

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2026.04.018

# 水沙调控作用下植被对黄河三角洲河口坝地形演变的影响

于子奇<sup>1</sup>, 武国相<sup>1,2</sup>, 王柯萌<sup>1</sup>, 梁丙臣<sup>1,2</sup>

(1. 中国海洋大学工程学院; 2. 山东省海洋工程重点实验室)

**摘要:**以黄河三角洲为原型,基于 Delft3D 构建具有典型河口坝地形特征的理想模型,模拟分析了黄河调水调沙作用下有、无植被对黄河三角洲河口坝地形演变的影响。结果表明:有植被时调水调沙后河口坝淤积量比无植被时减少 63.7%,这与植被可以捕沙促淤的一般认知相反;河口坝植被的阻力效应改变了分汊河道与河口坝的分流比,使过坝流量减少 70%~85%,促使挟沙水流更多通过河道入海,导致河口坝的局部泥沙供给和捕集量降低;调水期与调沙期的植被地貌效应也有显著差异,无植被时河口坝的垂向淤积和平面扩展主要发生在径流量低、含沙量高的调沙期,调水期几乎没有淤积,而有植被时调水期河口坝垂向淤积显著,但其平面扩展主要发生在调沙期,且仅限于来沙方向。

**关键词:**河口坝;调水调沙;植被;地貌演化;黄河三角洲

## Effect of vegetation on topographic evolution of river mouth bars in the Yellow River Delta under water and sediment regulation

Yu Ziqi<sup>1</sup>, Wu Guoxiang<sup>1,2</sup>, Wang Kemeng<sup>1</sup>, Liang Bingchen<sup>1,2</sup>

(1. College of Engineering, Ocean University of China; 2. Key Laboratory of Ocean Engineering of Shandong Province)

**Abstract:** By taking the Yellow River Delta as a prototype, an idealized model featuring typical river mouth bar topography was constructed using Delft3D. The model was used to simulate and analyze the influence of vegetation on the topographic evolution of the river mouth bar in the Yellow River Delta under water and sediment regulation. The results show that with vegetation, the sediment deposition volume of the river mouth bar after the water and sediment regulation is reduced by 63.7% compared to the scenario without vegetation, which contrasts with the general understanding that vegetation promotes sediment trapping and accumulation. The flow resistance effect of the vegetation on the river mouth bar alters the flow partitioning ratio between the bifurcated channels and the river mouth bar, reducing the flow discharge over the bar by 70%-85%. This redirects sediment-laden flows primarily through the river channel to the sea, leading to a decrease in local sediment supply and trapping on the river mouth bar. Furthermore, the geomorphic effects of vegetation differ significantly between the water-regulation period and the sediment-regulation period. In the absence of vegetation, vertical accretion and lateral expansion of the river mouth bar mainly occur during the sediment-regulation period, characterized by low discharge and high sediment concentration, with almost no deposition during the water-regulation period. In contrast, when vegetation is present, significant vertical accretion of the river mouth bar occurs during the water-regulation period, while its lateral expansion mainly takes place during the sediment-regulation period and is confined to the direction of sediment supply.

**Key words:** river mouth bar; water and sediment regulation; vegetation; geomorphic evolution; the Yellow River Delta

河口三角洲是河流与海洋过渡区域重要的地貌单元和生态系统<sup>[1]</sup>。径流入海后,在水体密度差、水流展宽及水面比降减小的共同影响下,所携带的泥沙沉积于入海口附近,形成拦门沙或河口坝地貌<sup>[2-5]</sup>。河口坝是受径流和海洋动力影响最剧烈的区域之一,其形成和演变是三角洲动力地貌过程的重要组成部分。在我国黄河口、长江口均发育有典型的河口坝地貌特征<sup>[6-7]</sup>。黄河现行流路口门处还因为自然改道形成了河口岛屿<sup>[8]</sup>。

河口坝、河口岛屿高程较低,常发育有芦苇、盐地碱蓬和互花米草等湿地植被<sup>[9-13]</sup>。这些植被具备良好

**基金项目:**国家重点研发计划项目(2022YFC3204301);国家自然科学基金项目(52071305)

**作者简介:**于子奇(2000—),男,硕士研究生,主要从事三角洲地貌-植被耦合研究。E-mail:yuziqinet@163.com

**通信作者:**武国相(1986—),男,副教授,博士,主要从事海洋灾害与生态减灾研究。E-mail:guoxiang@ouc.edu.cn

的消浪缓流、固滩促淤功能,在三角洲地貌发育过程中发挥着重要的作用<sup>[14-20]</sup>。已有研究<sup>[21-22]</sup>表明,植被对沉积过程的强化不仅加速了河口坝的形成过程,也在一定程度上推动了三角洲岛屿的演化。此外,植被对土壤的稳定作用还显著改变了河口的水力几何形态,进而影响了河口射流的水动力特征。Zolezzi 等<sup>[23]</sup>研究表明,植被的黏聚性能够有效削弱水流对岸滩的侵蚀能力,有助于形成更为稳定的三角洲地貌以及更窄、更深的河道。尽管上述研究较为系统地揭示了植被在长时间尺度下对河口坝地貌演化的塑造作用,但在不同来水来沙条件下,尤其是短历时剧烈变化的水沙过程背景下,植被对河口区域水动力结构与冲淤格局的具体响应机制仍有待深入探讨<sup>[24-26]</sup>。

人类活动对河口地貌格局及植被分布产生了深远影响,尤其在水沙调控、土地利用和生态修复等方面的干预更为显著<sup>[27-31]</sup>。为改善黄河下游水沙平衡、缓解河道淤积,自 2002 年起,黄河开始实施调水调沙工程措施<sup>[32-35]</sup>。该举措显著改变了黄河三角洲的水沙输移过程,提高了泥沙入海后的沉积效率<sup>[36-38]</sup>。在每轮调水调沙过程中,河口坝植被常暴露于高流量洪峰之下,直接影响河口区域的水动力特征与泥沙输移路径<sup>[39-40]</sup>。与无植被的河口坝相比,受植被作用影响的河口坝能否在调水调沙的过程中获得更大的沉积速率,其坝体沉积形态与无植被河口坝有何差异,是本文研究探讨的核心问题。

本文以黄河三角洲河口坝为原型,基于 Delft3D 构建理想河口坝的地形演变数值模型,模拟分析调水调沙背景下植被对黄河三角洲河口坝地貌演变过程的具体影响,以期为黄河三角洲地貌演变和保护管理提供参考。

# 1 研究方法

## 1.1 模型设置

参考黄河三角洲地貌特征及河口来水来沙模式,本文基于 Delft3D 构建包含河口坝地形的理想河口模型,并以黄河三角洲典型盐沼植被特征参数为原型,建立植被模型与 Delft3D 水动力-地貌耦合模型,模拟调水调沙期间有、无植被影响下河口坝的短期形态演变。设置两种模拟工况:工况一模拟无植被条件下河口口水沙格局的动态变化对河口坝形态的影响;工况二保持河口动力条件不变,于河口坝坝顶引入植被变量,以探究植被在调水调沙过程中对河口区域地貌沉积过程的影响。

Delft3D 是一款基于纳维-斯托克斯方程(N-S 方程)的数值模拟软件,采用耦合求解方法对水动力、泥沙输运及形态动力学进行模拟,在河口与三角洲等复杂环境中得到了广泛应用和验证<sup>[41]</sup>。参考 Zheng 等<sup>[6]</sup>的建模方法,设计模型计算域为边长 7 500 m 的正方形(图 1),网格宽  $b$  为 25 m,分辨率为 25 m×25 m。河道的有效宽度为 1 500 m,初始河道深 2 m,河道两侧设置宽 750 m、高程为 3 m 的海岸,以防止水流通过陆地流动。为了收束径流、保持河口射流强度,初始河道的横截面设置为高斯曲线(图 2)。近岸水深为 2.75 m,并随着海床坡度 0.000 1 逐渐增加(图 3)。

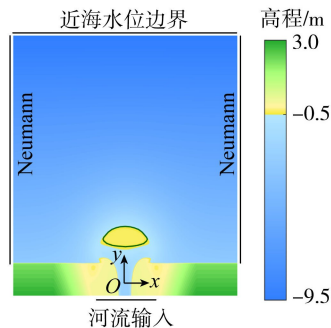


图 1 模型计算域与边界设置

Fig.1 Model computational domain and boundary setup

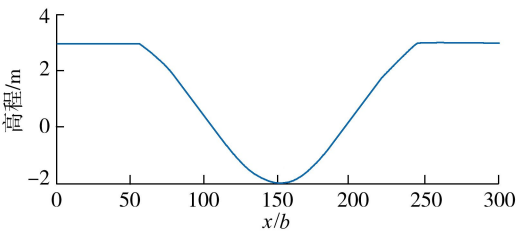


图 2 河道横截面

Fig.2 Cross-section of river channel

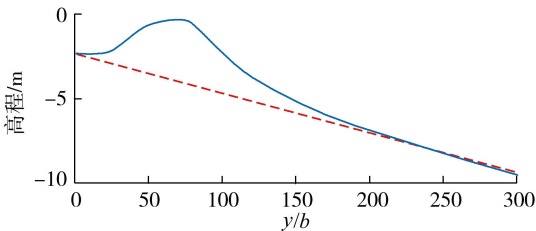


图 3 河道纵截面

Fig.3 Longitudinal section of river channel

模型的开放边界包括 1 个上游的河流边界和 3 个向海的边界(图 1):河流边界设定了流量和含沙量,是计算域内唯一的淡水输入及泥沙来源;平行于海岸线的向海边界水位固定为 0 m;两个向海侧边界采用零梯

度的 Neumann 边界条件。这一边界设置保证了模型在模拟过程中,计算域内外水体和泥沙能够自由交换。模型时间步长通过一系列敏感性测试确定为 12 s,以确保在足够计算精度下尽量缩短计算时长。

在黄河口地区,泥沙主要由粉砂和细砂组成,其粒径分布存在明显的区域性差异<sup>[42]</sup>。根据 Wang 等<sup>[43]</sup>的长期观测,高流量对下游河道的冲刷导致泥沙中值粒径从小浪底水库出口处的 6 μm 提高至利津站的 20 μm。Qiao 等<sup>[44]</sup>对河口悬浮泥沙的采样进一步验证了泥沙粒径的时空差异。根据调水调沙期间黄河口地区的泥沙参数,本文模型选择 20 μm 作为泥沙的中值粒径,设定泥沙密度为 2 650 kg/m<sup>3</sup>、干床密度为 1 600 kg/m<sup>3</sup>,以反映调水调沙期间河口的来沙特征。

1.2 径流条件概化

为了准确反映调水调沙过程中河口的水沙输入模式,统计了 2008—2022 年调水调沙期间河口水沙特征值(表 1)。由表 1 可见:①调水调沙期间进入河口的流量和含沙量显著增加,最大流量可达到年平均流量的 4~6 倍,水体最大含沙量甚至达到年平均含沙量的 6~10 倍;②最大流量与水体最大含沙量的出现日期不匹配,河口水沙不同步的特征明显。

表 1 2008—2022 年黄河调水调沙期间河口水沙特征值

Table 1 Water and sediment characteristics during water and sediment regulation period of the Yellow River from 2008 to 2022

| 年份   | 平均流量/(m <sup>3</sup> /s) | 最大流量/(m <sup>3</sup> /s) | 最大流量出现日期 | 平均含沙量/(kg/m <sup>3</sup> ) | 最大含沙量/(kg/m <sup>3</sup> ) | 最大含沙量出现日期 |
|------|--------------------------|--------------------------|----------|----------------------------|----------------------------|-----------|
| 2008 | 462                      | 4 050                    | 06-29    | 5.30                       | 56.0                       | 07-05     |
| 2009 | 421                      | 3 730                    | 07-01    | 4.22                       | 15.9                       | 06-25     |
| 2010 | 612                      | 3 900                    | 07-08    | 8.66                       | 69.7                       | 07-10     |
| 2011 | 584                      | 3 230                    | 09-23    | 5.03                       | 40.1                       | 07-11     |
| 2012 | 895                      | 3 530                    | 07-04    | 6.48                       | 36.7                       | 07-11     |
| 2013 | 751                      | 4 360                    | 07-30    | 7.30                       | 29.5                       | 07-25     |
| 2014 | 362                      | 3 150                    | 07-07    | 2.63                       | 19.6                       | 07-12     |
| 2015 | 423                      | 2 720                    | 07-09    | 2.35                       | 10.4                       | 07-05     |
| 2016 | 260                      | 1 480                    | 07-28    | 1.29                       | 4.4                        | 07-26     |
| 2017 | 284                      | 813                      | 12-08    | 0.860                      | 3.1                        | 04-28     |
| 2018 | 1 058                    | 3 670                    | 07-11    | 8.89                       | 48.1                       | 07-20     |
| 2019 | 989                      | 4 060                    | 08-12    | 8.68                       | 26.3                       | 07-21     |
| 2020 | 1 140                    | 4 580                    | 07-03    | 8.73                       | 24.1                       | 07-30     |
| 2021 | 1 399                    | 5 240                    | 10-08    | 5.51                       | 37.9                       | 07-10     |
| 2022 | 827                      | 4 030                    | 07-02    | 4.79                       | 39.2                       | 07-24     |
| 平均   | 698                      | 3 465                    |          | 5.38                       | 30.0                       |           |

调水调沙期间河口的水沙动态变化如图 4 所示。通过将每次调水调沙期间最大含沙量出现的时间节点在时间轴上重合,可以观察到调水调沙期间黄河入海口流量和含沙量的分布呈现出一定的规律。每次调水调沙通常持续 20 d 左右,在此期间可以按照河口水沙特征的差异将整个调水调沙过程划分为调水期和调

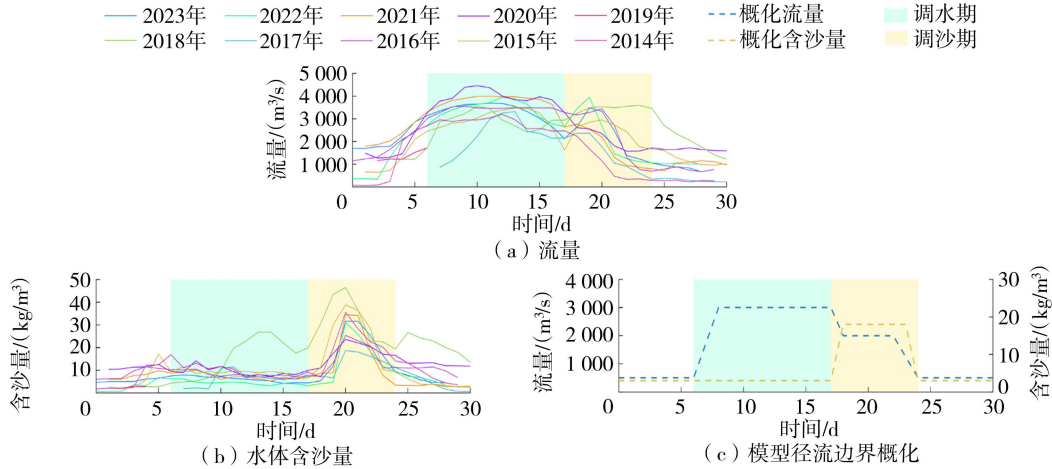


图 4 2014—2023 年黄河利津站水沙动态与径流边界概化

Fig. 4 Water and sediment regime at Yellow River Lijin Station (2014-2023) and schematization of runoff boundary

沙期。调水期河口入海流量快速升高,通常可以保持在 3 000 m<sup>3</sup>/s 以上,而含沙量较之前并无明显提升;调沙期入海含沙量达到年内最高值,此阶段的主要目的是通过增加流量来携带和冲刷河道及水库底部的泥沙,以防止河道淤积。

模型径流边界条件的设定是区分调水期与调沙期水沙输入差异的关键环节,本文基于水利部黄河水利委员会提供的水文资料(<http://www.yrcc.gov.cn/gzfw/szygb/>),对黄河调水调沙期间的水沙输入过程进行了系统性概化(图 4(c)),据此设定模型的径流边界条件。该概化处理在保留调水调沙不同阶段水沙特征的基础上,简化了径流边界,提高了模型运行的稳定性与计算效率。概化后的调水调沙过程总计 18 d,调水期持续 11 d,期间流量从 500 m<sup>3</sup>/s 逐步提高至 3 000 m<sup>3</sup>/s,含沙量 3 kg/m<sup>3</sup>;调沙期持续 7 d,流量下降至 2 000 m<sup>3</sup>/s,含沙量从 3 kg/m<sup>3</sup> 迅速升高至 18 kg/m<sup>3</sup>。模型在开始和结束阶段各设置 2 d 缓冲期,旨在实现流量向调水调沙主阶段的平稳过渡,减少水动力突变对河道和河口坝地形的冲击。

1.3 植被模拟方法

植被对水流的影响通常表示为水力粗糙度和流动阻力的影响,本文模型采用 Baptist 公式<sup>[45]</sup>来模拟植被阻力。将植被表示为刚性圆柱体,其特征参数包括茎直径  $D$ 、植被高度  $H$ 、植被密度  $m$  和阻力系数  $C_D$ 。植被影响下的总阻力  $\tau_t$  由床面阻力  $\tau_b$  和植被阻力  $\tau_v$  组成:

$$\tau_t = \rho g h i = \tau_b + \tau_v$$

1

其中

$$\tau_b = \frac{\rho g}{C_b^2} u_v^2 \qquad \tau_v = \frac{1}{2} \rho C_D m H u_v^2$$

式中: $\rho$  为水体密度,kg/m<sup>3</sup>;  $g$  为重力加速度,m/s<sup>2</sup>;  $h$  为水深,m;  $i$  为水面坡度;  $C_b$  为 Chezy 系数;  $u_v$  为深度平均流速,m/s。这种模拟方法利用水力粗糙度将流动阻力参数化,已在多种自然环境(如河口湿地)中通过现场试验和数值模拟验证,具有较强的适用性。

课题组于 2021 年 4—10 月在黄河三角洲清水沟叶瓣北岸开展了多次野外测量,重点采集互花米草(*Spartina alterniflora*)、碱蓬(*Suaeda salsa*)和芦苇(*Phragmites australis*)3 种典型湿地植被的物理参数,基于实测数据及文献数据<sup>[46-47]</sup>对比,3 种植被的茎直径、高度和密度范围如表 2 所示。

为反映植被整体阻力效应,本文采用面积加权平均法设置等效植被建模参数(互花米草、碱蓬、芦苇的密度比值为 5 : 3 : 2),茎直径  $D=0.003$  m,植被高度  $H=0.8$  m(匹配低潮滩淹水深度限制),植被密度  $m=180$  株/m<sup>2</sup>。

芦苇的水深适应范围通常为 0~1.0 m<sup>[48]</sup>,互花米草的最适宜生长水深为 0~0.3 m<sup>[49]</sup>,而碱蓬则集中分布在潮间带的高位区域,水深通常小于 0.2 m<sup>[50]</sup>,基于上述植被的生长习性,本文模型将植被的生长范围限定在高程-0.5 m 以上的区域(图 1 实线范围内)。

2 结果与分析

2.1 流速场与底部切应力分布

选取模型运行的第 8 天(调水期)和第 14 天(调沙期)作为代表性时段,对比分析了植被影响下河口区域深度平均流速场与无植被影响的差异。如图 5 所示,河口坝顶部的流速分布在有、无植被条件下均呈现不同程度的衰减,其中调沙期坝顶流速的衰减尤为显著,射流中心方向的纵向流速从 1.43 m/s 快速衰减至 0.55 m/s。这一差异主要源于调水期与调沙期流场深度的动态变化:随着模型运行进入调沙期,水体内含沙量显著升高,河口坝的持续淤积增强了坝顶水流的流动阻力,从而显著削弱了水流的流速与动能。

由图 5 可见,植被对河口区域水动力调控作用显著,调水期坝顶平均流速由无植被条件下的 1.05 m/s 降至 0.36 m/s(降幅约 66%),调沙期坝顶平均流速则由 0.55 m/s 锐降至 0.07 m/s(降幅约 87%)。在相同径流条件下,植被显著降低了过坝流量(70%~85%),导致区域内流量分配发生了改变,高流速区域向河口坝两侧的分汊河道集中。相比之下,在无植被条件下分汊河道与河口坝的水流分配更加均匀,尤其在调水期,坝顶流速并未出现显著衰减,河口射流能够更轻易地越过坝体。

表 2 黄河三角洲典型盐沼植被物理参数

Table 2 Physical parameters of typical salt marsh vegetation in the Yellow River Delta

| 植被   | 茎直径/mm | 植株高度/m  | 植被密度/(株/m <sup>2</sup> ) |
|------|--------|---------|--------------------------|
| 互花米草 | 3~5    | 0.6~1.5 | 200~400                  |
| 碱蓬   | 2~3    | 0.2~0.3 | 80~150                   |
| 芦苇   | 3~4    | 0.8~1.2 | 100~150                  |

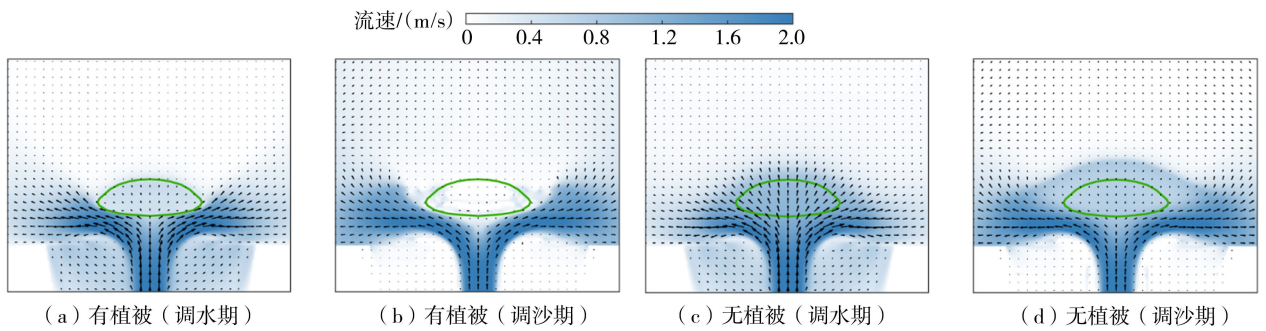


图5 有、无植被条件下河口坝流速分布

Fig. 5 Velocity distribution at river mouth bars with and without vegetation conditions

在调水期,尽管植被对流速具有一定的削弱作用,但由于径流量高,河口区域水动力作用整体较强,水流仍保持较高的动能;而在调沙期,随着径流量降低,植被阻力的相对作用被放大,植被区内的流动近乎停滞。流速衰减幅度的差异反映出植被效应对不同径流条件下水动力过程的差异化响应,尤其在径流量低、含沙量高的调沙期,流场对植被阻力的响应更加敏感。

流场的动态变化影响了河口坝周边区域的底部切应力分布格局。如图6所示,当河口射流进入海洋水体后,底部切应力随横向距离 $y/b$ 的增加而逐渐衰减。然而,植被的存在显著改变了切应力的空间分布特征。在调水期(图6(a)),无植被条件下底部切应力整体维持较高水平(5.8~6.7 Pa),尤其在河口坝末端(约 $y/b=78$ )出现明显的局部峰值。相比之下,植被阻力使底部切应力显著降低,最大切应力降低4.9 Pa,特别是在植被边界附近(虚线之前),切应力削弱幅度高达4.6 Pa。

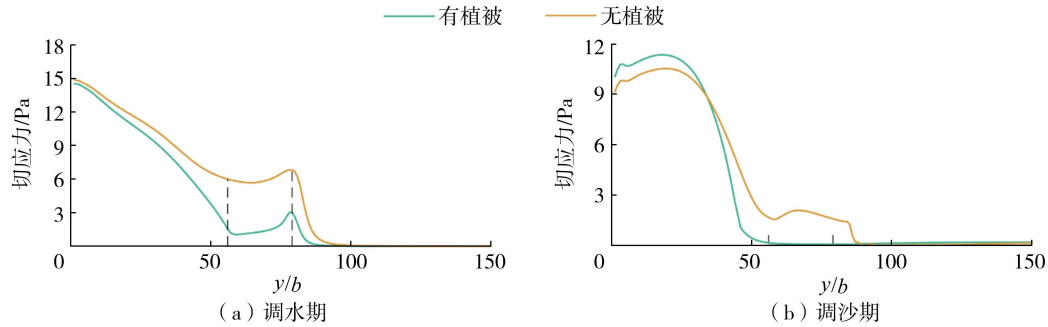


图6 沿射流中心线的切应力

Fig. 6 Shear stress along jet centerline

在调沙期(图6(b)),研究区域底部切应力普遍低于调水期。在河道内( $y/b<30$ ),由于流量减小、含沙量大幅升高,河道内淤积严重,底部切应力低于调水期。随着调水调沙进程的推进,河口坝区域水动力强度呈现明显的衰减特征。在无植被条件下,切应力空间分布相对均匀,但在坝顶区域仍存在局部高切应力区,但其数值仅为调水期的1/3。相比之下,植被缓流作用进一步抑制了局部水动力强度,导致整个河口坝区域的切应力接近零。

底部切应力的空间分布特征及其动态变化是调控河口区域泥沙沉积与再悬浮效应的关键因素。结合河口坝地貌形态的演变特征,本文发现植被不仅有效削弱了水流对河口坝的侵蚀,还通过诱导泥沙沉积进一步弱化了坝顶区域的水动力强度。通过对比调水期与调沙期可以发现,植被对切应力的削弱效应在调沙期表现得尤为显著,这一现象与流场的分析结果相吻合,进一步证实了植被对河口水动力作用的重要调控作用。

2.2 泥沙输移路径与泥沙通量

河口坝地貌演变受河口区域泥沙的输移路径、沉积分布和再悬浮过程的共同影响,图7为调水调沙过程中有、无植被条件下河口区域的泥沙通量分布情况。泥沙通量计算公式为:

$$F_s = c_s u_v h$$

(2)

式中: $F_s$ 为单一网格泥沙通量, $\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$ ;  $c_s$ 为含沙量, $\text{kg}/\text{m}^3$ 。考虑到模型中的泥沙均为黏性泥沙,且主要通过悬移质输沙的方式进行输移,因此可以忽略推移质输沙。

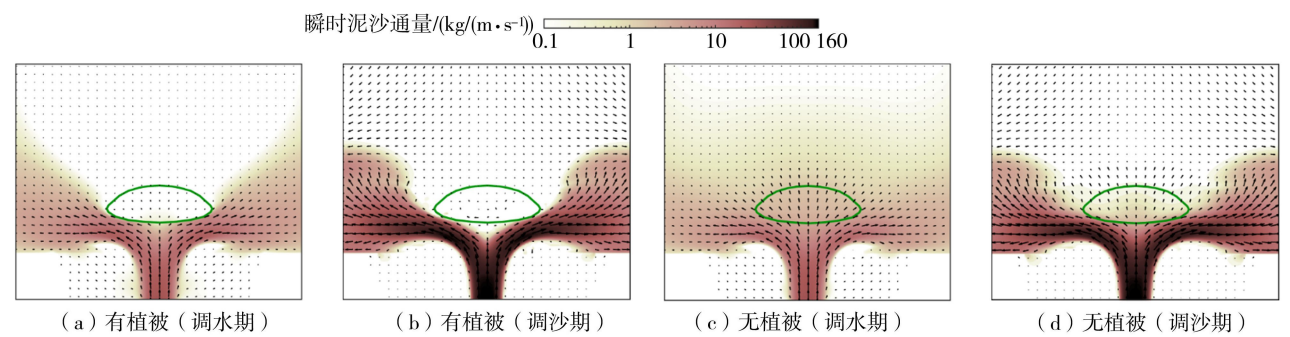


图 7 河口区域泥沙通量分布

Fig. 7 Sediment flux distribution at estuary

从整个河口区域的泥沙通量分布特征来看,植被的存在显著改变了河口区域的泥沙输移路径,进而塑造了河口坝的沉积格局。在无植被条件下,泥沙通过河口射流高效输运至坝顶区域,其输移路径呈现明显的连续性;而有植被的河口坝,在植被阻滞作用和河口坝分流效应的共同作用下,河口区域的泥沙输移路径发生显著改变,主要表现为:①主输移通道向两侧偏移;②坝顶区域的泥沙通量显著降低;③河口坝向海一侧泥沙供应大幅衰减。这一现象在调沙期表现得尤为显著。

图 8 为泥沙在河口坝不同方向上的泥沙通量和坝顶净泥沙沉积量,其中坝顶净泥沙沉积量通过输入总量与输出总量的差值量化得到。在 4 个边界中,南边界作为径流输入主导边界,承担着主要的泥沙输入功能;北、东、西边界则作为泥沙输出边界。结合研究区域内流速场和切应力的空间分布特征分析发现,调水期植被通过促进泥沙沉积和抑制再悬浮,显著增强了河口坝的泥沙留存能力(可维持在 20%~30%);相比之下,无植被河口坝由于缺乏有效的泥沙滞留能力,其净沉积量趋近于零,河口坝处于冲淤平衡状态。

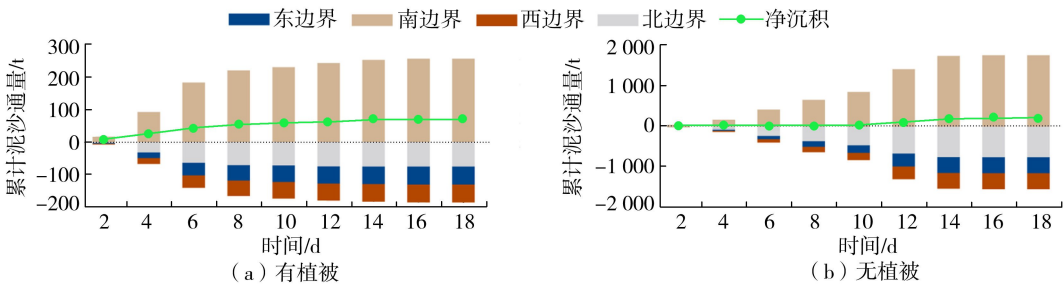


图 8 河口坝边界泥沙通量与净沉积量

Fig. 8 Sediment flux and net deposition at river mouth bar boundaries

进入调沙期后,河口区域含沙量剧增,无植被河口坝迅速从冲淤平衡状态转变为淤积状态。随着河口口水沙条件的改变,植被对泥沙输移的阻碍作用得到充分体现,调沙期植被区内的泥沙输入总量与净沉积量增长幅度极低。调水调沙过程结束后,植被区内的净泥沙沉积量为 70.3 t,仅为无植被对应区域的 36.3%。

在调水调沙期间,植被对河口坝地貌沉积的作用可以总结为两种效应:①通过削弱植被作用区域内的水动力强度、减小切应力,提高泥沙滞留能力,促进河口坝的垂向沉积过程;②通过改变泥沙输移路径,减少植被区内泥沙供应量,对河口坝的横向扩展和纵向延伸产生抑制作用。对河口坝地貌演化而言,其最终的沉积形态取决于这两种效应间的竞争。

2.3 河口坝地貌演化

图 9 为调水期和调沙期结束后河口坝地貌高程的分布特征。调水期结束后(图 9(a)(c))植被覆盖的河口坝表现出显著的沉积优势,高程增幅 7~13 cm/d,整体表现为稳定且持续的淤积趋势。这一阶段,植被对河口坝的影响以促进地貌垂向沉积为主,但同时也表现出一定的横向扩展;相较之下,无植被河口坝向远离河口方向逐步推移。由于缺乏植被对水动力的削弱作用,河口射流在坝顶仍保持较高动能,泥沙被水流输送至坝体外缘甚至更远的区域,呈现出扩散性强而垂向发育不足的特点。进入调沙期后(图 9(b)(d)),无植被河口坝在高含沙量射流的持续作用下迅速淤积,河口坝平面尺度快速扩张,泥沙垂向沉积作用明显,高程抬升速度最大可达 60 cm/d;相较之下,植被覆盖的河口坝由于缺乏泥沙来源,导致坝顶泥沙沉积速率下降。

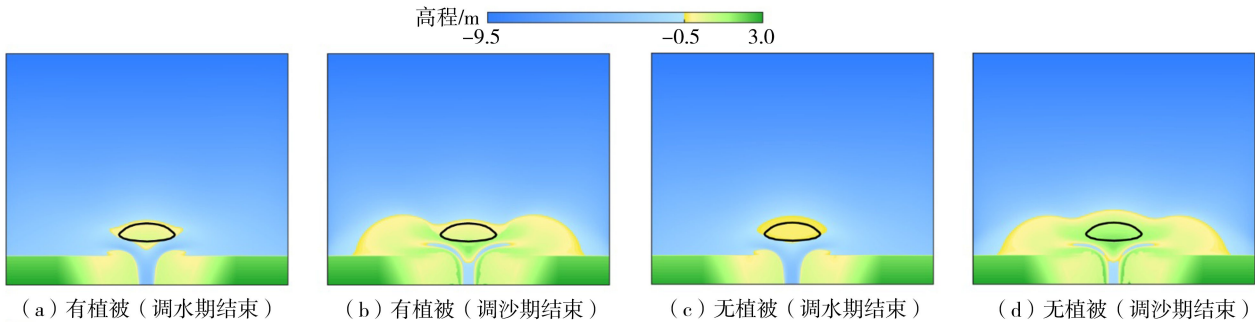


图 9 河口坝地貌高程分布

Fig. 9 Geomorphic elevation distribution at river mouth bar

图 10 为有、无植被条件下河口坝剖面高程的变化特征,其中蓝色系曲线代表调水期内的地貌演变结果,黄色系曲线代表调沙期内的结果。这些剖面图清晰揭示了调水调沙结束后有、无植被条件下河口坝形态的显著差异。

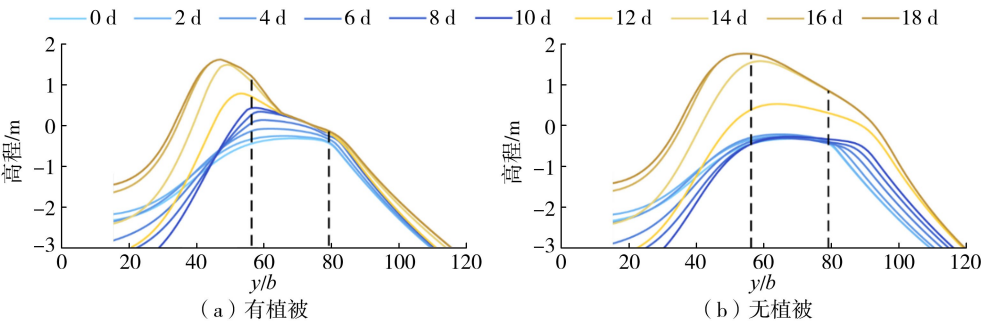


图 10 河口坝剖面高程

Fig. 10 River mouth bar profile elevation

在高径流、低含沙量的调水期,河道在强烈的水动力作用下发生剧烈冲刷。此阶段植被主要发挥缓流消能、固沙促淤的作用。在植被影响下,河口坝平面形态变化较小,主要表现为垂向高程的逐渐升高。这一现象表明,植被在调水期主要通过增强泥沙滞留能力和削弱水动力强度,促进了河口坝的垂向沉积。相比之下,低径流、高含沙量的调沙期是河口坝平面扩展和垂直沉积的主要时期。然而,植被通过缩减坝顶泥沙供应,成为限制河口坝发育的主导因素。泥沙的不均匀沉积导致坝顶呈现前高后低的地貌特征,这种形态变化进一步限制了河口坝向海扩张。由于河口坝后方缺少泥沙供应,其平面扩展仅限于来沙方向,向海端的发育受到显著抑制。

3 讨论

本文选择调水调沙背景下的植被效应作为核心关注点,原因在于植被作为三角洲地貌演变的重要调控因子,在强化泥沙滞留、稳定地貌形态和优化生态系统功能方面具有不可替代的作用。尽管河口三角洲演变研究已取得丰硕成果,特别是黄河三角洲对水沙响应的研究较为深入,但对植被作用的关注相对较少,尤其是在调水调沙这种特殊水沙条件下的植被效应研究。本文基于动态水沙条件,揭示了植被在调水期和调沙期的作用转变及其内在机制。研究发现,植被在调水期主要表现为缓流促淤作用,通过降低水流速度促进泥沙沉积;而在调沙期则转变为限制泥沙输移,通过改变水动力场结构和切应力分布,显著调控泥沙输移路径。植被作用的差异主要源于水沙条件的动态变化:调水期以水流为主导,植被主要通过生物阻力和根系固结作用影响沉积过程;调沙期则以泥沙输移为特征,植被通过改变局部水动力条件,在植被前缘形成集中沉积区,从而抑制坝顶发育。

从现实意义来看,研究结果为调水调沙工程的优化设计和三角洲生态保护管理提供了新的视角。在黄河口区域,通过合理配置植被类型和分布范围,既可以在调水期强化河口坝的垂向沉积,又能够在调沙期优化泥沙输移路径,平衡坝体的横向扩展与高程发育。这对三角洲保护管理具有重要意义:①在调水调沙工程

实施过程中,应充分考虑植被的空间布局和功能分区,建立基于植被生态功能的动态管理策略;②针对不同水沙条件,制定差异化的植被恢复方案,以最大化植被的生态效益;③将研究成果推广至其他动态水沙环境下的河口治理,可为全球三角洲地区的生态保护和可持续发展提供科学依据。

本文主要聚焦于调水调沙约 20 d 时间尺度上黄河三角洲河口坝植被的地貌效应,中长期的季节、年际演变则更为复杂,是下一步的研究重点。此外,不同的植被特性(如植被类型、密度和分布)对河流泥沙沉积的调控效应也可能有所不同,本文研究结论的泛化需要更系统、更广泛的植被参数敏感性分析来支撑。未来的研究应进一步探索植被-水沙-地貌的长期耦合机制,为三角洲生态系统的可持续管理提供更全面的理论支撑。

4 结 论

a. 植被通过调节流场结构及泥沙输移路径,显著影响了黄河三角洲河口坝的淤积格局。植被的阻滞效应减少了 70%~85%的过坝流量,导致河口坝整体淤积量下降 63.7%,这一结果与植被促淤的传统认知相反,体现了植被效应对不同水沙输入模式的差异化响应。

b. 植被对黄河三角洲河口坝的地貌效应在调水期与调沙期表现出明显分化:调水期流量高、含沙量低,植被使坝顶流速降低约 66%,河口坝以 7~13 cm/d 的速度持续淤积,有效抵御洪峰侵蚀;调沙期流量低、含沙量高,植被显著拦截了河口坝的泥沙供给,抑制了其高程发育。

参考文献:

[ 1 ] 李薇,朱乐红,胡鹏. 三角洲河道发育演变特征与影响机制研究[ J ]. 应用基础与工程科学学报,2025,33( 1 ):158-68. ( Li Wei,Zhu Lehong, Hu Peng. Study on the characteristics and mechanisms of deltaic channel evolution[ J ]. Journal of Basic Science and Engineering,2025,33( 1 ):158-168. ( in Chinese ) )

[ 2 ] Edmonds D A,Slingerland R L. Significant effect of sediment cohesion on delta morphology[ J ]. Nature Geoscience,2010,3( 2 ): 105-109.

[ 3 ] Fagherazzi S,Edmonds D A,Nardin W,et al. Dynamics of river mouth deposits[ J ]. Reviews of Geophysics,2015,53( 3 ):642-672.

[ 4 ] 王长金,胡鹏,李薇,等. 河流分汊成因与演变机制研究综述[ J ]. 水利水电科技进展,2022,42( 3 ):112-120. ( Wang Changjin,Hu Peng,Li Wei,et al. A review on formation and evolution mechanism of river bifurcation[ J ]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2022,42( 3 ):112-120. ( in Chinese ) )

[ 5 ] 林中源,胡晓张,邹华志,等. 磨刀门咸潮上溯对河口拦门沙地形变化的响应研究[ J ]. 水资源保护,2024,40( 5 ):104-111. ( Lin Zhongyuan,Hu Xiaozhang,Zou Huazhi,et al. Study on response of saltwater intrusion to topographic changes of mouth bar in Modaomen Estuary[ J ]. Water Resources Protection,2024,40( 5 ):104-111. ( in Chinese ) )

[ 6 ] Zhang Shaoyan,Gao Weilun,Shao Dongdong,et al. The effects of intra-annual variability of river discharge on the spatio-temporal dynamics of saltmarsh vegetation at river mouth bar:insights from an ecogeomorphological model[ J ]. Journal of Environmental Informatics,2023,42( 2 ):108-122.

[ 7 ] 何青,朱春燕,郭磊城,等. 变化条件下长江口沉积地貌系统转型与应对[ J ]. 中国水利,2024( 16 ):12-19. ( He Qing,Zhu Chunyan,Guo Leicheng,et al. Regime shift in morphology of the Yangtze Estuary under changing environment and its management[ J ]. China Water Resources,2024( 16 ):12-19. ( in Chinese ) )

[ 8 ] 徐丛亮,谷硕,刘喆,等. 黄河调水调沙 14 a 来河口拦门沙形态变化特征[ J ]. 人民黄河,2016,38( 10 ):69-73. ( Xu Congliang,Gu Shuo,Liu Zhe,et al. Characteristics of the river mouth bar in the past 14 years of the Yellow River water-sediment regulation[ J ]. Yellow River,2016,38( 10 ):69-73. ( in Chinese ) )

[ 9 ] 陈柯欣,丛丕福,曲丽梅,等. 黄河三角洲湿地水文连通及驱动力分析[ J ]. 水文,2023,43( 3 ):112-117. ( Chen Kexin,Cong Pifu,Qu Limei,et al. Hydrological connectivity and driving force of Yellow River delta wetland[ J ]. Journal of China Hydrology, 2023,43( 3 ):112-117. ( in Chinese ) )

[ 10 ] 高云芳,李秀启,董贯仓,等. 黄河口几种盐沼植物对滨海湿地净化作用的研究[ J ]. 安徽农业科学,2010,38( 34 ):19499-19501. ( Gao Yunfang,Li Xiuqi,Dong Guancang,et al. Purification of several salt marsh plants to the coastal wetlands in the estuary of Yellow River[ J ]. Journal of Anhui Agricultural Sciences,2010,38( 34 ):19499-19501. ( in Chinese ) )

[ 11 ] 任令祺,任广波,王建步,等. 面向滨海湿地修复治理的生态系统服务净价值遥感评估研究:以黄河口湿地为例[ J ]. 海洋开发与管理,2024,41( 3 ):28-44. ( Ren Lingqi,Ren Guangbo,Wang Jianbu,et al. Remote sensing assessment of the net value of ecosystem services for coastal wetland restoration and management:a case study of Yellow River Estuary wetland[ J ]. Ocean

Development and Management,2024,41(3):28-44. (in Chinese))

[12] 罗锋,代建成,陈治澎,等. 基于改进机会窗口理论的盐城湿地互花米草前缘时空变化研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(3):56-64. (Luo Feng,Dai Jiancheng,Chen Zhipeng,et al. Spatial-temporal variation of *Spartina alterniflora* edge in Yancheng wetland based on improved windows of opportunity theory[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2023,51(3):56-64. (in Chinese))

[13] 陆永军,赵雅慧,左利钦,等. 弱混合陆相河口三角洲水文连通性研究进展[J]. 水利水电科技进展,2025,45(5):129-140. (Lu Yongjun,Zhao Yahui,Zuo Liqin,et al. Research progress on hydrological connectivity in weakly mixed land-dominated estuarine deltas[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2025,45(5):129-140. (in Chinese))

[14] Liu Guilin,Zhang Luochen,Zhang Qian,et al. Spatio-temporal dynamics of wetland landscape patterns based on remote sensing in Yellow River Delta,China[J]. Wetlands,2014,34:787-801.

[15] 杨薇,靳宇弯,孙立鑫,等. 基于生产可能性边界的黄河三角洲湿地生态系统服务权衡强度[J]. 自然资源学报,2019,34(12):2516-2528. (Yang Wei,Jin Yuwan,Sun Lixin,et al. Determining the intensity of the trade-offs among ecosystem services based on production-possibility frontiers:model development and a case study[J]. Journal of Natural Resources,2019,34(12):2516-2528. (in Chinese))

[16] 葛昭佩,唐军,赵楚嫣. 植被对波浪作用下床面切应力影响的数值模拟分析[J]. 海洋学报,2022,44(11):111-120. (Ge Zhaopei,Tang Jun,Zhao Chuyan. Numerical study on influence of vegetation on bed shear stress under coastal waves[J]. Haiyang Xuebao,2022,44(11):111-120. (in Chinese))

[17] 赵铜铁钢,吴迪熠,杨振华,等. 粤港澳大湾区滨海自然与人工湿地演变及驱动因素分析[J]. 水资源保护,2024,40(6):38-47. (Zhao Tongtiegang,Wu Diyi,Yang Zhenhua,et al. Evolution of coastal natural and constructed wetlands and its driving factor analysis in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area[J]. Water Resources Protection,2024,40(6):38-47. (in Chinese))

[18] 何晓冬,詹泸成,郑权. 江苏沿海典型盐沼潮沟系统地表水与地下水交换规律[J]. 河海大学学报(自然科学版),2026,54(2):63-71. (He Xiaodong,Zhan Lucheng,Zheng Quan. Surface water and groundwater exchange pattern in a typical coastal salt marsh-tidal creek system of Jiangsu Province[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2026,54(2):63-71. (in Chinese))

[19] 姜博,张仟龙,宋志坤,等. 波流和植物作用下辽河口潮滩湿地水沙运动过程数值模拟[J]. 水利水电科技进展,2025,45(1):47-54. (Jiang Bo,Zhang Qianlong,Song Zhikun,et al. Numerical simulation of water and sediment movement processes in the Liaohe Estuary tidal flat wetland under influence of wave flow and vegetation[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2025,45(1):47-4. (in Chinese))

[20] Suresh D B,Wood D,Jin Yaqing. Sedimentary bed morphology in the wake of flexible aquatic vegetation[J]. Water Science and Engineering,2025,18(3):354-368.

[21] Mudd S M,Howell S M,Morris J T. Impact of dynamic feedbacks between sedimentation,sea-level rise,and biomass production on near-surface marsh stratigraphy and carbon accumulation[J]. Estuarine,Coastal and Shelf Science,2009,82(3):377-389.

[22] 罗锋,代建成,陈治澎,等. 盐城自然保护区盐沼植被分布动态监测及驱动力分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2024,52(3):88-95. (Luo Feng,Dai Jiancheng,Chen Zhipeng,et al. Dynamic monitoring and driving force analysis of salt marsh vegetation distribution in Yancheng Nature Reserve[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2024,52(3):88-95. (in Chinese))

[23] Zolezzi G,Luchi R,Tubino M. Modeling morphodynamic processes in meandering rivers with spatial width variations[J]. Reviews of Geophysics,2012,50(4):RG4005.

[24] 巴旗,吴振,张诗然,等. 黄河口湿地植被时空变化及其影响因素[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版),2022,52(12):81-94. (Ba Qi,Wu Zhen,Zhang Shiran,et al. Temporal and spatial variation of wetland vegetation in the Yellow River(Huanghe) mouth and its influencing factors[J]. Periodical of Ocean University of China,2022,52(12):81-94. (in Chinese))

[25] 龚政,陈欣迪,周曾,等. 生物作用对海岸带泥沙运动的影响[J]. 科学通报,2021,66(1):53-62. (Gong Zheng,Chen Xindi,Zhou Zeng,et al. The roles of biological factors in coastal sediment transport:a review[J]. Chinese Science Bulletin,2021,66(1):53-62. (in Chinese))

[26] 周曾,陈雷,林伟波,等. 盐沼滩生物动力地貌演变研究进展[J]. 水科学进展,2021,32(3):470-484. (Zhou Zeng,Chen Lei,Lin Weibo,et al. Advances in biogeomorphology of tidal flat-saltmarsh systems[J]. Advances in Water Science,2021,32(3):470-484. (in Chinese))

[27] 何振芳,牟婷婷,郭庆春,等. 1979—2019 年大汶河流域湿地时空演变与分异研究[J]. 水资源保护,2024,40(2):134-40. (He Zhenfang,Mou Tingting,Guo Qingchun,et al. Spatial-temporal evolution and differentiation study of wetlands in the Dawen

River Basin from 1979 to 2019[J]. *Water Resources Protection*,2024,40(2):134-140. (in Chinese))

[28] 王海云,匡耀求,郑少兰,等. 粤港澳大湾区 2010—2020 年湿地时空变化及驱动因素分析[J]. *水资源保护*,2023,39(4):126-134. (Wang Haiyun, Kuang Yaoqiu, Zheng Shaolan, et al. Spatial-temporal changes of wetlands and its driving factors in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area from 2010 to 2020[J]. *Water Resources Protection*,2023,39(4):126-134. (in Chinese))

[29] 李发文,刘慧婉,仇昊雨,等. 流域水系地貌定律的适应性与异质性研究[J]. *水资源保护*,2025,41(2):19-29. (Li Fawen, Liu Huiwan, Qiu Haoyu, et al. Study on adaptability and heterogeneity of water system geomorphic laws in watersheds[J]. *Water Resources Protection*,2025,41(2):19-29. (in Chinese))

[30] 谢亚军,顾浩,苏宇宸,等. 考虑植被力学-水力作用的洪泽湖堤防加固效果分析[J]. *河海大学学报(自然科学版)*,2024,52(2):61-68. (Xie Yajun, Gu Hao, Su Yuchen, et al. Reinforcement effects of Hongze Lake embankment considering hydro-mechanical effects of vegetation[J]. *Journal of Hohai University(Natural Sciences)*,2024,52(2):61-68. (in Chinese))

[31] 谢灵枫,杨肖丽,吴凡,等. 黄河流域未来气象水文干旱传播的气候变化响应[J]. *河海大学学报(自然科学版)*,2025,53(1):10-17. (Xie Lingfeng, Yang Xiaoli, Wu Fan, et al. Response of future meteorological and hydrological drought propagation to climate change in the Yellow River Basin[J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*,2025,53(1):10-17. (in Chinese))

[32] 毕乃双,时义睿,葛春海,等. 地形地貌变化对调水调沙期间黄河口沉积格局的影响[J]. *海洋地质与第四纪地质*,2024,44(5):1-14. (Bi Naishuang, Shi Yirui, Ge Chunhai, et al. Impacts of morphological evolution of the Huanghe River mouth by artificial regulation on deltaic sedimentation[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*,2024,44(5):1-14. (in Chinese))

[33] 胡刚,张勇,孔祥淮,等. 全新世中国大河三角洲沉积演化模式转化及其对人类活动的响应[J]. *海洋地质与第四纪地质*,2021,41(5):77-89. (Hu Gang, Zhang Yong, Kong Xianghuai, et al. Changes of evolution models of China's large river deltas since Holocene and their responses to anthropogenic activities[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*,2021,41(5):77-89. (in Chinese))

[34] 王开荣. 黄河调水调沙对河口及其三角洲的影响和评价[J]. *泥沙研究*,2005(6):29-33. (Wang Kairong. Impact and evaluation of water and sediment regulation in the Yellow River on the estuary and its delta[J]. *Journal of Sediment Research*,2005(6):29-33. (in Chinese))

[35] 李洁,夏军强,邓珊珊,等. 近 30 年黄河下游河道深泓线摆动特点[J]. *水科学进展*,2017,28(5):652-661. (Li Jie, Xia Junqiang, Deng Shanshan, et al. Characteristics of channel thalweg migration in the lower Yellow River over the past 30 years[J]. *Advances in Water Science*,2017,28(5):652-661. (in Chinese))

[36] 曹玉芹,夏军强,周美蓉,等. 汛期与非汛期水沙条件对黄河下游不同河段过流能力的影响[J]. *水科学进展*,2024,35(4):617-628. (Cao Yuqin, Xia Junqiang, Zhou Meirong, et al. Effects of flood and non-flood flow and sediment regimes on the flood discharge capacity of different reaches in the Lower Yellow River[J]. *Advances in Water Science*,2024,35(4):617-628. (in Chinese))

[37] 夏军强,张晓雷,邓珊珊,等. 黄河下游高含沙洪水过程一维水沙耦合数学模型[J]. *水科学进展*,2015,26(5):686-697. (Xia Junqiang, Zhang Xiaolei, Deng Shanshan, et al. Modelling of hyperconcentrated floods in the lower Yellow River using a coupled approach[J]. *Advances in Water Science*,2015,26(5):686-697. (in Chinese))

[38] 高璐,徐向舟,张红武. 持续冲刷期内黄河下游河床演变特点分析[J]. *水利水电科技进展*,2024,44(3):73-79. (Gao Lu, Xu Xiangzhou, Zhang Hongwu. Characteristics of channel adjustment in Lower Yellow River during continuously scouring period[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*,2024,44(3):73-79. (in Chinese))

[39] 刘胜琪,夏军强,石希,等. 长江中游洲滩植被生长动态及其对水流阻力的影响[J]. *水资源保护*,2025,41(2):233-241. (Liu Shengqi, Xia Junqiang, Shi Xi, et al. Growth dynamics of vegetation on floodplains in middle reaches of the Yangtze River and its impact on flow resistance[J]. *Water Resources Protection*,2025,41(2):233-241. (in Chinese))

[40] 李彬权,任泽凌,王国庆,等. 考虑地形地貌特征与土地利用变化的小流域设计洪水计算方法[J]. *河海大学学报(自然科学版)*:2025,53(6):33-40. (Li Binqun, Ren Zeling, Wang Guoqing, et al. A method for design flood calculation in small watershed considering geomorphological feature and land use change[J]. *Journal of Hohai University(Natural Sciences)*:2025,53(6):33-40. (in Chinese))

[41] 徐嘉毅,刘丽,葛家旺,等. 不同潮差影响的陆架三角洲沉积模式:基于 Delft 3D 数值模拟的启示[J/OL]. *沉积学报*,2025-01-16. <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550>. 2024. 123. (Xu Jiayi, Liu Li, Ge Jiawang, et al. Shelf delta depositional model influenced by different tidal ranges:inspiration from Delft 3D numerical simulation[J/OL]. *Acta Sedimentologica Sinica*,2025-01-16. <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550>. 2024. 123. (in Chinese))

[42] Meng Liwei, Wang Longsheng, Zhao iawen, et al. End-member characteristics of sediment grain size in modern Yellow River delta

sediments and its environmental significance[J]. *Frontiers in Marine Science*,2023,10:1141187.

[43] Wang Houjie,Bi Naishuang,Saito Y ,et al. Recent changes in sediment delivery by the Huanghe( Yellow River) to the sea:causes and environmental implications in its estuary[J]. *Journal of Hydrology*,2010,391(3/4):302-313.

[44] Qiao Shuqing,Shi Xuefa,Zhu Aimei ,et al. Distribution and transport of suspended sediments off the Yellow River( Huanghe) mouth and the nearby Bohai Sea[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*,2010,86(3):337-344.

[45] Baptist M J. A flume experiment on sediment transport with flexible, submerged vegetation [C/OL]//*Proceedings of the International Workshop on RIParian FORest Vegetated Channels: Hydraulic, Morphological and Ecological Aspects*, 2003. <https://www.researchgate.net/publication/279853441>

[46] 高翔,王柯萌,武国相,等. 黄河三角洲互花米草整治对潮滩湿地防灾功效和沉积动力的影响[J]. *海洋与湖沼*,2023,54(6):1586-1596. ( Gao Xiang, Wang Kemeng, Wu Guoxiang, et al. Effects of *Spartina alterniflora* removal on storm surge attenuation and sediment trapping in the intertidal zone of the Yellow River Delta[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*,2023,54(6):1586-1596. (in Chinese))

[47] Wu Guoxiang, Wang Kemeng, Liang Bingchen, et al. Modeling the morphological responses of the Yellow River Delta to the water-sediment regulation scheme: the role of impulsive river floods and density-driven flows[J]. *Water Resources Research*,2023,59(7):e2022WR033003.

[48] 孙文广,孙志高,孙景宽,等. 黄河口芦苇湿地不同恢复阶段种群生态特征[J]. *生态学报*,2015,35(17):5804-5812. ( Sun Wenguang, Sun Zhigao, Sun Jingkuan, et al. Ecological traits of *Phragmites australis* community in different restoration phases of the Yellow River estuary, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*,2015,35(17):5804-5812. (in Chinese))

[49] Zhi Yingbiao, Li Hongli, An Shuqing, , et al. Inter-specific competition: spartina alterniflora is replacing *Spartina anglica* in coastal China[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*,2007,74(3):437-48.

[50] Alhdad G M, Seal C E, Al-Azzawi M J, et al. The effect of combined salinity and waterlogging on the halophyte *Suaeda maritima*: the role of antioxidants[J]. *Environmental and Experimental Botany*,2013,87:120-125.

(收稿日期:2025-03-12 编辑:熊水斌)

(上接第105页)

[18] Ma Chao,Zhang Pengfei, Chen Diyi, et al. Medium-and long-term optimal operation of a hybrid energy system enhanced by cascade hydropower energy storage system[J]. *Energy Conversion and Management*,2024,301:118017.

[19] Ju Chang,Ding Tao,Jia Wenhao, et al. Two-stage robust unit commitment with the cascade hydropower stations retrofitted with pump stations[J]. *Applied Energy*,2023,334:120675.

[20] 罗彬,陈永灿,苗树敏,等. 融合改造的混合式抽水蓄能与风电联合运行短期调度模型[J]. *水利学报*,2023,54(8):955-966. ( Luo Bin, Chen Yongcan, Miao Shumin, et al. A joint short-term operation model for wind power and hybrid pumped-storage hydropower plant[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*,2023,54(8):955-966. (in Chinese))

[21] Tan Qiaofeng,Nie Zhuang, Wen Xin, et al. Complementary scheduling rules for hybrid pumped storage hydropower-photovoltaic power system reconstructing from conventional cascade hydropower stations[J]. *Applied Energy*,2024,355:122250.

[22] 郭爱军,畅建霞,王义民,等. 混合式抽水蓄能电站群容量计算研究 I :短期调峰特征与梯级开发增益[J]. *水利学报*,2024,55(7):768-779. ( Guo Aijun, Chang Jianxia, Wang Yimin, et al. Research on capacity computation of cascade on-stream integral pumped storage hydropower plants I :short-term peak shaving and gain of cascade development[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*,2024,55(7):768-779. (in Chinese))

[23] 尹丽君,许昌,黄显峰,等. 水光互补基地水库调度图绘制及应用策略[J]. *河海大学学报(自然科学版)*,2023,51(5):65-69. ( Yin Lijun, Xu Chang, Huang Xianfeng, et al. Drawing and application strategy of dispatching diagram for water-light complementary base reservoir[J]. *Journal of Hohai University(Natural Sciences)*,2023,51(5):65-69. (in Chinese))

[24] 闻昕,秦济森,谭乔凤,等. 基于余留期效益函数的水光互补随机优化调度方法[J]. *水资源保护*,2023,39(6):23-31. ( Wen Xin, Qin Jisen, Tan Qiaofeng, et al. Research on stochastic optimal operation of hydro-photovoltaic complementary based on utility function of carryover stage[J]. *Water Resources Protection*,2023,39(6):23-31. (in Chinese))

[25] 高英,苏华英,于洁,等. 乌江流域水光互补梯级蓄能调度图绘制[J]. *河海大学学报(自然科学版)*,2023,51(5):56-64. ( Gao Ying, Su Huaying, Yu Jie, et al. Drawing of Hydro-PV complementary cascade energy storage dispatching diagram in Wujiang River Basin[J]. *Journal of Hohai University(Natural Sciences)*,2023,51(5):56-64. (in Chinese))

[26] Wen Xin, Sun Yuanliang, Tan Qiaofeng, et al. Optimizing the sizes of wind and photovoltaic plants complementarily operating with cascade hydropower stations:balancing risk and benefit[J]. *Applied Energy*,2022,306:117968.

(收稿日期:2025-01-15 编辑:刘晓艳)