods]** Three influencing factors, namely sediment ratio, shoreline migration speed (lake level descent speed), and inlet flow rate, were selected. Physical and numerical deposition simulation methods were used to analyze the deposition evolution of the shoal water delta and the influence of control factors. Quantitative analysis was conducted using indicators such as sediment aspect ratio, area, and front edge roughness. **[Conclusions and Discussions]** The analysis results show that: ① The physical and numerical simulation experiments of shoal water delta deposition show that sediment ratio, shoreline migration speed (lake level descent speed), and inlet flow velocity have a significant impact on the aspect ratio, area, and front roughness changes, which are key factors affecting the development of shoal water deltas. ② From a macro perspective, the results of physical and numerical simulations are consistent. Physical deposition simulations show that the inlet velocity of shoal water deltas is negatively correlated with aspect ratio, whereas numerical simulations provide a more detailed description of this. When the flow rate at the estuary is greater than 1000 m³/s but less than 1200 m³/s, the shoal water delta is in a period of morphological transformation, and the flow rate at the estuary is positively correlated with the aspect ratio of the shoal water delta. At speeds below 1000 m³/s and above 1200 m³/s, the flow velocity at the estuary is negatively correlated with the aspect ratio of shoal water deltas. Therefore, when using deposition simulations to predict the morphology and scale of shoal water deltas, low-cost numerical simulations can replace physical simulations for shoal water delta formation. ③ Physical and numerical simulations are different. Physical simulations indicate that there are two developmental mechanisms in shoal water deltas: the alternating growth of flower bodies and fan edges caused by the diversion of distributary channels and the alternating growth of flower bodies caused by the continuous diversion of river mouths. In numerical simulations, the growth of shoal water deltas is accompanied by breaches, abandonment of old distributary channels, and rapid

formation of new distributary channels and estuarine sandbars (lobes). These sandbars are mainly finger-shaped and rarely exhibit fan-shaped lobes. This study explores the combination of physical and numerical deposition simulations, which has important theoretical significance and practical value for promoting oil and gas reservoir exploration research. This study explores the integration of physical and numerical deposition simulations and has important theoretical significance and practical value in promoting exploration research of oil and gas reservoirs.

Key words: deposition; physical simulation; numerical simulation; shoal water delta; sediment ratio; shoreline migration; inlet discharge; delta front roughness

