

引用格式: 张斌弛, 马世忠, 马琳, 等. 2026. 浅水辫状河三角洲水动力数值模拟和启示[J]. 沉积学报. doi: 10.14027/j.issn.1000-0550.2026.014.
ZHANG BinChi, MA ShiZhong, MA Lin, et al. 2026. Hydrodynamic Depositional Numerical Simulation and Its Implication for Shallow-Water Braided River Deltas[J]. Acta Sedimentologica Sinica, doi: 10.14027/j.issn.1000-0550.2026.014.

DOI: 10.14027/j.issn.1000-0550.2026.014

CSTR: 32268.14/j.cjxb.62-1038.2026.014

浅水辫状河三角洲水动力数值模拟和启示

张斌弛^{1,2}, 马世忠³, 马琳^{2,4}, 丛琳², 范广娟^{1,2}, 康德江⁵, 白东来⁶, 何伟⁷

1.东北石油大学多资源协同陆相页岩油绿色开采全国重点实验室, 黑龙江大庆 163712

2.东北石油大学地球科学学院, 黑龙江大庆 163318

3.东北石油大学三亚海洋油气研究院, 海南三亚 572024

4.大庆油田设计院有限公司北京分公司, 北京 100010

5.中国石油大庆油田有限责任公司勘探开发研究院, 黑龙江大庆 163412

6.中国地质调查局自然资源综合调查指挥中心, 北京 100055

7.中石化石油工程地球物理有限公司南方分公司, 成都 610041

摘要 【目的】国内外学者对浅水辫状河三角洲的研究取得了丰富成果, 但对远源型浅水辫状河三角洲的沉积演化过程、沉积特征及其水动力特征研究仍存在不足, 特别是对分支河道系统的作用和三角洲形态演化的理解有待进一步探讨。【方法】采用沉积数值模拟技术, 基于现代沉积水动力条件, 对比分析沉积正演模拟结果和现代沉积实例, 再现远源型浅水辫状河三角洲的沉积演化过程。利用 Delft3D 数值模拟软件, 通过多期模拟分析不同流速条件下, 分支河道系统对三角洲形态和沉积特征的控制作用, 建立远源型浅水辫状河三角洲的沉积模式, 并探讨该模式下的沉积特征与演化规律。【结果】(1) 远源型浅水辫状河三角洲的沉积演化过程由一级和次级分支河道以及多期朵叶体组成。一级分支河道在洪水期以搬运作用为主, 间洪期则以沉积作用为主, 废弃的一级分支河道和次级分支河道是三角洲沉积厚度增加的主要区域。(2) 一级分支河道流速较快, 废弃较慢, 数量较少, 延伸较长, 改道频繁, 且下切程度较高, 内部沉积较慢, 废弃沉积较厚, 控制朵叶体的位置和形态; 而次级分支河道对沉积的贡献较小, 但其数量和延伸距离影响朵叶体增生规模。(3) 分支河道的切叠程度与沉积时间尺度密切相关。在 0.01~0.1 ka 时间尺度下, 短期强水动力作用形成独立的朵叶体群; 而在 0.1~1 ka 时间尺度下, 持续较强的水动力作用形成了带状分支河道和复合砂体的增生。【结论】揭示远源型浅水辫状河三角洲的沉积演化特征, 明确分支河道系统对三角洲沉积模式的控制作用。不同时间尺度下的水动力条件显著影响了沉积物的分布与三角洲形态演变, 为理解复杂储层构型提供了新的理论支持。

关键词 储层构型; 河道分级; 砂质三角洲; 沉积微相; 分支河道

第一作者 张斌弛, 女, 1989 年出生, 博士, 讲师, 储层地质学与沉积学, E-mail: bczdy@foxmail.com

通信作者 马世忠, 男, 教授, E-mail: Masz@foxmail.com

中图分类号: P512.2+2

文献标志码: A

文章编号: 1000-0550 (2026) 00-0000-00

0 引言

浅水三角洲按照物源体系划分为浅水曲流河三角洲、浅水辫状河三角洲和浅水扇三角洲

收稿日期: 2025-12-17; 收修改稿日期: 2026-04-05

基金项目: 黑龙江省自然科学基金项目 (LH2024D009)

(朱筱敏等, 2013)。浅水辫状河三角洲是一类形成于构造稳定、水体较浅、物源供给充足背景下的砂质三角洲, 发育广泛分布的分支河道砂体, 具有粒度粗、厚度大、孔隙度高和连通性好的特点, 具备广阔的勘探开发前景(赵国祥等, 2018; 徐振华等, 2019; 陈春峰等, 2024; 冯文杰等, 2025; 胡鑫等, 2025)。近年来, 四川盆地二叠系须家河组、鄂尔多斯盆地二叠系石河子组、准噶尔盆地古近系和珠江口盆地古近系恩平组相继发现了浅水辫状河三角洲沉积体系(刘锐娥等, 2013; 樊晓伊, 2022; 刘成林等, 2022; 刘伟新等, 2022)。然而, 与近源型浅水辫状河三角洲相比, 远源型浅水辫状河三角洲主要发育于湖盆缓坡带, 供源辫状河具有长源特点, 沉积物亦相对较细, 以中—细砂为主, 其研究程度相对较低。第一, 长源辫状河载荷能力强而搬运距离长, 其河口处沉积过程和地貌特征未曾深入研究; 第二, 分支河道体系是浅水三角洲的重要组成部分, 其对三角洲的增生具有怎样的控制作用; 第三, 远源型浅水辫状河三角洲的沉积模式尚不明确。

随着数值模拟技术的不断发展, 水动力数值模拟是近年来兴起的一种基于泥沙水动力学的沉积数值模拟技术, 可根据给定的边界条件模拟沉积体系的沉积演化过程(贺婷婷等, 2021; 汪新光等, 2021; 郭颖等, 2025; 李恬恬等, 2025)。Delft3D 是荷兰杜兰大学开发的一款三维水动力数值模拟程序, 主要应用于自由地表水环境, 不仅能够模拟二维和三维的水流、波浪、水质、生态、泥沙输移和床底地貌, 也能模拟以上各个过程之间的相互作用(汪新光等, 2021)。近年来, Delft3D 程序逐渐被应用到小—中尺度的河流—河口系统沉积过程模拟, 例如辫状河河道和心滩坝的形成过程、“河、浪、潮”主控的三角洲河口砂坝的形成机理、不同因素对三角洲地貌的控制作用和三角洲分支河道决口与分叉的机制等, 从沉积正演的角度对未知地质体开展油气田开发阶段的储层构型研究(冯文杰等, 2017; 张宪国等, 2020; 甘泉, 2021; 刘雪萍等, 2021)。

据此, 基于现代沉积水动力条件, 设计沉积正演模拟的初始模型和边界条件, 选取 Delft3D-Flow 模块模拟远源型浅水辫状河三角洲的发育过程, 分析沉积厚度和水流流速特征, 对比分析沉积正演模拟结果和现代沉积实例, 讨论不同级次的分支河道对浅水辫状河三角洲朵叶增生的控制作用, 总结基于分支河道分级的远源型浅水辫状河三角洲沉积模式, 一定程度上丰富了浅水辫状河三角洲沉积理论研究。

1 浅水辫状河三角洲水动力特征

1.1 供源河流水动力条件

辫状河作为浅水辫状河三角洲的供源河流, 具有“水浅流急、近源、粗底负载、砂泥比

高”的特点，与曲流河相比季节性较强。洪水期气候温暖潮湿，在侵蚀和搬运作用下，洪水从上游山区（远源）或山口冲积扇（近源）带来大量的砾石和沙泥，砂质沉积物沿着深泓线快速堆积并形成水下浅滩，辫状河道内部不沉积并继续向湖搬运沉积物。间洪期气候干旱，辫状河谷进入枯水期，水下浅滩出露水面并形成“心滩”，辫状河道内部水动力骤减并逐渐被砂质沉积物充填，直至废弃后不再向前搬运沉积物（艾晓等，2021）。对于浅水辫状河三角洲而言，辫状河的洪水期是三角洲主要的生长期。另外，与近源浅水辫状河三角洲相比，远源浅水辫状河三角洲由于搬运距离较远，沉积物粒度相对较细，以中砂—细砂为主（曹天儒等，2021）。现代辫状河水动力数据显示，以青海湖西北部布哈河为例，其近十年平均河流径流量可达 $1.624 \times 10^9 \text{ m}^3$ ，平均年输沙量可达 $6.67 \times 10^5 \text{ t}$ ，平均年含沙量可达 0.439 kg/m^3 （方健梅等，2022）。

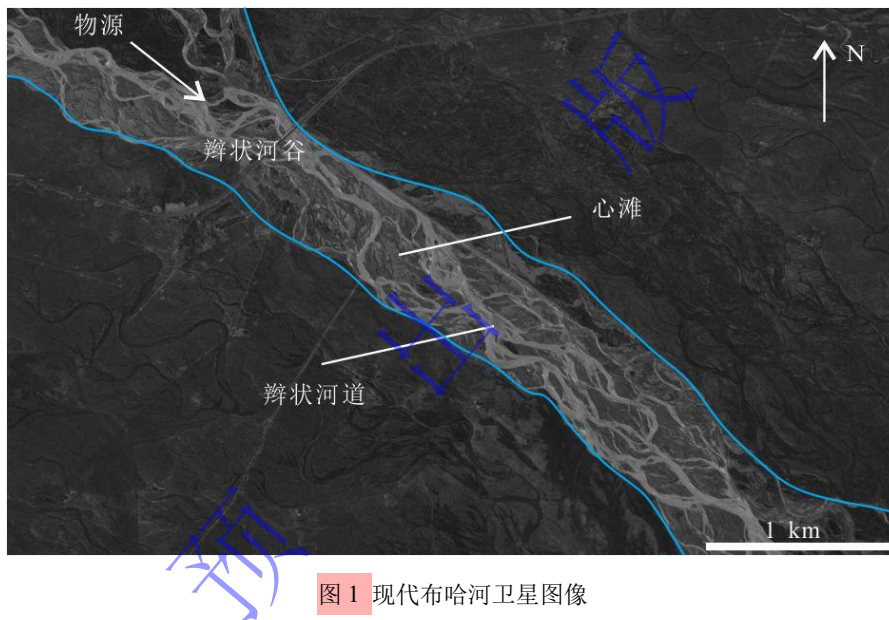


图1 现代布哈河卫星图像

Fig.1 Satellite image of the modern Buha river

1.2 河口水动力条件

河口水动力条件主要由河流、波浪和潮汐三种流体决定。对于波浪和潮汐作用相对较弱的大型湍流浅水湖盆沉积环境，湖底地形较缓，入湖河流的水动力条件直接决定了三角洲的生长能力。由于辫状河水动力相对较强，且砂质碎屑物质丰富，推移质—悬浮质比值大，进入相对较浅的水体后，河流主控导致三角洲分支河道极为发育（吴宇翔等，2022；唐洪等，2024）。现代观测数据显示，以青海湖西北部布哈河为例，辫状河在入湖河口处的径流量可达 $800 \sim 1500 \text{ m}^3/\text{s}$ ，河口宽度为 $100 \sim 300 \text{ m}$ ，河口与湖底间的坡度为 $0.05^\circ \sim 0.15^\circ$ （吴娟娟等，2014；胡雅丹等，2021；祝存兄等，2022）。



图2 布哈河三角洲古河口卫星图像

Fig.2 Satellite image of the ancient river mouth of Buha river delta

2 水动力数值模拟

2.1 数值模型

Delft3D-Flow 模块以 Navier-Stokes 方程为依托,符合浅水特性和 Boussinesq 假定。通过 ADI 计算方法对设定坐标系下的控制方程组进行离散求解,在忽略垂向加速度的影响的前提下,推导出静水压强假定下的水流方程(张宪国等, 2020; 宋亚开等, 2021)。根据质量守恒原理和沉积物搬运—沉积—侵蚀方程,实现沉积物剥蚀、搬运和沉积过程的二维或三维模拟^[16-17]。基于逐步迭代的计算方式,其主要步骤包括:输入/更新边界条件、输入/更新沉积底形、流动方程求解、沉积物搬运、沉积及剥蚀量计算和底形高程变化计算(冯文杰等, 2017; 甘泉, 2021; 刘雪萍等, 2021)。对于远源浅水辫状河三角洲,主要运用到悬浮搬运—沉积方程、非黏性物质沉积—侵蚀方程和泥沙沉降速度方程(冯文杰等, 2017)。

2.2 初始模型和边界条件

Delft3D-Flow 水动力数值模拟的模型设计主要包括初始模型和边界条件(甘泉, 2021; 刘雪萍等, 2021)。初始模型主要包括初始网格和初始条件参数。网格设计方面,假设三角洲汇入大型淌流湖盆,故设置湖盆的各个边界为开放边界。为了保证模拟结果的分辨率,需要使单一网格的尺寸小于或等于目标地质体的规模。假设单一分支河道的宽度为 10~20 m,将平面网格大小设置为 15 m×15 m,包含 200×266 个网格,总面积约 12 km²;假设单一分支河道沉积厚度最大为 5 m,将垂向网格大小设置为 1 m,包含 5 个网格。结合现代沉积实例,将辫状河河口的宽度设置为 200 m(图 3)。

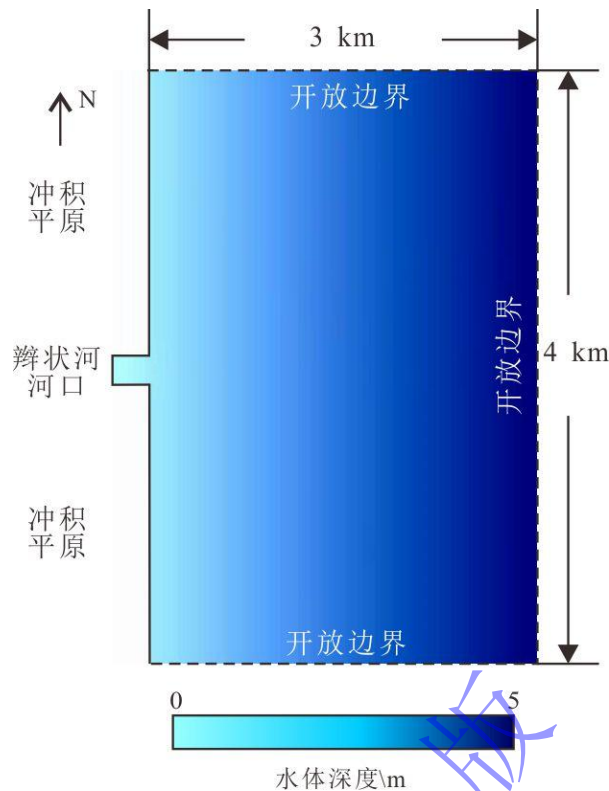


图3 初始水深模型

Fig.3 Initial bathymetry model

边界条件不仅决定了数值运算能否成功运行，也影响着模拟结果是否能达到预期（贺婷婷等，2021）。河流流量方面，由于辫状河受区域性气候控制，故需要考虑洪水期流量和间洪期流量，结合《中国泥沙公报》数据将洪水期河流流量设置为 $1\,400\text{ m}^3/\text{s}$ ，每一个洪水期模拟时长约 600 min ，等效于地质历史时期约 100 年；将间洪期河流流量设置为 $0\text{ m}^3/\text{s}$ ，每一个间洪期模拟时长约 120 min ，等效于地质历史时期约 20 年；物源供给方面，远源型辫状河距离物源距离较远，辫状河河口沉积物以中砂和淤泥为主且相对富砂，故将洪水期非黏滞性沉积物的粒度中值设为 0.15 mm ，百分含量设置为 70%，间洪期无沉积物输入；湖水水深方面，假设相对基准面为 0 m ，浅水湖盆的底形坡度为 0.1° ，若湖盆的延伸长度为 3 km ，不计河口的深度，则水深的线性变化区间为 $2\sim 5\text{ m}$ 。为了模拟小—中尺度的三角洲发育过程，加速模拟进程，将模拟加速系数设置为 125（冯文杰等，2017）。其他物理参数和数值参数详见表 1。

表 1 水动力数值模拟参数

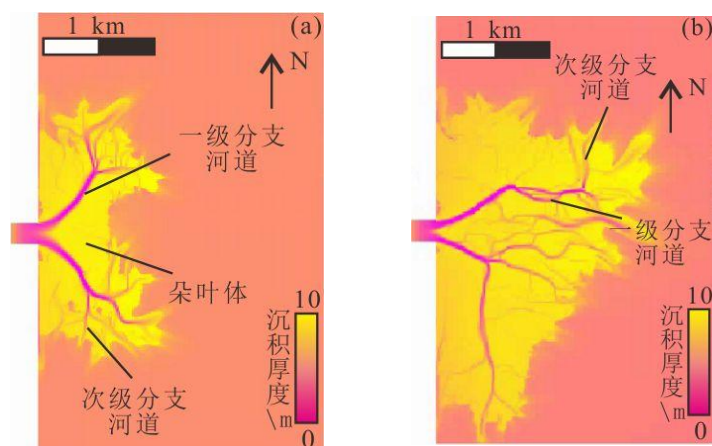
Table 1 Parameter setting of depositional numerical simulation			
参数设定	量纲	实验模型设定	现代沉积参考值
水体密度	kg/m^3	1000	1000
底床坡度	$^\circ$	0.1	0.05-0.15
相对基准面	m	0	/
水深区间	m	2-5	0-5

洪水期河流量	m ³ /s	1400	800~1 500
间洪期河流量	m ³ /s	0	0~200
辫状河河口宽度	m	200	100~300
沉积物粒度中值	mm	0.15	0.05~0.15
非黏滞性沉积物干容重	kg/m ³	1600	1 600
黏滞性沉积物干容重	kg/m ³	500	500
非黏滞性沉积物比例	/	0.7	/
模拟加速系数	/	125	/
临界沉积物厚度	m	0.05	/
临近干网格侵蚀系数	/	0.25	/
水平黏滞系数	m ² /s	0.001	/
平滑时间	min	60	/
单一网格大小	m ²	15×15	/
网格数量	/	200×266×5	/

注：“/”表示无量纲或无参考值。

2.3 水动力数值模拟结果

水动力数值模拟结果再现了浅水辫状河三角洲前期和中期的生长过程。本次研究选取沉积厚度和河道流速属性表征三角洲的发育过程和地貌特征（图 4， 5）。实时沉积厚度反映了三角洲宏观的地貌特征，达到区分分支河道和朵叶体的目的；沉积厚度变化可以反映朵叶体的增生情况和分支河道的充填情况；流速反映了分支河道的活动性，刻画河网特征和差异，进而区分不同级别的分支河道。模拟总步数为 1 300 步，包含四个洪水—间洪周期，第 239 步、第 562 步、第 937 步和第 1 267 步分别对应一个洪水—间洪周期的结束和下一个洪水—间洪周期的开始。据此，本次研究选取以上四个模拟节点进行详细论述。为了便于描述，本文定义一级分支河道为多个洪水期具有继承性和主导性的主干分支河道，定义次级分支河道为仅在单一洪水期活动的一级分支河道伴生分支河道。



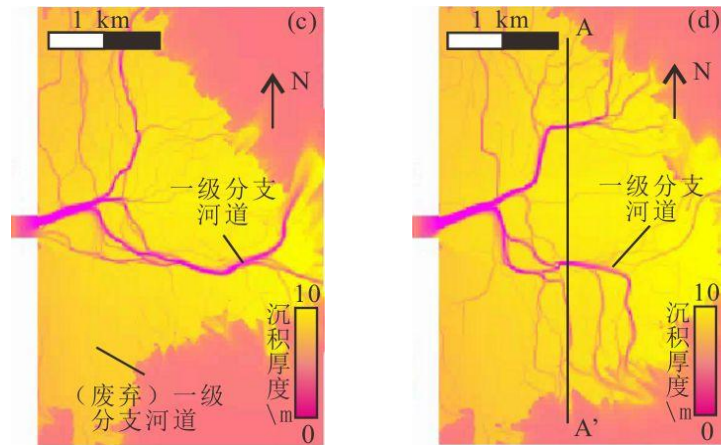


图4 实时沉积厚度模拟结果

(a) 第 239 步; (b) 第 562 步; (c) 第 937 步; (d) 第 1 267 步

Fig.4 Simulation results of instant sedimentary thickness

(a) step 239; (b) step 562; (c) step 937; (d) step 1 267

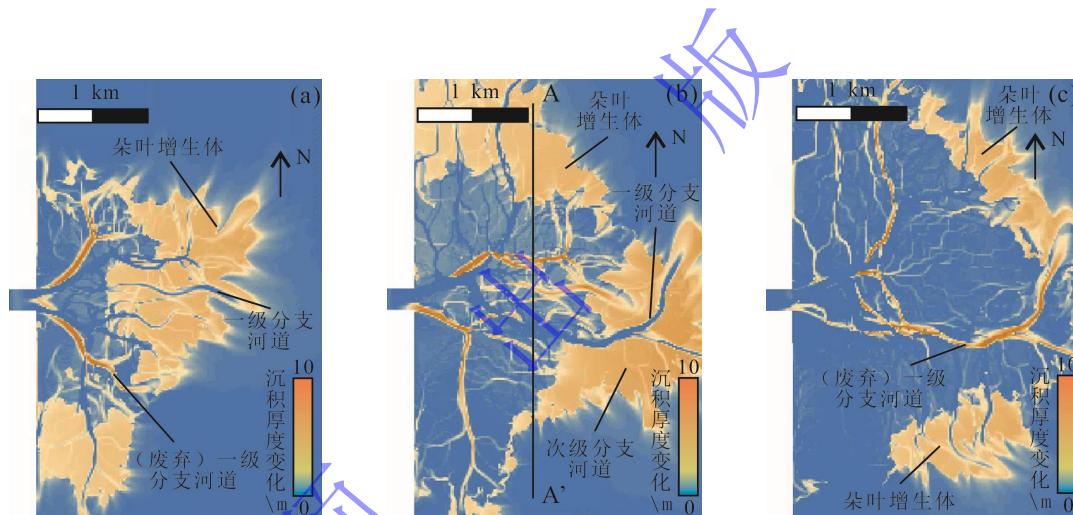


图5 沉积厚度变化模拟结果

(a) 第 239-562 步; (b) 第 562-937 步; (c) 第 937-1 267 步

Fig.5 Simulation results of changes in sedimentary thickness

(a) from step 239 to 562; (b) from step 562 to 937; (c) from step 937 to 1 267

2.3.1 沉积厚度

从实时沉积厚度和沉积厚度变化来看，第 239 步，辫状河输送沉积物至河口快速沉积，形成第一期朵叶体，面积约 2 km^2 ；朵叶体上发育两条宽度较大的一级分支河道，宽度约 100 m ，河道内未充填沉积物。由于河道的决口分叉作用，一级分支河道的末端（即三角洲前缘）发育多条次级分支河道，向前方延伸形成指状体（图 4a）。

第 562 步，南部的一级分支河道改变原有路径，向南部延伸，在第一期朵叶体的南部形成了长条状的第二期朵叶增生体，面积约 1 km^2 。北部的一级分支河道未发生明显改道，继续向东部延伸，在前方形成巨大的第二期朵叶增生体，面积约 2 km^2 。上一期的次级分支河

道内部充填泥沙，平均沉积厚度为 2~5 m（图 4b、图 5a）。

第 937 步，南部的一级分支河道再次改道，继续向东部延伸，而北部的一级分支河道向北改道，分别在东部和北部形成巨大的第三期朵叶增生体，面积均约 2 km²。上一期的一级分支河道内部充填泥沙，平均沉积厚度约 10 m（图 4c、图 5b）。

第 1 267 步，南部的一级分支河道再次向南改道，北部的一级分支河道再次向东改道，分别在东部和北部形成小型的第四期朵叶增生体，面积均约 1 km²（图 4d、图 5c）。垂向上，分支河道不同程度的下切于朵叶体之上。一级分支河道下切深度较大，河道底部可触及湖底，平均深度可达 10 m，而次级分支河道下切深度仅约 4 m。值得一提的是，一部分一级分支河道未改道，由于多期洪水的冲刷，剖面上表现明显的多期下切特征；另一部分一级分支河道每一次洪水期均会改道，剖面上表现为单一的 V 形下切特征。朵叶体的厚度呈现中部厚，两边薄的特点，平均厚度为 4~5 m（图 6）。

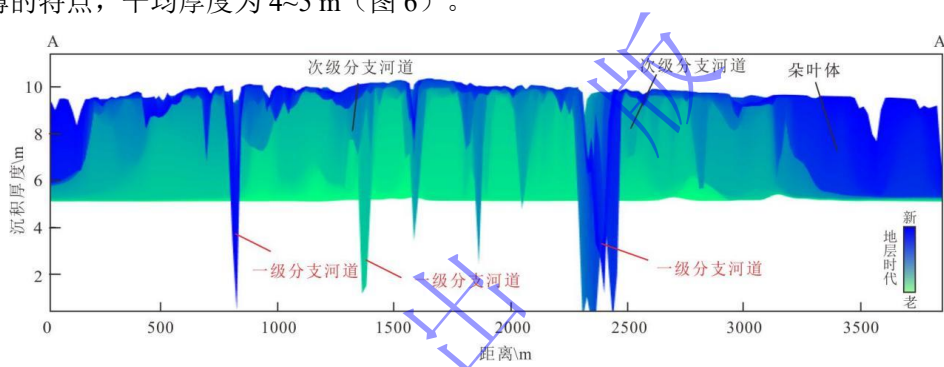


图 6 沉积厚度剖面（位置见图 2）

Fig.6 Cross section of sedimentary thickness (see location in Fig.2)

2.3.2 流速

从流速来看，（活动）一级分支河道流速为 1.5~2.5 m/s，（活动）次级分支河道流速为 1.0~1.5 m/s，废弃一级分支河道流速为 0.5~1.0 m/s，（废弃）次级分支河道和朵叶体流速为 0~0.5 m/s（图 7）。通过统计活动分支河道的数量可以得出，第 239 步，一级分支河道数量为 2 条，次级分支河道数量为 9 条（图 7a）；第 562 步，一级分支河道数量为 5 条，次级分支河道数量为 52 条（图 7b）；第 937 步，一级分支河道数量为 3 条，次级分支河道数量为 83 条（图 7c）；第 1 267 步，一级分支河道数量为 4 条，次级分支河道数量为 26 条（图 7d）。值得一提的是，第 239 步和第 1 267 步次级分支河道数量少且延伸距离较短，平均延伸距离为 100~200 m，朵叶体增生面积较小；第 562 步和第 937 步次级分支河道数量多且延伸长，平均延伸距离为 200~500 m，朵叶体增生面积较大（图 7c）。

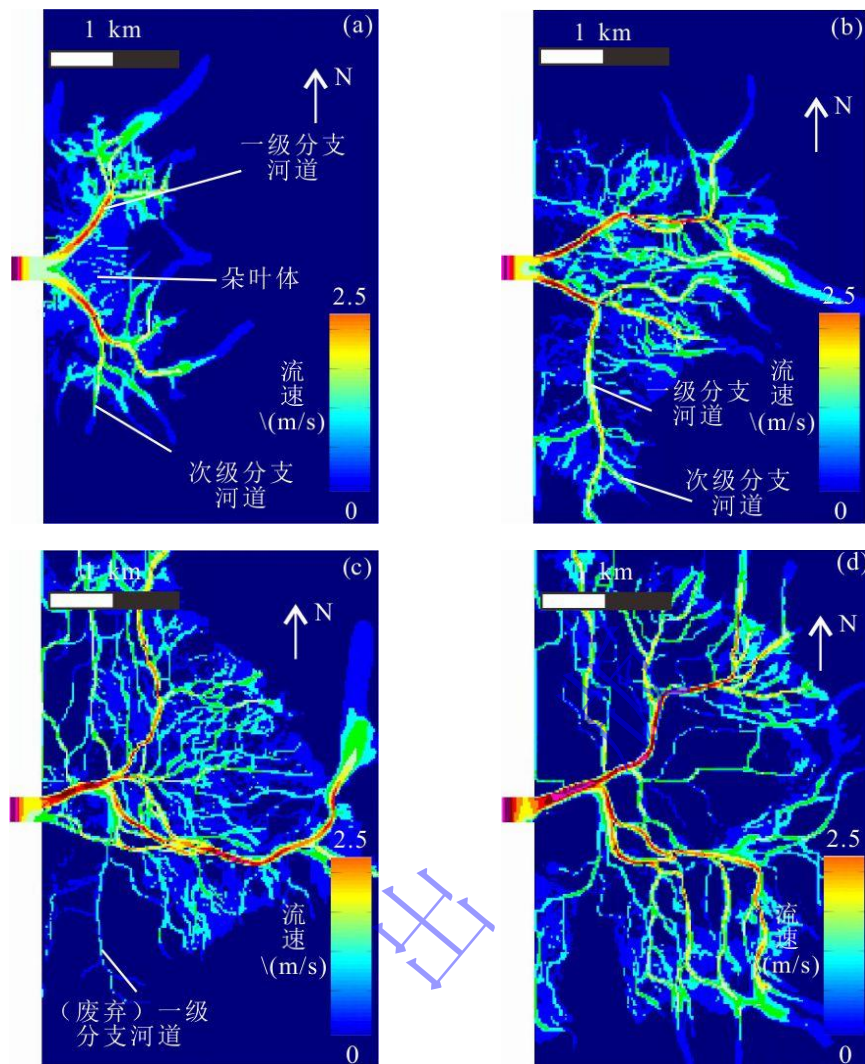


图7 河道流速模拟结果

(a) 第239步; (b) 第562步; (c) 第937步; (d) 第1267步

Fig.7 Simulation results of channel velocity

(a) step 239; (b) step 562; (c) step 937; (d) step 1267

3 讨论

3.1 水动力数值模拟与现代沉积体系的对比

从模拟结果看,模拟的浅水辫状河三角洲由四期朵叶增生体组成(图8)。第一期朵叶体发育2条一级分支河道和9条次级分支河道,朵叶体总面积约 2 km^2 (图8a);第二期朵叶体发育5条一级分支河道和52条次级分支河道,朵叶增生体总面积约 3 km^2 (图8b);第三期朵叶体发育3条一级分支河道和83条次级分支河道,朵叶增生体总面积约 4 km^2 (图8c);第四期朵叶体发育4条一级分支河道和26条次级分支河道,朵叶增生体总面积约 2 km^2 (图8d)。

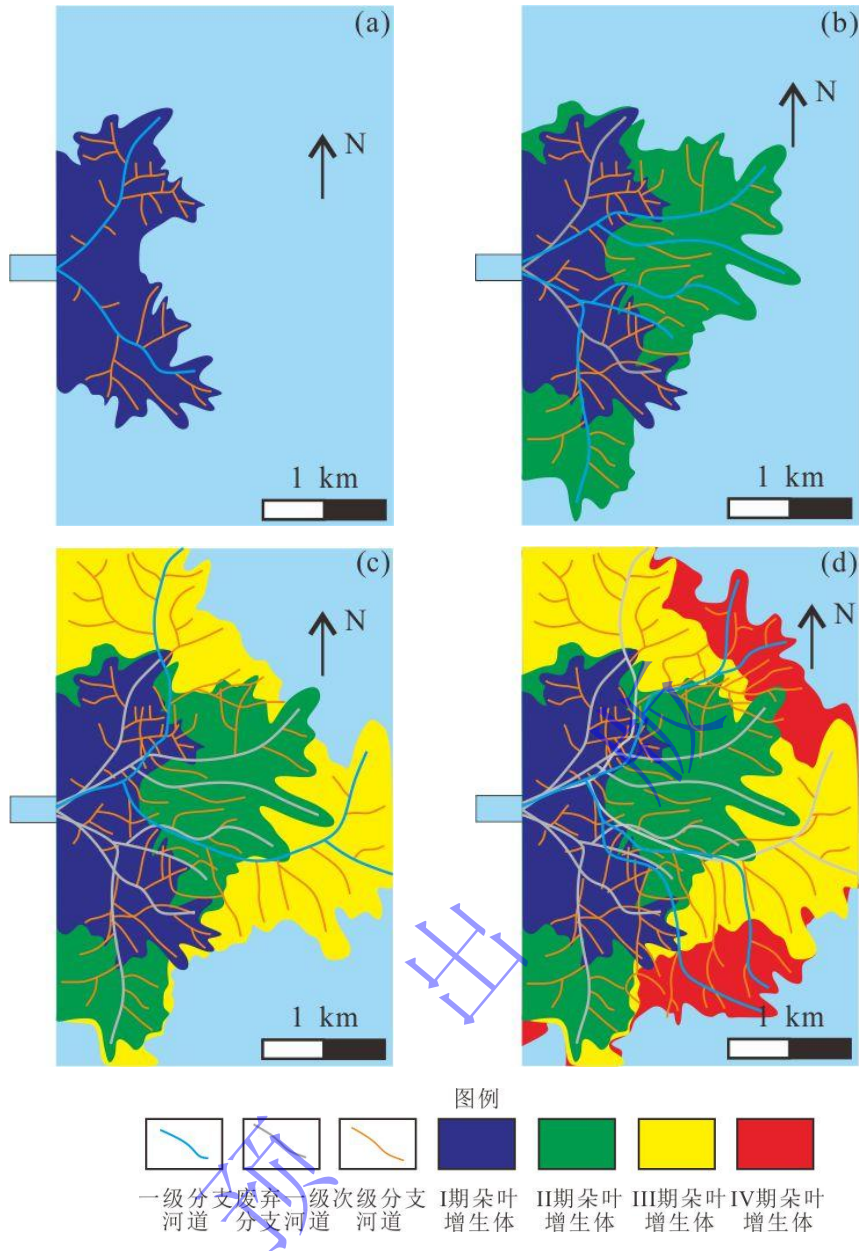


图 8 水动力数值模拟结果解释

(a) 第 239 步; (b) 第 562 步; (c) 第 937 步; (d) 第 1 267 步

Fig.8 Interpretation of hydrodynamic numerical simulation results

(a) step 239; (b) step 562; (c) step 937; (d) step 1 267

卫星影像在野外地质考察中具有指导作用,经过光学处理和变换后的卫星影像能够反映水域、植被覆盖、盐碱地、湖岸的期次及其边界,从而定性判断岩性组合特征和沉积相类型,不同期次的分支河道和朵叶体得以显现(郭丰杰等, 2022)。青海湖西北部浅水辫状河三角洲由三期朵叶增生体组成,西南部朵叶增生体发育 3 条一级分支河道和 8 条次级分支河道,朵叶体面积约 75 km²;西北部朵叶增生体发育 3 条一级分支河道和 7 条次级分支河道,朵叶体面积约 95 km²;中部朵叶增生体发育 3 条一级分支河道和 7 条次级分支河道,朵叶体面积约 25 km²(图 9)。

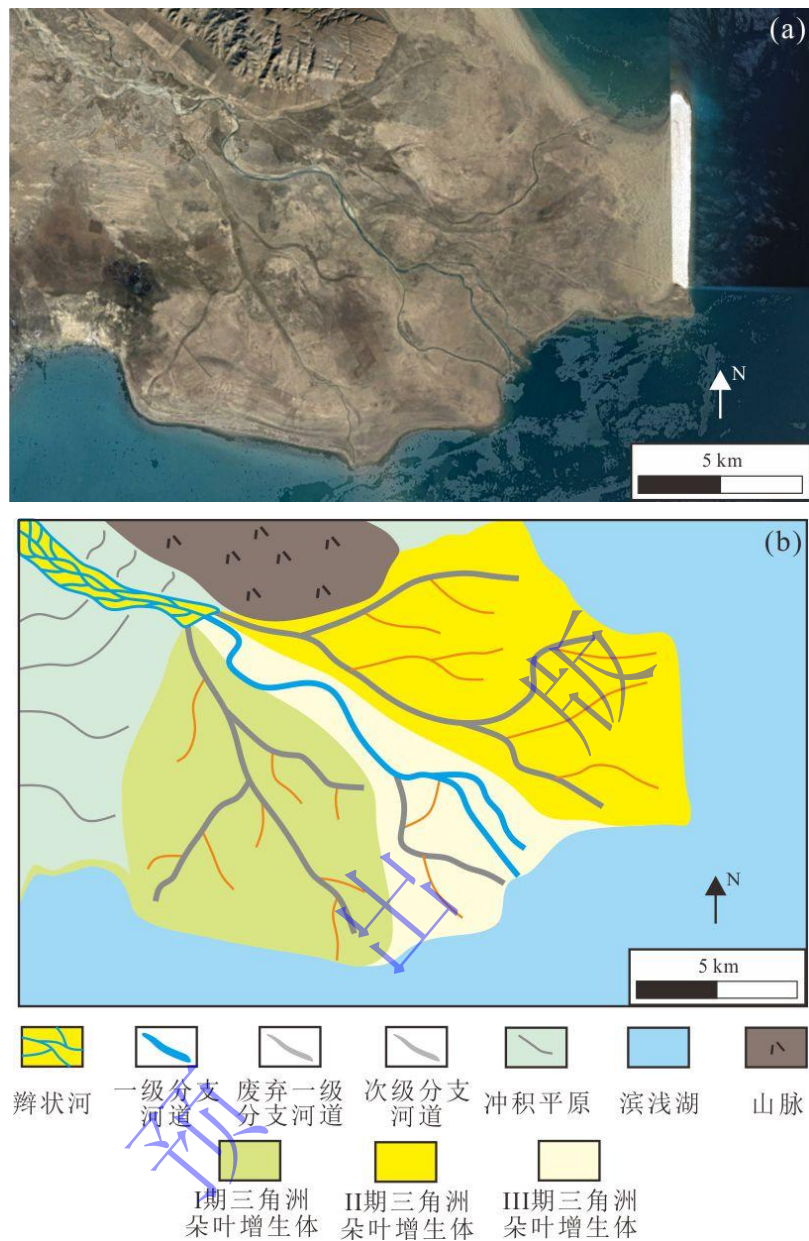


图9 布哈河三角洲卫星图像和沉积解释

(a) 布哈河三角洲卫星图像；(b) 布哈河三角洲沉积解释

Fig.9 Satellite image and interpretation of Buha river delta

(a)Satellite image Buha river delta; (b)Interpretation of Buha river delta

通过对比水动力数值模拟结果和现代沉积体系可以得出，浅水辫状河三角洲由一级分支河道、次级分支河道和多期次朵叶增生体组成。不同的是，水动力数值模拟结果中向源方向分支河道之间频繁交切，而布哈河三角洲未识别出交切现象。这种差异与沉积时间尺度密切相关。

对于布哈河三角洲现代沉积体系，一方面，近几十年来，青海湖地区处于高原大陆性气候，日照量大，雨量偏少，干湿季分明（祝存兄等，2022）。气候干旱和人类活动使雨季降

水量大幅减少,这意味着布哈河洪水期的水动力条件也相应减弱。由于供源河水动力强度受限,三角洲一级分支河道在洪水期不易发生决口改道,只会在河口处改变方向,不同期次一级分支河道没有继承性,分支河道之间便不会发生侵蚀交切。另一方面,0.01~0.1 ka 时间尺度的洪水期代表着一期事件性洪水沉积时期,这一尺度的一级分支河道不足以发生大规模的迁移改道,主要控制着次级分支河道和朵叶体的形成。布哈河三角洲近几十年来的演化过程更类似于本次水动力数值模拟的初始阶段。

相比之下,水动力数值模拟的河口边界条件假设洪水期温暖潮湿,河流流量为 $1\ 400\ \text{m}^3/\text{s}$,并且这一参数在洪水期内保持不变(宋亚开等, 2021)。本次数值模拟单次洪水期的时间间隔约等于百年,对应的是 0.1~1 ka 时间尺度的湿润气候而并非短期洪水事件,这一尺度下一级分支河道在主导形成次级分支河道和朵叶体的同时,会持续发生迁移改道,侵蚀前期的沉积体系。

3.2 基于河道分级的远源型浅水辫状河三角洲沉积模式

综合水动力数值模拟结果和现代沉积体系,总结了基于河道分级的远源型浅水辫状河三角洲沉积模式(图 10)。

远源型浅水辫状河三角洲由分支河道和多期次朵叶增生体组成。根据分支河道的从属关系,可将分支河道进一步划分为一级分支河道和次级分支河道。根据一级分支河道的水动力条件,可将一级分支河道进一步划分为活动一级分支河道和废弃一级分支河道。一个完整的洪水—间洪周期内,废弃的一级分支河道、次级分支河道和朵叶体是三角洲沉积厚度增加的主要场所,而活动的一级分支河道内部没有沉积物充填。洪水期活动一级分支河道以搬运作用为主,沉积物向前输送导致朵叶体的增生,次级分支河道由于水动力不足,迅速废弃并被沉积物充填。间洪期一级分支河道废弃,沉积物搬运能力下降导致朵叶体停止增生,废弃一级分支河道内部以沉积作用为主,充填较厚的沉积物。

不同级次的分支河道对浅水辫状河三角洲的朵叶增生具有不同的控制作用。一级分支河道具有“流速快、废弃慢、数量少、延伸长、改道频繁、下切程度高、内部沉积慢、废弃沉积厚”的特点。朵叶体发育于一级分支河道的前方,发育位置和方向与一级分支河道的洪水期改道方向有关。次级分支河道由一级分支河道决口分叉形成,具有“流速慢、废弃快、数量多、延伸短、改道不频繁、内部充填快、下切程度低”的特点,其数量和延伸距离影响着朵叶体的增生规模,数量多且延伸长的次级分支河道有利于朵叶体增生。

分支河道的切叠程度与沉积时间尺度有关,0.1~1 ka 时间尺度下的湿润气候包含了多期 0.01~0.1 ka 时间尺度的洪水事件。0.01~0.1 ka 时间尺度的洪水事件使季节性长源辫状河洪水

期水动力短期较强，一级分支河道改道分叉形成，形成相互独立、河网稀疏的多期孤立朵叶体群（李相博等，2021）（图 10a）。0.1~1 ka 时间尺度下，温暖潮湿的气候使季节性长源辫状河洪水期水动力较强，一级分支河道频繁的前向迁移、洪水改道、决口分叉和间洪废弃等现象造就了横纵交切、广布成网的前缘分支河道体系（黄若鑫等，2022）。在浅水湖盆环境下，随着三角洲不断向前推进，一级分支河道在前缘水下决口形成次级分支河道，控制着多期朵叶体的增生，并对废弃的分支河道体系和早期的朵叶增生体进行侵蚀改造，最终形成大规模的平面连通、纵向切叠的带状分支河道—朵叶增生体复合砂体（图 10b）。

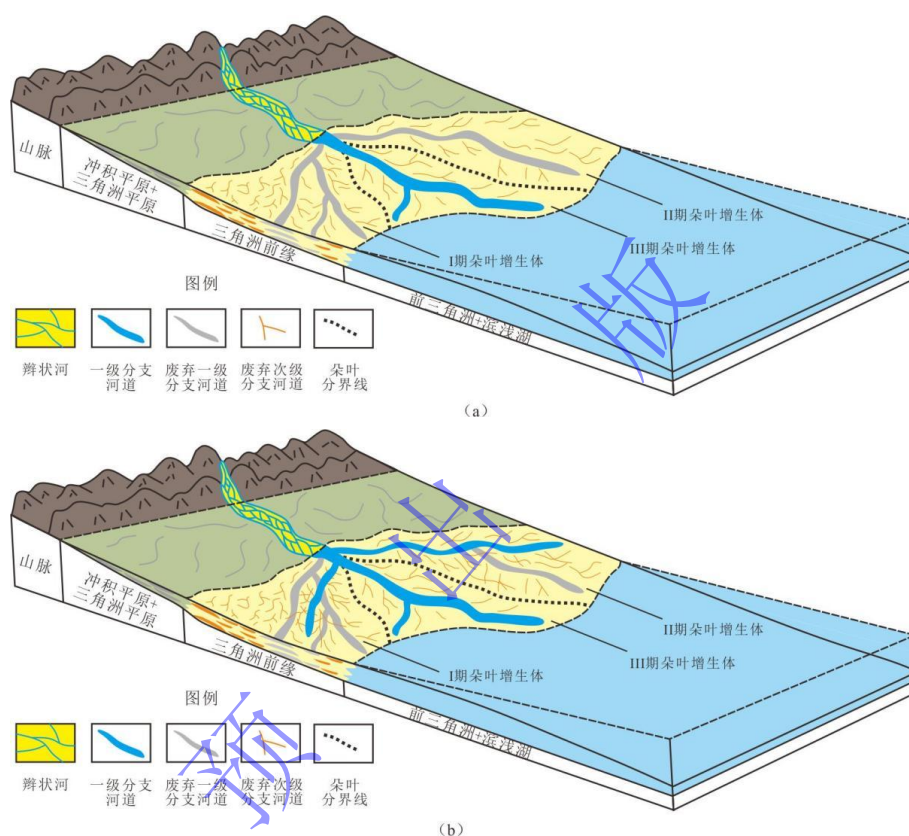


图 10 多级次分支河道控制下浅水辫状河三角洲沉积模式

(a) 0.01~0.1 ka 沉积尺度模式；(b) 0.1~1 ka 沉积尺度模式

Fig.10 Sedimentary model of shallow-water braided river delta controlled by multi-stage distributary channels

(a) 0.01-0.1 ka-scale model; (b) 0.1-1 ka-scale model

4 结论

(1) 远源型浅水辫状河三角洲由分支河道和多期朵叶体组成。分支河道可以划分为一级分支河道和次级分支河道。一个完整的洪水—间洪周期内，一级分支河道洪水期以搬运作用为主，间洪期以沉积作用为主。废弃的一级分支河道、次级分支河道和朵叶体是三角洲沉积厚度增加的主要场所，而活动的一级分支河道内部没有沉积物充填。

(2) 与次级分支河道相比，一级分支河道具有“流速快、废弃慢、数量少、延伸长、改道频繁、下切程度高、内部沉积慢、废弃沉积厚”的特点。一级分支河道的洪水期改道方向

控制朵叶体的发育位置和方向, 次级分支河道数量和延伸距离影响着朵叶体的增生规模。

(3) 分支河道的切叠程度与沉积时间尺度有关, 0.01~0.1 ka 时间尺度的洪水事件水动力短期较强, 一级分支河道决口分叉、不易改道, 易形成相互独立、河网稀疏的多期孤立朵叶体群。0.1~1 ka 时间尺度温暖潮湿的气候条件下, 洪水期水动力多期持续较强, 易形成大规模的平面连通、纵向切叠的带状分支河道—朵叶增生体复合砂体。

参考文献 (References)

- 艾晓, 陈相兆, 孙柏涛. 2021. 大同盆地云岗组石窟段河流相沉积特征[J]. 科学技术与工程, 21(9): 3495-3504. [Ai Xiao, Chen Xiangzhao, Sun Baitao. 2021. Sedimentary features of fluvial facies in the Shiku member of Yungang Formation in Datong Basin[J]. Science Technology and Engineering, 21(9): 3495-3504.]
- 曹天儒, 姚宗全, 德勒恰提·加娜塔依, 等. 2021. 准噶尔盆地西北缘吐孜阿克内沟八道湾组露头沉积特征及模式[J]. 科学技术与工程, 21(14): 5695-5709. [Cao Tianru, Yao Zongquan, Jianatayi Deleqati, et al. 2021. Sedimentary characteristics and model of outcrop the Badaowan Formation in Tuziakeneigou, northwestern margin of the Junggar Basin[J]. Science Technology and Engineering, 21(14): 5695-5709.]
- 陈春峰, 徐东浩, 张银国, 等. 2024. 西湖凹陷中北部花港组上段浅水辫状河三角洲发育特征[J]. 海洋地质前沿, 40(10): 39-48. [Chen Chunfeng, Xu Donghao, Zhang Yinguo, et al. 2024. Shallow braided river delta in the upper Huagang Formation in the central-northern part of Xihu Sag, East China Sea Basin[J]. Marine Geology Frontiers, 40(10): 39-48.]
- 樊晓伊. 2022. 准噶尔盆地春光探区古近系浅水辫状河三角洲沉积特征[J]. 特种油气藏, 29(4): 47-54. [Fan Xiaoyi. 2022. Sedimentary characteristics of Paleogene shallow braided river delta in Chunguang prospect area, Junggar Basin[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 29(4): 47-54.]
- 方健梅, 张家琦, 王贺年, 等. 2022. 青海湖主要入湖河流 57 年径流变化及其对气候变化的响应[J]. 西部林业科学, 51(4): 19-25, 33. [Fang Jianmei, Zhang Jiaqi, Wang Henian, et al. 2022. Annual runoff changes and their responses to climate change of main rivers into Qinghai Lake in the recent 57 years[J]. Journal of West China Forestry Science, 51(4): 19-25, 33.]
- 冯文杰, 刘超群, 王友净, 等. [2025-10-09]. 数值模拟认识浅水三角洲沉积构型及其非均质性[J/OL]. 沉积学报. <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2025.043>. [Feng Wenjie, Liu Chaoqun, Wang Youjing, et al. [2025-10-09]. Numerical simulation for understanding sedimentary architecture and heterogeneity in shallow-water deltas[J/OL]. Acta Sedimentologica Sinica. <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2025.043>.]
- 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.]
- 甘泉. 2021. 远源细粒辫状河心滩坝演化与河流分叉的交互沉积过程: 现代沉积启示与数值模拟分析[J]. 地质科技通报, 40(1): 14-26. [Gan Quan. 2021. Interaction and sedimentary process between the evolution of the bar and bifurcation of the river in the far-source fine-grained braided river: Numerical simulation analysis inspired by modern deposition[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 40(1): 14-26.]
- 郭丰杰, 李婷, 季民. 2022. 2000—2019 年青海湖面积时序特征分析及预测[J]. 科学技术与工程, 22(2): 740-748. [Guo Fengjie, Li Ting, Ji Min. 2022. Time series analysis and prediction of Qinghai Lake area from 2000 to 2019[J]. Science Technology and Engineering, 22(2): 740-748.]
- 郭颖, 陈奎, 高青松, 等. (2025-05-12). 不同流量砂质辫状河沉积演化与构型差异解析: 基于沉积数值模拟实验研究[J/OL]. 沉积学报. <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2025.011>. [Guo Ying, Chen Kui, Gao Qingsong, et al. (2025-05-12). The sedimentary evolution and architecture in sandy braided rivers with different discharge: Insights from a numerical model of sandy[J/OL]. Acta Sedimentologica Sinica. <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2025.011>.]
- 贺婷婷, 谈心, 段太忠, 等. 2021. 综合沉积正演与多点地质统计模拟辫状河三角洲: 以塔河 T 区为例[J]. 地质科技通报, 40(3):

- 54-66. [He Tingting, Tan Xin, Duan Taizhong, et al. 2021. Integrated sedimentary forward modeling and multipoint geostatistics in braided river delta simulation: A case from block T of Tahe oilfield[J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 40(3): 54-66.]
- 胡鑫, 朱筱敏, 金绪铃, 等. 2025. 准噶尔盆地永进地区侏罗系齐古组浅水辫状河三角洲沉积特征[J]. *岩性油气藏*, 37(2): 115-126. [Hu Xin, Zhu Xiaomin, Jin Xuling, et al. 2025. Sedimentary characteristics of the shallow-water braided river delta of Jurassic Qigu Formation in Yongjin area, Junggar Basin[J]. *Lithologic Reservoirs*, 37(2): 115-126.]
- 胡雅丹, 张飞, 范宣梅, 等. 2021. 布哈河流域不同时间尺度下土壤侵蚀对气候变化的响应特征[J]. *地球环境学报*, 12(3): 279-287. [Hu Yadan, Zhang Fei, Fan Xuanmei, et al. 2021. Response of soil erosion to climate change in different time scales in Buha River[J]. *Journal of Earth Environment*, 12(3): 279-287.]
- 黄若鑫, 张昌民, 冯文杰. 2022. 冲断带构造作用控制下的分支河流体系特征及其成因分析: 以塔里木盆地西北缘柯坪地区为例[J]. *沉积学报*, 40(1): 166-181. [Huang Ruoxin, Zhang Changmin, Feng Wenjie. 2022. Characteristics and factor analysis of distributive fluvial systems due to tectonic thrust belt activity: Example of Keping area, northwestern Tarim Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 40(1): 166-181.]
- 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.]
- 李相博, 刘化清, 邓秀芹, 等. 2021. 干旱环境河流扇概念与鄂尔多斯盆地延长组“满盆砂”成因新解[J]. *沉积学报*, 39(5): 1208-1221. [Li Xiangbo, Liu Huaqing, Deng Xiuqin, et al. 2021. The concept of fluvial fans in an arid environment: A new explanation of the origin of "sand-filled basins" in the Yanchang Formation, Ordos Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 39(5): 1208-1221.]
- 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.]
- 刘锐娥, 肖红平, 范立勇, 等. 2013. 鄂尔多斯盆地二叠系“洪水成因型”辫状河三角洲沉积模式[J]. *石油学报*, 34(增刊 1): 120-127. [Liu Ruie, Xiao Hongping, Fan Liyong, et al. 2013. A depositional mode of flood-induced braided river delta in Permian of Ordos Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 34(Suppl. 1): 120-127.]
- 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.]
- 刘雪萍, 卢双舫, 唐明明, 等. 2021. 河流—潮汐耦合控制下河口湾坝体沉积动力学数值模拟[J]. *地球科学*, 46(8): 2944-2957. [Liu Xueping, Lu Shuangfang, Tang Mingming, et al. 2021. Numerical simulation of sedimentary dynamics to estuarine bar under the coupled fluvial-tidal control[J]. *Earth Science*, 46(8): 2944-2957.]
- 宋亚开, 尹太举, 张昌民, 等. 2021. 分支河道型三角洲的数值模拟[J]. *大庆石油地质与开发*, 40(3): 42-50. [Song Yakai, Yin Taiju, Zhang Changmin, et al. 2021. Numerical simulation of a branch-channel delta[J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 40(3): 42-50.]
- 唐洪, 龙冠宇, 张章, 等. (2024-08-31). 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. (2024-08-31). Study on the sedimentary characteristics and evolution laws of 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>.]
- 汪新光, 张辉, 陈之贺, 等. 2021. 琼东南盆地陵水区中央峡谷水道沉积数值模拟[J]. *地质科技通报*, 40(5): 42-53. [Wang Xinguang, Zhang Hui, Chen Zhihe, et al. 2021. Numerical simulation of sedimentation in the central canyon of Lingshui area, Qiongdongnan Basin[J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 40(5): 42-53.]
- 吴娟娟, 王建萍, 陈亮, 等. 2014. 布哈河河口三角洲 1970~2010 年间面积变化研究[J]. *盐湖研究*, 22(2): 8-13. [Wu Juanjuan, Wang Jianping, Chen Liang, et al. 2014. The area change of Buha river estuary delta during the period of 1970-2010[J]. *Journal of Salt Lake Research*, 22(2): 8-13.]
- 吴宇翔, 柳保军, 张春生, 等. 2022. 珠江口盆地白云凹陷古近纪挠曲缓坡带三角洲沉积过程响应水槽模拟[J]. *石油实验地质*,

- 44 (3): 476-486. [Wu Yuxiang, Liu Baojun, Zhang Chunsheng, et al. 2022. Flume simulation of response of deltaic sedimentary process to Paleogene flexural gentle slope belt in Baiyun Sag, Pearl River Mouth Basin, northern South China Sea[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 44(3): 476-486.]
- 徐振华, 吴胜和, 刘钊, 等. 2019. 浅水三角洲前缘指状砂坝构型特征: 以渤海湾盆地渤海 BZ25 油田新近系明化镇组下段为例[J]. *石油勘探与开发*, 46(2): 322-333. [Xu Zhenhua, Wu Shenghe, Liu Zhao, et al. 2019. Sandbody architecture of the bar finger within shoal water delta front: Insights from the lower member of Minghuazhen Formation, Neogene, Bohai BZ25 oilfield, Bohai Bay Basin, East China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 46(2): 322-333.]
- 张宪国, 张育衡, 张涛, 等. 2020. 基于沉积数值模拟的辫状河心滩演化[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 44(2): 1-9. [Zhang Xianguo, Zhang Yuheng, Zhang Tao, et al. 2020. Analysis of braided bar evolution based on numerical simulation of deposition process[J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 44(2): 1-9.]
- 赵国祥, 官大勇, 刘朋波, 等. 2018. 庙西南凸起馆陶组浅水辫状河三角洲沉积特征及砂体演化[J]. *沉积学报*, 36(4): 807-817. [Zhao Guoxiang, Guan Dayong, Liu Pengbo, et al. 2018. Sedimentary characteristics and sand body evolution of shallow braided river delta of Guantao Formation in Miaoxi'nan uplift, Bohai Sea area[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 36(4): 807-817.]
- 朱筱敏, 潘荣, 赵东娜, 等. 2013. 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)*, 37(5): 7-14. [Zhu Xiaomin, Pan Rong, Zhao Dongna, et al. 2013. Formation and development of shallow-water deltas in lacustrine basin and typical case analyses[J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 37(5): 7-14.]
- 祝存兄, 史飞飞, 乔斌, 等. 2022. 基于高分 1 号卫星数据的青海湖扩张及湖滨沙地变化特征分析[J]. *干旱区研究*, 39(4): 1076-1089. [Zhu Cunxiong, Shi Feifei, Qiao Bin, et al. 2022. Analysis of Qinghai Lake expansion and lakeside sandy land change characteristics based on GF-1 satellite[J]. *Arid Zone Research*, 39(4): 1076-1089.]

Hydrodynamic Depositional Numerical Simulation and Its Implication for Shallow-Water Braided River Deltas

ZHANG BinChi^{1,2}, MA ShiZhong³, MA Lin^{2,4}, CONG Lin², FAN GuangJuan^{1,2}, KANG DeJiang⁵, BAI DongLai⁶, HE Wei⁷

1. State Key Laboratory of Continental Shale Oil, Northeast Petroleum University, Daqing, Heilongjiang 163712, China
2. School of Earth Sciences, Northeast Petroleum University, Daqing, Heilongjiang 163318, China
3. Sanya Offshore Oil & Gas Research Institute, Northeast Petroleum University, Sanya, Hainan 572024, China
4. Daqing Oilfield Design Institute Co., Ltd. Beijing Branch, Beijing 1000105, China
5. Exploration and Development Research Institute, PetroChina Daqing Oilfield Co., Ltd., Daqing, Heilongjiang 163712, China
6. Natural Resources Survey Center, China Geological Survey, Beijing 100055, China
7. SINOPEC Geophysical Corporation Nanfang Branch, Chengdu 610041, China

Abstract: [Objective] Significant progress has been made in the study of shallow braided river deltas both domestically and internationally. However, there is still insufficient research on the sedimentary evolution process, sedimentary characteristics, and hydrodynamic features of distant-source shallow braided river deltas. In particular, further exploration is needed to understand the role of branch river systems and the evolution of delta morphology. This study discusses the morphological evolution of this type of delta and the control of the

distributary channel system on the delta sedimentary patterns. **[Methods]** This study employed sedimentary numerical simulation technology to recreate the sedimentary evolution process of distant-source shallow braided river deltas based on modern sedimentary hydrodynamic conditions. Using Delft3D numerical simulation software, multiple simulations were conducted to analyze the control of distributary channel systems on delta morphology and sedimentary characteristics under different flow velocity conditions. A sedimentary evolution framework for distant-source shallow braided river deltas was established, and the sedimentary characteristics and evolution laws within this framework were explored. **[Results]** (1) The sedimentary evolution process of distant-source shallow braided river deltas consists of first-order and second-order distributary channels and multi-phase lobe bodies. First-order distributary channels primarily act as transport systems during flood periods, and as sedimentation systems during inter-flood periods. Abandoned first-order distributary channels, second-order distributary channels, and lobe bodies are the main areas for increased delta sediment thickness. (2) First-order distributary channels exhibit higher flow velocities, slower abandonment, fewer numbers, longer extensions, frequent channel migrations, deeper incision, slower internal sedimentation, and thicker abandoned sediment. These characteristics control the location and morphology of lobe bodies. In contrast, second-order distributary channels contribute less to sedimentation but influence the scale of lobe body development through their quantity and extension. (3) The degree of incision of distributary channels is closely related to sedimentation time scales. On the 0.01-0.1 ka time scale, short-term strong hydrodynamic forces result in isolated lobe body groups. On the 0.1-1 ka time scale, sustained strong hydrodynamics lead to the formation of banded distributary channels and composite sand bodies through the progradation of lobe bodies. **[Conclusion]** This study reveals the sedimentary evolution characteristics of distant-source shallow braided river deltas and clarifies the control of the distributary channel system on delta sedimentary patterns. Hydrodynamic conditions at different time scales significantly affect sediment distribution and delta morphology evolution, providing new theoretical support for understanding complex subsurface reservoir configurations.

Key words: reservoir architecture; channel hierarchy; coarse-grained delta; depositional micro-facies; distributary channel