

# 河流与波浪强度对湖盆浅水三角洲-滩坝形成的控制作用

徐振华<sup>1,2</sup> 吴胜和<sup>1,2</sup> 刘常妮<sup>3</sup> 何倚剑<sup>4</sup> 朵海福<sup>1,2</sup> 马福康<sup>1,2</sup> 岳大力<sup>1,2</sup> 李伟<sup>1,2</sup>

1 油气资源与工程全国重点实验室, 中国石油大学(北京), 北京 102249

2 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249

3 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083

4 中国石油天然气股份有限公司华北油田分公司, 河北沧州 062500

**摘要:** 为揭示河流与波浪强度对湖盆浅水三角洲-滩坝形成的控制作用, 本文基于 Delft3D 开展了 15 次不同河流与波浪强度情况下的湖盆浅水三角洲-滩坝沉积数值模拟。结果表明, 浅水三角洲与滩坝可以是耦合发育的, 河流流量越大, 浅水三角洲规模和岸线糙度越大, 分流河道数量越多; 浪高越大, 浅水三角洲的规模和岸线糙度越小、分流河道数量越少, 滩坝的规模越大。河流与波浪相对强度影响着河流、波浪主控区与相互作用区的分布, 进而形成浅水三角洲发育型、沿岸滩坝发育型、浅水三角洲-沿岸滩坝复合型、浅水三角洲-沙嘴复合型和浅水三角洲-离岸滩坝复合型多类型沉积。本文创新提出了波浪-河流强度比  $W$ , 并揭示了不同类型湖盆浅水三角洲-滩坝形成的阈值范围。

**关键词:** 浅水三角洲 滩坝 波浪 沉积数值模拟 波浪-河流强度比

**中图分类号:** P618

**收稿日期:** 2026-1-8

## Controls of River and Wave Strength on the Formation of Shallow Water Delta-Beach Bar in Lacustrine Basins

Xu Zhenhua<sup>1,2</sup> Wu Shenghe<sup>1,2</sup> Liu Changni<sup>3</sup> He Yijian<sup>4</sup> Duo Haifu<sup>1,2</sup> Ma Fukang<sup>1,2</sup> Yue Dali<sup>1,2</sup> Li Wei<sup>1,2</sup>

1 *National Key Laboratory of Petroleum Resources and Engineering, China University of Petroleum(Beijing), Beijing 102249, China*

2 *College of Geosciences, China University of Petroleum(Beijing), Beijing 102249, China*

3 *PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Beijing 100083, China*

4 *PetroChina Huabei Oilfield Company, Hebei Cangzhou 062500, China*

**基金资助:** 中国石油大学(北京)科研基金资助(编号:2462025BJRC005、2462023YJRC034); 国家自然科学基金项目(编号:42202178)。

**第一作者及通讯作者简介:** 徐振华(1992—), 男, 副教授、硕士生导师, 主要从事沉积动力学与油气田开发地质研究。E-mail: xuzhenhua@cup.edu.cn, ORCID: 0000-0002-8899-5094.

**作者贡献度说明--徐振华:** 观点总结与文章撰写; **吴胜和:** 观点提炼; **刘常妮、朵海福、马福康:** 沉积数值模拟与部分图件绘制; **岳大力、李伟:** 论文修改与完善。

**Abstract:** To reveal the controlling effects of river and wave strength on the formation of shallow-water delta-beach bar systems in lacustrine basins, this study conducted 15 numerical sedimentary simulations of shallow-water delta- beach bar under different river and wave strength scenarios using Delft3D model. The results show that shallow-water deltas and beach bars can develop in a coupled manner. Specifically, greater river discharge leads to larger scales and higher shoreline roughness of shallow-water deltas, along with an increased number of distributary channels. In contrast, higher wave height results in reduced scales and lower shoreline roughness of shallow-water deltas, fewer distributary channels, but larger scale of beach bar complexes. The relative strength of rivers and waves influences the spatial distribution of river-dominated, wave-dominated, and interaction zones, thereby generating diverse sedimentary types, including shallow-water delta-dominated types, coastal bar-dominated types, shallow-water delta-coastal bar composite types, shallow-water delta-sand spit composite types, shallow-water delta-offshore bar composite types. This study innovatively proposes a wave-to-river strength ratio ( $W$ ) and identifies threshold ranges for the formation of different types of shallow-water delta-beach bar systems in lacustrine basins.

**Keywords:** Shallow-water delta; Beach bar; Wave; Sedimentary numerical simulation; Wave-to-river strength ratio

## 引言

湖盆浅水三角洲是一类发育于水体较浅、在构造稳定、地形相对平缓的浅水湖泊环境中形成的一类三角洲，是重要的油气储层类型，广泛发育于我国的大型含油气盆地中，如鄂尔多斯、渤海湾、四川、松辽盆地等（邹才能等，2008；朱筱敏等，2012；于兴河等，2013；吴胜和等，2019；赵汉卿等，2024；Li et al., 2026）。

在千年以内的高频尺度下，单期浅水三角洲形成过程主要受到自旋回的影响（Olariu, 2014；Straub et al., 2015；Xu et al., 2025）。在大型湖盆中，浅水三角洲的自旋回形成过程往往会受到河流与波浪作用的共同影响。河流作为供给来源，影响着浅水三角洲的向湖生长过程，例如，沉积物粒度越粗、砂泥比越低、黏度越低，则分流作用越强，三角洲易表现出朵状形态，反之表现为指状（Edmonds and Slingerland, 2010；Caldwell and Edmonds, 2014；Burpee et al., 2015）；河流排量决定了三角洲的供给强度，排量越高，三角洲的进积越远、面积越大（Edmonds et al., 2010；Xu et al., 2021）。另一方面，湖浪则是改造三角洲的重要营力，可以抑制三角洲的分流与进积作用，导致三角洲长度短、面积小、岸线光滑，河口坝发育程度低（Geleynse et al., 2011；Anthony, 2015；Liu et al., 2020；Hu et al., 2022；Zainescu et al., 2024）。同时，湖浪改造带来的沉积物常在三角洲前缘或者侧缘形成滩坝沉积（王昕等，2023；刘成龙等，2024；纪友亮等，2025），波浪强度（浪高）越强，滩坝的规模往往越小、数量越多（Hillen, 2009）。从现代沉积可以看出，在河流与波浪的综合作用下，湖盆浅水三角洲与滩坝各自发育程度不同、平面组合样式也很复杂（图 1），可以形成浅水三角洲-离岸滩坝（图 1b、c）、浅水三角洲-沙嘴（图 1d）、浅水三角洲-沿岸滩坝（图 1e）等不同的组合类型。那么，上述不同类型的浅水三角洲-滩坝的定量化的形成条件尚不清楚。

本文研究认为，河流与波浪强度是影响上述不同类型的浅水三角洲-滩坝形成的关键条件，但量化的形成条件及其控制作用尚缺乏研究。

本文利用基于 Delft3D 的沉积数值模拟方法，开展不同河流与波浪强度情况下的浅水三角洲-滩坝沉积数值模拟，阐明河流与湖浪强度对于浅水三角洲与滩坝形成的控制作用，进而揭示浅水三角洲-滩坝体系不同组合样式的形成条件。这一研究将对深化湖盆三角洲沉积学具有一定的理论意义，同时对于该类油气藏精细勘探和开发具有实际意义。



a. 江西赣江湖浪影响浅水三角洲；b. 西藏纳木卡措浅水三角洲-离岸滩坝；c. 西藏爬措浅水三角洲-离岸滩坝沉积；d. 东非图尔卡纳湖三角洲-沙嘴；e. 内蒙古岱海三角洲-沿岸滩坝；f. 内蒙古岱海沿岸滩坝

图 1 不同组合样式的浅水三角洲与滩坝现代沉积

## 1 研究方法与资料

Delft3D 是荷兰杜兰大学开发的一款三维水动力数值模拟软件，主要基于流体流动和泥沙运输的数值模型 (Marciano *et al.*, 2025)，已被证实能够有效模拟河流与波浪作用下的浅

水三角洲-滩坝形成过程 (Hillen, 2009; 刘常妮等, 2025)。本次利用 Delft3D 软件, 参考胜坨油田二区古近系沙河街组二段 2 砂组的沉积条件 (刘常妮等, 2025), 开展不同河流与波浪强度情况下的浅水三角洲-滩坝沉积数值模拟, 揭示河流与波浪强度对湖盆浅水三角洲-滩坝形成的控制作用。

### 1.1 沉积数值模拟原理

Delft3D 软件是通过解析深度平均的、非线性的浅水水动力方程式、沉积运移方程式和动量及质量守恒方程式, 求解沉积物搬运与沉积过程, 以实现沉积数值模拟。对于河流与波浪的作用, 分别在 Flow 与 Wave 模块实现, 通过交互式计算, 可以实现河流与波浪耦合作用下的浅水三角洲-离岸滩坝复合体系模拟。下面介绍一下关键的水动力方法:

水流流速的计算是通过雷诺数平均的纳维-斯托克斯 (Navier-Stokes) 方程来求解的 (Caldwell and Edmonds, 2014)。如果不考虑蒸发、降水、科氏力、风浪的影响, 深度平均的动量方程可表达为:

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{g \bar{u} |\sqrt{\bar{u}^2 + \bar{v}^2}|}{c^2 h} - \mu \left( \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial y^2} \right) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{g \bar{v} |\sqrt{\bar{u}^2 + \bar{v}^2}|}{c^2 h} - \mu \left( \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial y^2} \right) = 0 \quad (2)$$

式中,  $\zeta$  为水面高度, m;  $h$  为水深, m;  $\bar{u}$  与  $\bar{v}$  分别为顺流  $x$  方向与沿岸  $y$  方向上的深度平均的流速, m/s;  $g$  为重力加速度, m/s<sup>2</sup>;  $t$  为流动时间, s;  $\mu$  为涡流黏度;  $C$  为 Chèzy 黏度系数, m<sup>1/2</sup>/s。

悬移质的搬运过程利用三维深度平均对流-扩散方程来估计, 可表达为:

$$\frac{\partial c^{(l)}}{\partial t} + \frac{\partial uc^{(l)}}{\partial x} + \frac{\partial vc^{(l)}}{\partial y} + \frac{\partial (w-w_s^{(l)})c^{(l)}}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \epsilon_{s,x}^{(l)} \frac{\partial c^{(l)}}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left( \epsilon_{s,y}^{(l)} \frac{\partial c^{(l)}}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left( \epsilon_{s,z}^{(l)} \frac{\partial c^{(l)}}{\partial z} \right) \quad (3)$$

式中,  $c^{(l)}$  为泥沙组分 ( $l$ ) 的浓度, kg/m<sup>3</sup>;  $u, v, w$  为  $x, y, z$  方向上的流速, m/s;  $\epsilon_{s,x}^{(l)}, \epsilon_{s,y}^{(l)}, \epsilon_{s,z}^{(l)}$  为  $x, y, z$  方向上泥沙组分 ( $l$ ) 的涡流扩散系数, m<sup>2</sup>/s;  $w_s^{(l)}$  为受阻的泥沙组分 ( $l$ ) 的沉降速度, m/s。

推移质在单位宽度内的沉积物排量用以下方程计算:

$$q_{b,i} = 0.006 w_{s,i} D_i \left( \frac{u(u-u_{c,i})^{1.4}}{(RgD_i)^{1.2}} \right) \quad (4)$$

式中,  $q_{b,i}$  为沉积物组分 ( $i$ ) 在单位宽度内的推移质沉积物排量, m<sup>2</sup>/s;  $R = \rho_s / \rho_w - 1$ ,  $\rho_s$  和  $\rho_w$  分别为沉积物和水体的比重;  $u$  为深度平均的流速, m/s;  $D_i$  为沉积物组分 ( $i$ ) 的粒度直径, m;  $u_{c,i}$  为沉积物组分 ( $i$ ) 起动的深度平均的临界流速, m/s。

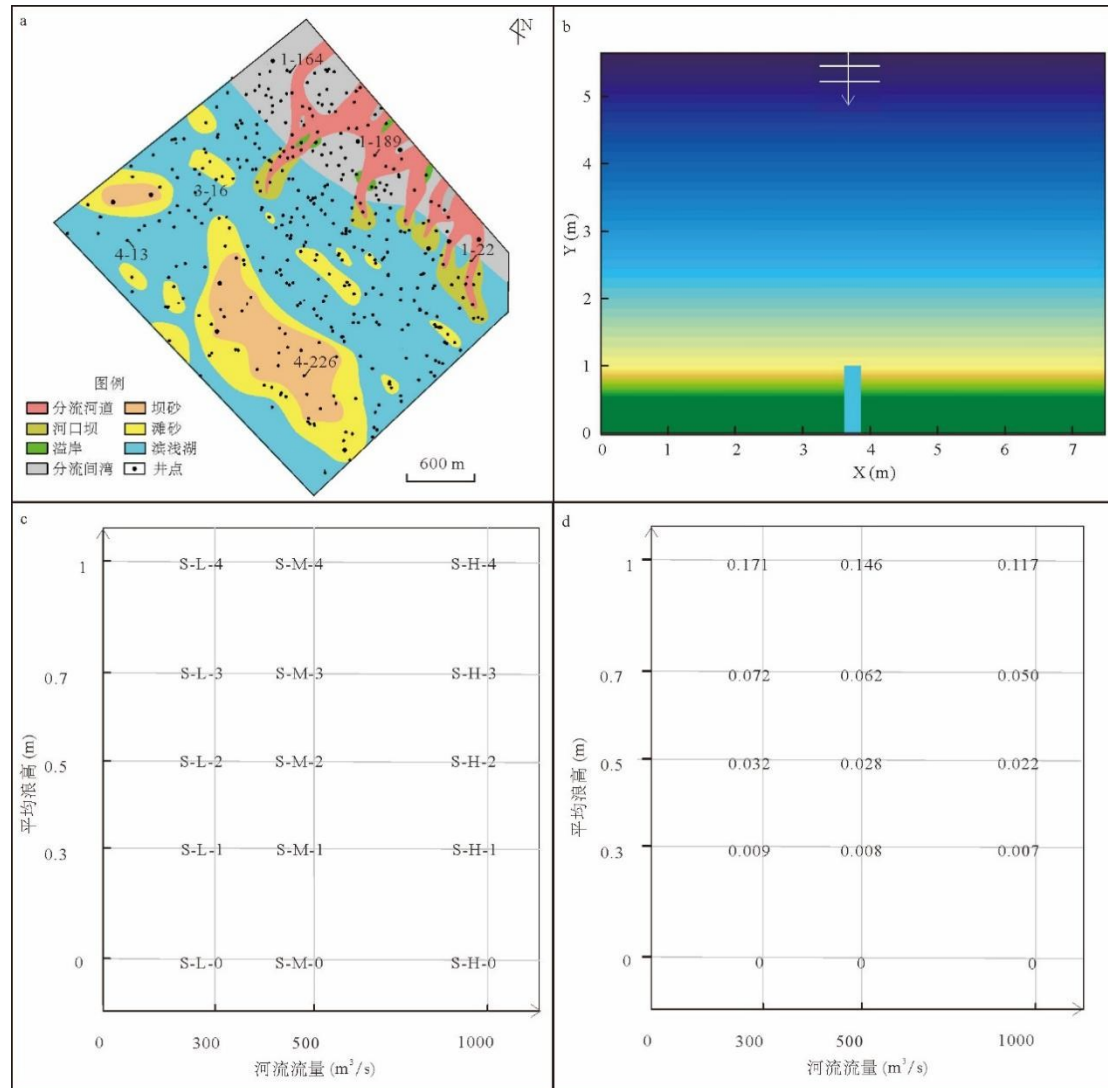
Delft3D 软件采用 SWAN 模型模拟波浪产生、传播及耗散过程, 并考虑了风力产生波浪、白浪消散、底部摩擦过程以及深度引起的波浪破碎和非线性波浪相互作用 (Hasselmann *et al.*, 1997)。波浪谱通过谱作用密度方程来表示:

$$\frac{\partial N(\sigma, \theta)}{\partial t} + \frac{\partial c_x N(\sigma, \theta)}{\partial x} + \frac{\partial c_y N(\sigma, \theta)}{\partial y} + \frac{\partial c_\sigma N(\sigma, \theta)}{\partial \sigma} + \frac{\partial c_\theta N(\sigma, \theta)}{\partial \theta} = \frac{S(\sigma, \theta)}{\sigma} \quad (5)$$

式中， $\sigma$ 为波浪频率，Hz； $\theta$ 为波浪方向； $N(\sigma, \theta)$ 为作用密度， $\text{m}^2/\text{Hz}^2$ ； $c_x$ 、 $c_y$ 分别为波浪在 $x$ 、 $y$ 方向上的传播速度，m/s； $c_\sigma$ 、 $c_\theta$ 分别为波浪在 $\sigma$ 、 $\theta$ 上的传播速度， $\text{Hz/s}$ 、 $^\circ/\text{s}$ ； $S(\sigma, \theta)$ 为在源或汇处的强度密度， $\text{m}^2/\text{Hz}$ 。

## 1.2 模拟参数设置

前人研究认为，胜坨油田二区古近系沙河街组二段 2 砂组发育典型的湖盆浅水三角洲与前缘离岸滩坝沉积（图 2a），物源来自北东方向（王居峰，2005；孙以德等，2024）。前人估算了其沉积条件，认为湖盆坡度较缓，坡降范围介于 0.5‰~1‰，湖盆最大水深约为 4 m，波浪垂直于岸线方向，浪高约为 0.5m；供源河流水排量约为 200~1000  $\text{m}^3/\text{s}$ ，砂岩类型包括中砂岩、细砂岩和粉砂岩，比例平均为 10%、80%、10%，粒度中值约 200  $\mu\text{m}$ ，砂泥比约 1: 1，水携沉积物浓度约为 0.1  $\text{kg}/\text{m}^3$ （Jiang et al., 2018；Liu et al., 2025）。



a. 胜坨油田二区沙二段 12 小层构型单元平面分布图（刘常妮等，2025）； b. 模拟区初始水深分布图；

c. 实验方案的设计与编号； d. 实验方案的波浪-河流强度比（W）值

图 2 沉积数值模拟设置

本次参考胜坨油田二区沙二段 2 砂组湖盆浅水三角洲与离岸滩坝的规模与水动力条件，设置沉积数值模拟参数。其中，模拟工区设置充足规模，大小为 12 km×10 km，共包含 300×250 个网格，网格平面大小为 40 m×40 m；在南侧设有一条初始供给河流，长、宽为 500、250 m，以设置河口处的河流供给情况。模拟工区的北侧、东侧、西侧均为开放边界，反映开阔的湖盆环境，北侧设置了波浪作用场，用于模拟来自北部的波浪作用（图 2b）。表 1 列举了反映盆地特征、河流供给特征以及其他相关的关键模拟参数，其中，针对浪高与河流排量两个参数进行了扩展，开展 15 次沉积数值模拟，以分析波浪与河流强度对于湖盆浅水三角洲-滩坝形成的影响（图 2c）。

表 1 关键模拟参数设置结果

| 参数类型     | 模拟参数         | 值        | 单位                  |
|----------|--------------|----------|---------------------|
| 盆地特征     | 浪高           | 0~1      | m                   |
|          | 波浪角度         | 180°     |                     |
|          | 波浪周期         | 5        | s                   |
|          | 最大盆地水深       | 7        | m                   |
|          | 底形坡度         | 0.8%     |                     |
| 河流供给特征   | 河流排量         | 300~1000 | m <sup>3</sup> /s   |
|          | 沉积物浓度        | 0.1      | kg/m <sup>3</sup>   |
|          | 粒度中值         | 250      | μm                  |
|          | 砂泥比          | 1:1      |                     |
| 其他关键模拟参数 | 时间步长         | 0.1 min  |                     |
|          | 模拟时间         | 4000     | h                   |
|          | 形态尺度因子       | 120      | -                   |
|          | 水流涡流黏度和扩散系数  | 0.001    | m <sup>2</sup> /s   |
|          | Chezy 糙度值    | 65       | m <sup>0.5</sup> /s |
|          | 横坡预测参数       | 0.006    | -                   |
|          | 邻近干网格的侵蚀概率   | 0.9      | -                   |
|          | 发生侵蚀的临界床面剪应力 | 1        | N/m <sup>2</sup>    |

为了加速模拟，可以增加形态尺度因子以加速沉积物的沉积，本次设定该因子为 120 以保证模拟结果的可信性（Burpee *et al.*, 2015）。假设每年平均经历 10~50 天的满岸沉积期（Caldwell and Edmonds, 2014），模拟时间 1800h 实际上代表着自然界约 180~900 年。模拟结果如图 3 所示。

## 2 湖盆浅水三角洲-滩坝的沉积过程

从模拟结果来看，在近源端发育浅水三角洲沉积，湖盆一侧则可发育滩坝沉积（图 3）。本小节以 S-M-2 模拟结果为例（图 3H），阐述浅水三角洲-滩坝的沉积过程。为了反映更为完整的沉积过程，该模拟的持续时间为 4000h，从沉积过程可以看出，浅水三角洲与滩坝是同时发育的，其中浅水三角洲由河流沉积物供给形成并受到波浪的影响，而滩坝则由波浪携带和改造的沉积物形成，并受到三角洲的影响，浅水三角洲与滩坝耦

合发育（图 4）。浅水三角洲-滩坝耦合发育过程可划分为三个阶段：浅水三角洲初始进积与滩砂加积生长阶段、浅水三角洲加宽与小规模坝砂发育阶段、浅水三角洲二次进积与大规模坝发育阶段。

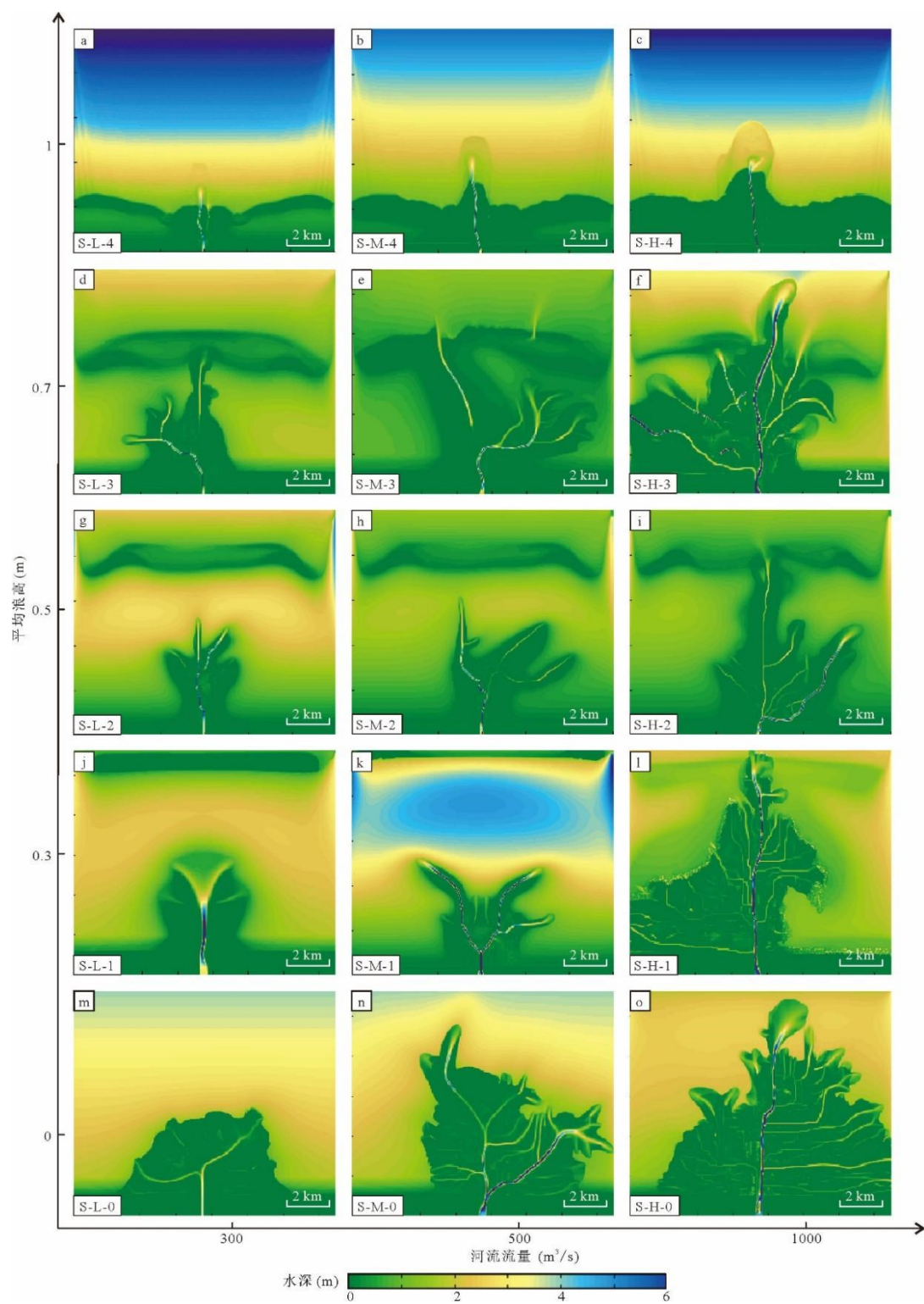


图 3 不同波浪与河流相对强度下形成的浅水三角洲和滩坝组合样式  
(第 1800 个模拟小时)

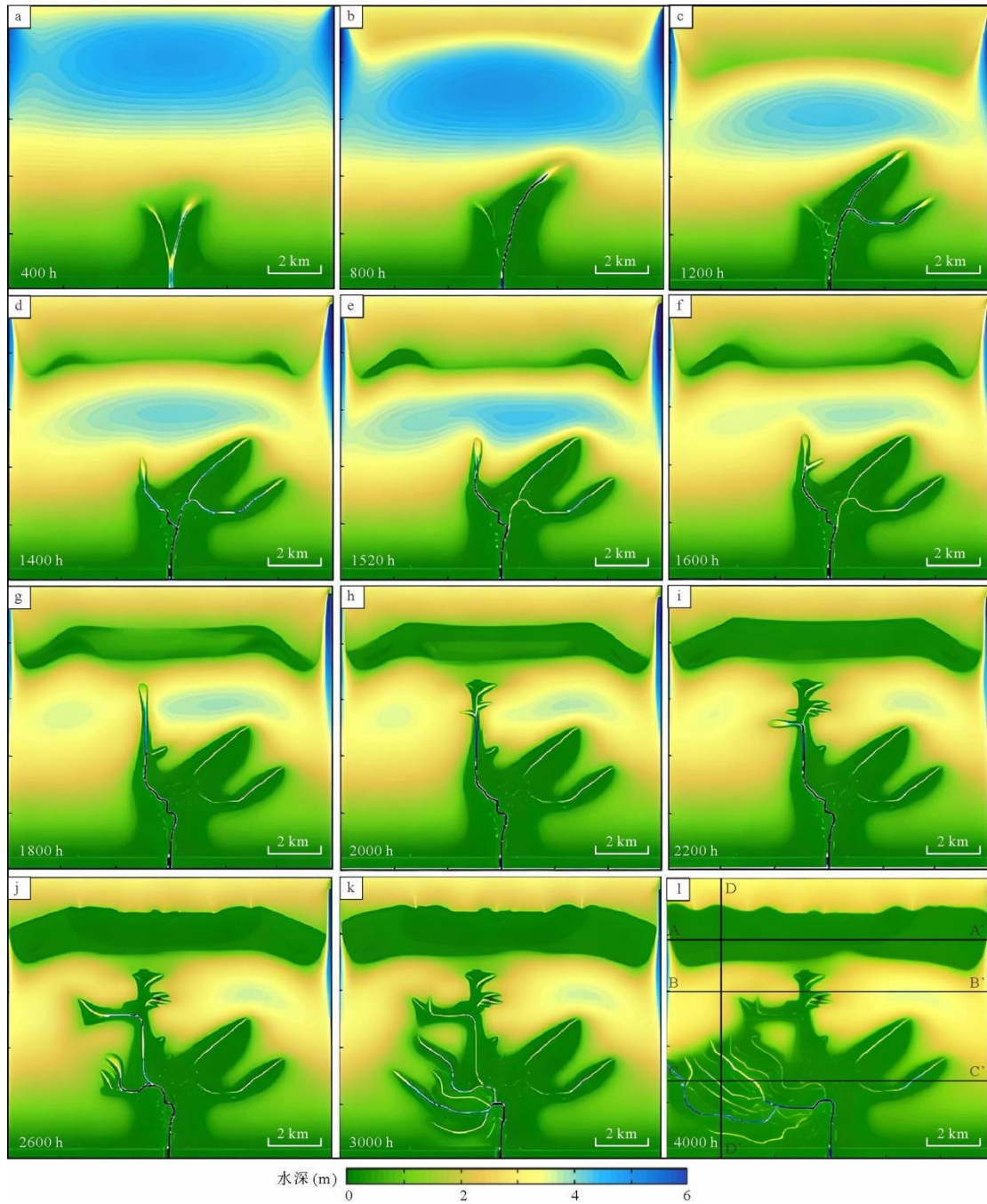


图 4 不同时间序列的模拟 S-M-2 的浅水三角洲与滩坝沉积过程

#### (1) 浅水三角洲初始进积与滩砂加积生长阶段

此阶段形成于模拟中 0~1200 h (图 4a~c)。, 典型特征是浅水三角洲与水下滩砂分别在波浪的影响下各自发育, 相互之间影响比较小。

水下滩砂发育在湖盆较远端、距离岸线 7~10 km 位置处, 呈宽条状, 平行岸线分布, 沿岸长度较大, 超过 10 km, 但厚度多小于 1.5 m (图 4a~c), 呈底平顶凸形态 (图 5a)。这一阶段, 水下滩砂的长度不变, 而是不断向岸方向生长加宽, 最终宽度达到近 3 km

(图 4c)。

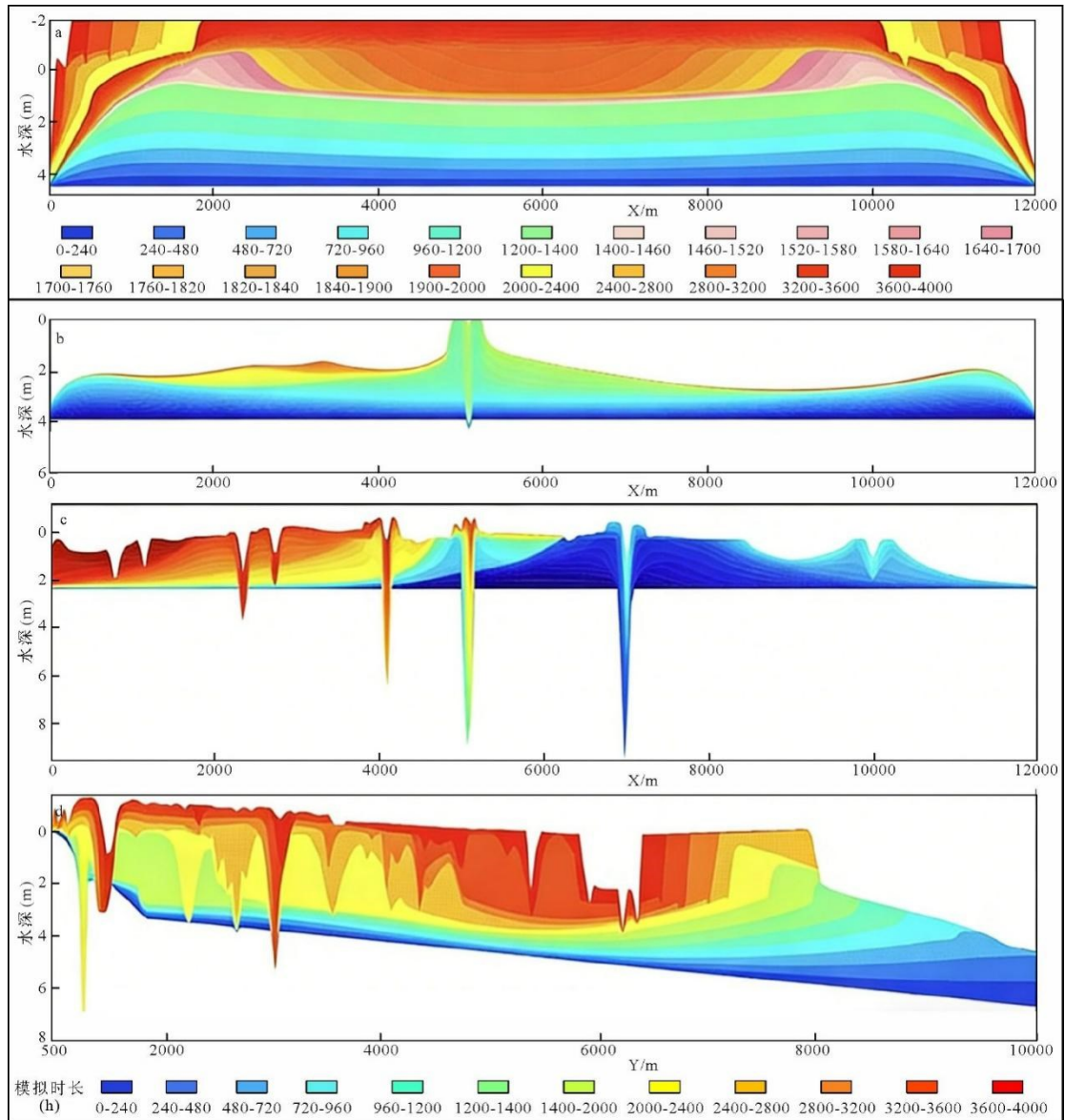


图 5 模拟 S-M-2 的沉积地貌剖面图 (剖面位置见图 4I)

与此同时，在南部岸线附近，河流入湖形成了典型的波浪影响浅水三角洲，表现出岸线光滑、分流河道发育程度低(主干分流河道 2~4 条，分叉数为 1)的特点(图 4a~c)，分流河道深切于河口坝中部，形成河在坝上走的典型样式(图 5c)。浅水三角洲在 0~400h 向湖盆进积较快，但随后进积速度较慢，最终延伸长度约为 4.5km (图 4a~c)。

## (2) 浅水三角洲加宽与小规模坝砂发育阶段

此阶段形成于模拟中 1200~1600 h (图 4c~f)，典型特征是浅水三角洲受波浪影响停止进积并侧向加宽，在水下滩砂之上逐渐发育两个小规模水上坝砂。

在 1200~1400h，小规模离岸坝砂发育在湖盆远端的滩砂之上的左右两侧，距离岸线

7~8 km 位置处, 呈弯月状出露于水面, 平行岸线分布, 长约 2 km, 宽约 1 km, 厚度约 5 m (图 4d), 剖面上呈双厚度中心 (图 5a)。这一阶段, 坝砂由两侧向中间逐渐生长、加长, 并最终合并为一个大规模的离岸坝砂, 长度达 10 km, 宽度与厚度变化不大 (图 4d~f)。

与此同时, 浅水三角洲不再向湖盆进积, 其分流河道开始决口并侧向延伸, 浅水三角洲也随着侧向生长加宽, 在 1200h, 分流河道向左决口, 三角洲向左加宽, 并向湖盆延伸至 5km 停止进积, 分流河道则向右侧决口形成新的分流河道 (图 4d~f)。

### (3) 浅水三角洲二次进积与大规模离岸坝发育阶段

此阶段形成于模拟中 1600h 之后 (图 4f~l), 典型特征是浅水三角洲在离岸坝砂的“屏障”保护下再次向湖盆进积, 大规模离岸坝侧向加宽发育阶段, 两者之间相互影响。

对于离岸坝来说, 在合并为一个大规模坝砂后, 开始向岸加宽, 由窄带状演变为宽带状 (图 4g~l), 剖面上内部增生体表现为侧向增生充填特征 (图 5a)。在 1600~1800h, 离岸坝仍然由两个厚度中心 (对应于早期小型坝砂) 不断向中心侧积, 并形成宽度为 1 km 的带状砂体 (图 4g), 形成稳定的“障壁岛”。1800h 之后, 离岸坝向岸线方向加宽, 至 4000h, 宽度达 2 km, 长度无变化 (图 4 h~l)。

与此同时, 浅水三角洲开始表现出河控三角洲的特点, 分流河道自 5 km 处再次向湖盆延伸并不断决口分流, 直至离岸坝砂附近, 分流开始侧向决口并向两侧进积 (图 4g~l)。此阶段, 分流河道的分流作用增加, 浅水三角洲的延伸至 7km 左右, 岸线糙度明显增加, 超过 8。

在剖面上, 浅水三角洲表现出向湖盆方向与侧向进积的地层充填样式 (图 5c、d), 滩坝则表现为向岸线方向推进, 发育向陆地方向倾斜的增生体充填样式 (图 5a), 两者之间沉积厚度较薄 (图 5b)。

## 3 河流与波浪强度对湖盆浅水三角洲与滩坝形成的控制作用

从模拟结果上可以看出, 不同波浪与河流强度情况下, 浅水三角洲与滩坝的模拟结果有较大的差异 (图 3)。下面基于模拟结果, 阐述河流与波浪强度对湖盆浅水三角洲与滩坝形成的控制作用。

### 3.1 河流流量对湖盆浅水三角洲与滩坝形成的控制作用

从图 3 中可以看出, 河流流量对滩坝的形成没有直接的影响, 在波浪强度相似的情况下, 河流流量不同, 滩坝形成的顺源位置、长度与宽度没有明显的差异性。相对地, 河流流量对湖盆浅水三角洲的形成具有显著影响, 在波浪强度相似的情况下, 河流流量越大, 浅水三角洲的长度越大、面积也越大, 岸线糙度 (三角洲的岸线长度与面积平方根之比) 也越高, 越表现出河控三角洲的特点 (图 3)。

综上, 在河流流量较低的情况下, 如模拟 S-L-2, 浅水三角洲进积距离较近, 与滩坝相距一定的距离, 两者由湖泊相隔 (图 3g); 反之, 在河流流量较高的情况下, 如

模拟 S-H-2，浅水三角洲进积距离远，逐渐进积至滩坝附近，与滩坝相距近甚至相接（图 3i）。在模拟 S-H-3 中，浅水三角洲甚至穿过滩坝，进积至湖盆远端一侧，而滩坝被一分为二，分列与三角洲两侧呈翼状（图 3f）。

### 3.2 波浪强度对湖盆浅水三角洲与滩坝形成的控制作用

从图 3 中可以看出，波浪强度（体现为浪高）对湖盆浅水三角洲与滩坝的形成均有着较强的控制作用。在河流流量相似的情况下，波浪强度越强，滩坝发育位置越接近于岸线一侧，直至与岸线相接，滩坝的长度与宽度也略有增加。对浅水三角洲来说，波浪强度越强，面积越小、宽度也越小，岸线越光滑，分流河道的发育程度越低。但是，波浪强度对浅水三角洲长度的影响较为复杂，在波浪强度较弱-中等时，波浪对于浅水三角洲的长度影响不大，多形成于滩坝的近岸一侧（图 3d~o）；在波浪强度较强时，滩坝形成于岸线附近，这浅水三角洲的长度骤然变小，面积与宽度也大幅度减小，如模拟 S-L-4、S-M-4、S-H-4（图 3a~c）。

综上，在不存在波浪或很弱时，滩坝不发育，浅水三角洲表现出河控的特点，如 S-H-1、S-H-0（图 3l、o）；在波浪强度较弱-中等时，滩坝形成于湖盆远岸一端，浅水三角洲发育于湖盆近岸一端，表现出波浪影响的特点，两者之间多由湖泊相隔；在波浪强度较强时，滩坝发育位置更靠近岸线，此时，浅水三角洲可进积至滩坝附近与其相接，这是穿过滩坝；在波浪强度较强时，滩坝形成于岸线附近，浅水三角洲进积距离很近、规模很小。

### 3.3 波浪-河流强度比对湖盆浅水三角洲-滩坝形成的控制作用

基于上述分析发现，波浪与河流强度对湖盆浅水三角洲-滩坝形成的控制作用不同，甚至表现出相反的作用，波浪利于滩坝形成，而不利于浅水三角洲生长；河流则利用浅水三角洲生长，进而间接破坏滩坝。因此，河流与波浪强度耦合作用下的浅水三角洲-滩坝形成过程不易评价。

据此，本次提出了波浪-河流强度比（ $W$ ）这一参数，以反映波浪与河流的相对强度。其中，河流供给沉积物的强度与河流水流量  $Q$  直接相关，被认为与  $Q^{0.31}$  线性相关（Syvitski and Milliman, 2007），而波浪导致的近似流量是很难直接求得的，但与浪高  $H$  的  $(12/5)$  次方具有线性相关关系（Ashton and Murray, 2006），因此可以  $H^{12/5}$  反映波浪强度。据此，波浪-河流强度比可以表达为：

$$W=H^{12/5}/Q^{0.31} \quad (6)$$

波浪-河流强度比（ $W$ ）可以实现波浪与河流的相对强度定量表征，反映河流与波浪搬运沉积物能力的相对大小。该值越大，反映波浪强度相对越强，而河流强度相对越弱，即河流搬运沉积物能力相对更强。河流流量  $Q$  与浪高  $H$  在现代沉积与地下储层中均可以获得，在沉积模拟中则为输入的已知参数，故波浪-河流强度比易于求取，文中各模拟的参数值如图 2d 所示。

基于定量测量与统计发现,针对浅水三角洲,随着波浪-河流强度比增大,其长度、宽度与厚度均逐渐减小,表现出明显的负相关关系(图 6a~c),反映波浪的相对强度越强,浅水三角洲的发育程度越低、规模越小。波浪-河流强度比与三角洲长度、宽度的相关关系不高,与两个奇异点有关,其一是 S-M-1 模拟三角洲长度偏小,可能与离岸滩坝位置靠近工区边界有关,导致滩坝在工区内部的形成时间较晚,三角洲受到了更长时间的波浪作用的影响,因而三角洲进积距离较短,河流携带沉积物搬运距离也较近,若不考虑,波浪-河流强度比与三角洲长度的相关性可提高至 0.59;其二是 S-M-2 模拟三角洲宽度偏大,与分流河道过度向右偏转相关,若不考虑,波浪-河流强度比与三角洲宽度的相关性可提高至 0.58。针对滩坝来说,随着波浪-河流强度比增大,滩坝的宽度越大、厚度趋于越薄(图 6d~e)。同时,波浪-河流强度比越大,滩坝发育位置越接近于岸线,浅水三角洲与滩坝之间的间距越小,在波浪-河流强度比大于 0.05 时,浅水三角洲与滩坝直接相接(图 6f)。

## 4 湖盆浅水三角洲-滩坝的平面组合类型

从模拟结果上可以看出,不同波浪与河流强度情况下,浅水三角洲与滩坝的模拟结果有较大的差异,总体上呈现出 3 大类:浅水三角洲发育型、沿岸滩坝发育型、浅水三角洲-滩坝复合型,最后一种又可以细分为浅水三角洲-沿岸滩坝复合型、浅水三角洲-沙嘴复合型和浅水三角洲-离岸滩坝复合型(图 3)。

### (1) 浅水三角洲发育型

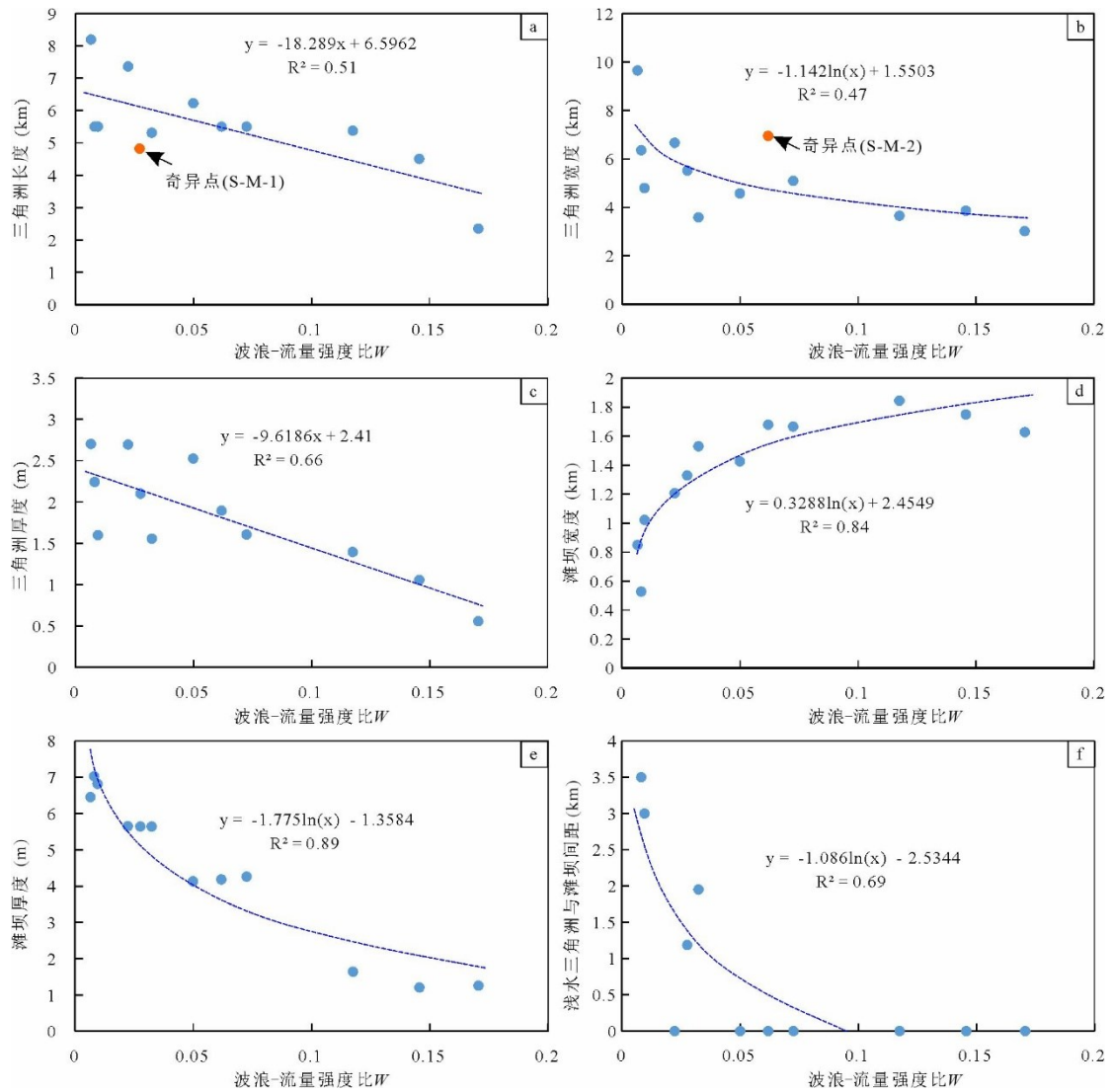
这种情况下,浅水三角洲发育程度高,而滩坝不发育或仅发育薄层的滩砂。浅水三角洲表现出明显河控的特点,延伸长度、宽度、厚度均较大,分流河道分流程度高、数量多,岸线粗糙,例如模拟 S-H-1、S-L-0、S-M-0 S-H-0(图 3l~o)。在现代沉积中,江西鄱阳湖内发育湖浪,但强度较弱,赣江中支三角洲日帽洲沉积可以前缘波浪影响的特点,岸线较光滑,但其前端与两侧未见滩坝沉积(图 1a)。

### (2) 沿岸滩坝发育型

这种情况下,滩坝发育于岸线附近,为沿岸滩坝,平行岸线展布,而浅水三角洲发育程度很低,仅发育于河口坝附近,例如模拟 S-L-4(图 3a)。在现代沉积中,岱海存在较强的波浪,步量河入湖后,携带的沉积物快速被湖浪改造并搬运至两侧,形成了侧向分布较广的沿岸滩坝,而三角洲并没有有效建造,属于沿岸滩坝发育型(图 1f)。

### (3) 浅水三角洲-滩坝复合型

这种情况下,浅水三角洲与滩坝同时发育,发育于波浪与河流强度相对均衡的条件下,波浪-河流强度比( $W$ )介于 0.006~0.16(图 3、图 2d)。但是,波浪与河流的强度不同,两者的平面组合样式可能不同。



a. 波浪-河流强度比与浅水三角洲长度交会图；b. 波浪-河流强度比与浅水三角洲宽度交会图；  
c. 波浪-河流强度比与浅水三角洲厚度交会图；d. 波浪-河流强度比与滩坝宽度交会图；e. 波浪-河流强度比与滩坝厚度长度交会图；f. 波浪-河流强度比与浅水三角洲和滩坝间距宽度交会图  
图 6 波浪-河流强度比与浅水三角洲、滩坝定量规模的相关关系

### ① 浅水三角洲-沿岸滩坝复合型

这种情况下，浅水三角洲表现出明显波浪影响的特点，延伸长度较短、岸线光滑、分流河道发育程度低（主干分流河道多小于 10 条，分叉数多小于 3），滩坝发育于岸线附近，为沿岸滩坝，平行岸线分列于浅水三角洲两侧，形成浅水三角洲与侧缘沿岸滩坝平面组合样式，例如模拟 S-M-4、S-H-4（图 3b、c）。在现代沉积中，岱海存在较强的波浪作用，索代沟河入湖后形成了典型的波浪影响的三角洲，其沉积物受湖浪改造在两侧形成了沿岸滩坝，为浅水三角洲-沿岸滩坝复合型（图 1e）。

### ② 浅水三角洲-沙嘴复合型

这种情况下，滩坝发育于湖盆中-远端的离岸位置，浅水三角洲发育程度较高，延

伸长度大、岸线相对粗糙,可直接穿过滩坝,导致滩坝呈现透镜状沙嘴样式分列发育浅水三角洲的末端两侧,形成浅水三角洲与侧缘沙嘴平面组合样式,例如模拟 S-M-3、S-H-3、S-H-2(图 3e、f、i)。在现代沉积中,东非图尔卡纳湖西侧特克韦尔河三角洲,受到湖浪改造的影响,并在前端两侧发育沙嘴沉积,为浅水三角洲-沙嘴复合型(图 1d)。

### ③ 浅水三角洲-离岸滩坝复合型

这种情况下,滩坝发育于湖盆中-远端的离岸位置,呈平行岸线的条带状,浅水三角洲发育程度相对低,延伸长度相对近、岸线相对光滑,与离岸滩坝之间由湖盆相隔,形成浅水三角洲与前端离岸滩坝平面组合样式,例如模拟 S-L-2、S-M-2、S-H-2(图 3g~i)。在现代沉积中,西藏纳木卡措与青海爬措均发育典型的浅水三角洲-离岸滩坝沉积(图 1b、c)。胜坨油田二区古近系沙河街组二段 2 砂组,也发育着典型的湖盆浅水三角洲-离岸滩坝沉积(图 2a)。

## 5 讨论

### 5.1 河流与波浪强度控制下的湖盆浅水三角洲-滩坝形成机理

河流与波浪是大型浅水湖盆的重要营力,在近岸一侧,河流动力强,导致水流携带沉积物向湖盆搬运,形成浅水三角洲,而波浪则可以改造三角洲(Nutz *et al.*, 2018; Jiang *et al.*, 2018; Althaus *et al.*, 2020)。同时,在湖盆一侧,波浪动力强,波浪携带改造的沉积物向湖盆方向搬运,在三角洲前缘或侧缘形成沿岸滩坝、离岸滩坝或者沙嘴多种类型的滩坝沉积(Jiang *et al.*, 2011; Nienhuis *et al.*, 2013)。河流与波浪相对强度不同,浅水三角洲与滩坝的特征与平面组合样式可能不同。波浪的方向与对称性也会影响着浅水三角洲的滩坝的形成(Bhattacharya and Giosan, 2003; Anthony, 2015),本文重点考虑垂直岸线的对称波浪的控制作用。

笔者在先前的研究发现,在河流与波浪强度的耦合作用下,顺源方向水动力存在着分带特点。在近岸一侧,河流主导水流向湖一侧;在湖盆一侧,波浪主导水流向岸一侧;在中间地区,河流与波浪相互作用并发生一定程度的抵消(Liu *et al.*, 2025)。因此,根据矢量化的平均流速  $V_s$ ,可将湖盆区域划分为 3 个不同的水动力区,包括河流主控区、波浪主控区和相互作用区。其中,在河流主控区,  $V_s$  为正值,且  $V_s$  较高,表明整体向湖方向的水流流速较快,河流占主导地位,波浪作用较弱;在波浪主控区,  $V_s$  为负值且绝对值较高,表明整体向岸方向的水流流速较快,波浪作用占主导,河流作用较弱;在河流与波浪主控区之间,存在相互作用区,该区域的  $V_s$  接近于零,反映出向湖的河流强度与向陆的波浪强度在此处相互抵消。

基于平均流速  $V_s$  数据,可以在模拟结果中识别出河流主控区、波浪主控区和相互作用区(图 7)。从图中可以看出,水动力分区直接影响着相带分布,在河流主控区,形成三角洲沉积,可受到波浪作用的影响;在波浪主控区的近岸一侧则形成滩坝沉积;在相互作用区,由于河流与波浪能量相互抵消,此处水体相对安静,主要以前三角洲或湖泊泥质沉积为主。浅水三角洲的规模与河流主控区的范围相关,河流强度越强,河流主

控

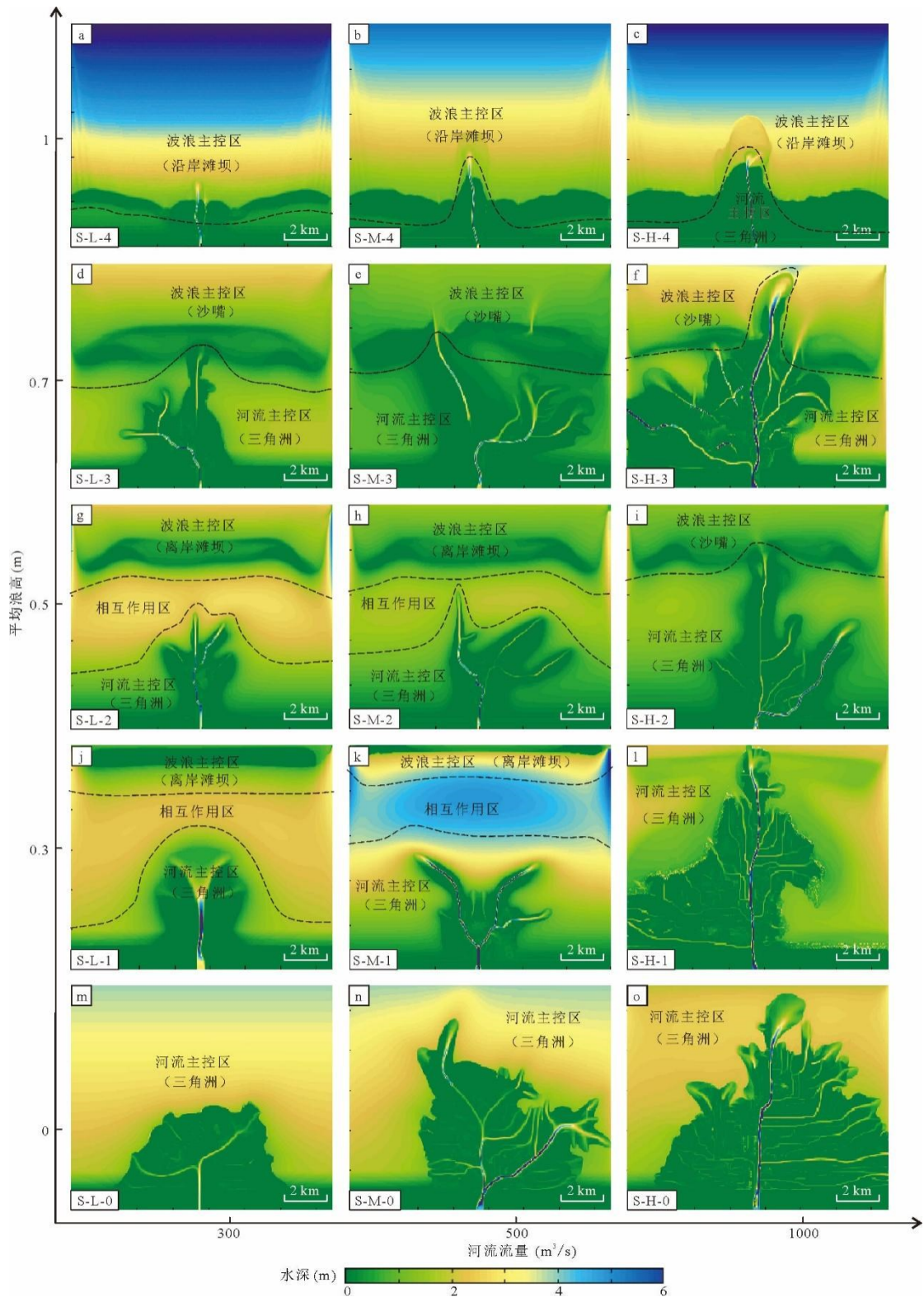


图 7 不同河流与波浪强度条件下的水动力分区平面分布图

区的范围越大，则浅水三角洲的延伸长度与面积越大，但会受到波浪作用的影响，相互作用区随之向湖盆迁移。其原因容易理解，河流流量增大导致水流流速提高，沉积物可

被搬运至更远离湖岸的位置 (Nienhuis *et al.*, 2015; Xu *et al.*, 2021; 李洪辉等, 2025), 促使河流主控区范围加宽。相对地, 波浪强度越强, 波浪主控区的范围越大, 则滩坝的规模越大并越趋近于湖岸, 相互作用区随之向湖岸迁移, 滩坝则会由离岸滩坝或沙嘴变为沿岸滩坝。这是由于波浪的浪高越大, 波浪发生浅水变形所需的水深也越大, 从而导致波浪对滨岸的扰动范围扩大 (Ainsworth *et al.*, 2011), 即波浪主控区范围加宽。若河流与波浪的总强度较弱, 相互作用区发育于河流主控区与波浪主控区之间, 浅水三角洲与滩坝不直接相接, 滩坝表现为离岸滩坝的特点; 若河流与波浪的总强度较强, 导致河流主控区与波浪主控区直接相接, 则相互作用区的范围会很小甚至不存在, 浅水三角洲与滩坝直接相接, 甚至穿过滩坝, 滩坝多表现为沙嘴或者沿岸滩坝的特点。

本文重点考虑河流与波浪强度对湖盆三角洲-滩坝形成的影响, 其实湖盆水深与地貌变化也是重要的影响因素。对河流三角洲来说, 湖盆水深增加, 沉积物的沉降速率降低、沉积时间增加, 三角洲进积速度降低 (Xu *et al.*, 2021), 则河流主控区范围有所减小, 三角洲延伸长度变短。对于滩坝来说, 湖盆水深增加, 波浪传播中的底部摩擦效应减小 (Falcini *et al.*, 2010), 波浪主控区范围会有所增加, 滩坝形成位置应更靠近湖岸。考虑在浅水湖盆环境, 湖盆水深总体交浅, 河流与波浪强度仍然是影响湖盆浅水三角洲-滩坝形成的主控因素。湖盆内部的地貌变化也会影响着波浪传播中的底部摩擦效应, 如在水下低隆处, 底部摩擦效应会突然增加, 波浪主控区范围明显减小甚至会终止在水下低隆处, 因此, 水下低隆处往往是滩坝发育的有利场所 (朱筱敏等, 1994; 姜在兴等, 2015)。相对而言, 河流供给的沉积物特征对于湖盆三角洲-滩坝形成的影响不大。前人研究指出, 河流三角洲的延伸长度主要受控于供给河流排量与生长时间, 而与沉积物粒度、砂泥比、黏度等特征的影响不大 (Xu *et al.*, 2021), 因此, 改变河流供给沉积物, 并不会影响河流主控区的顺源分布范围, 也不会影响三角洲-滩坝的发育类型。

在自然界, 河流与波浪作用会受到气候、人类活动等因素的影响而发生着变化。若河流作用持续加强, 河流主控区的范围会逐渐增大, 相对地, 波浪主控区会向湖盆方向迁移, 河流三角洲会向湖方向逐渐延伸, 原有的三角洲-离岸滩坝沉积会逐渐向三角洲-沙嘴沉积转变, 原有的离岸滩坝发育型与三角洲-沿岸滩坝, 随着三角洲重新生长, 在三角洲前端会再形成离岸滩坝或沙嘴。相反, 若波浪作用持续增强, 波浪主控区会向岸线迁移, 相互作用的范围逐渐减小, 原有的离岸滩坝会被改造, 三角洲也会接受到更强的改造作用, 并在三角洲附近形成沙嘴甚至沿岸滩坝。

## 5.2 湖盆浅水三角洲-滩坝的形成条件

在现代与古代浅水湖盆中, 浅水三角洲与滩坝可以形成多种类型的组合样式, 包括浅水三角洲发育型、沿岸滩坝发育型、浅水三角洲-沿岸滩坝复合型、浅水三角洲-沙嘴复合型和浅水三角洲-离岸滩坝复合型 (图 3)。河流与波浪的耦合作用, 影响着三角洲与滩坝形成 (Hillen, 2009; Nienhuis *et al.*, 2013; Yin *et al.*, 2021)。不同的平面组合样式受控于不同水动力分区分布样式。河流主控区远岸界线指示了河流影响的最远范围, 波浪主控区的近岸界线代表了波浪作用的前沿位置, 二者之间的区域即为河流与波浪的相互作用区 (图 7)。这两条界线距离岸线的远近反映了三个水动力分区的空间范围及其

相互关系，进而形成了不同的浅水三角洲与滩坝组合样式：当河流主控区远岸界线位于模拟区北部边界或更远时，河流作用占优势，发育浅水三角洲；当波浪主控区近岸界线位于岸线附近，波浪作用占优势，发育沿岸滩坝；当河流主控区远岸界线与波浪主控区近岸界线重合时，波浪与河流相互抗衡形成浅水三角洲-沿岸滩坝复合体系或浅水三角洲-沙嘴复合体系；当两条界线相互分离时，形成浅水三角洲-离岸滩坝复合体系。

因此，浅水三角洲与滩坝组合样式并非单独受控于河流或者波浪强度，而与两者的相对强度有关。本文提出的波浪-河流强度比 ( $W$ ) 则可以定量表征这种相对强度，该值越大，则反映波浪强度越强，对应于波浪主控区范围越大，搬运或改造沉积物的能力越强，滩坝位置越靠近于湖岸，浅水三角洲因被改造程度强而规模越小；反之，该值越小，则反映河流强度越强，对应于河流主控区范围越大，向湖盆搬运沉积物的能力越强，滩坝位置越远离湖岸，浅水三角洲的规模越大。另外，该值越大，波浪向湖盆搬运与改造沉积物的能量相对越强，则滩坝越容易接近湖岸位置，对应于波浪主控区与河流主控区的间距越小，即相互作用区的范围越小。据此，根据模拟结果，明确了基于波浪-河流强度比 ( $W$ ) 的浅水三角洲-滩坝类型的形成条件 (图 8)：

#### (1) 浅水三角洲发育型的形成条件

波浪-河流强度比  $W$  小于 0.007 时，对应波浪强度极弱、河流强度极强的情况，此时，发育河控浅水三角洲沉积。在图 8 中，波浪主控区界线与河流主控区界线重合并趋向于平行 Y 轴方向延伸，表明河流相对强度大，波浪改造作用难以阻挡河流三角洲的生长过程。由于波浪作用微弱，河流作用占绝对优势，导致相互作用区不发育。河流主控区范围广阔，发育浅水三角洲沉积，波浪主控区位于湖盆远端，波浪能量不足以有效改造与搬运沉积并形成滩坝沉积，故滩坝基本不发育。例如，针对鄱阳湖赣江三角洲，中支入湖的流量较高，平均为  $1000\text{m}^3/\text{s}$ ，而鄱阳湖南区波浪能量较弱，平均浪高小于 0.2m， $W$  值小于 0.003，故形成波浪影响的河控浅水三角洲，滩坝基本不发育 (图 1a)。

#### (2) 沿岸滩坝发育型的形成条件

波浪-河流强度比  $W$  大于 0.16 时，对应河流强度极弱、波浪强度极强的情况，发育沿岸滩坝沉积。此时，波浪改造与搬运沉积物的能力很强，河流携带的沉积物会快速被波浪改造，并在湖岸沉积形成沿岸滩坝。在图 8 中，波浪主控区与河流主控区的边界再次重合，趋向于平行于 X 轴方向延伸，表明波浪作用在湖岸附近占据绝对优势。河流主控区范围极小，仅局限于河口近端区域，波浪主控区则覆盖了广阔的滨浅湖区。因此，在这种情况下，三角洲基本不发育，而被沿岸滩坝所替代。例如，在岱海，在强季风作用下，波浪明显，浪高可超过 0.6m，而在人类改造的影响下，步量河的流量已很低了 (平均小于  $1\text{m}^3/\text{s}$ )，其  $W$  值大于 0.2，故三角洲基本被改造完，仅发育沿岸滩坝 (图 1f)。

#### (3) 三角洲和滩坝复合型的形成条件

##### ① 浅水三角洲-沿岸滩坝复合型

当波浪-河流强度比  $W$  值介于 0.10~0.16 时, 对应河流强度较弱、波浪强度较强的情况, 发育浅水三角洲-沿岸滩坝复合沉积。此时, 波浪改造与搬运沉积物的能力较强, 导致波浪主控区将河流主控区挤压至湖岸附近, 河流主控区与波浪主控区边界重合, 相互作用区不发育 (图 8)。此时, 在小范围的河流主控区, 河流作用可以形成小规模三角洲沉积, 但是会明显受到波浪的影响, 一部分三角洲沉积物会被波浪改造并使沿岸再分配, 在三角洲侧缘形成沿岸滩坝。例如, 同样在岱海, 其北侧的索代沟河受到人为改造程度较低, 虽然总体上流量也较低, 但要高于目前的步量河, 故其  $W$  值略大, 形成浅水三角洲-沿岸滩坝沉积 (图 1e)。

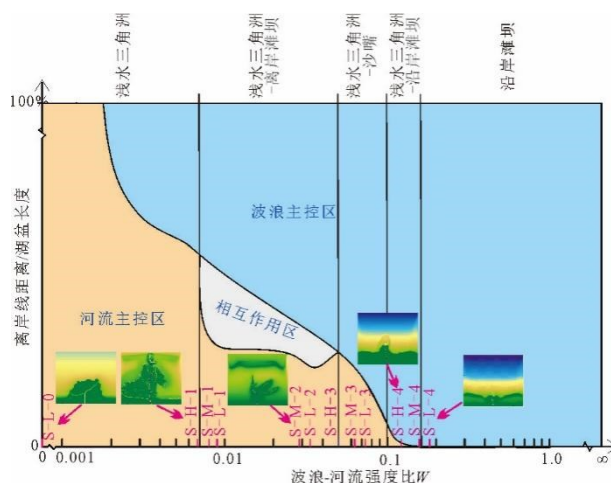


图 8 波浪-河流强度比与水动力分区位置的关系图

### ② 浅水三角洲-沙嘴复合型

当波浪-河流强度比  $W$  值介于 0.05~0.10 时, 对应河流强度中等、波浪强度较强的情况, 发育浅水三角洲-沙嘴复合沉积。此时, 波浪改造与搬运沉积物的能力中等, 但仍然导致波浪主控区向湖岸方向挤压至与河流主控区重合, 相互作用区不发育 (图 8)。河控主控区内可形成具有一定建设性的波浪影响三角洲, 并延伸至河控主控区的向湖边界附近, 波浪主控区的向岸一侧则形成滩坝沉积, 由于缺少相互作用区的分隔, 三角洲与滩坝直接接触, 并将滩坝分开, 形成分布于三角洲两侧的沙嘴沉积 (图 8)。例如, 在南非图尔卡纳湖, 浪高平均为 0.5m, 特克韦尔河的流量平均为 15~20m<sup>3</sup>/s,  $W$  值约为 0.08, 形成浅水三角洲-沙嘴沉积 (图 1d)。

### ③ 浅水三角洲-离岸滩坝复合型

当  $W$  值介于 0.007~0.05 时, 对应河流强度较强、波浪强度较弱的情况, 发育浅水三角洲-离岸滩坝复合沉积。此时, 波浪改造与搬运沉积物的能力较弱, 导致波浪主控区位于更靠近湖盆的方向, 并未与河流主控区重合, 波浪主控区界线与河流主控区界线分离, 形成三个独立的水动力区域: 河流主控区、波浪主控区以及介于二者之间的相互作用区 (图 8)。浅水三角洲限制于河流主控区, 而滩坝形成于波浪主控区的近岸一端, 使得浅水三角洲与离岸滩坝能够同时发育并保持空间上的分离, 相互作用区起到关键分

隔作用。河流输入的沉积物在向前搬运过程中受到波浪的筛选与再分布，部分细粒物质被输运至离岸坝处沉积，这种动态平衡机制是形成典型湖盆浅水三角洲-离岸滩坝复合体系的关键。研究区胜坨油田二区古近系沙河街组二段 2 砂组， $W$  值多介于 0.02~0.04，故发育浅水三角洲-离岸滩坝沉积（图 2a）。

前文已述，除了河流与波浪强度，湖盆水深与古地貌也会影响着湖盆水动力分区的影响因素，必然也会影响着不同类型湖盆三角洲-滩坝形成的波浪-河流强度比  $W$  的阈值。但是，针对湖盆浅水环境中，湖盆水深总体较浅、古地貌差异不大的情况下，流量与浪高则成为决定  $W$  阈值最主要的因素。基于此，本文从波浪与河流相对强度出发，所提出的浅水三角洲-离岸滩坝复合体系的形成条件，在湖盆浅水背景下具备较好的适用性与合理性。

## 6 结论

（1）湖盆浅水三角洲-滩坝可以是同时耦合发育的，其沉积过程可分为 3 个阶段：浅水三角洲初始进积与滩砂加积生长阶段、浅水三角洲加宽与小规模坝砂发育阶段、浅水三角洲二次进积与大规模坝发育阶段。在河流与波浪的耦合作用下，浅水湖盆顺源存在 3 个水动力分区：河流主控区、相互作用区、波浪主控区，浅水三角洲与滩坝分布限制于河流主控区与波浪主控区，由相互作用区相隔。

（2）河流流量越大，河流主控区范围越大，相互作用区向湖盆迁移，浅水三角洲规模和岸线糙度越大，分流河道数量越多；浪高越大，波浪主控区范围越大，相互作用区向岸线迁移，浅水三角洲的规模和岸线糙度越小、分流河道数量越少，滩坝的规模越大。

（3）本次提出了波浪-河流强度比（ $W$ ）这一参数，其值越大，反映波浪相比河流强度越大。在浅水湖盆， $W$  小于 0.007 时，波浪强度极弱、河流强度极强，发育河控浅水三角洲沉积，滩坝基本不发育； $W$  值介于 0.007~0.05 时，河流强度较强、波浪强度较弱，发育浅水三角洲-离岸滩坝复合沉积； $W$  值介于 0.05~0.10 时，河流强度中等、波浪强度较强，发育浅水三角洲-沙嘴复合沉积； $W$  值介于 0.10~0.16 时，河流强度较弱、波浪强度较强，发育浅水三角洲-沿岸滩坝复合沉积； $W$  大于 0.16 时，河流强度极弱、波浪强度极强，发育沿岸滩坝沉积，浅水三角洲基本不发育。

## 参考文献

- [1] Althaus, C. E., Dos Santos Scherer, C. M., Kuchle, J., et al., 2020. Wave-Dominated Lacustrine Margin of Aptian Pre-Salt: Mucuri Member, EspÍRito Santo Basin. *Journal of South American Earth Sciences*, 99: 102490. doi.10.1144/petgeo2020-112.
- [2] Anthony E. J., 2015. Wave Influence in the Construction, Shaping and Destruction of River Deltas: A Review. *Marine Geology*, 361: 53-78. doi.10.1016/j.margeo.2014.12.004.
- [3] Ashton, A. D., Murray, A. B., 2006. High-Angle Wave Instability and Emergent Shoreline Shapes: 1. Modeling of Sand Waves, Flying Spits, and Capes. *Journal of Geophysical Research*, 111(F4): F04011. doi: 10.1029/2005JF000422.

- [4] Bhattacharya, J. P., Giosan, L., 2003. Wave-Influenced Deltas: Geomorphological Implications for Facies Reconstruction. *Sedimentology*, 50(1): 187-210. doi.10.1046/j.1365-3091.2003.00545.x.
- [5] 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. *Journal of Sedimentary Research*, 85(6): 699-714. doi.10.2110/jsr.2015.39.
- [6] Caldwell, R. L., Edmonds, D. A., 2014. The Effects of Sediment Properties on Deltaic Processes and Morphologies: A Numerical Modeling Study. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 119(5): 961-982. doi.10.1002/2013JF002965.
- [7] Edmonds, D. A., Slingerland, R. L., 2010. Significant effect of sediment cohesion on Delta Morphology. *Nature Geoscience*, 3(2): 105-109. doi.10.1038/NGEO730.
- [8] Edmonds, D., Slingerland, R., Best, J., et al., 2010. Response of River-Dominated Delta Channel Networks to Permanent Changes in River Discharge. *Geophysical Research Letters*, 37(12): L12404. doi.10.1029/2010GL043269.
- [9] Falcini, F., Jerolmack, D. J., 2010. A Potential Vorticity Theory for the Formation Of Elongate Channels in River Deltas and Lakes. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 115(F4): F04018. doi.10.1029/2010JF001802.
- [10] Geleynse, N., Storms, J. E. A., Walstra, D. J. R., et al., 2011. Controls on River Delta Formation: Insights From Numerical Modelling. *Earth and Planetary Science Letters*, 302(1-2): 217-226. doi.10.1016/j.epsl.2010.12.013.
- [11] Hasselmann, K., Barnett, T. P., Bouws, E., et al., 1973. Measurements of Wind-Wave Growth and Swell Decay During the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP). *Ergaenzungsheft zur Deutschen Hydrographischen Zeitschrift, Reihe A*, 8: 1-95.
- [12] Hillen, M., 2009. Wave Reworking of a Delta. Delft: Delft University of Technology.
- [13] Hu, T., Li, Z., Zeng, C., et al., 2022. Applications of EMD to Analyses of High-Frequency Beachface Responses to Storm Bebinca in the Qing'an Bay, Guangdong Province, China. *Acta Oceanologica Sinica*, 41(5): 147-162.
- [14] 纪友亮, 董志武, 许瑞, 等, 2025. 三角洲—滩坝复合砂体沉积模式和成因机制研究进展与展望. *古地理学报*, 27(4): 811-822. doi.10.7605/gdlxb.2025.089. [Ji, Y. L., Dong, Z. W., Xu, R., et al., 2025. A Review of Research Progress and Prospects on Depositional Models and Genetic Mechanisms of Delta-Beach Bar Composite Sand Bodies. *Journal of Palaeogeography(in Chinese Edition)*, 27(4): 811-822 (in Chinese with English abstract). doi.10.7605/gdlxb.2025.089.]
- [15] Jiang, Z., Wang, J., Fulthorpe, C. S., et al., 2018. A Quantitative Model of Paleowind Reconstruction Using Subsurface Lacustrine Longshore Bar Deposits: An Attempt. *Sedimentary Geology*, 371: 1-15.
- [16] Jiang, Z. X., Liu, H., Zhang, S. W., et al., 2011. Sedimentary Characteristics of Large-Scale Lacustrine Beach-Bars and Their Formation in the Eocene Boxing Sag of Bohai Bay

Basin, East China. *Sedimentology*, 58(5): 1087-1112.

- [17] 李洪辉,李伟,岳大力,等.流量变化对浅水三角洲沉积特征影响[J]. *地球科学*, 2025, 50(06): 2428-2443. [Li, H. H., Li, W., Yue, D. L., et al. Impact of Discharge Variability on Sedimentary Characteristics in Shallow-Water Deltas [J]. *Earth Science*, 2025, 50(06): 2428-2443.]
- [18] Li, H. H., Yue, D. L., Li, W., et al. Characterization of tight sandstone architecture in arid shallow-water delta distributary channels[J/OL]. *Journal of Earth Science*, 2026. <https://link.cnki.net/urlid/42.1788.p.20250416.1700.025>.
- [19] 刘成龙, 王艳忠, 杨怀宇, 等. 高精度层序约束下三角洲-滩坝沉积体系精细刻画与岩性圈闭分布规律——以渤海湾盆地济阳坳陷东营凹陷南坡东段沙河街组四段上亚段为例[J]. *石油与天然气地质*, 2024, 45(4): 1121-1141. doi.10.11743/ogg20240416. [Liu, C. L., Wang, Y. Z., Yang, H. Y., et al., 2024. Fine Characterization and Lithologic Trap Distribution Patterns of Delta-Beach Bar Sedimentary System Under High-Precision Sequence Constraints: A case study of the Upper Submember of the 4th Member Of The Shahejie Formation in the Eastern Segment of the Southern Gentle Slope of Dongying Sag, Jiyang Depression, Bohai Bay Basin. *Oil & Gas Geology*, 45(4): 1121-1141. doi.10.11743/ogg20240416.]
- [20] Liu, C. N., Wu, S. H., Xu, Z. H., et al., 2025. Lacustrine Delta-Offshore Bar System: Depositional Characteristics and Formative Mechanism. *Journal of Palaeogeography*, 14(4): 100267. doi.10.1016/j.jop.2025.100267.
- [21] 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. *石油科学通报*, 10(03): 430-445. doi. 10.3969/j.issn.2096-1693.2025.01.010. [Liu, C. N., Wu, S. H., Xu, Z. H., 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. *Petroleum Science Bulletin*, 10(03): 430-445 (in Chinese with English abstract). doi. 10.3969/j.issn.2096-1693.2025.01.010. ]
- [22] Liu, Y., Chen, H., Wang, J., et al., 2020. Numerical Simulation for the Effects of waves and Grain Size on Deltaic Processes and Morphologies. *Open Geosciences*, 12(1): 1286-1301. doi. 10.1515/geo-2020-0196.
- [23] Marciano, R., Wang, Z. B., Hibma, A., et al., 2005. Modeling of channel patterns in Short Tidal Basins. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 110: F01001. doi.10.1029/2003JF000092.
- [24] Nienhuis, J. H., Ashton, A. D., Giosan, L., 2015. What Makes A Delta Wave-Dominated? *Geology*, 43(6): 511-514. doi.10.1130/G36518.1.
- [25] Nienhuis, J. H., Ashton, A. D., Roos, P.C., et al., 2013. Wave Reworking of Abandoned Deltas. *Geophysical Research Letters*, 40(22): 5899-5903. doi.10.1002/2013GL058231.
- [26] Nutz, A., Schuster, M., Ghienne, J. F., et al., 2018. Wind-driven Waterbodies: A New

- Category of Lake Within An Alternative Sedimentologically-Based Lake Classification. *Journal of Paleolimnology*, 59: 189-199. doi.10.1007/s10933-016-9894-2.
- [27] Olariu, C., 2014. Autogenic Process Change in Modern Deltas: Lessons for the Ancient. *IAS Special Publications*, 46: 149-166. doi.10.1002/9781118920435.ch7.
- [28] Straub, K. M., Li, Q., Benson, W.M., 2015. Influence of Sediment Cohesion on Deltaic Shoreline Dynamics and Bulk Sediment Retention: A Laboratory Study. *Geophysical Research Letters*, 42(22): 9808-9815. doi.10.1002/2015GL066131.
- [29] 孙以德, 刘常妮, 李浩男, 等, 2024. 基于密井网和井间示踪剂资料的浅水三角洲单砂体沉积构型研究——以东营凹陷胜坨油田二区沙二段 1-2 砂组为例. *油气地质与采收率*, 31(2): 39-47. doi.10.13673/j.pgre.202305010. [Sun, Y. D., Liu, C. N., Li, H. N., et al., 2024. Study on Sedimentary Architecture of Single Sand Body in Shallow Water Deltas Based on Dense Well Pattern and Interwell Tracer Data: A Case Study of Es21 and Es22 in Shenger District of Shengtuo Oilfield, Dongying Sag. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 31(2): 39-47 (in Chinese with English abstract). doi.10.13673/j.pgre.202305010.]
- [30] Syvitski, J. P. M., Milliman, J. D., 2007. Geology, Geography, and Humans Battle for Dominance over the Delivery of Fluvial Sediment to the Coastal Ocean. *The Journal of Geology*, 115(1): 1-19. doi.10.1086/509246.
- [31] 王居峰, 2005. 济阳拗陷东营凹陷古近系沙河街组沉积相. *古地理学报*, 7(1): 45-58. doi.10.3969/j.issn.1671-1505.2005.01.005. [Wang, J. F., 2005. Sedimentary Facies of the Shahejie Formation of Paleogene in Dongying Sag Jiyang Depression. *Journal of Palaeogeography*, 7(1): 45-58 (in Chinese with English abstract). doi.10.3969/j.issn.1671-1505.2005.01.005.]
- [32] 王昕, 魏思源, 吕奇奇, 等, 2023. 基于物理模拟的三角洲前缘横向砂坝发育过程及形成机理. *沉积学报*, 41(3): 818-827. doi.10.14027/j.issn.1000-0550.2021.150. [Wang, X., Wei, S. Y., Lv, Q. Q., et al., 2023. Development Process and Formation Mechanism of Transverse Sand Bar in Delta Front Based on Physical Simulation. *Acta Sedimentologica Sinica*, 41(3): 818-827 (in Chinese with English abstract). doi.10.14027/j.issn.1000-0550.2021.150.]
- [33] 吴胜和, 徐振华, 刘钊, 2019. 河控浅水三角洲沉积构型. *古地理学报*, 21(2): 202-215. doi.10.7605/gdlxb.2019.02.012. [Wu, S. H., Xu, Z. H., Liu, Z., et al., 2019. Depositional Architecture of Fluvial-Dominated Shoal Water Delta. *Journal of Palaeogeography*, 21(2): 202-215 (in Chinese with English abstract). doi.10.7605/gdlxb.2019.02.012.]
- [34] Xu, Z.H., Wu, S. H., Liu, M. C., 2021. Effects of Water Discharge on River-Dominated Delta Growth. *Petroleum Science*, 18: 1630-1649. doi.10.1016/j.petsci.2021.09.027.
- [35] Xu, Z. H., Wu, S. H., Plink-Bjorklund, P., 2025. Autocyclic switching processes and Architecture of Lobes in River-Dominated Lacustrine Deltas. *Journal of Palaeogeography*,

14(1): 126-140. doi.10.1016/j.jop.2024.12.004.

- [36] 于兴河, 李胜利, 李顺利, 2013. 三角洲沉积的结构—成因分类与编图方法. *沉积学报*, 31(5): 782-797. [Yu, X. H., Li, S. L., Li, S. L., 2013. Structural-genetic Classification and Mapping Methods of Deltaic Deposits. *Journal of Sedimentology*, 31(5): 782-797 (in Chinese with English abstract).]
- [37] Zainescu, F., Storms, J. E. A., Vespremeanu - Stroe A, et al., 2024. Wave-influenced Delta Morphodynamics, Long-Term Sediment Bypass and Trapping Controlled by Relative Magnitudes Of Riverine and Wave-Driven Sediment Transport. *Geophysical Research Letters*, 51(19): e2024GL111069. doi.10.1029/2024GL111069.
- [38] 赵汉卿, 李超, 郭诚, 等, 2024. 河控型浅水三角洲前缘河道砂体结构特征——以渤海湾盆地黄河口凹陷 BZ34 油区明下段II油组为例. *海洋地质前沿*, 40(2): 20-27. doi.10.16028/j.1009-2722.2023.019. [Zhao, H. Q., Li, C., Guo, C., et al., 2024. Geomorphology of Channel Sandbodies in Fluvially Dominated Shallow Water Delta Front: Taking the Lower Member of the Minghuazhen Formation in BZ34 Oilfield of the Huanghekou Sag, Bohai Bay Basin as An Example. *Marine Geology Frontiers*, 40(2): 20-27 (in Chinese with English abstract). doi.10.16028/j.1009-2722.2023.019.]
- [39] 朱筱敏, 刘媛, 方庆, 等, 2012. 大型拗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. *地学前缘*, 19(1): 89-99. [Zhu, X. M., Liu, Y., Fang, Q., et al., 2012. Formation and Sedimentary Model of Shallow Delta in Large-Scale Lake: Example From Cretaceous Quantou Formation in Sanzhao Sag, Songliao Basin. *Earth Science Frontiers*, 19(1): 89-99 (in Chinese with English abstract).]
- [40] 邹才能, 赵文智, 张兴阳, 等, 2008. 大型敞流拗陷湖盆浅水三角洲与湖盆中心砂体的形成与分布. *地质学报*, 82(6): 813-825. [Zou, C. N., Zhao, W. Z., Zhang, X. Y., et al., 2008. Formation and Distribution of Shallow-Water Deltas and Centra-Basin Sandbodies in Large Open Depression Lake Basins. *Acta Geologica Sinica*, 82(6): 813-825 (in Chinese with English abstract).]