

引用格式: 冯文杰, 刘超群, 王友净, 贾风娟, 张佩, 刘俊玲, 叶心月, 张昌民. 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, 2025, DOI: 10.14027/j.issn.1000-0550.2025.043. CSTR: 32268.14/j.cjxb.62-1038.2025.043. [FENG WeJie, LIU ChaoQun, WANG YouJing, JIA FengJuan, ZHANG Pei, LIU JunLing, YE XinYue, ZHANG ChangMin. Numerical Simulation for Understanding Sedimentary Architecture and Heterogeneity in Shallow-water Deltas[J/OL]. Acta Sedimentologica Sinica, 2025, DOI:10.14027/j.issn.1000-0550. 2025.043. CSTR: 32268.14/j.cjxb.62-1038. 2025.043.]

数值模拟认识浅水三角洲沉积构型及其非均质性

冯文杰¹, 刘超群¹, 王友净², 贾风娟³, 张佩³, 刘俊玲¹, 叶心月¹, 张昌民¹

1.长江大学地球科学学院, 武汉 430100

2.中国石油勘探开发研究院, 北京 100083

3.中国石油青海油田勘探开发研究院, 甘肃敦煌 736202

摘 要 【目的】浅水三角洲广泛见于含油气盆地中。根据泥沙含量, 可分为富砂质、砂泥质、富泥质三类, 其地貌形态、沉积特征、沉积构型及沉积物非均质性存在较大的差异。【方法】采用沉积数值模拟技术, 再现了三类三角洲的沉积演化过程。基于模拟所得沉积界面与粒度数据, 重构了其沉积构型与粒度分布模型, 进而通过精细解析演化过程, 建立了浅水三角洲的沉积构型模式, 并阐明了模式框架下的沉积非均质性特征。【结果与结论】(1) 物源泥沙比例是控制三角洲沉积演化的重要因素, 决定了堤岸的沉积速率与抗冲能力, 从而影响三角洲沉积演化并最终主导了其构型与非均质性; (2) 随着河流供给沉积物砂泥比由高变低, 三角洲分流河道数量逐渐减少, 分级层次逐渐减少, 分流河道占三角洲面积比例降低, 分流河道弯曲度升高、稳定性增强、侧向迁移能力降低、分流河道沉积由侧向迁移堆积转为废弃充填; (3) 富砂质三角洲多呈朵状、三角状, 分流河道广泛发育, 呈辐射状多级分流, 多具侧向迁移特征; 砂泥质三角洲多指分支状, 分流河道数量相对较少, 由主干分流河道控制并在其末端多向分流, 形成多个侧向复合的指状河坝组合; 富泥质三角洲分流河道数量少, 主要发育弯曲窄带状主干分流河道, 河道不具侧积特征, 多在决口废弃后充填泥质沉积物; (4) 富砂质三角洲砂体在平面上近连片分布, 沉积物粒度整体由近源部位向远源部位变细, 主干分流河道粒度最粗, 其次为河口坝, 平面非均质性较弱, 垂向和侧向上发育多期相对细粒侧积、前积夹层, 垂向非均质性强。砂泥质三角洲砂体在平面上呈宽带状分布, 主干分流河道与河口坝主体部位为相对粗粒优质储层, 末端分流河道多充填细粒沉积, 平面非均质性较弱, 垂向、侧向上发育多期侧积、前积泥质夹层, 垂向非均质性强。富泥质三角洲内部仅河口坝主体部位发育相对粗粒优质储层, 侧向上多被泥质充填河道隔挡, 平面非均质性强, 垂向、侧向可见多期泥质夹层, 垂向非均质性较弱。

关键词 浅水三角洲; 砂泥比; 沉积构型; 沉积非均质性; 沉积数值模拟

第一作者简介 冯文杰, 男, 1988 年出生, 博士, 副教授, 沉积学、油气田开发地质学、储层地质学, E-mail: fwj1017@yangtzeu.edu.cn

通信作者 张昌民, 男, 教授, 沉积学, E-mail: zcm@yangtzeu.edu.cn

中图分类号: P512.2 文献标志码: A 文章编号: 1000-0550 (2025) 00-0000-00

收稿日期: 2025-05-22; 收修改稿日: 2025-09-07

基金项目: 国家自然科学基金青年项目 (41802123); 国家自然科学基金重点项目 (42130813)

0 引言

浅水三角洲广泛见于含油气沉积盆地边缘缓坡区域(张昌民等, 2010; 付晶等, 2015; 冯文杰等, 2017), 蕴含大量油气资源, 在我国松辽盆地(楼章华等, 1999; 韩晓东等, 2000; 胡明毅等, 2009; 李洋等, 2013; 贾珍臻等, 2014; 蔡全升等, 2016; 赖洪飞等, 2017; 刘宗堡等, 2022)、渤海湾盆地(代黎明等, 2007; 付鑫等, 2021; 李建平等, 2023; 刘常妮等, 2025)、鄂尔多斯盆地(韩永林等, 2009; 李元昊等, 2009; 李洁等, 2011; 李树同等, 2013; 李媛等, 2019; 陈诚等, 2021; 刘翰林等, 2021)、准噶尔盆地(孙靖等, 2016; 冯怀伟等, 2024; 宋璠等, 2024; 朱青等, 2024)、四川盆地(刘柳红等, 2009; 刘君龙等, 2018; 高阳等, 2019)等大型含油气盆地中均有大量油气发现。因此, 长期以来, 浅水三角洲沉积特征、沉积(构型)模式及其控制的储层非均质性特征一直是沉积学研究的热点领域(Xu *et al.*, 2021, 2022; 刘宗堡等, 2022; 张佩等, 2023; 冯怀伟等, 2024; 宋璠等, 2024; 王于恒等, 2024; 徐振华等, 2024; 杨征等, 2024; 易定红等, 2024; 朱青等, 2024; 杨沁超等, 2025)。

综合浅水三角洲形态、沉积特征及储层发育情况, 可将其分为三类, 包括富砂质、砂泥质及富泥质三类。富砂质浅水三角洲由沉积物砂质含量较高的河流供源, 形态一般为朵状, 内部河道、河口坝高度叠切复合, 根据这一特征也可命名为叠覆式三角洲(张昌民等, 2010; 朱永进等, 2013; 尹太举等, 2014)、分流砂坝型三角洲(吴胜和等, 2019)、树枝状砂坝型三角洲(徐振华等, 2024), 典型的现代富砂质浅水三角洲为鄱阳湖赣江三角洲(图 1a)(张昌民等, 2010; 冯文杰等, 2017), 鄂尔多斯盆地延长组浅水三角洲为典型的富砂质浅水三角洲(邹才能等, 2008; 朱筱敏等, 2013; 刘翰林等, 2021)。富泥质浅水三角洲则由主要携带悬浮质沉积物的河流控制形成, 供给沉积物粒度细、泥质含量高、抗冲蚀能力强, 分流河道向湖弯曲延伸距离较远, 形成的河道—河口坝组合往往孤立发育(孙靖等, 2016; Klausen *et al.*, 2018), 前人多命名为指状三角洲(吴胜和等, 2019; 徐振华等, 2019; Xu *et al.*, 2022; 朱筱敏等, 2023)、分支河道型浅水三角洲(张昌民等, 2010), 典型的现代富泥质浅水三角洲为洞庭湖藕池河三角洲(图 1c)(张昌民等, 2010)。砂泥质浅水三角洲属于前两者的过渡类型, 河流供给的砂、泥质沉积物含量相当, 分流河道体系具有一定的分级分流特征, 河坝组合侧向复合关系复杂(孙雨等, 2010; 张莉等, 2017), 密西西比河三角洲属于典型的砂泥质浅水三角洲(图 1b)(吴胜和等, 2019)。前人通过系统的对照模拟实验证实: 供给沉积物砂泥质含量差异可控制三角洲沉积物粒度、沉积物黏性的分异

(Edmonds and Slingerland, 2010; Caldwell and Edmonds, 2014; Burpee *et al.*, 2015; Xu *et al.*, 2021), 并可通过三角洲分流河道堤岸建设速度与抗冲蚀能力的差异影响分流河道沉积演化特征, 导致不同形态、样式的三角洲形成。

截至目前, 前人针对浅水三角洲沉积特征、沉积模式及地下储层表征开展广泛的研究, 综合现代沉积(邹才能等, 2008; 张昌民等, 2010; 吴胜和等, 2019)、野外露头(付晶等, 2015; 李媛等, 2019)、井震数据(孙雨等, 2010; 纪友亮等, 2013; 刘宗堡等, 2022)建立了多种沉积(构型)模式, 利用近年来发展的沉积数值模拟技术揭示了河流供给沉积物砂、泥质含量差异控制的三角洲沉积地貌特征的差异(Edmonds and Slingerland, 2010; Caldwell and Edmonds, 2014; Burpee *et al.*, 2015; Xu *et al.*, 2021)。然而, 上述三类浅水三角洲动态沉积演化过程与规律、精细沉积构型模式尚缺乏系统的研究, 特别是储层构型框架约束下沉积物非均质分布特征与规律尚未明确。当前, 浅水三角洲沉积学研究的局限性制约了油气资源的高效勘探开发。

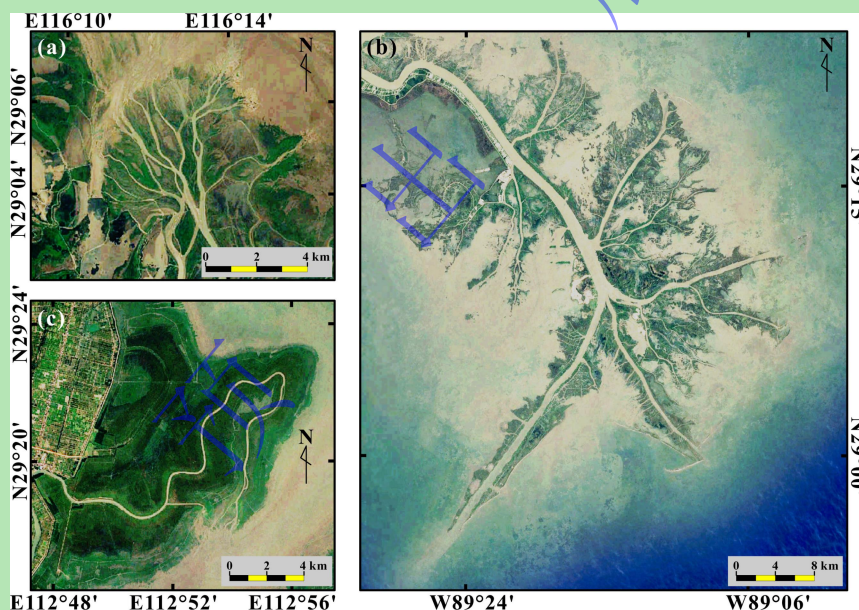


图 1 三类典型的现代浅水三角洲卫星照片

(a) 鄱阳湖赣江三角洲—富砂质; (b) 密西西比河三角洲—砂泥质; (c) 洞庭湖藕池河三角洲—富泥质

Fig.1 Satellite images of three typical shallow-water deltas

(a) Ganjiang sand-rich delta, Poyang lake; (b) Mississippi sandy-muddy delta; (c) Ouchi River mud-rich delta, Dongting lake

本文利用 Delft3D 软件, 通过多组对照模拟实验, 模拟再现富砂质、砂泥质、富泥质浅水三角洲沉积演化过程并记录沉积过程中水动力、沉积物搬运、沉积地貌、沉积物粒度分布等参数和数据。在此基础上, 利用定量化沉积模拟过程解析与 3D 数字模型重构技术开展解剖分析, 揭示三类典型浅水三角洲沉积构型及其控制的沉积物非均质特征。

1 实验设计

1.1 模拟网格与边界条件

模拟网格由 650×400 个网格单元构成，每个网格单元规模为 25 m×25 m，模拟区总面积为 162.5 km²。在网格内设定了由南向北逐渐变深的初始底形，底形最南端为水深 0 m 的平原区，其顺源宽度为 500 m。供水供砂河道位于平原区中间，宽 250 m、初始水深 4 m，由南部边界延伸至沉积区。沉积区水深由南部 2.0 m 逐步向北加深至 5.5 m，底床设定为一个平缓斜坡，坡度为 0.02°，符合浅水三角洲缓坡沉积背景。模拟区东、西、北三侧边界为开放边界，其水位设为 0 m，注入湖区水流从三侧边界自由流出，保证湖平面稳定（图 2、表 1）。

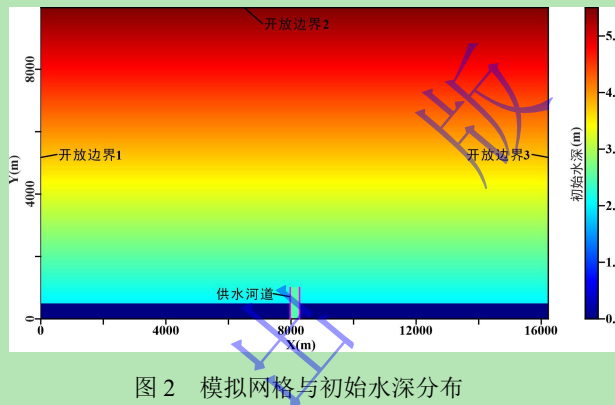


图 2 模拟网格与初始水深分布

Fig.2 Simulation grid and initial water depth distribution

在模拟过程中，水流量恒定为 1 000 m³/s，初始流速为 1 m/s。沉积物供应量恒定为 0.1 kg/m³，主要沉积物类型包括砂质和泥质两类，其中砂质沉积物按照沉积物粒度差异分为 NC300、NC150 及 NC80，对应沉积物粒度为 300 μm、150 μm 及 80 μm；泥质沉积物按照沉降速率差异分为 COH09、COH015 及 COH005，对应沉降速率为 0.9 mm/s、0.15 mm/s 及 0.05 mm/s。

表 1 沉积模拟边界条件

Table 1 Simulation boundary conditions

参数项	设定值	参数项	设定值
模拟网格/（个×个）	650×400	砂质沉积物干容重/（kg/m ³ ）	1 600
单网格规模/（m×m）	25×25	泥质沉积物干容重/（kg/m ³ ）	500
模拟区规模/（km×km）	16.25×10	模拟时间步长/min	0.2
供水河道宽度/m	250	沉积地貌输出时间步长/min	120
初始供水河道水深/m	4.0	总模拟输出步数/步	350
供水流量/（m ³ /s）	1000	地貌尺度参数/（1/1）	175
湖水水位/m	0	底床糙度-chezy 值/（m ^{1/2} /s），U 和 V	45, 45
砂质沉积物粒度/μm	NC300	邻近干网格侵蚀系数/（1/1）	0.25
	300		

泥质沉积物沉降速率/ (mm/s)	NC150	150	水平涡粘系数/ (m^2/s)	0.001
	NC80	80	沉积厚度变化记录下限/m	0.05
	COH09	0.9	底床坡度/ $^\circ$	0.02
	COH015	0.15	平滑时间/min	60
	COH005	0.05	沉积物计算最小深度/m	0.1

表 2 沉积物供应量与底床沉积物厚度

Table 2 Sediment feed rate and bedform thickness

模拟组			Run 1	Run 2	Run 3
供应沉积物含砂率			90%	50%	10%
供应沉积物含泥率			10%	50%	90%
泥质沉积物临界剪切应力/Pa			0.25	1.75	3.25
沉积物供应量合计/（kg/m³）			0.1	0.1	0.1
底床沉积物厚度总计/m			20	20	20
沉积物供应量 （kg/m³）	砂质沉积物	NC300	0.018	0.01	0.002
		NC150	0.036	0.02	0.004
		NC80	0.036	0.02	0.004
	泥质沉积物	COH09	0.004	0.02	0.036
		COH015	0.004	0.02	0.036
		COH005	0.002	0.01	0.018
底床沉积物厚度 （m）	砂质沉积物	NC300	3.6	2	0.4
		NC150	7.2	4	0.8
		NC80	7.2	4	0.8
	泥质沉积物	COH09	0.8	4	7.2
		COH015	0.8	4	7.2
		COH005	0.4	2	3.6

在模拟设定中，分别设定了三组模拟（Run 1~Run 3），其中 Run 1 供应沉积物中砂质含量为 90%、泥质含量为 10%，用于模拟富砂质三角洲；Run 2 供应沉积物中砂泥质含量均为 50%，用于模拟砂泥质三角洲；Run 3 供应沉积物中砂质含量为 10%、泥质含量为 90%，用于模拟富泥质三角洲。由于模拟过程中，沉积底床可能会遭受侵蚀，且被侵蚀的沉积物会混入三角洲中，故将 Run 1~Run 3 中底床沉积物厚度按照砂质 90%、50%及 10%，泥质 10%、50%及 90%的比例设定。在所有模拟中，NC300~NC80 三类砂质沉积组分比例均设为 1:2:2，COH09~COH005 三类泥质沉积组分比例设为 2:2:1。三组模拟中，底床沉积物总厚度均为 20 m。由于三组模拟中，砂泥质沉积物供应量不同，对应的泥质沉积物临界剪切应力分别设为 0.25、1.75 及 3.25 Pa，对应底床或三角洲泥质沉积物侵蚀难度逐渐增加。

模拟过程中，水动力与沉积物搬运及侵蚀过程计算时间步长设为 0.2 min，沉积地貌及沉积物粒度等数据记录时间步长为 120 min，地貌尺度参数为 175，底床糙度为 $45 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$ ，水平涡粘系数为 $0.001 \text{ m}^2/\text{s}$ 。按照每年度约 15 天主要沉积时间计算，每个数据记录时间步长

可等效为自然界 1 年。所有模拟组共模拟 350 个记录步长,可等效为自然界约 350 年沉积过程。

1.2 模拟数据处理方法

在模拟过程中,Delft3D 软件会按数据记录间隔存储流速与流向、水深、水位、沉积厚度、沉积物粒度等数据。为了分析沉积地貌、沉积构型特征,直接提取 350 个步长的沉积动力与沉积厚度数据,计算即可获得沉积地貌数据。参考 Feng *et al.* (2025) 的数字地层重构方法,可回溯分析沉积演化过程,计算经过频繁堆积、侵蚀、改造后最终保存在沉积记录中的沉积构型界面与构型要素空间展布特征,构建浅水三角洲三维沉积构型与沉积物粒度模型。模拟浅水三角洲沉积物随三角洲的沉积、侵蚀、改造过程不断发生变化。因此,第 350 步模拟结束后输出的沉积物组分体积含量数据可指示模拟结束后不同类型沉积物的空间分布。利用不同沉积组分中值粒径与体积含量加权计算可获得沉积物粒度数据体。在粒度计算过程中,根据泥质沉积物沉降速度可计算其等效中值粒径并参与沉积物粒度计算。根据计算,3 种泥质组分(COH09、COH015、COH005)的等效中值粒径约为 32.0 μm 、13.1 μm 、7.5 μm 。由于沉积物粒度数据是以规则网格方式记录的,无法直接匹配模拟三角洲沉积三维沉积构型模型,故通过网格坐标匹配法和体积加权几何平均法将沉积物粒度数据重采样至构型模型中,形成构型与沉积物粒度耦合模型,进而支撑模拟三角洲沉积构型解剖与沉积非均质性分析。

2 浅水三角洲沉积演化过程与沉积特征

2.1 浅水三角洲沉积动力特征、演化过程与规律

模拟结果显示,富砂质、砂泥质及富泥质浅水三角洲呈现出明显不同的演化特征,主要表现为三角洲整体形态、分流河道发育数量与网络样式、沉积物厚度差异分布(图 3)。

模拟的富砂质三角洲在演化开始阶段即形成朵状形态,发育多条分流河道(图 3a1)。在随后的发育过程中,其岸线保持平滑,整体形态为朵形或三角形,三角洲分流河道数量多且多呈发散的网状、水流分散程度高、河道迁移演化或废弃改道过程迅速、分流河道规模总体差异较小,水流分散均匀,三角洲地貌整体平缓均一(图 3a1~a3,图 4a1~a4)。广泛分布的河网导致三角洲分流河道体系过水截面面积较大、整体流速较低,主干分流河道流速一般为 1.0 m/s,主干外围分流河道流速一般为 0.5~0.8 m/s(图 4a1~a4)。

砂泥质三角洲演化初期发育 2 条分流河道,形态不规则,分流河道入湖延伸较为迅速(图 3b1),随着发育过程的持续,分流河道入湖形成较多类曲流河弯曲的分流河道—河口坝组合。分流河道呈现明显的主次差异,通常水流集中在 1~2 条分流河道内,主干河道流速达到

1.5 m/s 以上，而次级分流河道流速通常仅为 0.5 m/s 左右（图 4b1~b4）。主干河道通常较为稳定，并能延伸 5 km 以上，而次级分流河道通常流程较短，仅为 2~3 km，且主要由分流河道决口生成，形成类似乔木干支结构的分流河道组合。相比富砂质三角洲，砂泥质三角洲在任意时间发育的活动分流河道数量明显更少，迁移或叠切频次显著下降，河道两侧河口坝形成后通常原地保存，后续受侵蚀改造程度明显更低（图 3b1~b4）。

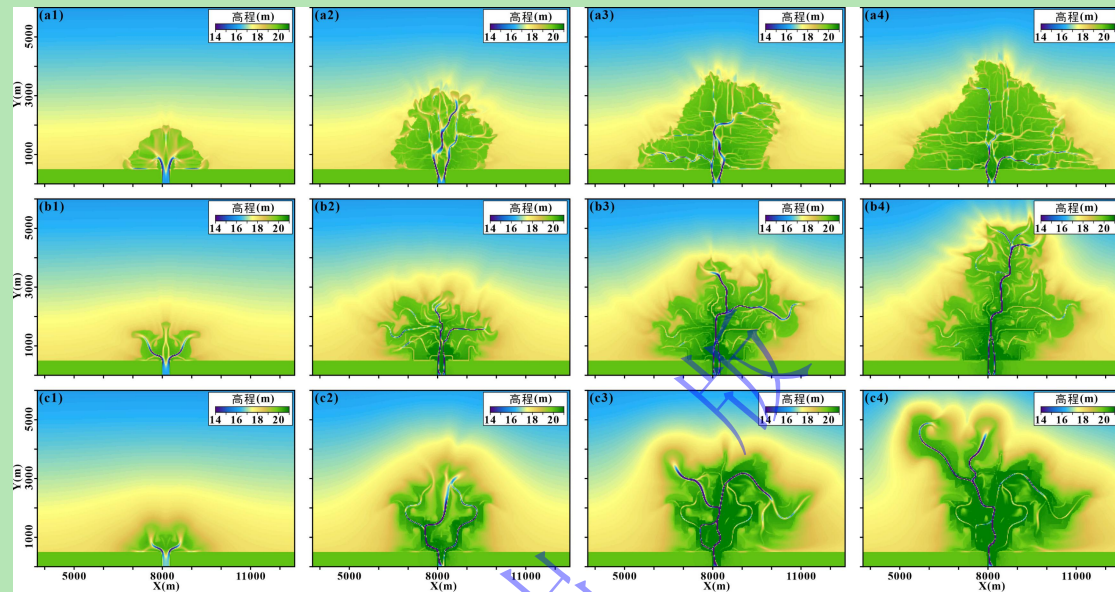


图 3 模拟三角洲沉积地貌特征

(a1~a4) Run 1, 富砂质三角洲, 模拟第 50、150、250、350 模拟步地貌; (b1~b4) Run 2, 一般三角洲, 模拟第 50、150、250、350 模拟步地貌; (c1~c4) 富泥质三角洲, 模拟第 50、150、250、350 模拟步地貌

Fig.3 Topographical features of the simulated deltas, run steps 50, 150, 250, 350

(a1~a4) Run 1, sand-rich delta; (b1~b4) Run 2, normal delta; (c1~c4) Run 3, mud-rich delta

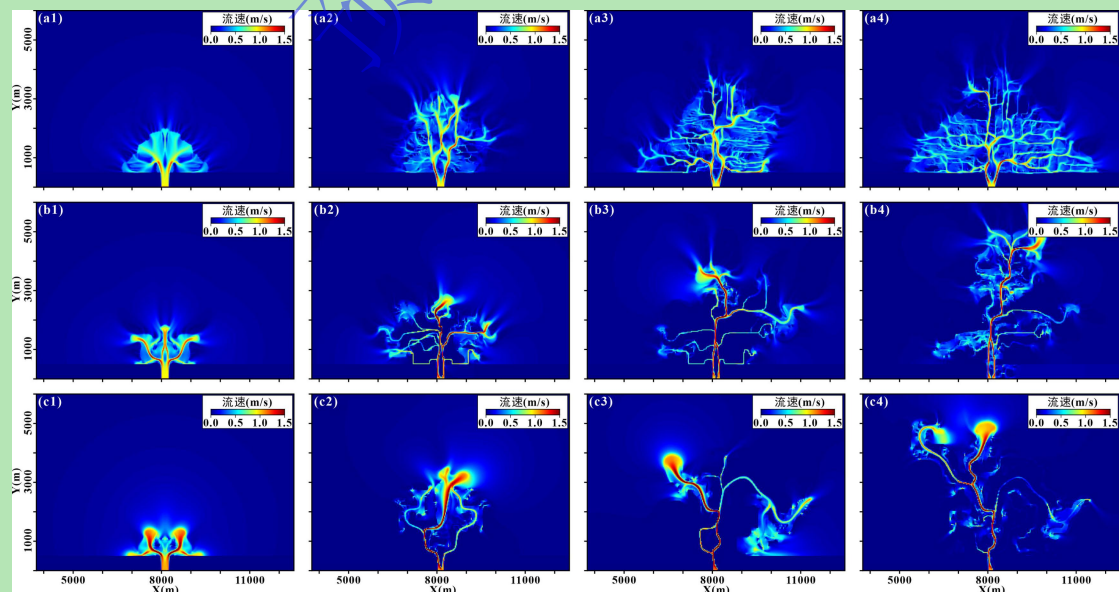


图 4 模拟三角洲流速分布特征

(a1~a4) Run 1, 富砂质三角洲, 模拟第 50、150、250、350 模拟步地貌; (b1~b4) Run 2, 一般三角洲, 模拟第 50、150、250、350 模拟步地貌; (c1~c4) 富泥质三角洲, 模拟第 50、150、250、350 模拟步地貌

Fig.4 Flow velocity distribution of the simulated deltas, run steps 50, 150, 250, 350

(a1~a4) Run 1, sand-rich delta; (b1~b4) Run 2, normal delta; (c1~c4) Run 3, mud-rich delta

富泥质三角洲在演化初始阶段与砂泥质三角洲类似, 河流入湖形成 2 条分流河道, 并各自向前延伸形成河坝组合 (图 3c1), 在后续演化中, 两条分流河道快速出现强弱分异, 形成以 1 条主干分流河道向湖蜿蜒延伸较远的河道样式。主干分流河道通常仅 1 条, 水流分布集中, 流速大于 1.5 m/s, 在分流河道发生决口改道后, 废弃的原分流河道内流速通常在 0.5 m/s 以下并逐步废弃充填 (图 4c1~c4)。相较于富砂质、砂泥质三角洲而言, 富泥质三角洲分流河道河口部位流速更高、呈现出朵状水流分散区 (图 4c1~c4), 易形成朵状河口坝。由于主干分流河道数量少、水流集中且沉积物以泥质成分为主, 河岸两侧天然堤建设速度较快, 地貌高程明显大于前两类三角洲 (图 3)。

2.2 浅水三角洲分流河道结构样式与发育规律

由于三类代表性浅水三角洲河道发育模式与演化行为特征存在较大差异, 在沉积活动结束后, 形成的分流河道体系样式也存在较大差异。为了精确呈现三角洲演化过程中, 分流河道发育情况, 按照每 1 个模拟记录步长提取三角洲内部水流速度场, 并提取水流速度在 0.5 m/s 以上的网格代表分流河道活动并记录为 1。累计计算不同模拟网格内, 共 350 个模拟步长内分流河道的活动状态并成图 (图 5)。结果表明: 富砂质三角洲分流河道网络分布广泛, 长期较稳定发育的主干河道多集中于三角洲近端部位, 分流河道网络呈现多级分流的特征, 模拟完成后分流河道发育区面积为 7.2 km², 三角洲总面积为 14.2 km², 河道发育区占三角洲总面积的 50.7%; 砂泥质三角洲分流河道发育程度相对砂质三角洲有所降低, 而主干河道延伸较远, 通常分流河道仅为 2 级分流, 模拟完成后分流河道发育区面积为 4.1 km², 三角洲总面积为 13.8 km², 河道发育区占三角洲总面积约 29.7%; 富泥质三角洲分流河道发育程度相对较低、数量较少, 主干分流河道可延伸至前缘河口部位, 模拟完成后分流河道发育区面积为 3.4 km², 三角洲总面积为 13.6 km², 河道发育区仅占三角洲总面积约 25.1%。

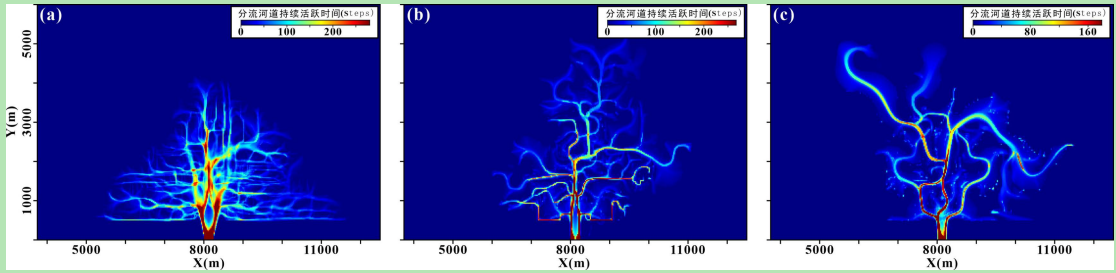


图 5 模拟三角洲分流河道网络分布特征

(a) Run 1; (b) Run 2; (c) Run 3

Fig.5 Distributary channel network of the simulated deltas:

3 浅水三角洲沉积构型样式

3.1 浅水三角洲沉积增生特征与差异性

碎屑岩沉积体系构型特征及其模式主要取决于演化过程中的侵蚀切割与充填动态。在三角洲体系中，分流河道及其控制的河口坝沉积活动与动态演化是决定沉积构型的关键过程。为了明确三类浅水三角洲沉积构型差异，以模拟第 299~300 步沉积厚度增量（Sediment Thickness Increment, STI）特征为例分析了分流河道及其控制的河口坝沉积特征。

富砂质三角洲表现为广泛分布的分流河道快速迁移并发生侵蚀和侧向增生及快速充填，河道末端河口坝增生范围小、数量较多（图 6a）；砂泥质三角洲则表现为废弃分流河道充填、活动分流河道向湖延伸并下切、河口坝增生面积大且多呈多分支指状（图 6b）；富泥质三角洲表现为废弃分流河道充填、活动分流河道快速向湖延伸并下切既有沉积物，同时形成 2 个大面积朵状河口坝增生体（图 6c）。三角洲内部新增沉积物堆积方式、形态及规模的差异以及分流河道迁移、充填样式的差异决定了其沉积构型特征也必然存在较大差异：富砂质三角洲分流河道频繁迁移叠切并改造下伏河口坝沉积；砂泥质三角洲分流河道迁移范围小、频率低，河口坝由指状坝复合而成；富泥质三角洲以朵状坝顺流增生复合为典型特征（图 6）。

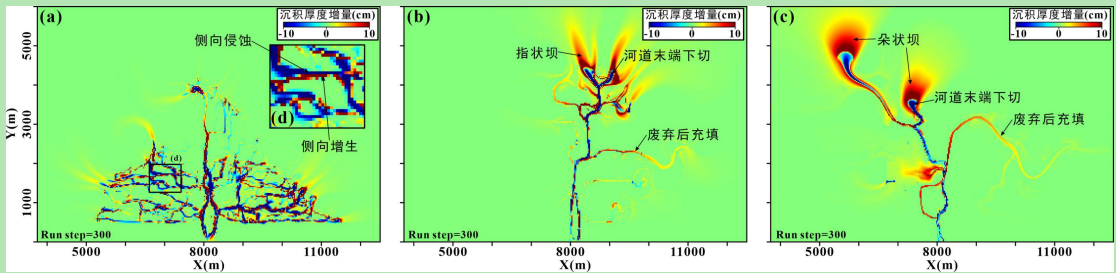


图6 模拟三角洲第299~300步长内沉积物增生特征

(a) Run 1; (b) Run 2 (c) Run 3

Fig.6 Sediment thickness increment from run step 299 to 300

3.2 富砂质浅水三角洲沉积构型

3.2.1 富砂质浅水三角洲平面构型特征

富砂质三角洲通常整体表现为三角形或朵形,内部发育复杂的分流河道体系,河道多呈辐射状由入湖口向不同方向延伸发育并在其末端形成河口坝沉积。为了揭示富砂质三角洲内部沉积构型特征,以50~60个模拟步长为间隔分别绘制三角洲沉积物增量分布图(图7)。

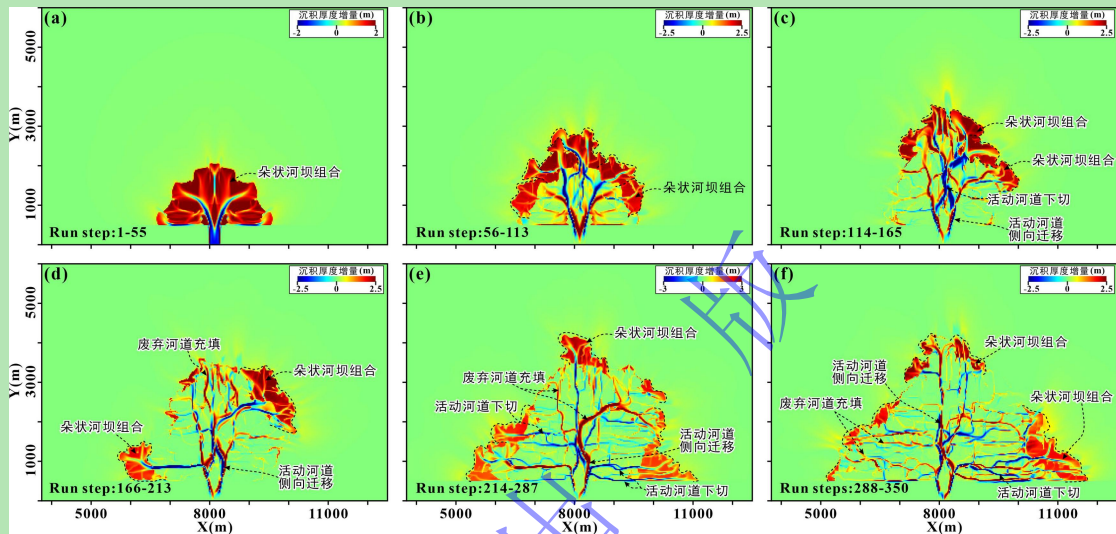


图7 富砂质浅水三角洲增生演化过程(Run 1)

(a~f) 富泥质三角洲在第1-55、56-113、114-165、166-213、214-287、288-350模拟步产生的沉积物厚度增量分布

Fig.7 Growth process of sand rich shallow-water delta (Run 1)

(a-f) Distribution of sediment thickness increment generated in simulation steps 1-55、56-113、114-165、166-213、214-287、288-350 of the sand rich delta

富砂质三角洲初始发育阶段主要形成较大规模的多分支分流河道与朵状河口坝(图7a);随后分流河道随着三角洲规模的增大延伸更远并分流成更多水道,新增沉积物主要分布于三角洲前缘和分流河道内,前缘部位主要由短距离延伸的末端河道控制的河口坝复合形成近环带状河口坝复合体(图7b),分流河道内的沉积主要为迁移侧积与废弃充填两类;随着三角洲的进一步生长,分流河道的数量逐渐增加,河道宽度逐渐减小,河道末端形成的河口坝逐渐分散为多个小规模、不规则状河口坝复合体,分流河道体系高频动态迁移、增生、废弃及充填(图7c~f)。综合来看,富砂质三角洲生长过程中,随着分流河道体系的逐级多分支演化,分流河道数量逐渐增加,河道规模逐渐减小,河口坝连片程度逐渐降低,单一河口坝规模逐渐减小。

3.2.2 富砂质浅水三角洲剖面构型特征

由于分流河道体系存在频繁的侧向迁移、决口改道活动，富砂质三角洲剖面上呈现出复杂的叠切结构（图 8）。以横切物源方向的剖面为例：三角洲中部以相对深切且反复叠切的分流河道为主，这类河道为三角洲主干河道，长期存续并反复侧向迁移，形成多期多向侧积结构，河道往往能深切至底床，河口坝沉积几乎不发育（图 8b, c）；在三角洲侧缘，分流河道规模明显变小，非主干河道可部分改造河口坝沉积，但受有限的河道规模与较短的存续时间限制，下切深度通常小于三角洲沉积厚度（图 8d, e），部分区域河口坝发育且保存程度较高，其内部可见明显的前积结构（图 8d）。在三角洲边缘部位，沉积厚度较平原一前缘区域明显减小，内部可见较为平坦的前三角洲细粒沉积，属于河口悬浮粉砂质沉积物缓慢堆积产物，其厚度波动与供源分流河道的分布与演化相关（图 8f）。

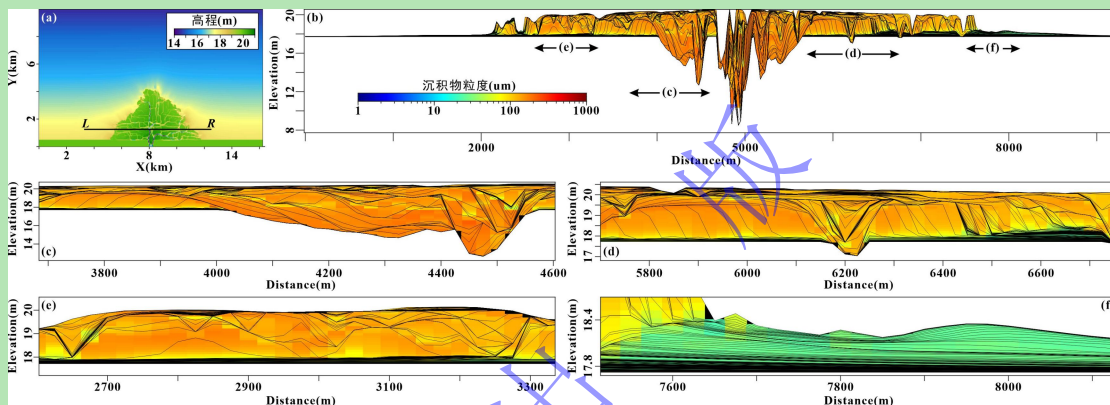


图 8 富砂质浅水三角洲物源方向沉积构型特征与沉积物粒度分布 (Run 1)

(a) 富砂质浅水三角洲地貌与剖面位置；(b) 沉积构型与粒度分布整体剖面；(c~f) 沉积构型与粒度分布局部剖面

Fig.8 Sedimentary architecture and grain size distribution of the simulated sand-rich shallow water delta (Run 1)

(a) Geomorphology of the sand-rich shallow water delta and location of section L-R; (b) Sedimentary architecture and sediment grain size distribution of the along the section L-R; (c-f) Sedimentary architecture and sediment grain size distribution of partial short sections in section L-R.

3.3 砂泥质浅水三角洲沉积构型

3.3.1 富砂质浅水三角洲平面构型特征

砂泥质三角洲整体上表现为多分支指状，由 1~2 条主干河道控制并发生分流，形成干支分异明显的分流河道体系（图 3b1~b4）。在沉积演化的初始阶段，延伸较近的主干分流河道形成了较为连片的河口坝组合（图 9a），随后分流河道向湖延伸距离快速增加并主要形成多方向同时发育的指状坝，指状坝多孤立或侧向边缘拼接并主要受主干河道分布控制，即在主干河道河口部位形成指状坝复合体（图 9）。

不同于富砂质三角洲，砂泥质三角洲主干河道及部分较大规模的分流河道废弃后，会在后续沉积过程中形成连续的废弃充填沉积，主干分流河道顺源方向上规模总体一致，未出现明显的宽度变小（图 9c~f）。此外，砂泥质浅水三角洲沉积活动往往集中在三角洲的局部

区域,并随着主干分流河道的决口或迁移演变而整体迁移,同时其他区域则缺乏沉积作用(图 3, 9)。

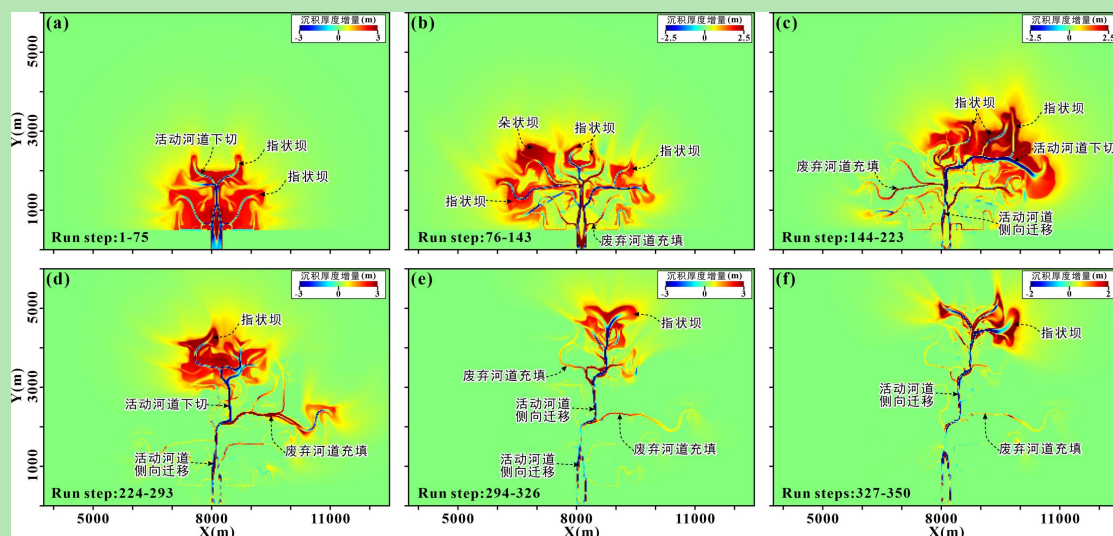


图 9 砂泥质浅水三角洲增生演化过程 (Run 2)

(a~f) 富泥质三角洲在第 1-75、76-143、144-223、224-293、294-326、327-350 模拟步产生的沉积物厚度增量分布

Fig.9 Growth process of the sandy-muddy shallow-water delta (Run 2)

(a-f) Distribution of sediment thickness increment generated in simulation steps 1-75、76-143、144-223、224-293、294-326、327-350 of the sandy-muddy delta

3.3.2 砂泥质浅水三角洲剖面构型特征

相比富砂质三角洲,砂泥质三角洲剖面结构复杂度有所降低,主要表现为分流河道侧向迁移强度降低、分流河道数量减少、河道下切能力普遍更弱(图 10)。在三角洲中部主干河道发育部位可见 1 条下切较深的水道,但其宽度小于 200 m(图 10b)。主干河道侧缘的较大规模分流河道内部可见多期次断距侧向迁移叠切形成的河道沉积,河道顶部通常具有废弃河道多期薄层向心充填特征(图 10c~e)。分流河道侧缘通常发育河口坝,其宽度通常为分流河道宽度的 2~5 倍,河坝组合通常保存较为完整,仅少量河口坝会受到后续河道的侵蚀(图 10b)。整体上,靠近三角洲中部分流河道及其控制的河口坝规模较大,河道侧向迁移现象明显(图 10c);而位于三角洲边部的分流河道及其控制的河口坝规模较小、分流河道通常不具有侧向迁移能力(图 10d~e),边缘部位部分河口坝未受分流河道切割(图 10f)。

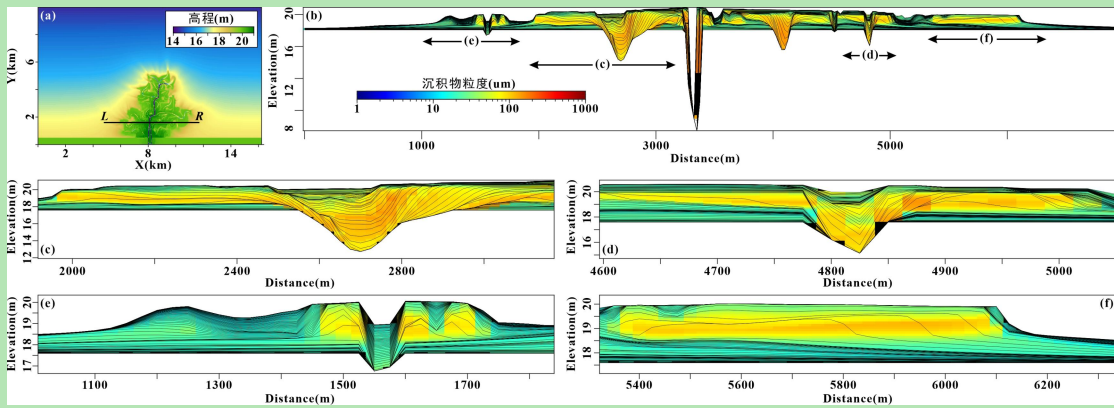


图 10 砂泥质浅水三角洲切物源方向沉积构型特征与沉积物粒度分布 (Run 2)

(a) 砂泥质浅水三角洲地貌与剖面位置; (b) 沉积构型与粒度分布整体剖面; (c~f) 沉积构型与粒度分布局部剖面

Fig.10 Sedimentary architecture and grain size distribution of simulated sandy-muddy shallow-water delta (Run 2)

(a) Geomorphology of the sandy-muddy shallow-water delta and location of section L-R; (b) Sedimentary architecture and sediment grain size distribution of the along the section L-R; (c-f) Sedimentary architecture and sediment grain size distribution of partial short sections in section L-R.

3.4 富泥质浅水三角洲沉积构型

3.4.1 富泥质浅水三角洲平面构型特征

富泥质三角洲发育初期, 供给河道入湖分流为 2 支并形成类似曲流河的弯曲河道, 河口坝在其两侧不对称发育。随后, 分流河道快速向湖延伸, 2 条分流河道中的 1 条逐步占据主导, 并持续在河道两侧形成不对称的河口坝 (图 3, 11)。不同于富砂质、砂泥质三角洲分流河道的频繁分流和决口, 富泥质三角洲分流河道数量少、决口或分流频次低, 河道持续向湖延伸并不断进积 (图 11)。由于富泥质三角洲分流河道分流或决口少、河道水流集中, 河口部位形成的指状河口坝规模较其他两类三角洲的规模更大, 加之河道持续弯曲延伸, 河口坝复合后可形成弯曲枝状坝体, 因此富泥质三角洲也可根据其形态命名为“枝状”三角洲 (图 3)。与砂泥质三角洲类似, 在分流河道不断向前延伸的同时, 近岸部位因河道决口废弃的河道被逐步充填 (图 11c~f)。根据沉积厚度增量分布规律观察, 富泥质三角洲沉积过程通常仅河口及尚未充填的废弃河道内发生沉积, 而其他区域无明显沉积作用 (图 11)。整体而言, 富泥质三角洲的构型特征可概括为顺弯曲河道持续进积的不对称河口坝与废弃河道充填沉积的复合体。分流河道几乎不发生侧向迁移, 通常仅作为水流和沉积物的输运通道, 难以形成河道砂体 (图 11)。

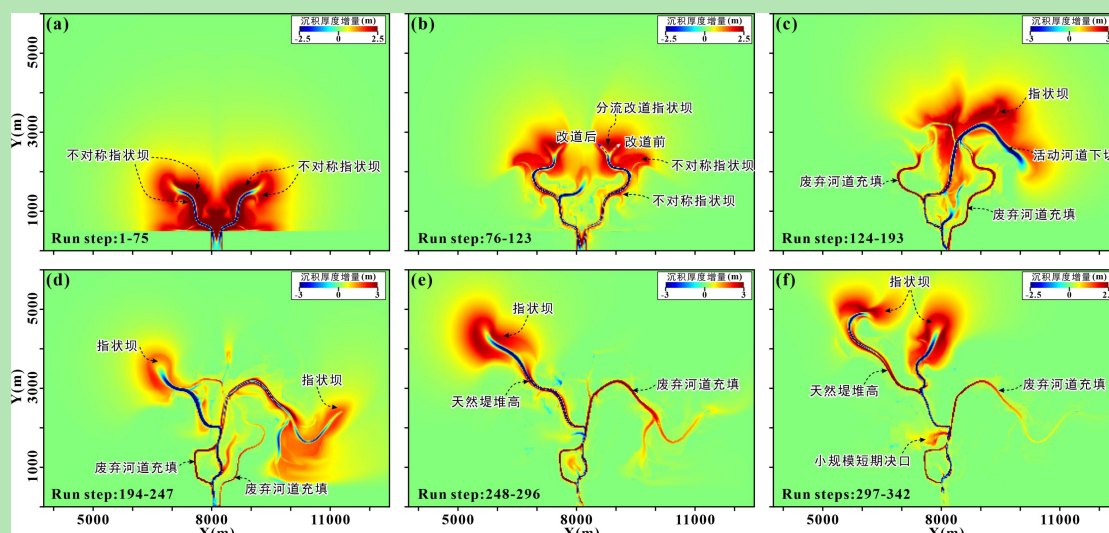


图 11 富泥质浅水三角洲增生演化过程 (Run 3)

(a~f) 富泥质三角洲在第 1-75、76-123、124-193、194-247、248-296、297-342 模拟步产生的沉积物厚度增量分布

Fig.11 Growth process of the mud-rich shallow water delta (Run 3)

(a-f) Distribution of sediment thickness increment generated in simulation steps 1-75, 76-123, 124-193, 194-247, 248-296, 297-342 of the mud rich delta

3.4.2 富泥质浅水三角洲剖面构型特征

富泥质浅水三角洲剖面结构主要表现为多期薄层河口坝垂向叠置并被分流河道切割(图 12)。分流河道通常可完整切穿三角洲沉积并轻微侵蚀底床,河道沉积通常表现为向心充填,未见河道侧积(图 12c~f),表明沉积过程中河道稳定,未发生侧向迁移,河道充填主要发生在废弃阶段,由弱水动力携带的悬浮沉积物充填。三角洲沉积体垂向上可识别出多期河口坝沉积,单期厚度较薄(图 12)。多期叠置的主要原因是弯曲的分流河道向湖延伸时,河口朝向动态变化,导致河口外沉积频繁侧向变迁。

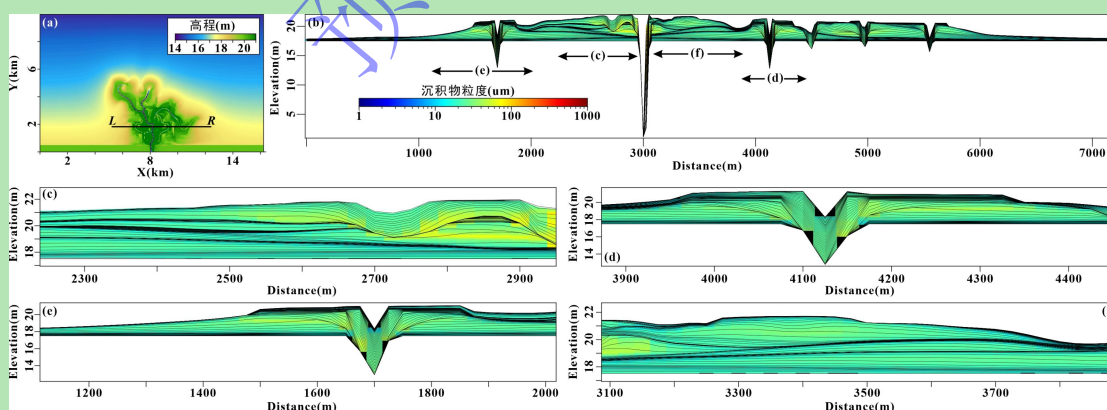


图 12 富泥质浅水三角洲沉积构型特征与沉积物粒度分布 (Run 3)

(a) 富泥质浅水三角洲地貌与剖面位置; (b) 沉积构型与粒度分布整体剖面; (c~f) 沉积构型与粒度分布局部剖面

Fig.12 Sedimentary architecture and grain size distribution of the simulated mud-rich shallow-water delta (Run 3)

(a) Geomorphology of the mud-rich shallow-water delta and location of section L-R; (b) Sedimentary architecture and sediment grain size distribution of the along the section L-R; (c-f) Sedimentary architecture and sediment grain size distribution of partial short sections in section L-R.

4 浅水三角洲沉积非均质性

三角洲的沉积非均质分布是控制储层沉积物粒度、岩性及储层物性的决定性因素。为了探索不同类型浅水三角洲的沉积非均质性，在沉积模拟过程中记录了沉积物粒度，并将粒度数据融入沉积构型框架，以揭示沉积构型控制的沉积物非均质分布特征（图 8，10，12）。

4.1 浅水三角洲内部岩性与沉积物粒度分布特征

由于供应沉积物类型与粒度的差异及其控制的沉积过程差异，导致三类典型浅水三角洲整体沉积物粒度及其分布特征存在较大差异。以模拟产生的沉积物粒度分布数据构建三维沉积体粒度模型，通过栅状图揭示了沉积物分布特征（图 13）。

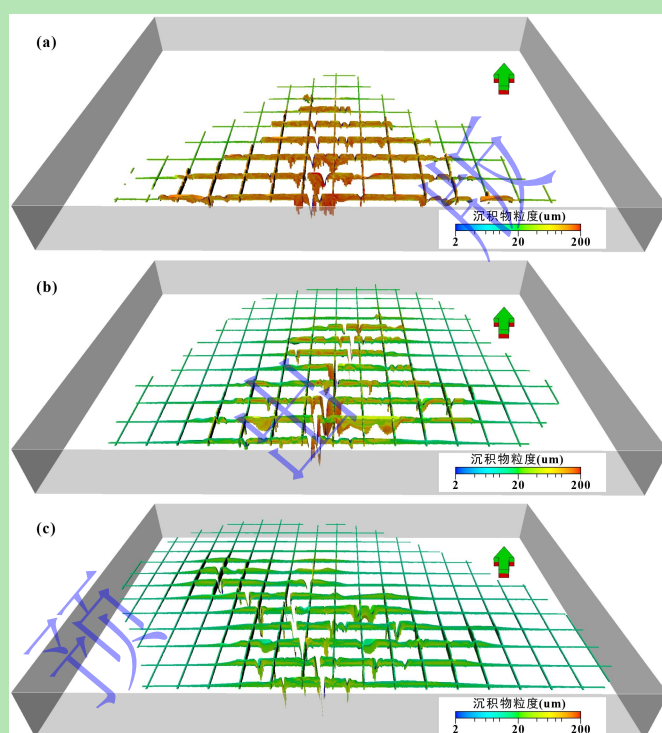


图 13 模拟三角洲沉积物粒度三维模型栅状图

(a) Run 1; (b) Run 2; (c) Run 3

Fig.13 Fence plot of sediment grain size model of the simulated deltas

富砂质浅水三角洲平原—前缘部位普遍偏中砂，砂体连续性强，内部非均质性不明显，河道沉积物粒度略粗于河口坝，前三角洲部位则以粉砂为主（图 13a）；砂泥质三角洲内部沉积物粒度分异较大，分流河道内沉积物粒度主要为中砂—细砂及粉砂，主要呈明显的正韵律特征，近河道的河口坝内沉积物粒度主要为细砂与粉砂，偏粗的中细砂体整体连续性较低，非均质性较富砂质三角洲明显较强（图 13b）；富泥质三角洲整体粒度偏细，沉积物以粉砂和细粉砂为主，粒度较粗的粉砂多分布于近河道的河口坝主体部位，分流河道多沉积废弃充填的泥质、细粉砂，河口坝中远端部位也主要沉积细粉砂及泥（图 13c）。

4.2 沉积构型框架内沉积韵律与非均质分布特征

为分析三角洲沉积物非均质分布特征，在平面网格上顺次选取网格面元，并在沉积物粒度模型中提取该面元所处垂向上所有网格单元中的粒度值，计算平均粒度与粒度方差，并绘制沉积物粒度均值平面分布图（图 14a1~a3）与垂向方差平面分布图（图 14b1~b3），并结合沉积构型剖面粒度分布（图 8，10，12）揭示的沉积韵律特征，综合分析浅水三角洲沉积物非均质分布特征。

富砂质三角洲沉积物粒度平面分布总体均衡，三角洲平原与前缘主体部位主要沉积中砂，边缘部位略细，主要沉积中、细砂，前三三角洲粒度细，主要沉积粉砂，未充填的分流河道内显示粒度较细，应为深切后底床暴露导致（图 14a1）。在构型剖面上，分流河道频繁叠切部位整体呈正韵律，内部夹多层相对细粒夹层（图 8c）。河口坝整体呈典型的反韵律，非连续前积界面处往往形成偏细粒夹层（图 8d~e）。尽管非均质性较强，三角洲平原与前缘部位仍能形成较为连续、粒度较粗的有利储层（图 8）。

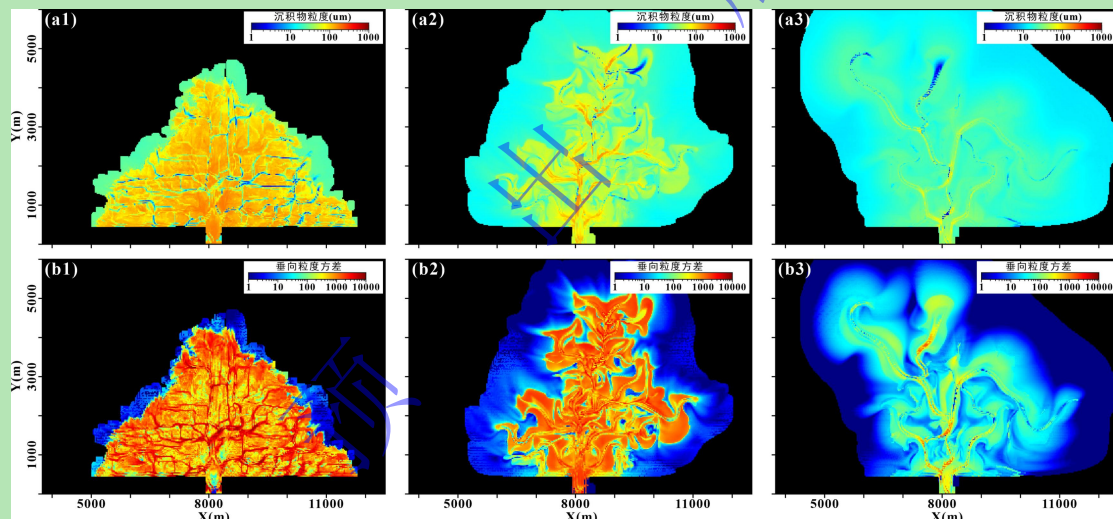


图 14 模拟三角洲垂向沉积物粒度几何平均值与粒度差异平面分布特征

(a1~a3) Run 1~Run 3 沉积物粒度几何平均值平面分布；(b1~b3) Run 1~Run 3 沉积物粒度垂向差异平面分布；图中黑色区域内沉积厚度小于 0.5 m，忽略

Fig.14 Planar distribution of the vertically geometric mean and variances of sediment grain size in the simulated deltas

(a1-a3) geometric mean sediment grain size distribution; (b1-b3) vertical grain size variance distribution; black area represents total sediment thickness < 0.5 m

砂泥质三角洲沉积物粒度呈现比较明显的分异，分流河道及其侧缘部位粒度较粗，主要沉积中砂，河口坝发育部位主要沉积细砂，河口坝之外的前三三角洲主要沉积粉砂（图 14a2）。在构型剖面上，砂泥质三角洲较大规模的分流河道发育部位沉积物粒度呈典型的正韵律，自下而上逐步变细并在顶部渐变为废弃泥质充填沉积，河口坝发育部位也可见典型反韵律特征

(图 10c~f)。部分小规模分流河道未发生侧向迁移,河道内主要沉积向心充填的细粉砂及泥质(图 10e)。在砂泥质三角洲沉积中,几乎所有分流河道均存在整体废弃或演化末期废弃充填现象。

富泥质三角洲沉积物粒度分异也较明显,分流河道发育部位主要沉积粉砂,临近河道的河口坝近端部位主要沉积细砂,且主要顺分流河道延伸方向弯曲延续,随着与分流河道距离增加,沉积物粒度逐渐变细为粉砂,不同于前两类三角洲平原—前缘与前三三角洲的粒度突变,横切物源方向上沉积物粒度逐渐变细(图 14a3)。在沉积构型剖面上,较粗的沉积物主要分布于靠近河道的河口坝主体部位,向边缘快速变细(图 12b~f)。所有分流河道均呈向心充填沉积,显示河道沉积主体为废弃后的细粒充填物,因而,在这类三角洲中,可形成有效储层的砂体整体分布较为有限且主要集中在分流河道侧缘,而分流河道实际上可视为连续的侧向物性或岩性隔挡体,会严重干扰地下油气资源开发。

垂向沉积物粒度方差平面分布图可指示三角洲不同部位沉积物分布的非均质程度:方差高的地方代表砂泥互层频繁、叠切关系复杂;低的地方则代表岩性均一、垂向变化不明显、叠切关系简单。富砂质三角洲沉积物粒度方差整体较高,主要由多期次叠切产生的偏细粒夹层(如前积夹层、分流河道侧向迁移夹层)造成,分流河道和三角洲前缘远端非均质性相对较强,三角洲中远端河口坝非均质性相对较弱(图 14b1);砂泥质三角洲沉积物粒度方差整体也较高,且同样集中于三角洲平原—前缘部位,不同于富砂质三角洲,砂泥质三角洲分流河道内非均质性相对较弱,河口坝发育部位非均质性强,但侧向变化较弱(图 14b2);富泥质三角洲整体非均质性相对较弱,分流河道两侧河口坝近端部位非均质性相对较强,从分流河道向河口坝边缘,非均质性逐渐降低(图 14b3)。

5 讨论

5.1 供给沉积物差异控制的三角洲沉积构型与非均质性

在模拟过程中,三类典型浅水三角洲的分流河道发育特征、活动方式与频率呈现出较大的差异并导致沉积构型与沉积物非均质分布特性的差异。对比富砂质、砂泥质、富泥质浅水三角洲,其沉积特征、沉积构型及沉积物分布非均质性存在显著的差异。随着供给沉积物由砂质为主转为泥质为主,三类三角洲呈现如下差异特征(表 3):①三角洲形态由三角状或朵状转为多指分支状、树枝状(Edmonds and Slingerland, 2010; Xu *et al.*, 2022);②三角洲沉积厚度由整体均衡转为集中于河坝组合(Burpee *et al.*, 2015; Xu *et al.*, 2021);③分流河道数量由多变少,分流河道弯曲度由低变高,分流河道体系样式由多级分流—多向辐射

状转为干支两级分流、主干河道弯曲改道(孙雨等, 2010; 张昌民等, 2010; 尹太举等, 2014), 分流河道体系占三角洲总面积比例由 50%降低至 20%; ④基本构型单元与组合样式由高度叠切的分流河道与残存河口坝转为侧向复合指状河坝组合、顺源复合河坝组合, 且河口坝规模由小变大, 河口坝保存程度由低变高, 河口坝形态由点状转为指状、朵状(吴胜和等, 2019); ⑤沉积物粒度相对较粗的优势储层分布位置由平原—前缘连片分布转为主干分流河道与河口坝, 最终变为河口坝近端, 连续性逐渐降低; ⑥优势储层分布样式由泛连通、宽带状连通转为局限不连续分布, 平面非均质性由弱变强(孙雨等, 2010; 徐振华等, 2019); ⑦垂向夹层由物性夹层转为泥质夹层, 夹层数量随叠切频次降低而逐渐减少, 非均质性由强变弱(吴胜和等, 2019; 马福康等, 2025)。

表 3 三类浅水三角洲沉积构型与沉积非均质性对比

Table 3 Comparison of sedimentary architecture and heterogeneity in the three types of shallow-water delta

三角洲类型	富砂质	砂泥质	富泥质
三角洲形态	三角状、朵状	多指分支状	树枝状
沉积厚度分布	均衡	集中于河坝组合	集中于河坝组合
分流河道数量	多	较多	少
分流河道弯曲度	低	较低	高
分流河道体系样式	多级分流	干支两级分流	主干河道改道
分流河道体系占三 角洲面积比例	多向辐射状 50%	分流河道岩主干分流 30%	弯曲枝状 20%
基本构型单元	叠切分流河道与河 口坝	侧向复合指状河坝组合	顺源复合河坝组合
分流河道叠切程度	高	较低	低
河口坝规模	小	较大	大
河口坝保存程度	较低	较高	高
河口坝形态	点状	指状	朵状
较粗粒沉积物分布 位置	平原—前缘, 较均匀	主干分流河道与河口坝	河口坝近端
平面非均质性	优质砂体泛连通, 非 均质性弱	优质砂体集中于河坝组合, 宽带状 连通, 非均质性较强	优质砂体局限于河口坝主体部位, 分流河 道侧向阻隔, 非均质性强
垂向非均质性	物性夹层发育 非均质性强	泥质夹层发育 非均质性强	非均质性较弱

5.2 不同类型浅水三角洲储层表征

浅水三角洲储层广泛发育于我国含油气沉积盆地, 蕴含丰富油气资源。根据模拟揭示的三类典型浅水三角洲沉积特征、沉积构型模式及沉积非均质性特征存在较大差异, 因此, 需根据各类浅水三角洲储层发育特征总结表征方法。

针对富砂质浅水三角洲，其典型识别标志为：朵状砂体近连片分布，砂体内部普遍发育复合韵律，河流成因沉积构造发育，地震属性通常无法辨识分流河道。在储层表征中，可优先识别三角洲朵体，并根据砂体韵律、河道占比、砂体厚度、砂体沉积物粒度识别多级分流河道并通过模式与规模约束构建分流河道体系，随后根据河口坝保存完善程度表征三角洲砂体内部构型（邹才能等，2008；朱筱敏等，2012；朱永进等，2013；张佩等，2023）。

针对砂泥质浅水三角洲，其典型识别标志为：多指分支状砂体呈宽带状发育，分流河道呈两级分流，主干河道宽且厚、分流河道窄且多向分流，分流河道正韵律典型，河口坝反韵律典型，河流成因与河口坝成因沉积构造共同发育，地震属性可有效辨识三角洲宽带状砂体、主干分流河道并可辨识分流河道。在储层表征中，可优先通过地震属性辨识主干河道与三角洲砂体展布，并根据砂体韵律、砂体厚度、沉积物粒度划分主干与分流河道及河口坝，通过模式指导，可有效构建两级分流河道体系及其侧缘河口坝，参考沉积模拟建立的定量化构型模式约束完成构型解剖（朱筱敏等，2013；张新涛等，2014；秦润森等，2020；袁选俊等，2021）。

富泥质浅水三角洲储层的典型识别标志为：树枝状弯曲分散的窄带状砂体，砂体内部以反韵律为主，河流成因沉积构造发育程度低、低流态牵引流沉积构造常见，地震属性可识别形态弯曲、断续或弱连续条带状砂体。在储层表征中，通过地震属性即可确定三角洲砂体大致展布，并结合分流河道、河口坝砂体沉积构型模式约束，结合单井相识别成果刻画分流河道体系展布与内部构型（孙靖等，2016；张莉等，2017；吴胜和等，2019；徐振华等，2019）。

6 结论

（1）河流供应沉积物类型与含量差异控制了浅水三角洲沉积特征，砂质沉积物易分散、易遭侵蚀，泥质沉积物易形成堤岸、抗冲蚀能力强。富砂质三角洲分流河道数量多，多级分流现象明显，同期活跃分流河道数量多、弯曲度低，水流分散程度高，易发生侧向迁移、决口、分流改道，三角洲沉积分散均匀，整体多呈朵状、三角状；砂泥质三角洲分流河道数量较少、弯曲度较低、呈两级分流，同期仅主干河道末端分流河道活跃，水流分散程度较高，仅主干分流河道具有侧向迁移特征，决口、分流频次显著降低，三角洲一般呈多指分支状；富泥质三角洲水流高度集中于少数主干分流河道，河道稳定性强、弯曲度高，决口频次低，河道未见侧向迁移现象，整体呈树枝状。

（2）分流河道发育特征、活动特性的差异控制了三类典型浅水三角洲沉积构型并呈现出显著的差异性。富砂质三角洲分流河道高度叠切，大部分河口坝随着三角洲的生长逐步被

顶积层覆盖而平原化后易被后期形成的分流河道切割而难以完整保存,其平原—前缘亚相为一高度叠切复合的泛连通砂体,分流河道占比较高,侧积层发育程度高,河口坝多伏于分流河道之下且保存程度较低。砂泥质三角洲主干分流河道规模较大,侧向迁移可形成侧积体,末端分流河道则多废弃充填,主要构型单元为分流河道—河口坝组合,分流河道占比较小,河口坝占比较高且多保存完整,在剖面上可见多个不同期次的河坝组合侧向复合,连通范围限于单个河坝组合。富泥质三角洲分流河道弯曲度高,河口坝多位于分流河道凹岸,随河道弯曲而在其两侧呈串珠状分布,分流河道高度稳定且不发生侧向迁移,多在决口废弃后形成细粒充填,仅河口坝主体部位形成相对较粗的优势储层并通常被废弃充填的分流河道侧向分隔,连续性差。

(3) 在沉积构型框架下,三角洲沉积物非均质分布特征存在较大差异。富砂质三角洲平原—前缘泛连片砂体均为较优质储层,其平面非均质性较弱,垂向、侧向可见多期由侧积、前积作用形成的物性夹层,垂向非均质性强。砂泥质三角洲分流河道—河口坝组合为较优质储层,平面非均质性较强,主干分流河道沉积物粒度粗、末端分流河道粒度细、河口坝粒度较粗,垂向、侧向可见多期河口坝披覆泥质夹层及少量侧积夹层,垂向非均质性强。富泥质三角洲优质储层局限分布于河口坝核心部位并受废弃充填河道侧向隔挡,平面非均质性强,垂向、侧向可见多期泥质夹层且优质储层层薄、数量少,非均质性强。

参考文献 (References)

- 蔡全升, 胡明毅, 胡忠贵, 等. 2016. 退积型浅水三角洲沉积演化特征及砂体展布规律: 以松辽盆地北部临江地区下白垩统泉头组四段为例[J]. 石油与天然气地质, 37(6): 903-914. [Cai Quansheng, Hu Mingyi, Hu Zhonggui, et al. 2016. Sedimentary evolution and distribution of sand bodies of retrogradational shallow-water delta: A case study from 4th member of the Cretaceous Quantou Formation in the Lingjiang area, Songliao Basin[J]. Oil & Gas Geology, 37(6): 903-914.]
- 陈诚, 齐宇, 喻梓靓, 等. 2021. 浅水三角洲河道砂体叠置关系的地震识别: 以鄂尔多斯盆地东缘临S区为例[J]. 天然气地球科学, 32(5): 772-779. [Chen Cheng, Qi Yu, Yu Ziliang, et al. 2021. Seismic identification of superposition relationship of the shallow water delta channel sand bodies: Case study of Linxing S area in eastern Ordos Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 32(5): 772-779.]
- 代黎明, 李建平, 周心怀, 等. 2007. 渤海海域新近系浅水三角洲沉积体系分析[J]. 岩性油气藏, 19(4): 75-81. [Dai Liming, Li Jianping, Zhou Xinhui, et al. 2007. Depositional system of the Neogene shallow water delta in Bohai Sea area[J]. Lithologic Reservoirs, 19(4): 75-81.]
- 冯怀伟, 许淑梅, 王金铎, 等. 2024. 浅水三角洲物源、砂体构型与储层特征研究: 以准噶尔盆地永进—莫西庄地区侏罗系三工河组二段为例[J]. 地质论评, 70(1): 330-345. [Feng Huaiwei, Xu Shumei, Wang Jinduo, et al. 2024. Study on shallow water delta provenance, sandbody architecture and reservoir characteristics: A case of the 2nd member of the Jurassic Sangonghe Formation in Yongjin—Moxizhuang region, Junggar Basin[J]. Geological Review, 70(1): 330-345.]
- 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.]

- 付晶, 吴胜和, 王哲, 等. 2015. 湖盆浅水三角洲分流河道储层构型模式: 以鄂尔多斯盆地东缘延长组野外露头为例[J]. 中南大学学报(自然科学版), 46(11): 4174-4182. [Fu Jing, Wu Shenghe, Wang Zhe, et al. 2015. Architecture model of shallow-water delta distributary channel in lake Basin: A case study of the Yanchang Formation outcrops in the eastern margin of Ordos Basin[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 46(11): 4174-4182.]
- 付鑫, 杜晓峰, 官大勇, 等. 2021. 地震沉积学在河流-浅水三角洲沉积相研究中的应用: 以渤海海域蓬莱A构造区馆陶组为例[J]. 地质科技通报, 40(3): 96-108. [Fu Xin, Du Xiaofeng, Guan Dayong, et al. 2021. Application of seismic sedimentology in reservoir prediction in fluvial to shallow water delta facies: A case study in Guantao Formation from the Penglai A structure area in Bohai Bay[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 40(3): 96-108.]
- 高阳, 胡向阳, 曾大乾, 等. 2019. 川西新场气田沙溪庙组浅水三角洲砂体类型与展布特征[J]. 现代地质, 33(6): 1163-1173, 1207. [Gao Yang, Hu Xiangyang, Zeng Daqian, et al. 2019. Sandbody type and distribution characteristics of shallow-water delta in Shaximiao Formation, Xinchang gas field, West Sichuan[J]. Geoscience, 33(6): 1163-1173, 1207.]
- 韩晓东, 楼章华, 姚炎明, 等. 2000. 松辽盆地湖泊浅水三角洲沉积动力学研究[J]. 矿物学报, 20(3): 305-313. [Han Xiaodong, Lou Zhanghua, Yao Yanming, et al. 2000. Analysis of the sedimentary dynamic process of the shallow-water lake delta in the Songliao Basin, Northeast China[J]. Acta Mineralogica Sinica, 20(3): 305-313.]
- 韩永林, 王成玉, 王海红, 等. 2009. 姬塬地区长8油层组浅水三角洲沉积特征[J]. 沉积学报, 27(6): 1057-1064. [Han Yonglin, Wang Chengyu, Wang Haihong, et al. 2009. Sedimentary characteristics of shallow-water deltas in Chang-8 subsection of Yanchang Formation, Jiyuan area[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 27(6): 1057-1064.]
- 胡明毅, 马艳荣, 刘仙晴, 等. 2009. 大型拗陷型湖盆浅水三角洲沉积特征及沉积相模式: 以松辽盆地茂兴-敖南地区泉四段为例[J]. 石油天然气学报, 31(3): 13-17. [Hu Mingyi, Ma Yanrong, Liu Xianqing, et al. 2009. Sedimentary characteristics and mode of shallow delta in large scale down wrap lacustrine Basin: By taking Quan-4 Formation in Maoxing and aonan region in Songliao Basin for example[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 31(3): 13-17.]
- 纪友亮, 卢欢, 刘玉瑞. 2013. 苏北盆地高邮凹陷古近系阜宁组一段浅水三角洲和滩坝沉积模式[J]. 古地学报, 15(5): 729-740. [Ji Youliang, Lu Huan, Liu Yurui. 2013. Sedimentary model of shallow water delta and beach bar in the member 1 of Paleogene Funing Formation in Gaoyou Sag, Subei Basin[J]. Journal of Palaeogeography, 15(5): 729-740.]
- 贾珍臻, 林承焰, 董春梅, 等. 2014. 大庆升平油田葡萄花油层葡萄一油组浅水三角洲储层构型研究[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 38(6): 9-17. [Jia Zhenzhen, Lin Chengyan, Dong Chunmei, et al. 2014. Shallow delta reservoir architecture analysis on Putaohua oil Formation in Shengping oilfield[J]. Journal of China University of Petroleum, 38(6): 9-17.]
- 赖洪飞, 秦智, 王洪君, 等. 2017. 高频基准面旋回控制下浅水三角洲及其砂体发育模式: 以松辽盆地扶余油田白垩系泉头组为例[J]. 古地学报, 19(4): 609-622. [Lai Hongfei, Qin Zhi, Wang Hongjun, et al. 2017. Development pattern of shallow-water delta and sandbodies under control of high-frequency base-level cycles: A case study of the Cretaceous Quantou Formation in Fuyu oilfield, Songliao Basin[J]. Journal of Palaeogeography, 19(4): 609-622.]
- 李建平, 刘子玉, 陈莹, 等. 2023. 浅水三角洲基本特征、形成条件及沉积模式: 以渤海新近系为例[J]. 地质科学, 58(4): 1340-1353. [Li Jianping, Liu Ziyu, Chen Ying, et al. 2023. Basic characteristics, Formation conditions and depositional models of shallow water deltas: A case study of Neogene in Bohai Sea[J]. Chinese Journal of Geology, 58(4): 1340-1353.]
- 李洁, 陈洪德, 林良彪, 等. 2011. 鄂尔多斯盆地西北部盒8段浅水三角洲砂体成因及分布模式[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 38(2): 132-139. [Li Jie, Chen Hongde, Lin Liangbiao, et al. 2011. Genesis and distribution pattern of shallow water delta sandbodies in member 8 of Lower Shihezi Formation in the northwest of Ordos Basin[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 38(2): 132-139.]
- 李树同, 王琪, 仲佳爱, 等. 2013. 鄂尔多斯盆地姬塬地区长8₁浅水三角洲砂体成因[J]. 天然气地球科学, 24(6): 1102-1108. [Li Shutong, Wang Qi, Zhong Jia'ai, et al. 2013. The genesis of sandbody in the shallow delta from Chang 8₁ of Jiyuan area in Ordos Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 24(6): 1102-1108.]
- 李洋, 朱筱敏, 宋英琦, 等. 2013. 松辽盆地榆树林油田下白垩统泉头组扶余油层浅水三角洲沉积特征及其演化[J]. 高校地质学报, 19(1): 23-31. [Li Yang, Zhu Xiaomin, Song Yingqi, et al. 2013. Sedimentary characteristics and evolution of shallow-water delta of the Lower Cretaceous Fuyu reservoir in the Yushulin Oil[J]. Geological Journal of China Universities, 19(1): 23-31.]

- 李媛, 张元福, 王桐, 等. 2019. 鄂尔多斯盆地子洲地区上三叠统延长组长1段沉积相和浅水三角洲河口坝发育规律[J]. 古地理学报, 21(5): 757-766. [Li Yuan, Zhang Yuanfu, Wang Tong, et al. 2019. Sedimentary facies of the member 1 of the Upper Triassic Yanchang Formation in Zizhou area of Ordos Basin and the development of mouth bar in shallow-water delta[J]. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 21(5): 757-766.]
- 李元昊, 刘池洋, 独育国, 等. 2009. 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, 11(3): 265-274. [Li Yuanhao, Liu Chiyang, Du Yugu, et al. 2009. 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, 11(3): 265-274.]
- 刘常妮, 吴胜和, 徐振华, 等. 2025. 湖盆浅水三角洲—离岸滩坝体系构型特征: 以东营凹陷胜坨油田沙河街组为例[J]. 石油科学通报, 10(3): 430-445. [Liu Changni, Wu Shenghe, Xu Zhenhua, et al. 2025. Architectural characteristics of shallow water delta-offshore beach-bar system in lacustrine Basin: Taking the Shahejie Formation of Shengtuo oilfield, Dongying Sag as an example[J]. Petroleum Science Bulletin, 10(3): 430-445.]
- 刘翰林, 邱振, 徐黎明, 等. 2021. 鄂尔多斯盆地陇东地区三叠系延长组浅水三角洲砂体特征及厚层砂体成因[J]. 石油勘探与开发, 48(1): 106-117. [Liu Hanlin, Qiu Zhen, Xu Liming, et al. 2021. Distribution of shallow water delta sand bodies and the genesis of thick layer sand bodies of the Triassic Yanchang Formation, Longdong area, Ordos Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 48(1): 106-117.]
- 刘君龙, 孙冬胜, 纪友亮, 等. 2018. 川西晚侏罗世前陆盆地浅水三角洲砂体分布特征与叠置模式[J]. 石油与天然气地质, 39(6): 1164-1178. [Liu Junlong, Sun Dongsheng, Ji Youliang, et al. 2018. Distribution characteristics and superimposition pattern of the Late Jurassic shallow water deltaic sand body in the foreland Basin of western Sichuan Depression[J]. Oil & Gas Geology, 39(6): 1164-1178.]
- 刘柳红, 朱如凯, 罗平, 等. 2009. 川中地区须五段—须六段浅水三角洲沉积特征与模式[J]. 现代地质, 23(4): 667-675. [Liu Lihong, Zhu Rukai, Luo Ping, et al. 2009. Characteristics and depositional models for the shallow-water deltas of the 5th-6th interval, Xujiahe Formation, Upper Triassic in Central Sichuan Basin, China[J]. Geoscience, 23(4): 667-675.]
- 刘宗堡, 李雪, 郑荣华, 等. 2022. 浅水三角洲前缘亚相储层沉积特征及沉积模式: 以大庆长垣萨北油田北二区萨葡高油层为例[J]. 岩性油气藏, 34(1): 1-13. [Liu Zongbao, Li Xue, Zheng Ronghua, et al. 2022. Sedimentary characteristics and models of shallow water delta front subfacies reservoirs: A case study of Sapugao oil layer in north- II block of Sabei oilfield, Daqing placanticline[J]. Lithologic Reservoirs, 34(1): 1-13.]
- 楼章华, 兰翔, 卢庆梅, 等. 1999. 地形、气候与湖面波动对浅水三角洲沉积环境的控制作用: 以松辽盆地北部东区葡萄花油层为例[J]. 地质学报, 73(1): 83-92. [Lou Zhanghua, Lan Xiang, Lu Qingmei, et al. 1999. Controls of the topography, climate and lake level fluctuation on the depositional environment of a shallow-water delta: A case study of the Cretaceous Putaohua reservoir in the northern part of Songliao Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 73(1): 83-92.]
- 马福康, 徐振华, 吴胜和, 等. 季节性湖平面变化下浅水三角洲指状砂坝沉积特征[J/OL]. 沉积学报, 1-23[2025-09-13]. <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2024.091>. [Ma Fukang, Xu Zhenhua, Wu Shenghe, et al. Sedimentary characteristics of the bar fingers in a shallow delta under seasonal lake level changes[J/OL]. Acta Sedimentologica Sinica, 1-23[2025-09-13]. <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2024.091>.]
- 秦润森, 岳红林, 周凤军, 等. 2020. 河控浅水三角洲前缘席状砂沉积特征及沉积模式探讨: 以黄河口凹陷渤中34地区明下段为例[J]. 沉积学报, 38(2): 429-439. [Qin Runsen, Yue Honglin, Zhou Fengjun, et al. 2020. Characteristics and sedimentary models of sheet sand in shallow lacustrine fluvial-dominated delta front: A case study from Lower member of Minghuazhen Formation in BZ34 area, Huanghekou Sag[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 38(2): 429-439.]
- 宋璠, 孔庆圆, 张学才, 等. 2024. 干旱型浅水三角洲沉积特征及沉积模式: 以准噶尔盆地腹部永进地区侏罗系齐古组为例[J]. 石油与天然气地质, 45(5): 1275-1288. [Song Fan, Kong Qingyuan, Zhang Xuecai, et al. 2024. Sedimentary characteristics and models of shallow-water deltas in arid settings: A case study of the Jurassic Qigu Formation in the Yongjin area within the hinterland of the Junggar Basin[J]. Oil & Gas Geology, 45(5): 1275-1288.]

- 孙靖, 薛晶晶, 吴海生, 等. 2016. 远源、细粒型浅水三角洲沉积特征与演化: 以准噶尔盆地腹部莫索湾地区八道湾组为例[J]. 沉积学报, 34(1): 129-136. [Sun Jing, Xue Jingjing, Wu Haisheng, et al. 2016. Distal fine-grain shallow-water delta sedimentary characteristics and evolution: A case from Badaowan Formation in the central Junggar Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 34(1): 129-136.]
- 孙雨, 马世忠, 姜洪福, 等. 2010. 松辽盆地三肇凹陷葡萄花油层河控浅水三角洲沉积模式[J]. 地质学报, 84(10): 1502-1509. [Sun Yu, Ma Shizhong, Jiang Hongfu, et al. 2010. Sedimentary mode of shallow lacustrine fluvial-dominated delta of putaohua reservoirs in the Sanzhao Depression, Songliao Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 84(10): 1502-1509.]
- 王于恒, 于福生, 李忠诚, 等. 2024. 浅水三角洲相控储层预测研究: 以松辽盆地中央坳陷大安地区泉四段为例[J]. 中国矿业大学学报, 53(3): 564-584. [Wang Yuheng, Yu Fusheng, Li Zhongcheng, et al. 2024. Shallow-water deltaic facies-controlled reservoir prediction study: A case study of the Quantou Formation in the Da'an area of the Central Depression, Songliao Basin[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 53(3): 564-584.]
- 吴胜和, 徐振华, 刘钊. 2019. 河控浅水三角洲沉积构型[J]. 古地理学报, 21(2): 202-215. [Wu Shenghe, Xu Zhenhua, Liu Zhao. 2019. Depositional architecture of fluvial-dominated shoal water delta[J]. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 21(2): 202-215.]
- 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.]
- 徐振华, 邓航, 吴胜和, 等. 2024. 河控浅水三角洲前缘树枝状沙坝沉积构型与形成机理[J]. 古地理学报, 26(6): 1338-1351. [Xu Zhenhua, Deng Hang, Wu Shenghe, et al. 2024. Depositional architecture and formative mechanism of dendritic bars within river-dominated shallow-water delta front[J]. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 26(6): 1338-1351.]
- 杨沁超, 张莉, 赛鲁星, 等. 2025. 干旱气候背景下的季节性浅水三角洲沉积演化: 以塔北地区古近系苏维依组为例[J]. 科学技术与工程, 25(13): 5316-5329. [Yang Qinchao, Zhang Li, Dou Luxing, et al. 2025. Sedimentary evolution of seasonal shallow water delta in arid climate: A case study of the Paleogene Suweiyi Formation in Tabei area[J]. Science Technology and Engineering, 25(13): 5316-5329.]
- 杨征, 吴胜和, 段冬平, 等. 2024. 西湖凹陷花港组浅水三角洲平原分流河道沉积构型[J]. 古地理学报, 26(3): 525-544. [Yang Zheng, Wu Shenghe, Duan Dongping, et al. 2024. Architecture characteristics of distributary channels in shallow water delta plain of the Huagang Formation in Xihu Sag, East China Sea[J]. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 26(3): 525-544.]
- 易定红, 石亚军, 刘俊丰, 等. 2024. 柴达木盆地南八仙地区渐新世浅水三角洲物源及沉积演化[J]. 地质学报, 98(2): 494-510. [Yi Dinghong, Shi Yajun, Liu Junfeng, et al. 2024. Provenance analysis and sedimentary evolution of Oligocene shallow water delta in the Nanbaxian area, northern Qaidam Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 98(2): 494-510.]
- 尹太举, 张昌民, 朱永进, 等. 2014. 叠覆式三角洲: 一种特殊的浅水三角洲[J]. 地质学报, 88(2): 263-272. [Yin Taiju, Zhang Changmin, Zhu Yongjin, et al. 2014. Overlapping delta: A new special type of delta formed by overlapped lobes[J]. Acta Geologica Sinica, 88(2): 263-272.]
- 袁选俊, 周红英, 张志杰, 等. 2021. 坳陷湖盆大型浅水三角洲沉积特征与生长模式[J]. 岩性油气藏, 33(1): 1-11. [Yuan Xuanjun, Zhou Hongying, Zhang Zhijie, et al. 2021. Depositional features and growth pattern of large shallow-water deltas in Depression Basin[J]. Lithologic Reservoirs, 33(1): 1-11.]
- 张昌民, 尹太举, 朱永进, 等. 2010. 浅水三角洲沉积模式[J]. 沉积学报, 28(5): 933-944. [Zhang Changmin, Yin Taiju, Zhu Yongjin, et al. 2010. Shallow-water deltas and models[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 28(5): 933-944.]
- 张莉, 鲍志东, 林艳波, 等. 2017. 浅水三角洲砂体类型及沉积模式: 以松辽盆地南部乾安地区白垩系姚家组一段为例[J]. 石油勘探与开发, 44(5): 727-736. [Zhang Li, Bao Zhidong, Lin Yanbo, et al. 2017. Genetic types and sedimentary model of sandbodies in a shallow-water delta: A case study of the first member of Cretaceous Yaojia Formation in Qian'an area, south of Songliao Basin, NE China[J]. Petroleum Exploration and Development, 44(5): 727-736.]

- 张佩, 钱其豪, 姜明忠, 等. 2023. 干旱湖盆边缘浅水三角洲沉积特征与沉积模式: 以青海尕斯库勒油田下油砂山组VI油组为例[J]. 沉积学报, 41(3): 839-854. [Zhang Pei, Qian Qihao, Jiang Mingzhong, et al. 2023. Depositional Characteristics and Sedimentary Model of a Shallow-water Delta at the Lake Margin in an Arid Climate: A case study based on the VI oil zone of the Lower Youshashan Formation, Gaskule oilfield, Qinghai[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 41(3): 839-854.]
- 张新涛, 周心怀, 李建平, 等. 2014. 敞流沉积环境中“浅水三角洲前缘砂体体系”研究[J]. 沉积学报, 32(2): 260-269. [Zhang Xintao, Zhou Xinhui, Li Jianping, et al. 2014. Unconfined flow deposits in front sandbodies of shallow water deltaic distributary systems[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 32(2): 260-269.]
- 朱青, 刘圣乾, 朱雪清, 等. 2024. 准噶尔盆地东道海子凹陷下侏罗统浅水三角洲沉积演化及主控因素[J]. 古地理学报, 26(3): 567-583. [Zhu Qing, Liu Shengqian, Zhu Xueqing, et al. 2024. Sedimentary evolution and main controlling factors of shallow water delta of the Lower Jurassic in Dongdaohaizi Sag, Junggar Basin[J]. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 26(3): 567-583.]
- 朱筱敏, 刘媛, 方庆, 等. 2012. 大型坳陷湖盆浅水三角洲形成条件和沉积模式: 以松辽盆地三肇凹陷扶余油层为例[J]. 地学前缘, 19(1): 89-99. [Zhu Xiaomin, Liu Yuan, Fang Qing, et al. 2012. Formation and sedimentary model of shallow delta in large-scale lake. Example from Cretaceous Quantou Formation in Sanzhao Sag, Songliao Basin[J]. Earth Science Frontiers, 19(1): 89-99.]
- 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, 37(5): 7-14.]
- 朱筱敏, 叶蕾, 谢爽慧, 等. 2023. 低可容空间陆相湖盆富砂浅水三角洲沉积模式及实例分析[J]. 古地理学报, 25(5): 959-975. [Zhu Xiaomin, Ye Lei, Xie Shuanghui, et al. 2023. Sedimentary models and case study of sand-rich shallow-water delta in continental lacustrine basins with low accommodation[J]. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 25(5): 959-975.]
- 朱永进, 张昌民, 尹太举. 2013. 叠覆式浅水三角洲沉积特征与沉积模拟[J]. 地质科技情报, 32(3): 59-65. [Zhu Yongjin, Zhang Changmin, Yin Taiju. 2013. Characteristics of superimposed shallow-lacustrine delta and its experimental simulation[J]. Geological Science and Technology Information, 32(3): 59-65.]
- 邹才能, 赵文智, 张兴阳, 等. 2008. 大型敞流坳陷湖盆浅水三角洲与湖盆中心砂体的形成与分布[J]. 地质学报, 82(6): 813-825. [Zou Caineng, Zhao Wenzhi, Zhang Xingyang, et al. 2008. Formation and distribution of shallow-water deltas and central-Basin sandbodies in large open Depression lake basins[J]. Acta Geologica Sinica, 82(6): 813-825.]
- Burpee A P, Slingerland R L, Edmonds D A, et al. 2015. Grain-size controls on the morphology and internal geometry of river-dominated deltas[J]. Journal of Sedimentary Research, 85(6): 699-714.
- Caldwell R L, Edmonds D A. 2014. The effects of sediment properties on deltaic processes and morphologies: a numerical modeling study[J]. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 119(5): 961-982.
- Edmonds D A, Slingerland R L. 2010. Significant effect of sediment cohesion on delta morphology[J]. Nature Geoscience, 3(2): 105-109.
- Feng W J, Gao F X, Zhang C M, et al. 2025. Sedimentary architecture of a sandy braided river: Insights from a flume experiment[J]. Petroleum Science, 22(1): 16-28.
- Klausen T G, Torland J A, Eide C H, et al. 2018. Clinoform development and topset evolution in a mud - rich delta - the Middle Triassic Kobbe Formation, norwegian barents sea[J]. Sedimentology, 65(4): 1132-1169.
- Xu Z H, Wu S H, Yue D L, et al. 2021. Effects of upstream conditions on digitate shallow-water delta morphology[J]. Marine and Petroleum Geology, 134: 105333.
- Xu Z H, Plink-Björklund P, Wu S H, et al. 2022. Sinuous bar fingers of digitate shallow - water deltas: Insights into their formative processes and deposits from integrating morphological and sedimentological studies with mathematical modelling[J]. Sedimentology, 69(2): 724-749.

Numerical Simulation for Understanding Sedimentary Architecture and Heterogeneity in Shallow-water Deltas

FENG WeJie¹, LIU ChaoQun¹, WANG YouJing², JIA FengJuan³, ZHANG Pei³, LIU JunLing¹, YE XinYue¹, ZHANG ChangMin¹

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

2. Research Institute of Petroleum Exploration & Development, PetroChina, Beijing 100083, China

3. Exploration and Development Research Institute of Qinghai Oilfield Company, PetroChina, Dunhuang, Gansu 736202, China

Abstract: [Objective] Shallow-water deltas are widely distributed in petroliferous basins. They can be classified into three categories based on their sediment composition: sand-rich, mixed sand-mud, and mud-rich, all of which exhibit significant differences in geomorphology, depositional characteristics, sedimentary architecture and sediment heterogeneity. [Methods] This study employed sedimentary numerical simulation technology to reproduce the depositional evolution processes of the three types of deltas. Their sedimentary architecture and grain size models were reconstructed from the simulated depositional interfaces and grain size data. Subsequently, from a detailed analysis of the evolutionary processes, sedimentary architectural models for shallow-water deltas were established and the characteristics of sedimentary heterogeneity within this model framework were elucidated. [Results and Conclusions] (1) The sediment supply ratio is a crucial influencing factor in deltaic depositional evolution, as it determines the sedimentation rate and erosion resistance of channel margins. On this basis, the evolution and ultimately the resultant architecture and heterogeneity are determined. (2) As the sand-to-mud ratio decreases, distributary channels exhibit reduced quantity, hierarchical complexity and areal proportion, as well as increased sinuosity, greater stability, diminished lateral migration capacity, and a transition from lateral migration-dominated filling to abandonment-dominated filling. (3) Sand-dominated deltas typically exhibit lobate or triangular shapes, with extensively developed distributary channels forming multistage, radial patterns. They frequently display lateral migration characteristics. Sandy-muddy deltas manifest as multi-fingered, branching forms with fewer distributary channels that are primarily controlled by trunk distributary channels with multi-directional bifurcations at their termini, creating multiple laterally amalgamated finger-like bar assemblages. Mud-rich deltas possess few distributary channels, being characterized by the development of narrow, sinuous, belt-like trunk distributary channels lacking lateral accretion features. These channels are predominantly infilled with muddy sediments following avulsion and abandonment. (4) Sand-rich deltas show near-continuous sand distribution with downstream fining. Coarsest grains occur in trunk channels, with finer grains in mouth bars, yielding weak planar heterogeneity but strong vertical heterogeneity due to multi-stage lateral/progradational fine-grained interbeds. Sandy-muddy deltas exhibit broad-banded sand bodies with coarse-grained reservoirs in trunk channels and mouth bars, weak planar heterogeneity, and strong vertical heterogeneity from muddy interbeds. Mud-rich deltas display strong planar heterogeneity, with reservoirs being restricted to mouth-bar cores that are laterally isolated by muddy channels, with weak vertical heterogeneity resulting from multi-stage muddy interbeds.

Keywords: Shallow-water delta; sand-to-mud ratio; sedimentary architecture; sedimentary heterogeneity; numerical simulations

