

引用格式: 唐洪, 黄帅, 龙冠宇, 等. 2026. 关键边界条件对陆相辫状河三角洲沉积过程的控制作用——基于沉积数值模拟的探讨[J]. 沉积学报. DOI: 10.14027/j.issn.1000-0550.2026.015

TANG Hong, Huang Shuai, LONG GuanYu, et al. 2026. Control of Key Boundary Conditions on the Depositional Processes of Lacustrine Braided River Deltas: Insights from Sedimentary Numerical Simulation[J]. Acta Sedimentologica Sinica, DOI: 10.14027/j.issn.1000-0550.2026.015.

DOI: 10.14027/j.issn.1000-0550.2026.015

CSTR: 32268.14/j.cjxb.62-1038.2026.015

# 关键边界条件对陆相辫状河三角洲沉积过程的控制作用

## ——基于沉积数值模拟的探讨

唐洪<sup>1,2</sup>, 黄帅<sup>1</sup>, 龙冠宇<sup>1,3</sup>, 桂万铃<sup>1</sup>, 卫莹<sup>1</sup>, 刘博轩<sup>1</sup>, 陈家驹<sup>1</sup>

1.西南石油大学地球科学与技术学院, 成都 610500

2.天然气地质四川省重点实验室, 成都 610500

3.中国石油塔里木油田分公司, 新疆库尔勒 841000

**摘要** 【目的】辫状河三角洲是重要的油气储集体类型之一, 国内外学者围绕其沉积过程、演化特征及控制因素已开展了大量研究, 但对于关键边界条件如何定量控制陆相辫状河三角洲的生长演化及成因砂体特征, 仍需进一步探讨。【方法】采用 Delft3D 沉积数值模拟软件, 设计了针对入湖流量、盆地坡度、沉积物总浓度、砂泥比及湖平面变化共 5 类关键边界条件的单因素对比实验, 通过定量提取指标, 系统分析不同参数条件下的沉积特征差异。【结果】(1) 入湖流量与三角洲面积及砂体规模呈显著正相关, 流量越大, 分流河道分叉越活跃, 分流砂坝数量增多且顶部串沟较为发育; (2) 地形坡度主要控制沉积物的平面与垂向分配, 坡度增大使三角洲由宽缓型转为窄厚型, 抑制侧向分叉, 导致分流砂坝数量减少但厚度增大; (3) 沉积物总浓度升高在模拟演化中后期加速了三角洲前缘的快速扩展, 但较高浓度条件下前缘沉积加快, 易导致分流河道淤堵与废弃, 使河道分叉次数减少, 数量降低; (4) 砂泥比降低会促进细粒沉积物向远端运输, 导致顺物源延伸长度增加, 且河道形态更趋于发散; (5) 湖平面下降引发快速进积, 形成面积较大且河道下切较深、串沟较为发育的沉积体, 而湖平面上升则导致垂向加积与平面萎缩。【结论】强水动力与湖平面下降环境有利于形成串沟连通的优势砂体; 陡坡与高浓度背景倾向于形成厚度大且沿物源方向延展性较好的砂体。实验结果可为陆相盆地辫状河三角洲储层预测提供理论依据。

**关键词** 辫状河三角洲; 沉积数值模拟; 边界条件; 演化特征; 成因砂体

**第一作者** 唐洪, 女, 1973 年出生, 教授, 储层精细表征、开发地质学, E-mail: 737307945@qq.com

**中图分类号**: P618.13 **文献标志码**: A

## 0 引言

辫状河三角洲是陆源碎屑沉积体系中重要的粗碎屑三角洲类型 (McPherson *et al.*, 1987), 常见于陆相湖盆边缘或海陆过渡带, 沉积物以砂质—砂砾质为主, 单成因砂体复合叠置, 通常具有较好的孔渗条件与开发潜力, 是陆相盆地油气勘探与开发的重要储集体类型之一 (于兴河, 1995; 徐安娜等, 1998; 朱筱敏等, 2008, 2013)。辫状河三角洲的优势储集层往往受控于单成因砂体的展布、连通性及叠置样式 (张俊逸, 2024), 而这些又与沉积演化过程

收稿日期: 2026-01-12; 收修稿日期: 2026-04-01

基金项目: 国家科技重大专项 (2016ZX05058-001-006)

中的供水供砂条件、盆地地形坡度、粒度组成及湖平面变化等沉积控制因素密切相关（魏康强等，2017；何文军等，2018；王鹏飞等，2019；徐伟等，2019；张文彪等，2019；杜威等，2020；王韬等，2021；郭文建等，2024）。因此，厘清关键边界条件对三角洲形态演化与成因砂体构型的控制机制，是开展储层预测与开发方案优化的重要基础（Zhang *et al.*, 2016；Edmonds *et al.*, 2022）。

近年来，针对辫状河三角洲的研究主要依托露头解剖（于兴河等，1995；陈彬滔等，2015；朱卫红等，2016）、钻井与地震资料解释（何翠，2017；刘成林等，2022；刘伟新等，2022）以及物理水槽模拟实验（刘忠保等，2011；何艺玮等，2023）等手段，在沉积相组合、层序充填样式与砂体构型等方面取得了大量认识。然而，自然地质体系中多因素耦合作用普遍存在，单一因素的影响往往难以直接观测且难以剥离，导致不同控制因素对三角洲形态及砂体构型的作用强弱、敏感性差异仍缺乏可对比的定量约束（Feng *et al.*, 2019；Edmonds *et al.*, 2022；杜威等，2022；李恬恬等，2025）。尤其是在河流主导型环境下，分流河道与砂坝之间具有一定联系（Edmonds and Slingerland, 2007），使得控制因素与沉积响应之间的关系难以仅通过定性描述得到可靠刻画。

过程驱动的沉积数值模拟为解决上述问题提供了有效途径。通过设定边界条件、可控沉积参数并开展对比实验，可以在相对可复现的框架下定量评估关键因素对三角洲形态与内部构型的影响，从而揭示其演化机理与响应规律（黄秀等，2015；冯文杰等，2017；郭颖等，2024；李恬恬等，2025）。基于此，采用 Delft3D 泥沙水动力模型，构建从河道到湖盆的研究区模型，设计多组单因素实验，分别改变入湖流量、盆地坡度、沉积物总浓度、砂泥比及湖平面变化方式，提取三角洲面积与厚度、生长发育速率、分流河道数量与级次、分流砂坝数量与几何尺度等指标，系统刻画不同控制因素条件下的沉积特征差异。

## 1 方法

采用沉积水动力数值模拟开展单因素对比实验。以定量刻画不同控制因素对辫状河三角洲形态演化、沉积规模及砂体结构要素的影响。

### 1.1 Delft3D 框架与基本假设

采用 Delft3D-Flow 水动力板块开展辫状河三角洲沉积过程模拟，模型以浅水水动力控制方程组为基础，并通过交替方向隐式法（ADI）等数值离散方法求解水动力场，再运用泥沙搬运、沉积与冲刷计算实现床面演化。模型采用逐步迭代计算（图 1）：在每一步长内先更新边界条件并求解流场，再计算泥沙搬运与沉积/侵蚀量，最终将底床高程变化反馈到水

深并进入下一步迭代。

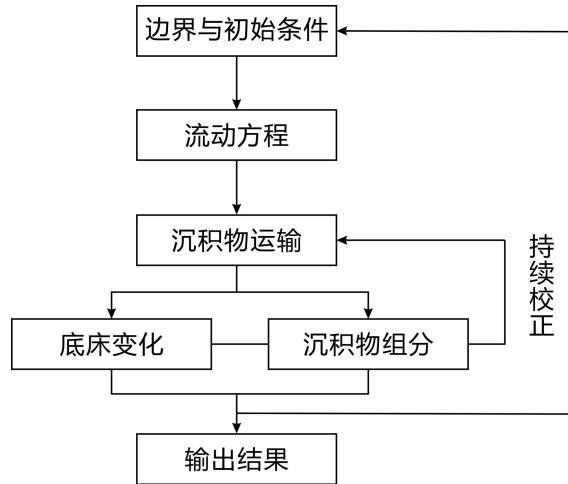


图1 Delft3D 模拟流程配置关系图

Fig.1 Configuration framework of the Delft3D simulation workflow

## 1.2 研究区设定与参数选取

本次模型研究区设置为：湖盆计算域为  $13\text{ km}\times 8\text{ km}$ ，初始水深由约  $4\text{ m}$  线性过渡至约  $12\text{ m}$ ，入湖河道布置在湖盆南部，宽约  $2\text{ km}$ 、长约  $5\text{ km}$ 、深约  $2\text{ m}$ ，湖盆西侧、东侧与北侧设置为开放边界（图2）。

基准模型 S0 参考前人对辫状河三角洲模拟设置方案（表1），入湖流量设为  $14\,000\text{ m}^3/\text{s}$ ，沉积物总浓度  $0.2\text{ kg}/\text{m}^3$ ，砂泥比为  $7:3$ ，砂质沉积物中值粒径为  $0.2\text{ mm}$ ，湖盆坡降为  $1\%$ ，初始湖平面为  $0\text{ m}$  且保持不变。床面糙率采用 Chezy 系数  $(30\text{ m}^{1/2}/\text{s})$ ，地貌演化系数取  $20$ ，并设置水平涡黏系数为  $0.0001\text{ m}^2/\text{s}$  与水平涡流扩散系数为  $0.001\text{ m}^2/\text{s}$ 。泥、砂两类沉积组分的干重参数分别取  $500\text{ kg}/\text{m}^3$  与  $1\,600\text{ kg}/\text{m}^3$ ，沉积组分比重取  $2\,650\text{ kg}/\text{m}^3$ 。

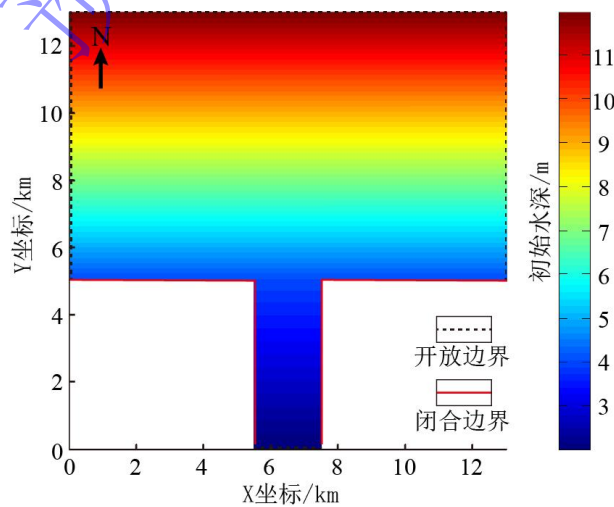


图2 辫状河三角洲模拟网格与初始水深分布（据唐洪等，2024 修改）

Fig.2 Computational grid and initial bathymetric configuration of the braided river delta (modified from Tang *et al.*, 2024)

表 1 辫状河三角洲沉积数值模拟部分参数（据唐洪等，2024 修改）

Table 1 Key parameters for the numerical simulation of braided river delta sedimentation (modified from Tang *et al.*, 2024)

参数项	设定值	参考值	单位
网格单元大小	25	—	m
网格规模	520×320+80×200	—	个
模拟时长	60	—	day
地貌演化系数	20	—	—
河道宽度	2	0.415~4.600	km
沉积组分干重	泥质: 500 砂质: 1 600	泥质: 500; 砂质: 1 600	kg/m <sup>3</sup>
沉积组分比重	2 650	2650	kg/m <sup>3</sup>
砂质沉积物中值粒径	0.2	0.5~1.3	mm
底床糙度—chezy 值	30	模型反复测试结果	m <sup>2/3</sup> /s
水动力计算时间步长	0.5	与水深、网格精度相关	min
临界深度	0.1	—	m
临近干网侵蚀系数	0.25	—	—
水平涡黏系数	0.000 1	参考前人经验参数	m <sup>2</sup> /s
水平涡流扩散系数	0.001	—	m <sup>2</sup> /s

注：“—”代表无固定参考标准值。

### 1.3 对比参数选取依据与实验设计

本文研究对象为陆相浅水辫状河三角洲，选取流量、初始坡降、沉积物总浓度、砂泥比和湖平面升降五类对比参数，主要参考现代辫状河沉积体系及前人相关数值模拟研究。需要强调的是，本文研究主要是理论实验，选取相关参数常见范围内典型有效数值进行实验，方便差异化对比。现代辫状河流量差异较大，典型辫状河多年平均流量多处于  $10^3\sim 10^4$  m<sup>3</sup>/s 量级，如 Kosi 河约为 2 236 m<sup>3</sup>/s，Brahmaputra 河约为 19 830 m<sup>3</sup>/s（Goswami, 1985; Sinha, 2014），则设计河流流量分别为 6 000、10 000 与 14 000 m<sup>3</sup>/s 的对照实验。黄旗海浅水辫状河三角洲发育于约 0.2°（约 3.5‰）的缓坡浅水环境（Shan *et al.*, 2018），因此本文设置 1‰~3‰ 坡度以表征浅水辫状河三角洲发育的缓坡地貌条件。前人统计表明，国内现代辫状河沉积物总浓度多为 0.13~0.79 kg/m<sup>3</sup>（唐洪等，2024），故本文以 0.1 kg/m<sup>3</sup> 和 0.4 kg/m<sup>3</sup> 分别代表相对低、相对高沉积物总浓度条件。以 7:3 作为基准砂泥比表征砂质辫状河三角洲的基本特征，并以 1:1 和 3:7 分别表征砂泥相当和泥质较高情形。湖平面升降参数则参考赣江浅水三角洲相关模拟研究进行设定（马福康等，2026）。

在此基础上，采用单因素分析法，在基准方案 S0 上分别改变入湖流量、初始坡降、沉积物总浓度、砂泥比及湖平面升降方式，形成 S0~S11 共 12 组实验方案（表 2）。

表 2 辫状河三角洲沉积控制因素实验组别参数设置表

**Table 2 Experimental parameter configurations for controlling factors of braided river delta sedimentation**

序号	入湖流量/(m <sup>3</sup> /s)	砂:泥	沉积物总浓度/(kg/m <sup>3</sup> )	湖平面/m	初始底形坡降/%
S0	14 000	7:3	0.2	0 (不变)	1
S1	10 000	7:3	0.2	0 (不变)	1
S2	6 000	7:3	0.2	0 (不变)	1
S3	14 000	7:3	0.2	0 (不变)	2
S4	14 000	7:3	0.2	0 (不变)	3
S5	14 000	7:3	0.1	0 (不变)	1
S6	14 000	7:3	0.4	0 (不变)	1
S7	14 000	3:7	0.2	0 (不变)	1
S8	14 000	1:1	0.2	0 (不变)	1
S9	14 000	7:3	0.2	0~4 (上升)	1
S10	14 000	7:3	0.2	0~2 (上升)	1
S11	14 000	7:3	0.2	0~4 (下降)	1

## 2 指标与识别方法

为定量刻画不同控制因素条件下辫状河三角洲的生长演化及单成因砂体发育差异,基于Delft3D输出的沉积厚度结果,进行量化的识别与统计。为保证不同方案之间的可比性,所有模型均在相同的输出时刻(step150、step300、step500、step700、step900、step1150)提取指标,并在统一网格分辨率(25 m×25 m)下进行计算。

### (1) 三角洲平面范围的判别

定义三角洲沉积体网格集合为 $\Omega_{\Delta}$ 累计沉积厚度超过阈值的区域:

$$\Omega_{\Delta} = \{i | T_i \geq T_0\}$$

式中:  $T_0$ 为沉积体识别沉积厚度阈值,  $T_0$ 可取 5 m、7 m、8 m;  $T_i$ 为实际沉积厚度。

### (2) 三角洲面积、长度与宽度

三角洲沉积面积定义为:

$$A_{\Delta} = \sum_{i \in \Omega_{\Delta}} \Delta A$$

三角洲“顺物源长度” $L_{\Delta}$ 与“垂直物源宽度” $W_{\Delta}$ 以入湖河道中心线方向为主轴定义。建立沿 x 轴方向坐标 s (顺物源) 与 y 轴方向坐标 n (垂直物源), 则:

$$L_{\Delta} = \max (s_i) - s_0, i \in \Omega_{\Delta}$$

$$W_{\Delta} = \max (n_i) - \min (n_i), i \in \Omega_{\Delta}$$

式中:  $S_0$ 为入湖口断面位置。

### (3) 分流级次

以入湖主干河道为 0 级，每发生一次分汊，下游各分支级次在母河道级次基础上加 1；所有河道的最大级次作为该时刻分流级次  $O_{ch}$ ：

$$O_{ch} = \max(\text{各河段级次})$$

### 3 各因素影响下的辫状河三角洲生长演化特征与定量表征

不同关键边界条件下，辫状河三角洲在平面形态、沉积规模及演化速率方面具有差异性。对各模型相同典型时刻（step150、step300、step500、step700、step900、step1150）提取三角洲沉积体范围与形态参数，重点对比三角洲沉积面积、顺物源长度及垂直物源宽度等指标。

#### 3.1 基准模型（S0）演化过程与阶段划分

以基准模型 S0 为参照，辫状河三角洲的生长演化总体呈现出由早期快速前积扩展、中期平原持续生长与砂体连片发育以及晚期发育迟缓与局部改造的演化特征（唐洪等，2024）。早期阶段（step0~300）以入湖口附近快速堆积与水下初始沉积体形成为主，表现为  $A_{\Delta}$  与  $L_{\Delta}$  的快速增长；中期阶段（step300~700）三角洲前缘逐渐由扇状向朵状过渡，平面轮廓更为复杂，局部出现分汊与摆动控制的前缘展布差异，串沟水道常发育在砂坝顶部，为窄浅型的冲沟，主要用于连通砂体两侧水流，在规模与流量上与分流河道有主要区别（唐洪等，2024）。三角洲平原发育串沟水道，部分串沟演化为新的分流河道。晚期阶段（step700~1150）由前积扩展转为前缘缓慢推进和平原区加积，三角洲整体增长速率减缓。

#### 3.2 不同流量条件下辫状河三角洲生长发育特征

流量变化显著影响三角洲的沉积规模、厚度分布及前缘形态。厚度平面图对比表明（图 3），在相同外部条件下三模型均经历由扇状向朵状形态演化的过程，但流量越大，三角洲前缘朵体特征越清晰；流量较小的 S2 朵体特征不明显，整体更接近扇状展布。同时，流量较大时分流通道更为活跃、不易废弃，三角洲平面展布更趋于对称。

在同一时期流量越大，沉积厚度整体越大且厚度高值区更发育。以 step900 为例，S0 最大沉积厚度大于 8 m，且厚度超过 5 m 的区域约占三角洲整体面积的 60%；S1 最大厚度约 6 m，厚度超过 5 m 的区域约占 30%；S2 的最大厚度不超过 5 m，整体较薄（图 3）。这表明更高的入湖流量不仅增强了输沙能力，也提高了近端堆积与持续改造的强度，使得厚度高值区更集中、更连续。

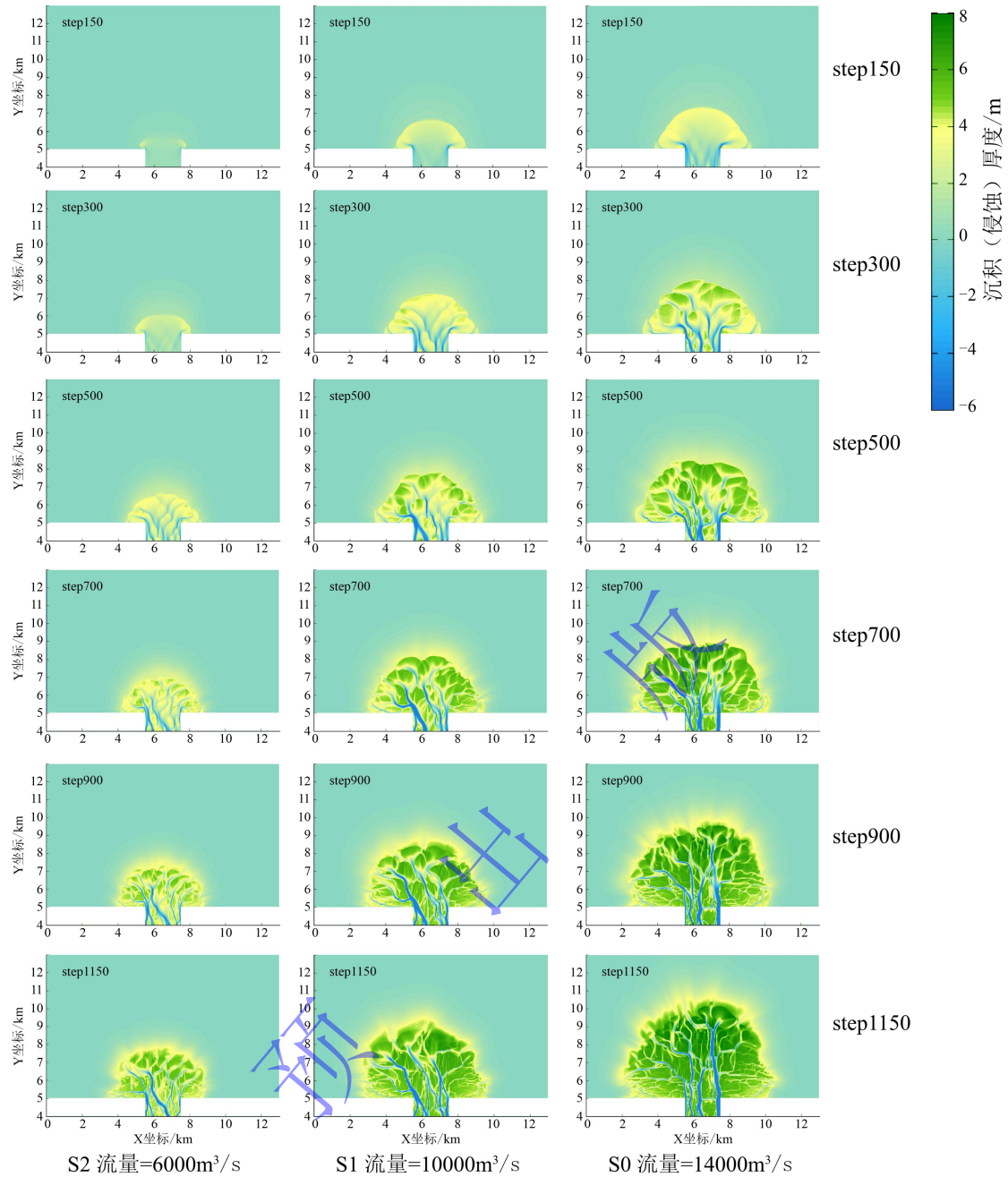


图3 不同流量的辫状河三角洲沉积厚度变化图

Fig.3 Sediment thickness variations in braided river delta under different discharge conditions

定量指标特征显示（图4），三角洲面积 $A_{\Delta}$ 与入湖流量呈明显正相关（图4a）。早期（step150）S0的水下初始沉积体面积约为S1的2倍，而流量较小的S2在该时期水下初始沉积体几乎尚未发育。随着三角洲持续演化，相同阶段内流量越大，面积增长速率越快。长宽指标方面（图4b, c），尽管三模型流量不同，但三角洲垂直物源宽度始终大于顺物源长度，且宽度增长速率随时间衰减较快，而长度增长相对更稳定。

入湖流量增强可显著提高三角洲的沉积规模与堆积强度，并强化前缘朵体特征，同时更高流量条件下分流通道更活跃，整体展布趋向更对称。

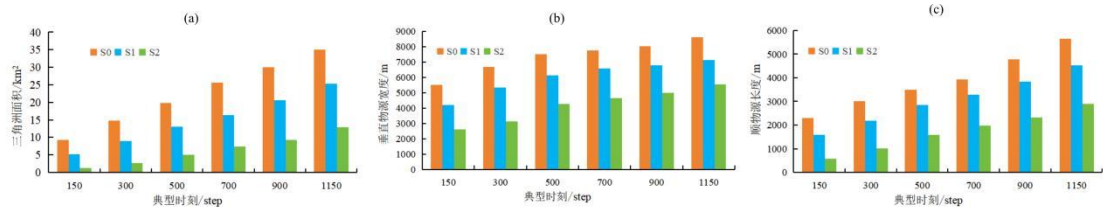


图4 不同流量模型典型时刻辫状河三角洲生长发育特征

(a) 不同流量模型典型时刻三角洲面积变化；(b) 不同流量模型典型时刻三角洲垂直物源宽度变化；(c) 不同流量模型典型时刻三角洲顺物源长度变化

Fig.4 Growth and development characteristics of braided river delta at representative time points under different discharge conditions

### 3.3 不同地形坡度条件下辫状河三角洲生长发育特征

已有研究表明,盆地水深作为重要的下游边界条件,可通过影响可容纳空间、水动力扩散及河道稳定性,显著调节三角洲形态演化。因此,本文讨论的地形坡度应理解为坡度变化与水深分布、可容纳空间以及湖平面条件共同作用下的综合影响(Nota *et al.*, 2024; Wang *et al.*, 2019)。厚度平面图表明(图5),坡度对平面展布的对称性影响相对较弱,但对平面形态影响明显,坡度增大后,三角洲形态不再是从扇状到朵状的转变,而是向边缘不规则扇状转变,坡度越大,不规则形态越明显。

坡度越大,沉积越趋于近端集中并形成更厚的堆积体。以 step900 为例, S4 最大厚度大于 12 m, 厚度超过 7 m 的区域约占三角洲整体面积的 60%; S3 最大厚度约 11 m, 厚度超过 7 m 的区域约占 45%; 而 S0 厚度超过 7 m 的区域约占 25% (图 5)。该结果表明坡度增大有利于加大三角洲沉积厚度,但这种加厚往往伴随着平面范围的收缩。

面积与长宽统计进一步验证了上述面积与厚度关系(图6)。三角洲面积 $A_{\Delta}$ 与坡度呈负相关(图6a),坡度越大,三角洲面积越小且增长速率越慢;在 step1 150 时, S0 的三角洲面积近乎为 S4 的 2 倍。长宽指标方面(图6b, c),三模型均表现为宽度大于长度,但后期宽度增长减慢、长度增长相对稳定,在坡度变陡条件下,侧向扩展更受限,沉积体更倾向于沿主水动力方向集中推进。

坡度增大使三角洲沉积更集中、厚度显著增大,但平面面积减小且平面形态更不规则,缓坡背景更易形成大面积、相对连续的沉积体。

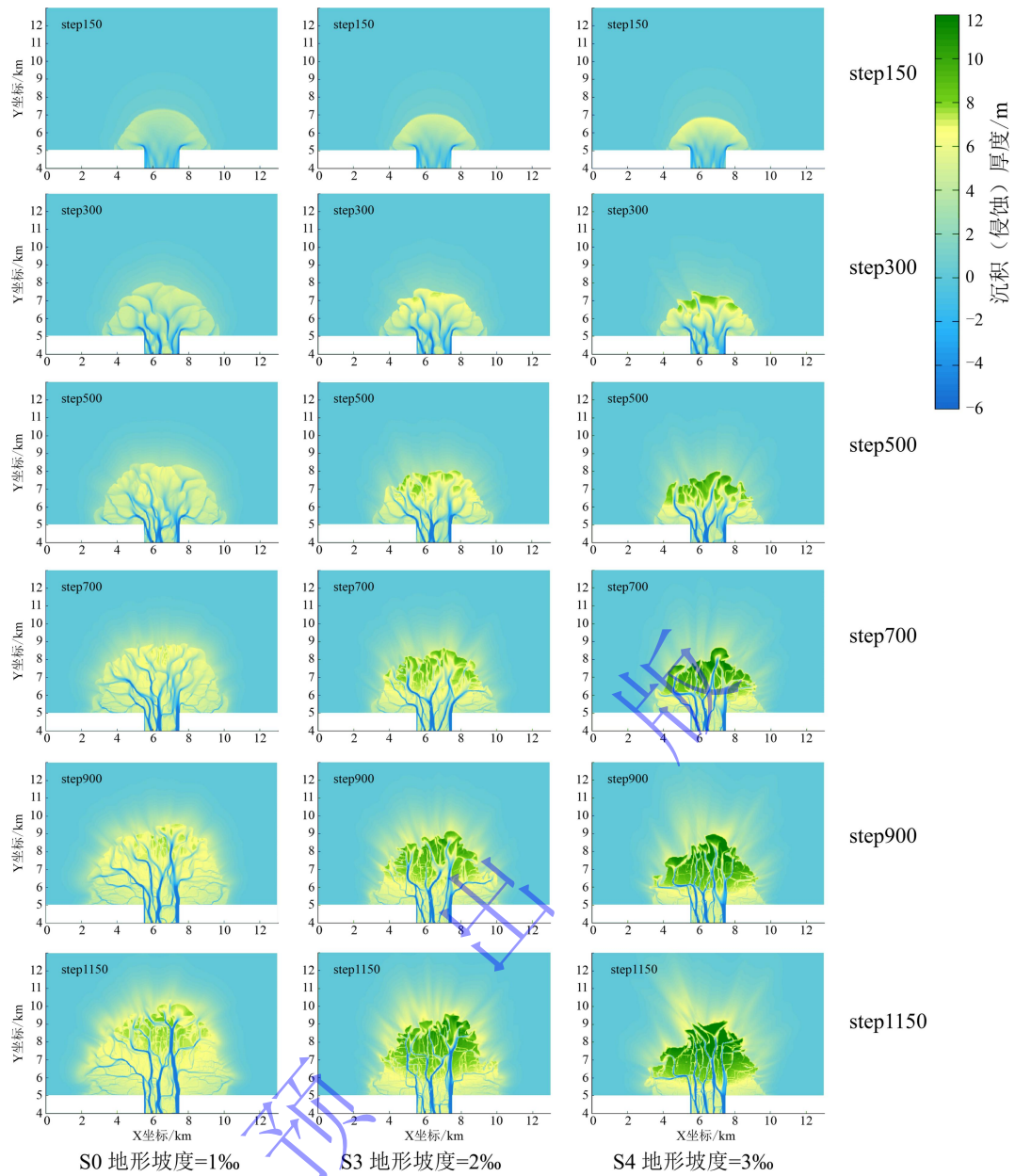


图5 不同地形坡度的辫状河三角洲沉积厚度变化图

Fig.5 Sediment thickness variations in braided river delta under different topographic gradients

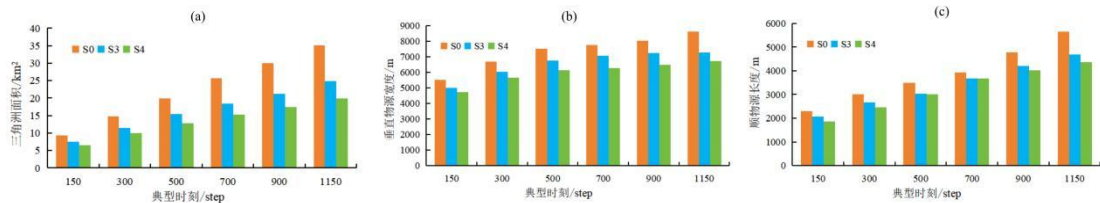


图6 不同坡度模型典型时刻辫状河三角洲生长发育特征

(a) 不同坡度模型典型时刻三角洲面积变化； (b) 不同坡度模型典型时刻三角洲垂直物源宽度变化； (c) 不同坡度模型典型时刻三角洲顺物源长度变化

Fig.6 Growth and development characteristics of braided river delta at representative time points under different topographic gradients

### 3.4 不同沉积物总浓度条件下辫状河三角洲生长发育特征

沉积物总浓度主要控制单位时间内的供砂供泥强度，从而影响三角洲扩展速率及前缘形

态。厚度平面图显示（图 7），三模型整体仍呈扇状向朵状演化的趋势，但浓度越低，三角洲整体形态越接近扇状；浓度越高，前缘朵体特征更明显。浓度对早期对称性影响相对有限，但浓度较高时，后期三角洲对称性有变差趋势（图 7），表明高浓度条件下沉积更易在优势路径与优势前缘区段集中，从而放大平面展布差异。

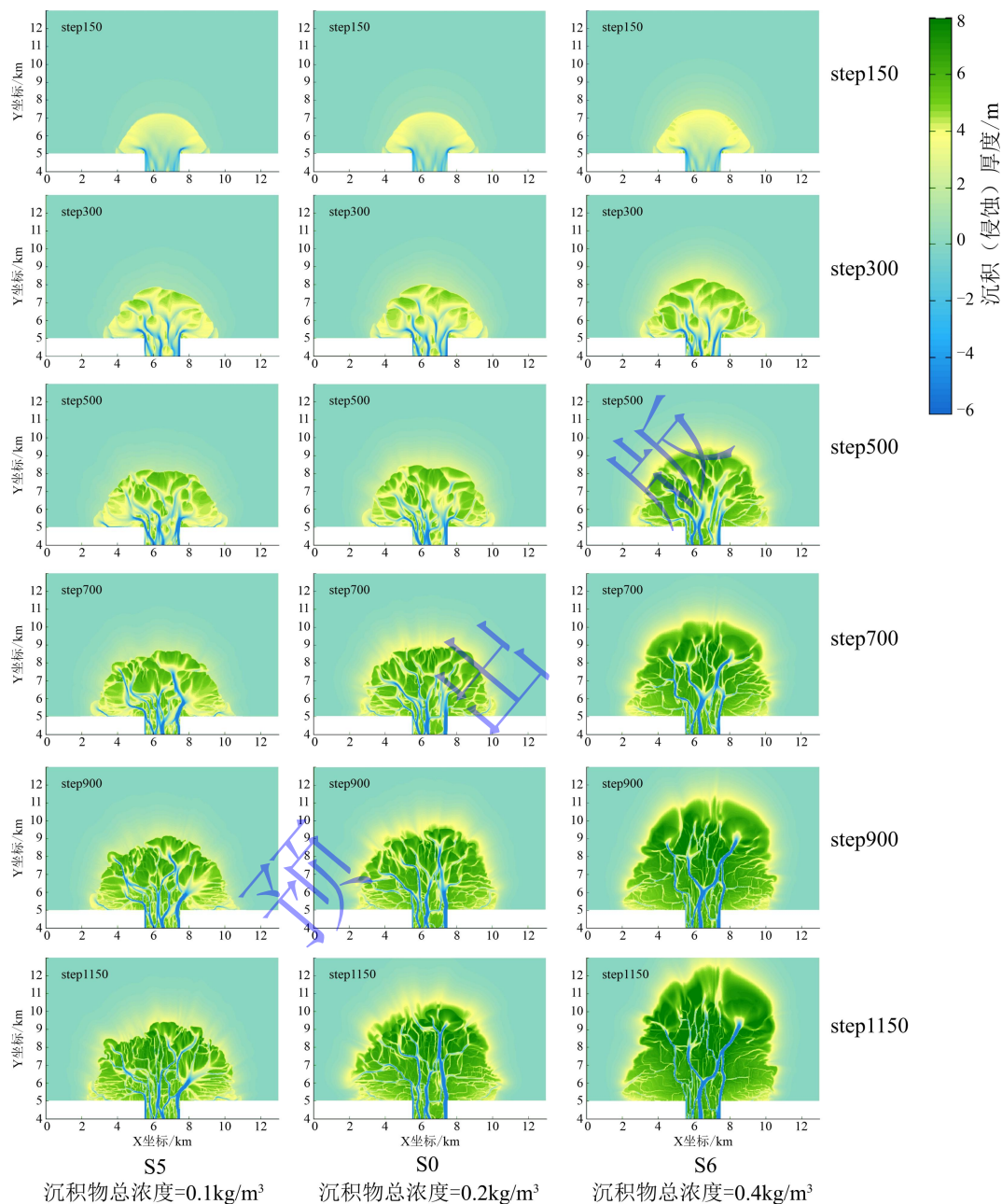


图 7 不同沉积物总浓度的辫状河三角洲沉积厚度变化图

Fig.7 Sediment thickness variations in braided river delta under different total sediment concentration

总浓度越高，沉积厚度越大且厚度高值区占比提高。以 step900 为例，S0 最大厚度大于 8 m，厚度超过 8 m 的区域约占 15%；高浓度模型 S6 最大厚度亦大于 8 m，厚度超过 8 m 的区域约占 50%，体现出明显的加厚效应；低浓度模型 S5 最大厚度不超过 8 m，整体偏薄（图 7）。

面积与长宽统计表明（图 8），三角洲面积 $A_{\Delta}$ 与沉积物总浓度呈正相关（图 8a）。在 step300 之前各模型面积差异不显著，而 step300 之后 S6 的增长速率明显加快，导致中后期面积显著大于低浓度模型。长宽对比（图 8b, c）显示，不同浓度条件下三角洲宽度差异不大，而沉积规模差距更多体现于顺物源长度 $L_{\Delta}$ ，浓度越高，细粒悬浮载荷所占比例增加，细粒沉积物更易搬运至更远位置沉积，从而推动三角洲在顺物源方向的延伸。

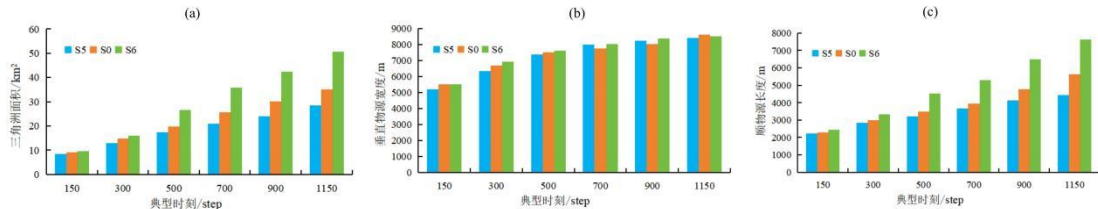


图 8 不同沉积物总浓度模型典型时刻辫状河三角洲生长发育特征

(a) 不同沉积物浓度模型典型时刻三角洲面积变化；(b) 不同沉积物浓度模型典型时刻三角洲垂直物源宽度变化；(c) 不同沉积物浓度模型典型时刻三角洲顺物源长度变化

Fig.8 Growth and development characteristics of braided river delta at representative time points under different total sediment concentration

沉积物总浓度提高可增强三角洲的扩展速率与沉积规模，并提高厚度高值区占比，其影响在中后期更易显现。

### 3.5 不同砂泥比条件下辫状河三角洲生长发育特征

砂泥比反映沉积物粒度组成与黏性组分比例，进而影响输运方式与沉积展布形态。厚度平面图表明（图 9），不同砂泥比条件下三角洲均经历形态转变。砂质占比高时，三角洲形态表现为扇状向朵状过渡；泥质占比高时，三角洲在顺物源方向出现更大范围的细粒铺展，整体更趋于多边形/不规则扩展。同时，泥质含量越高，三角洲对称性越差、轮廓变化更强（图 9），表现为形态更不稳定。

沉积厚度方面，在同一时期，泥质占比越高，整体沉积厚度越大。以 step700 为例，S7 最大厚度大于 8 m，厚度超过 8 m 的区域约占 30%；S8 最大厚度亦大于 8 m，但厚度超过 8 m 的区域约占 10%；基准模型 S0 最大厚度约 7 m（图 9）。这一差异表明，泥质组分增加不仅能促进远端铺展，也可能增强平原区的充填与加厚，使厚度分布更为离散。

面积与长宽统计结果显示（图 10），砂泥比与三角洲面积呈负相关（图 10a）。泥质含量越高，三角洲面积越大且增长速率略快。长宽对比（图 10b, c）同样表现为宽度差异不大、长度差异明显，泥质含量越高，细粒悬浮沉积贡献越大，三角洲顺物源长度增长更显著。

增加泥质组分可显著扩大三角洲平面范围并增强顺物源延伸，同时会使厚度分布更离散、轮廓更不规则；砂质占优条件下三角洲形态更接近典型扇—朵过渡且展布相对稳定。

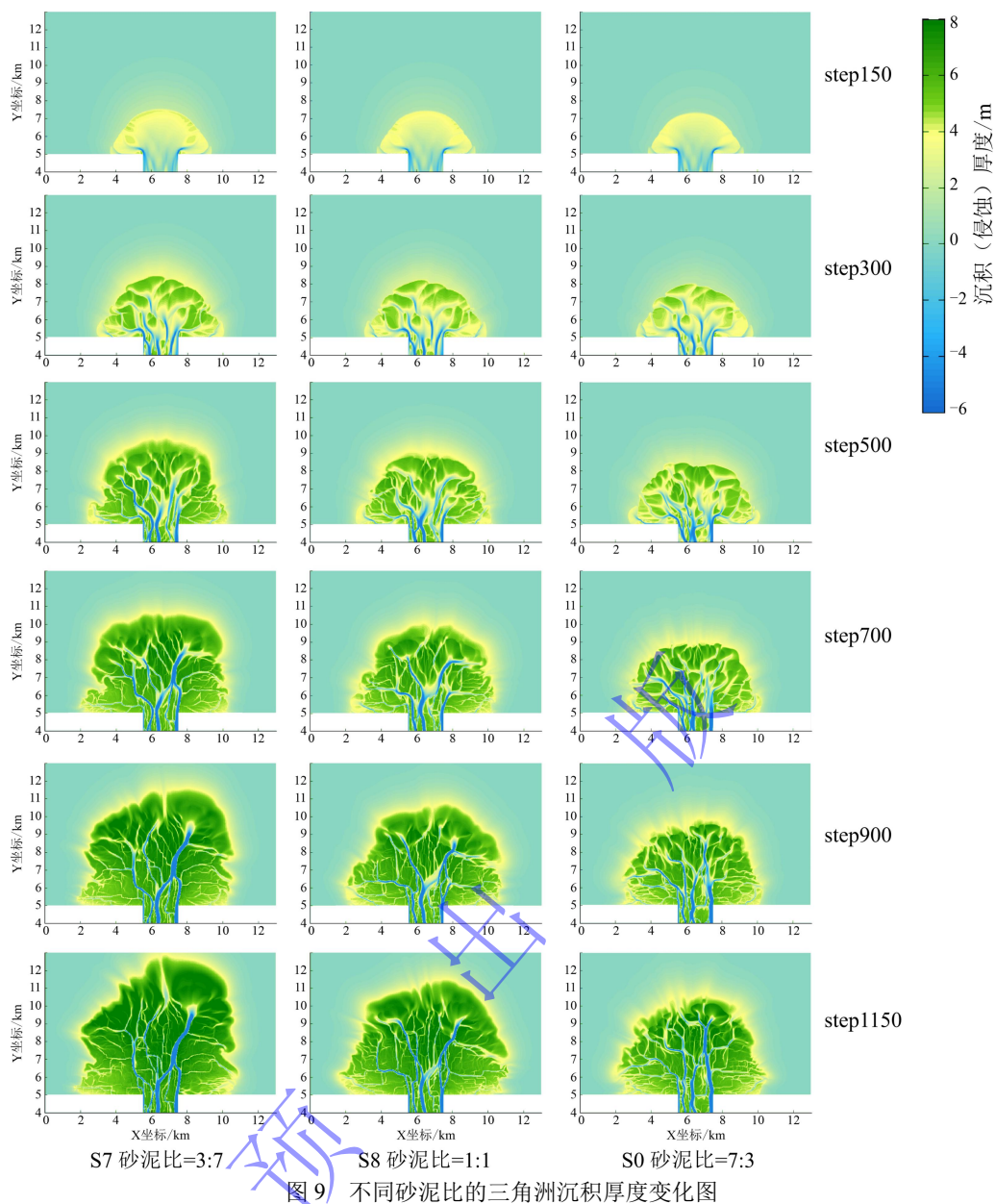
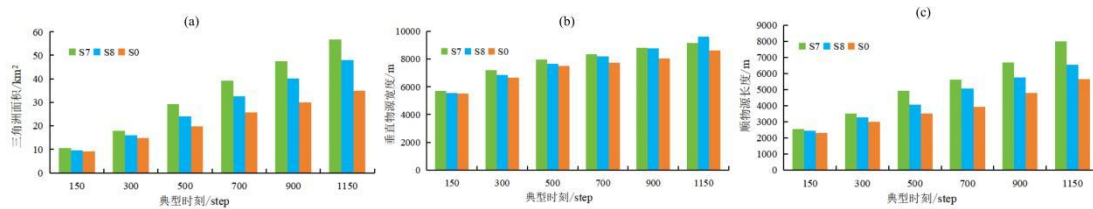


Fig.9 Sediment thickness variations in braided river delta under different sand-mud ratios



(a) 不同砂泥比模型典型时刻三角洲面积变化；(b) 不同砂泥比模型典型时刻三角洲垂直物源宽度变化；(c) 不同砂泥比模型典型时刻三角洲顺物源长度变化

Fig.10 Growth and development characteristics of braided river delta at representative time points under different sand-mud ratios

### 3.6 不同湖平面升降变化条件下辫状河三角洲生长发育特征

湖平面升降变化直接控制可容空间的变化，是影响三角洲前积与垂向加积的关键因素。

厚度平面图对比显示（图 11），湖平面上升条件下三角洲整体形态仍表现为扇状向朵状演化，且上升速度越快形态越趋稳定；湖平面下降条件下，三角洲由扇状逐渐发育为朵状，晚期进一步向舌状展布转变（图 11）。在同一时期，湖平面上升速度越快，沉积厚度越大；湖平面下降条件下同期沉积厚度明显更薄。以 step900 为例，S9 最大厚度约 9 m，厚度超过 7 m 的区域约占 50%；S10 最大厚度约 8 m，厚度超过 7 m 的区域约占 30%；S11 最大厚度不超过 6.5 m（图 11）。这表明湖平面上升增大可容空间，沉积更易以垂向加厚方式消耗可容空间；相反，湖平面下降导致可容空间迅速减小，三角洲更倾向于通过前积扩展获得新的沉积空间，从而表现为面积大、厚度相对薄的特征。

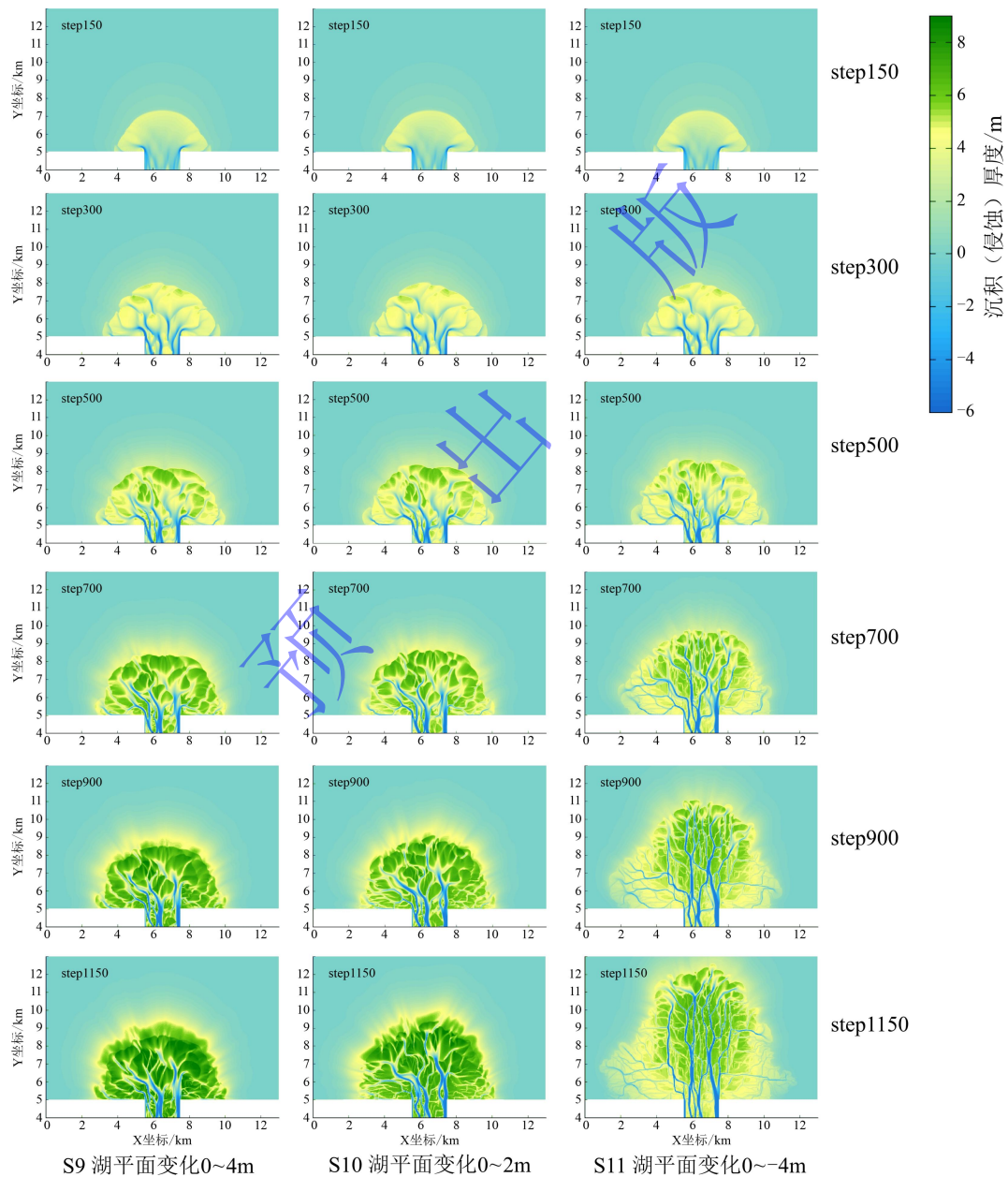


图 11 不同湖平面升降变化下三角洲沉积厚度变化图

Fig.11 Sediment thickness variations in braided river delta under different lake level fluctuations

面积与长宽统计进一步表明（图 12），湖平面下降时三角洲沉积面积最大，而湖平面上升时面积较小，且上升速度越快面积越小（图 12a）。在 step1150 时，S11 的面积近乎为 S9 的 2 倍。长宽变化方面（图 12b, c），湖平面下降使三角洲宽度与长度均以较快速度增长；湖平面上升时宽度与长度仍有小幅增长，但增长幅度较小。

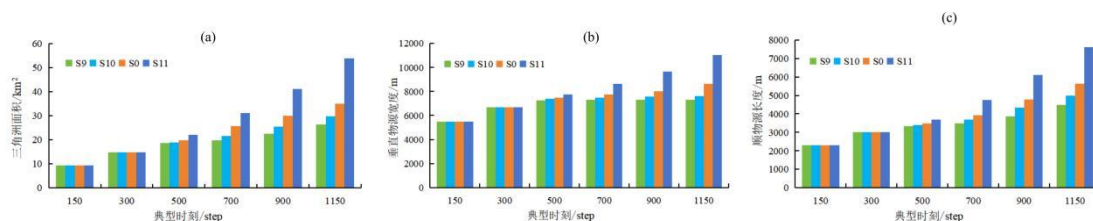


图 12 不同湖平面升降模型典型时刻辫状河三角洲生长发育特征

(a) 不同湖平面模型典型时刻三角洲面积变化；(b) 不同湖平面模型典型时刻三角洲垂直物源宽度变化；(c) 不同湖平面模型典型时刻三角洲顺物源长度变化

Fig.12 Growth and development characteristics of braided river delta at representative time points under different lake level fluctuations

湖平面上升强化垂向加积、抑制平面扩展；湖平面下降强化前积扩展、形成更大平面范围，并表现为晚期前缘由朵状向舌状过渡。

#### 4 成因砂体发育特征

三角洲生长发育特征的差异本质上是由内部成因砂体的叠加样式决定的。为了揭示储层非均质性的成因，需进一步解析各控制因素对成因砂体关键构型要素的差异化控制。辫状河三角洲内部单成因砂体类型多样，其中分流河道与分流砂坝是作为辫状河三角洲储层最关键的两大类成因砂体单元。分流河道反映优势水动力通道特征，其数量与分流级次可表征分流河道网络复杂度；分流砂坝几何尺度与顶部串沟水道发育程度对砂体内部构型与连通性具有直接指示意义。以分流河道与分流砂坝两类主要单成因砂体，对比五类控制因素对单成因砂体发育特征的差异。

##### 4.1 流量对成因砂体的控制

不同流量条件下，三角洲水道化出现时间存在明显差异。流量越大，分流河道形成越早，三角洲越早出现明显的水道化特征：S0 于 step150~200、S1 于 step200~300、S2 于 step400~500 开始形成明显分流河道，表示较强水动力有利于分流河道发育（图 13a）。从所选典型时刻对比看，较大流量模型在多数阶段通常表现出更多的活跃分流河道和较高的分流级次，其中 S0 在 step700 时河道数量最多达 24 条、最高分流级次为 4 级；S1 和 S2 在 step900 时分别达到 18 条和 16 条，最高分流级次均为 3 级；至 step1150 时，三者河道数量分别降至 20 条、16 条和 15 条。结合分流水道的自旋回理论推断（Jerolmack and Mohrig, 2007; Feng *et al.*,

2019)，这种典型时刻提取的晚期分流河道数量减少现象，是由于砂坝加积导致的局部地形梯度改变与水流阻碍（Edmonds and Slingerland, 2007），引发了水道的决口改道、旧河道充填废弃与新河道分叉（Hoyal and Sheets, 2009）。这表明，晚期部分不活跃河道的废弃与数量降低，本质上是由三角洲分流河道内部的自旋回机制形成的阶段性演化过程。

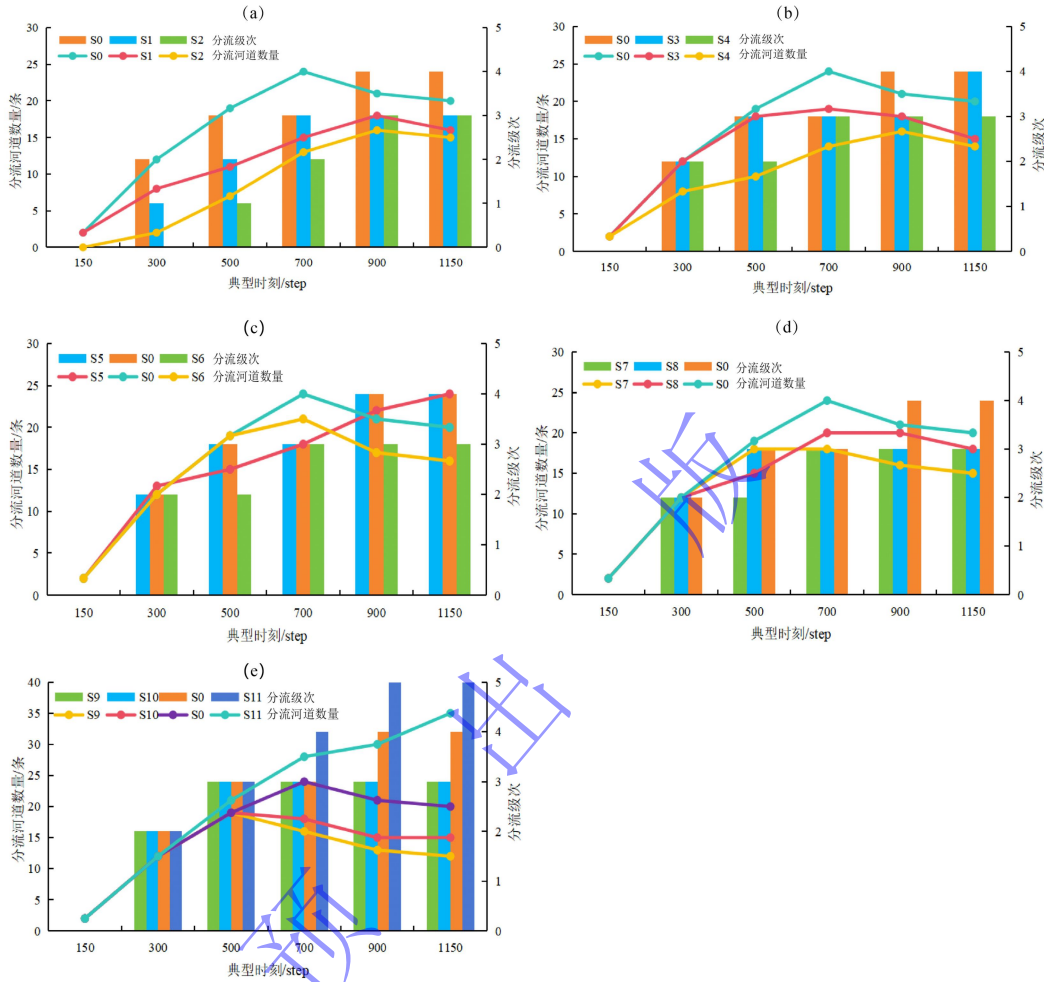


图 13 不同模型典型时刻分流河道数量和分流级次变化

(a) 不同流量模型典型时刻分流河道数量和分流级次变化；(b) 不同地形坡度模型典型时刻分流河道数量和分流级次变化；(c) 不同沉积物浓度模型典型时刻分流河道数量和分流级次变化；(d) 不同砂泥比模型典型时刻分流河道数量和分流级次变化；(e) 不同湖平面模型典型时刻分流河道数量和分流级次变化

Fig.13 Variations in the number and hierarchy of distributary channels at representative time points in different models

流量增大显著增加分流砂坝数量与规模，并增强后期侵蚀改造强度（表 3）。基准模型 S0 分流砂坝平面形态多样，厚度 1.9~8 m，长度 325~2 099 m，宽度 102~1 400 m，且砂坝顶部串沟水道大量发育。S1 砂坝数量较 S0 偏少，厚度 1.8~7.5 m，长度 289~2 010 m，宽度 110~1 326 m，串沟水道较多发育。S2 流量最小，砂坝数量最少，厚度 0.8~6 m，砂坝尺度整体偏小，串沟水道发育最少。

高流量条件下，分流河道分叉更活跃、河道数量与分流级次更易增殖，对应河口区更易

形成多处砂坝堆积。同时更强的水动力使砂坝顶面更易被切割形成串沟水道，串沟又可能在局部演化为新的分流通道，从而形成河道增殖、砂坝增多、串沟增强的正反馈。低流量条件下，上述正反馈整体减弱，砂坝数量少且顶面改造弱。

表 3 不同流量条件下的分流砂坝几何参数

Table 3 Geometric parameters of diversion sand dams under different discharge conditions

序号	平面形态	厚度/m	宽度/m	长度/m	串沟水道发育情况
S0	纺锤状、叶状和不规则状	1.9~8	102~1 400	325~2 099	大量发育，单一砂坝顶部发育 1~4 条
S1	纺锤状、叶状和不规则状	1.8~7.5	110~1 326	289~2 010	较多发育，单一砂坝顶部发育 1~4 条
S2	叶状、不规则状	0.8~6	90~1 100	900~1 150	少量发育，单一砂坝顶部发育 1~3 条

#### 4.2 坡度对成因砂体的控制

坡度较小时分流河道数量较多、分流级次较高，河道总体较为发散、树杈状特征明显；坡度较大时河道数量与级次明显降低，优势通道更集中于顺流方向，三角洲两侧分流河道发育受限（图 13b）。

坡度增大使砂坝呈现数量减少、厚度增大以及串沟减弱的特征（表 4）。缓坡模型 S0 砂坝数量最多且串沟水道大量发育；坡度增大的 S3 砂坝数量偏少、厚度 2.1~11 m，串沟发育较好；坡度最大模型 S4 砂坝数量最少，但厚度可达 2.4~13 m，串沟发育相对较差。

表 4 不同地形坡度下的分流砂坝几何参数

Table 4 Geometric parameters of diversion sand dams under different topographic gradients

序号	平面形态	厚度/m	宽度/m	长度/m	串沟水道发育情况
S0	纺锤状、叶状和不规则状	1.9~8	102~1 400	325~2 099	大量发育，单一砂坝顶部发育 1~4 条
S3	纺锤状、叶状和不规则状，不规则状居多	2.1~11	115~1 167	332~1 980	较多发育，单一砂坝顶部发育 1~4 条
S4	叶状、不规则状	2.4~13	110~1 182	320~2 010	少量发育，单一砂坝顶部发育 1~3 条

坡度增大导致沉积更集中、地形约束更强，优势通道集中并抑制侧向分汊；河口区砂坝更倾向于加厚而非多点分散发育，砂坝顶面被切割形成串沟的机会与程度降低。整体呈现成因砂体更集中，少通道、少砂坝、砂坝更厚以及串沟偏弱。

#### 4.3 沉积物总浓度对成因砂体的控制

不同浓度模型早期河道特征相近，但在晚期出现分化（图 13c）：高浓度模型分流河道数量较少、分流级次较低，主流河道相对更宽且更集中；低浓度模型分流河道数量较多并持续增加，未出现明显数量拐点，河道总体更分散。

高浓度条件下沉积加厚与阻挡作用增强，分流通道更难持续分汊，砂坝顶面串沟水道较不发育；低浓度条件下阻挡作用弱，砂坝顶面串沟更易下切并可能形成新的分流河道，从而

使新增河道数可超过废弃河道数，表现为河道数量持续增加（图 13c）。

总浓度增大，本质上增强了单位时间沉积加厚与地形约束，进而通过沉积障碍增强使砂坝更集中来影响成因砂体；总浓度降低则相反，更利于维持分汊活跃与多通道格局。

#### 4.4 砂泥比对成因砂体的控制

不同砂泥比条件下的分流河道演化在早期相似，自 step 500 起差异逐渐显现（图 13d）。总体上砂泥比越低，分流河道数量越少、分流级次越低，主通道相对更宽且更集中；砂泥比越高分流河道数量与级次更高，河道网络更分散，树杈状特征更明显。

泥质占比提高往往伴随更强的平原充填与披覆作用，成因砂体更易平原化，砂坝顶面串沟水道相对不发育；砂质占优时，优势通道更易反复切割迁移，砂坝顶面更易被改造并形成串沟，从而与更复杂的分流河网相匹配。

砂泥比通过改变沉积物的输运方式与沉积体加厚的效率，进而控制河道分汊与砂坝改造的组合：泥质增加倾向于形成少通道、低级次、弱串沟的相对稳定特征；砂质增加则倾向于形成多通道、高级次、强改造的更活跃特征。

#### 4.5 湖平面升降变化对成因砂体的控制

湖平面升降变化对河道的的影响较大（图 13e）：湖平面下降使分流河道数量快速增多且在晚期仍持续增加，河道向四周方向发散延伸，分流级次较高；湖平面上升使分流分汊作用减弱，分流河道数量明显减少，且上升速度越快河道数量越少。

湖平面升降变化同时强烈控制砂坝几何形态与改造方式（表 5）。湖平面上升砂坝数量相对较少，厚度偏大但平面规模受限，砂坝顶面串沟水道发育很少或相对较少；湖平面下降砂坝数量最多，砂坝厚度较薄但平面尺度显著增大，砂坝拼接使不规则形态增多，且串沟水道大量发育、分布范围广。

表 5 不同湖平面升降条件下的分流砂坝几何参数

Table 5 Geometric parameters of diversion sand dams under different lake level fluctuations

序号	平面形态	厚度/	宽度/	长度/	串沟水道发育情况
S0	纺锤状、叶状、不规则状	1.9~8	102~1 400	325~2 099	大量发育，单一砂坝顶部发育 1~4 条
S9	叶状、不规则状	2.1~9	124~1 520	205~1 750	少量发育，单一砂坝顶部发育 1~2 条
S10	纺锤状、叶状、不规则状	1.9~9	105~1 500	260~1 920	少量发育，单一砂坝顶部发育 1~3 条，原河口处较多
S11	纺锤状、叶状、不规则状	0.8~6.5	90~1 430	230~3 650	大量发育，单一砂坝顶部发育 1~4 条，分布范围广

湖平面上升增大可容空间，成因砂体更倾向于垂向加积，表现为河道分汊受限、砂坝更厚但数量少、串沟弱；湖平面下降导致可容空间快速减小，成因砂体更倾向于前积特征，表现为河道增殖与发散、砂坝更易拼接并被切割形成大量串沟。

## 5 讨论

## 5.1 与前人研究结果对比

通过 Delft3D 数值模拟揭示了关键边界条件对辫状河三角洲宏观形态与微观砂体构型的控制规律, 所得结果与经典沉积学模型及野外露头研究具有较好的对应关系, 同时也量化了一些传统定性描述难以捕捉的特征。

(1) 前人基于水槽实验和现代沉积考察认为, 强水动力条件有利于形成朵叶状三角洲, 并伴随频繁的河道分汊与改道 (魏康强等; 2017; 李恬恬等, 2025)。模拟结果证实, 随着入湖流量增加, 三角洲前缘朵体特征愈发清晰, 分流河道级次与数量显著增加, 分流砂坝的形成与切割作用增强 (图 3, 13)。对于坡度的影响, 陡坡背景下受重力流与底床摩擦影响, 沉积物易在近端快速卸载堆积 (Postma, 1900; McPherson *et al.*, 1987)。数值模拟进一步量化了这一过程, 坡度由 1% 增至 3% 时, 三角洲面积减小约 50%, 但沉积中心厚度显著增加 (图 5), 且平面形态由典型的朵状和扇状转变为不规则状。

(2) 关于沉积物浓度与粒度变化, Caldwell and Edmonds (2014) 等指出, 细粒沉积物能通过稳定河岸来抑制河道游荡, 促进顺直河型的形成。模拟进一步表明, 高泥质含量不仅会降低三角洲平面形态的对称性, 还会显著增加其顺物源延伸长度 (图 9, 10)。同时这与 Wright (1977) 提出的细粒物质输运效率更高, 易被搬运至远端的观点一致。在现代沉积体系中亦有体现, 如洞庭湖三角洲在泥质含量高的背景下, 三角洲平面形态表现出物源方向呈现较强的延伸特征 (尹太举等, 2012)。

(3) 关于湖平面变化, Liu and Zhou (2024) 基于 Delft3D 模拟主要讨论了不同湖位高低对三角洲尺度及生长过程的影响, 指出高湖位条件下三角洲面积较小、沉积厚度较大, 而低湖位条件下更有利于三角洲向前扩展。马福康等 (2026) 模拟了正常浅水三角洲, 明确在单个湖平面变化周期内, 湖平面下降可促进砂坝进积和分流河道快速延伸, 而湖平面上升则导致砂坝退积、河道废弃及天然堤持续加积增厚。在此基础上, 进一步揭示了湖平面升降变化对陆相辫状河三角洲的控制作用, 湖平面上升加快时, 三角洲整体形态更稳定, 面积减小、厚度增大, 且河道数量降低与分流级次减少; 湖平面下降时, 不仅前缘进积增强, 还会促使三角洲由扇状向朵状、舌状演化, 并使分流砂坝在顺流方向上更易拼接形成大型沙洲。

## 5.2 不足与展望

本文通过沉积数值模拟揭示了关键边界条件对陆相辫状河三角洲沉积过程及成因砂体的控制作用, 但由于自然沉积体系具有较强的复杂性仍存在若干不足, 未来需继续进一步探究。

(1) 模型中未考虑湖流及弱波浪改造作用, 因而未能反映远沙坝、席状砂等前缘改造

成因砂体的发育特征，未来需进一步讨论不同湖浪、湖流条件下前缘砂体的响应差异。

(2) 研究主要基于相同模拟时长开展不同边界条件对比，尚未在等累计水通量或等累计沉积物通量下进行归一化分析。未来可引入“模拟时间×流量”或“模拟时间×沉积物浓度”等指标，进一步分析河流流量或沉积物总浓度对三角洲的控制作用。

(3) 此次定量化分析并对比了五类边界条件对辫状河三角洲沉积演化过程的控制作用，但真实辫状河三角洲的形成演化受多种自然因素共同控制，未来可在单因素规律基础上开展多因素耦合实验。

## 6 结论

(1) 流量越大，分流河道越早分流，沉积面积、沉积厚度及生长速率均明显增加，分流河道数量和分流级次也整体增大。同时，大流量条件下分流砂坝数量更多、规模更大、厚度更高，坝顶更易形成串沟水道。

(2) 坡度增大时，沉积厚度增大、面积减小、生长速率减慢，分流河道数量和分流级次整体降低，难以形成大面积连片砂体。坡度较大时，前缘砂体更易沿顺物流方向集中堆积，形成厚度较大的河口坝，而坝顶串沟水道相对不发育。

(3) 沉积物总浓度升高可促进三角洲快速生长，增大沉积面积和厚度，但同时会减少分流河道数量和级次，增强三角洲平原化趋势，抑制坝顶串沟水道发育。砂泥比越低，三角洲厚度和面积增加，沿物源方向延伸增强，但分流河道减少、级次降低，平面上不易形成典型树枝状或辫状特征。相反，砂泥比增大时，三角洲整体形态更稳定。

(4) 湖平面上升速度越快，三角洲越趋于稳定，整体表现为厚度增大、面积减小、生长速率减慢，分流河道数量和级次降低，砂坝呈现厚而小的特征；湖平面下降则增强前缘进积作用，使三角洲由扇状逐渐向朵状、舌状演化，前缘砂体展布范围扩大，分流砂坝厚度较薄但面积较大，并更易沿顺流方向拼接形成大型沙洲。

## 参考文献 (References)

- 陈彬滔, 于兴河, 王天奇, 等. 2015. 砂质辫状河岩相与构型特征: 以山西大同盆地中侏罗统云冈组露头为例[J]. 石油与天然气地质, 36(1): 111-117. [Chen Bintao, Yu Xinghe, Wang Tianqi, et al. 2015. Lithofacies and architectural characteristics of sandy braided river deposits: A case from outcrops of the Middle Jurassic Yungang Formation in the Datong Basin, Shanxi province[J]. Oil & Gas Geology, 36(1): 111-117.]
- 杜威, 纪友亮, 李其海, 等. 2020. 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, 27(2): 62-71. [Du Wei, Ji Youliang, Li Qihai, et al. 2020. Sedimentary forward numerical modeling at different sedimentary scales: Progress and hydrocarbon significance[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 27(2): 62-71.]
- 杜威, 邱春光, 贾岫, 等. 2022. 基于主控因素分析的河控三角洲形态定量表征[J]. 油气地质与采收率, 29(5): 1-14. [Du Wei,

- Qiu Chunguang, Jia Shen, et al. 2022. Quantitative characterization of river-dominated deltaic morphology based on analysis of dominant controlling factors[J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 29(5): 1-14.]
- 冯文杰, 吴胜和, 张可, 等. 2017. 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*, 91(9): 2047-2064. [Feng Wenjie, Wu Shenghe, Zhang Ke, et al. 2017. Depositional process and sedimentary model of meandering-river shallow delta: Insights from numerical simulation and modern deposition[J]. *Acta Geologica Sinica*, 91(9): 2047-2064.]
- 郭文建, 郭瑞婧, 唐勇, 等. 2024. 准噶尔盆地二叠系上乌尔禾组退覆式扇(辫状河)三角洲前缘—滩坝复合砂砾岩沉积特征及控制因素[J]. *古地理学报*, 26(3): 584-599. [Guo Wenjian, Guo Ruijing, Tang Yong, et al. 2024. Sedimentary characteristics, controlling factors and genesis of retrogradational fan (braided) delta front-beach bar composite gravel body in the Permian Upper Urho Formation in Junggar Basin[J]. *Journal of Palaeogeography*, 26(3): 584-599.]
- 郭颖, 冯文杰, 李少华, 等. 2024. 砂质辫状河中河边滩和河心滩沉积构型: 基于沉积演化过程的精细解析[J]. *地球科学进展*, 39(4): 405-418. [Guo Ying, Feng Wenjie, Li Shaohua, et al. 2024. Sedimentary architecture between compound middle bars and side bars: Insights from a numerical model of sandy braided rivers[J]. *Advances in Earth Science*, 39(4): 405-418.]
- 何翠. 2017. 基于井震结合的辫状河三角洲前缘构型表征及控制因素[D]. 北京: 中国地质大学(北京). [He Cui. 2017. Delta front architecture characterization of braided river based on combination of well and seismic and its controlling factors[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing).]
- 何文军, 刘敏珠, 吴俊军, 等. 2018. 准噶尔盆地阜东斜坡阜19井区三叠系韭菜园子组沉积正演模拟[J]. *油气地质与采收率*, 25(6): 7-15. [He Wenjun, Liu Minzhu, Wu Junjun, et al. 2018. Forward modeling of sedimentation in the Triassic Jiucaiyuanzi Formation in well Fu19 area of the Fudong slope, Junggar Basin[J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 25(6): 7-15.]
- 何艺玮, 房元龙, 冯文杰, 等. 2023. 辫状河三角洲沉积特征与生长演变规律: 水槽沉积模拟实验研究[J]. *地质论评*, 69(4): 1564-1580. [He Yiwei, Fang Yuanlong, Feng Wenjie, et al. 2023. Sedimentary characteristics and evolution of a braided river delta: Insights from a flume experiment[J]. *Geological Review*, 69(4): 1564-1580.]
- 黄秀, 刘可禹, 吴松涛, 等. 2015. 沉积体系非均质性对致密油气储集层控制及其定量评价方法[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 34(01): 61-69. [Huang Xiu, Liu Keyu, Wu Songtao, et al. 2015. Quantitative analysis of sedimentary heterogeneities[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 34(1): 61-69.]
- 李恬恬, 胡光明, 徐佑德, 等. 2025. 浅水三角洲沉积物理模拟与数值模拟的对比研究[J]. *沉积学报*, 43(3): 860-879. [Li Tiantian, Hu Guangming, Xu Youde, et al. 2025. Comparative study on physical and numerical simulations of deposition in a shoal water delta[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 43(3): 860-879.]
- 刘成林, 刘伟新, 顾振宇, 等. 2022. 珠江口盆地陆丰A油田恩平组浅水辫状河三角洲砂体构型研究[J]. *海相油气地质*, 27(3): 236-248. [Liu Chenglin, Liu Weixin, Gu Zhenyu, et al. 2022. Sand body configuration of shallow braided river delta of Enping Formation in Lufeng A oilfield, Pearl River Mouth Basin[J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 27(3): 236-248.]
- 刘伟新, 王华, 万琼华, 等. 2022. 基于分频RGB融合技术的辫状河三角洲储层构型精细解剖[J]. *地球科学与环境学报*, 44(5): 765-774. [Liu Weixin, Wang Hua, Wan Qionghua, et al. 2022. Fine analysis of braided river delta reservoir architecture based on frequency division RGB fusion technology[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 44(5): 765-774.]
- 刘忠保, 罗顺社, 何幼斌, 等. 2011. 缓坡浅水辫状河三角洲沉积模拟实验研究[J]. *水利与建筑工程学报*, 9(6): 9-14. [Liu Zhongbao, Luo Shunshu, He Youbin, et al. 2011. Study on sedimentation simulation experiment of gentle-slope shallow braided river delta[J]. *Journal of Water Resources and Architectural Engineering*, 9(6): 9-14.]
- 马福康, 徐振华, 吴胜和, 等. 2026. 季节性湖平面变化下浅水三角洲指状砂坝沉积特征[J]. *沉积学报*, 44(2): 646-663. [Ma Fukang, Xu Zhenhua, Wu Shenghe, et al. 2026. Sedimentary characteristics of the finger bar in a shallow delta under seasonal lake level changes[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 44(2): 646-663.]
- 唐洪, 龙冠宇, 张章, 等. 2024. 基于沉积数值模拟的砂质辫状河三角洲沉积特征与演化规律研究[J/OL]. *沉积学报*. <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2024.088>. [Tang Hong, Long Guanyu, Zhang Zhang, et al. 2024. Sedimentary characteristics and evolution laws of a sandy braided river delta based on sediment numerical simulation[J/OL]. *Acta Sedimentologica Sinica*. <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2024.088>.]

- 王鹏飞, 霍春亮, 叶小明, 等. 2019. 伊拉克 BU 油田碳酸盐岩储层沉积过程数值模拟[J]. 油气地质与采收率, 26(4): 56-61. [Wang Pengfei, Huo Chunliang, Ye Xiaoming, et al. 2019. Numerical simulation of sedimentary process for carbonate reservoir in BU oilfield, Iraq[J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 26(4): 56-61.]
- 王韬, 李婷, 郭文建, 等. 2021. 沉积正演模拟在准噶尔盆地吉木萨尔凹陷东斜坡二叠系梧桐沟组中的应用[J]. 特种油气藏, 28(1): 34-41. [Wang Tao, Li Ting, Guo Wenjian, et al. 2021. Application of sedimentary forward modeling of the Permian Wutonggou Formation in the east slope of Jimusar Sag, Junggar Basin[J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 28(1): 34-41.]
- 魏康强, 焦朝维, 王振, 等. 2017. 三角洲分流河道与朵叶体形成过程的物理模拟[J]. 科学技术与工程, 17(23): 155-160. [Wei Kangqiang, Jiao Chaowei, Wang Zhen, et al. 2017. Physical simulation of delta distributary channel and the formation process of leaf body[J]. *Science Technology and Engineering*, 17(23): 155-160.]
- 徐安娜, 穆龙新, 裘怿楠. 1998. 我国不同沉积类型储集层中的储量和可动剩余油分布规律[J]. 石油勘探与开发, 25(5): 41-44. [Xu Anna, Mu Longxin, Qiu Yinan. 1998. Distribution pattern of OOIP and remaining mobile oil in different types of sedimentary reservoir of China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 25(5): 41-44.]
- 徐伟, 房磊, 张新叶, 等. 2019. 乌干达 K 油田扇三角洲沉积正演模拟与应用[J]. 地球科学, 44(2): 513-523. [Xu Wei, Fang Lei, Zhang Xinye, et al. 2019. Sedimentary forward simulation and application of fan delta in K oil field in Uganda[J]. *Earth Science*, 44(2): 513-523.]
- 尹太举, 李宣玥, 张昌民, 等. 2012. 现代浅水湖盆三角洲沉积砂体形态特征: 以洞庭湖和鄱阳湖为例[J]. 石油天然气学报, 34(10): 1-7. [Yin Taiju, Li Xuanyue, Zhang Changmin, et al. 2012. Sandbody shape of modern shallow lake basin delta sediments: By taking Dongting Lake and Poyang Lake for example[J]. *Journal of Oil and Gas Technology*, 34(10): 1-7.]
- 于兴河, 王德发, 孙志华. 1995. 湖泊辫状河三角洲岩相、层序特征及储层地质模型: 内蒙古岱海湖现代三角洲沉积考察[J]. 沉积学报, 13(1): 48-58. [Yu Xinghe, Wang Defa, Sun Zhihua. 1995. Lithofacies types, vertical profile features and reservoir geological models of braided deltaic sandbodies in faulted lake basin: The observation on deposition of modern deltas in Daihai Lake, Inner Mongolia[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 13(1): 48-58.]
- 张俊逸. 2024. 埕北油田东二上亚段辫状河三角洲储层构型研究[D]. 成都: 西南石油大学. [Zhang Junyi. 2024. Study on reservoir architecture of braided river delta in the upper Dong 2 submember, Chengbei oilfield[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University.]
- 张文彪, 段太忠, 刘彦锋, 等. 2019. 定量地质建模技术应用现状与发展趋势[J]. 地质科技情报, 38(3): 264-275. [Zhang Wenbiao, Duan Taizhong, Liu Yanfeng, et al. 2019. Application status and development trend of quantitative geological modeling[J]. *Geological Science and Technology Information*, 38(3): 264-275.]
- 朱卫红, 吴胜和, 尹志军, 等. 2016. 辫状河三角洲露头构型: 以塔里木盆地库车坳陷三叠系黄山街组为例[J]. 石油勘探与开发, 43(3): 482-489. [Zhu Weihong, Wu Shenghe, Yin Zhijun, et al. 2016. Braided river delta outcrop architecture: A case study of Triassic Huangshanjie Formation in Kuche Depression, Tarim Basin, NW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 43(3): 482-489.]
- 朱筱敏, 邓秀芹, 刘自亮, 等. 2013. 大型坳陷湖盆浅水辫状河三角洲沉积特征及模式: 以鄂尔多斯盆地陇东地区延长组为例[J]. 地学前缘, 20(2): 19-28. [Zhu Xiaomin, Deng Xiuqin, Liu Ziliang, et al. 2013. Sedimentary characteristics and model of shallow braided delta in large-scale lacustrine: An example from Triassic Yanchang Formation in Ordos Basin[J]. *Earth Science Frontiers*, 20(2): 19-28.]
- 朱筱敏, 张义娜, 杨俊生, 等. 2008. 准噶尔盆地侏罗系辫状河三角洲沉积特征[J]. 石油与天然气地质, (2): 244-251. [Zhu Xiaomin, Zhang Yina, Yang Junsheng, et al. 2008. Sedimentary characteristics of the shallow Jurassic braided river delta, the Junggar Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, (2): 244-251.]
- Caldwell R L, Edmonds D A. 2014. The effects of sediment properties on deltaic processes and morphologies: A numerical modeling study[J/OL]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 119(5): 961-982
- Edmonds D A, Chadwick A J, Lamb M P, et al. 2022. 10.09 - Morphodynamic modeling of river-dominated deltas: A review and future perspectives[J]. *Treatise on Geomorphology*, 10: 110-140.
- Edmonds D A, Slingerland R L. 2007. Mechanics of river mouth bar formation: Implications for the morphodynamics of delta

- distributary networks[J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 112(F2): F02034.
- Feng W J, Zhang C M, Yin T J, et al. 2019. Sedimentary characteristics and internal architecture of a river-dominated delta controlled by autogenic process: Implications from a flume tank experiment[J]. *Petroleum Science*, 16(6): 1237-1254.
- Goswami D C. 1985. Brahmaputra River, Assam, India: Physiography, basin denudation, and channel aggradation[J]. *Water Resources Research*, 21(7): 959-978.
- Hoyal D C J D, Sheets B A. 2009. Morphodynamic evolution of experimental cohesive deltas[J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2009, 114(F2): F02009.
- Jerolmack D J, Mohrig D. 2007. Conditions for branching in depositional rivers[J]. *Geology*, 35(5): 463-466.
- Liu J N, Zhou D J, 2024. Scale characteristics and growth process of shallow water delta under different lake levels: Based on Delft3D numerical simulation research[J]. *Frontiers in Earth Science*, 2024, 12: 1489238.
- McPherson J G, Shanmugam G, Moiola R J. 1987. Fan-deltas and braid deltas: Varieties of coarse-grained deltas[J]. *GSA Bulletin*, 99(3): 331-340.
- Nota P J, Zhang X G, Liu H F, et al. 2024. Effects of upstream and downstream boundary conditions on lacustrine shallow-water delta morphologies: A numerical modeling approach[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 167(2): 106966.
- Postma G. 1990. Depositional architecture and Facies of river and fan deltas: A synthesis[M]//Colella A, Prior D B. *Coarse-grained deltas*. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 13-27.
- Shan X, Li S L, Li S L, et al. 2018. Sedimentology of a topset-dominated, braided river delta of Huangqihai Lake, North China: Implications for formation mechanisms[J]. *Journal of Paleolimnology*, 59(2): 245-261.
- Sinha R. 2014. The Kosi Megafan: The best-known Himalayan Megafan[M]//Kale V S. *Landscapes and landforms of India*. Dordrecht: Springer, 151-156.
- Wang J H, Muto T, Urata K, et al. 2019. Morphodynamics of river deltas in response to different basin water depths: An experimental examination of the grade index model[J]. *Geophysical Research Letters*, 46(10): 5265-5273.
- Wright L D. 1977. Sediment transport and deposition at river mouths: A synthesis[J]. *GSA Bulletin*, 88(6): 857-868.
- Zhang Y, Qiu L W, Yang B L, et al. 2016. Effects of water level fluctuation on sedimentary characteristics and reservoir architecture of a lake, river dominated delta[J]. *Journal of Central South University*, 23(11): 2958-2971.

## Control of Key Boundary Conditions on the Depositional Processes of Lacustrine Braided River Deltas: Insights from sedimentary numerical simulation

TANG Hong<sup>1,2</sup>, HUANG Shuai<sup>1</sup>, LONG GuanYu<sup>1,3</sup>, GUI WanLing<sup>1</sup>, WEI Ying<sup>1</sup>, LIU BoXuan<sup>1</sup>, CHEN JiaJu<sup>1</sup>

1. School of Geoscience and Technology, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China

2. Sichuan Provincial Key Laboratory of Natural Gas Geology, Chengdu 610500, China

3. PetroChina Tarim Oilfield Company, Korla, Xinjiang 841000, China

**Abstract:** [Objective] Braided river deltas are one of the most important types of hydrocarbon reservoirs. Extensive studies have examined their depositional processes, evolutionary characteristics, and controlling factors. However, how key boundary conditions quantitatively control the growth, evolution, and genetic sandbody characteristics of lacustrine braided river deltas remains underexplored. [Methods] The Delft3D sedimentary numerical simulation software was used to design a series of single-factor comparative experiments involving five key boundary conditions, including lake-inflow discharge, basin slope, total sediment concentration, sand–mud

ratio, and lake-level variation. Relevant indicators were quantitatively extracted, and differences in depositional characteristics across parameter settings were systematically analyzed. **[Results]** (1) Lake-inflow discharge shows a significant positive correlation with delta area and sandbody scale. As discharge increases, distributary bifurcation becomes more active, the number of distributary mouth bars increases, and chute channels on bar tops become more developed. (2) Basin slope mainly controls the lateral and vertical distribution of sediments. With increasing slope, the delta shifts from a broad and gently sloping morphology to a narrow and thickened morphology. Lateral bifurcation is suppressed, and distributary mouth bars become fewer but thicker. (3) An increase in total sediment concentration accelerates rapid progradation of the delta front during the middle to late stages of simulated evolution. However, under higher concentrations, accelerated frontal deposition tends to promote channel siltation and abandonment, thereby reducing both the frequency and number of channel bifurcations. (4) A lower sand–mud ratio promotes the distal transport of fine-grained sediments, resulting in greater elongation in the source-to-sink direction and a more divergent channel pattern. (5) Lake-level fall triggers rapid progradation, forming depositional bodies with larger areal extent, deeper channel incision, and more extensively developed chute channels, whereas lake-level rise leads to enhanced vertical aggradation and areal contraction. **[Conclusions]** Strong hydrodynamic conditions and lake-level fall favor the development of dominant sandbodies interconnected by chute channels. Steeper slopes and higher sediment-concentration settings tend to form thicker sandbodies with greater extension in the sediment transport direction. These experimental results provide a theoretical basis for reservoir prediction of braided river deltas in continental basins.

**Key words:** braided river delta; sedimentary numerical simulation; boundary conditions; evolutionary traits; genetic sandbodies

