

# 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

姜博<sup>1</sup>, 张仟龙<sup>1</sup>, 宋志坤<sup>1</sup>, 张明亮<sup>1,2</sup>, 柴崇頊<sup>3</sup>

(1. 大连海洋大学海洋科技与环境学院, 辽宁 大连 116023; 2. 辽宁省近海生态环境与灾害防护工程技术创新中心, 辽宁 大连 116023; 3. 中科星图维天信(北京)科技有限公司, 北京 100094)

**摘要:**运用 Delft3D 软件建立了盐沼植被作用下波流耦合数值模型, 定量分析了辽河口潮滩湿地海域的水沙动力特性和泥沙落淤过程。结果表明:模型模拟的波浪、潮流及悬浮泥沙结果与实测数据相符, 各测点模拟的悬浮泥沙浓度自表层至底层逐渐上升; 不同盐沼植被如芦苇与盐地碱蓬, 对潮滩流速的阻碍影响存在显著差异, 在大潮期, 芦苇能更有效地衰减水流速度; 相比盐地碱蓬植被, 芦苇在截留悬浮泥沙及促使泥沙落淤方面的作用更加显著。

**关键词:**盐沼植被; 悬浮泥沙通量; 数值模拟; Delft3D; 辽河口

中图分类号: TV143

文献标志码: A

文章编号: 1006-7647(2025)01-0047-08

**Numerical simulation of water and sediment movement processes in the Liaohe Estuary tidal flat wetland under influence of wave flow and vegetation//JIANG Bo<sup>1</sup>, ZHANG Qianlong<sup>1</sup>, SONG Zhikun<sup>1</sup>, ZHANG Mingliang<sup>1,2</sup>, CHAI Chongxu<sup>3</sup> (1. College of Marine Science and Technology and Environmental Science, Dalian Ocean University, Dalian 116023, China; 2. Liaoning Provincial Engineering Technology Innovation Center for Nearshore Ecological Environment and Disaster Prevention, Dalian 116023, China; 3. Zhongke Xingtu Weitianxin (Beijing) Technology Co., Ltd., Beijing 100094, China)**

**Abstract:** A wave-flow coupled numerical model under the influence of salt marsh vegetation was established using Delft3D software to quantitatively analyze the water and sediment dynamics and sediment deposition processes in the Liaohe Estuary tidal flat wetland. The research results show that the simulated wave, tidal current, and suspended sediment results are consistent with the measured data. The suspended sediment concentration at each measurement point gradually increases from the surface layer to the bottom layer. Different salt marsh vegetation types, such as *Phragmites australis* and *Suaeda salsa*, have significant differences in their effects on the tidal flat flow velocity. During the spring tide period, *Phragmites australis* can more effectively attenuate flow velocity. Compared to *Suaeda salsa*, *Phragmites australis* has a more significant effect on the interception of suspended sediment and sediment deposition.

**Key words:** salt marsh plants; suspended sediment flux; numerical simulation; Delft3D; the Liaohe Estuary

河口潮滩位于陆地、河流与海洋的交界处, 各介质相互作用活跃, 动力系统受潮流、风、波浪及风暴潮等多种因素影响变得非常复杂<sup>[1]</sup>。近年来, 在多种因素影响下, 河口潮滩湿地出现了面积锐减、湿地动植物多样性下降等一系列退化问题<sup>[2]</sup>。为此, 相关机构采取了一系列措施对海岸带湿地进行整治与修复, 如湿地生境恢复技术、生物修复技术和生物-生境联合修复技术等。盐沼植被在生物-生境联

合修复技术中发挥着重要作用, 相关学者开展了一系列研究<sup>[3-4]</sup>, 但在整治修复过程中, 湿地植被和水动力相互作用、泥沙输运及促淤等理论研究尚不完善, 一系列重要科学问题尚未得到有效解决, 相关研究工作亟须开展。

数值模拟以其在计算效率和模拟精度方面的优越性在河口水动力及泥沙输运研究中发挥了巨大作用<sup>[5]</sup>。考虑潮滩湿地盐沼植被较多, 其对潮流的消

**基金项目:**国家自然科学基金项目(U21A20155, 52471270); 辽宁省应用基础研究计划项目(2023030048-JH2/1013); 辽宁省属本科高校基本科研业务费专项资金项目(LJ232410158063)

**作者简介:**姜博(1995—), 男, 硕士研究生, 主要从事河口水沙数值模拟研究。E-mail: jiangxiaobo241@163.com

**通信作者:**张明亮(1976—), 男, 教授, 博士, 主要从事近海水动力、波浪传播及湿地恢复数值模拟研究。E-mail: zhmliang\_mail@126.com

减及海岸的防护有重要影响,相关学者针对该问题开展了大量的研究工作。例如:Ashall 等<sup>[6]</sup>基于三维水动力模型研究了盐沼植被对 Fundy 湾潮流运动的影响,结果显示盐沼植被在减缓流速和改变流场结构等方面发挥了重要作用;Wu 等<sup>[7]</sup>结合细网格效应的处理方法构建了三维水动力模型,研究了 Delaware 海湾盐沼植被对涨落潮过程的影响;Wu 等<sup>[8]</sup>建立了非破碎和破碎长波在刚性植被水域传播运动的二维数值模型,并对植被的消波进行了深入分析。在考虑径流与潮汐相互作用的条件下,Zhang 等<sup>[9-10]</sup>将遥感技术解译的盐沼植被空间分布耦合到水动力学模型中,揭示了盐沼植被对辽河口湿地海域水动力特征的影响机制。此外,盐沼植被对海岸和湿地泥沙促淤有重要的影响。例如:Ma 等<sup>[11]</sup>开展了理想化植被潮滩的潮流和泥沙输运数值模拟,研究表明植被的存在使植被区在涨落潮过程中产生环流,并造成沉积物在植被区内沉积;Temmerman 等<sup>[12]</sup>通过建立潮滩湿地三维模型分析了植被对水流路径和沉积模式的影响,得出植被是潮滩地貌长期发育的关键因素等结论;Nardin 等<sup>[13]</sup>使用 Delft3D-SWAN 模型将水动力过程与植被沉积物运输相结合,研究了盐沼植被和海草在不同密度、高度和空间分布下对水交换量的影响,同时发现植被降低了底床剪切应力,保护海湾免受波浪和潮流的侵蚀。

辽河口潮滩湿地是我国北方最大的河口湿地,该湿地植物种类少,以芦苇和盐地碱蓬为主要植被群落。近年来,围垦、滩涂养殖等不合理的人类活动引发河口生境退化<sup>[14]</sup>,芦苇、盐地碱蓬群落逐渐萎缩<sup>[15]</sup>。盐沼植被由于其自身特性引起的弱流、消浪、促淤等作用对潮滩地貌演变具有重要影响;而潮

滩水动力、泥沙动力等因子对植被的生长及发育也起着至关重要的作用<sup>[2]</sup>。本文以辽河口潮滩湿地为研究对象,在模拟过程中考虑盐沼植被对波浪、潮流的阻碍作用,运用 Delft3D 软件建立盐沼植被作用下波流耦合数值模型,分析其水动力及泥沙输移过程,揭示波流和植物共同作用下辽河口潮滩湿地的水沙运动特征规律,以期为掌握河口泥沙问题及沿岸生态保护提供科学参考。

## 1 波流耦合数值模型

### 1.1 模型构建

Delft3D 软件是由荷兰代尔夫特水利研究所开发的一款功能强大的计算机软件包,由 Delft3D-FLOW、Delft3D-WAQ、Delft3D-WAVE、Delft3D-PART、Delft3D-ECO、Delft3D-MOR、Delft3D-SED 等七大模块组成,应用场景包括海岸、河口、河流、湖泊和水库等地区,并取得了丰富的研究成果<sup>[16]</sup>。本文构建的波流耦合数值模型主要用到了 Delft3D-FLOW、Delft3D-WAVE 及 Delft3D-SED 模块,耦合模型所用到的详细方程见文献<sup>[17]</sup>。

波流耦合数值模型是将 Delft3D-WAVE 模块构建的波浪模型和 Delft3D-FLOW 模块构建的潮流模型在同一级网格中同步进行计算得到,其中 Delft3D-FLOW 模块负责计算流场相关参数(如潮位、流速等),Delft3D-WAVE 模块负责计算波浪有关参数(如波向、波长、波周期及波高等)。Delft3D-SED 模块负责模拟非黏性沉积物的底床输运和悬移质输运以及黏性沉积物的悬移质输运。盐沼植被对波浪和潮流的影响通过引入阻力项的形式被纳入计算模型中。植被作用下波流耦合数值模型的信息交互方式见图 1。

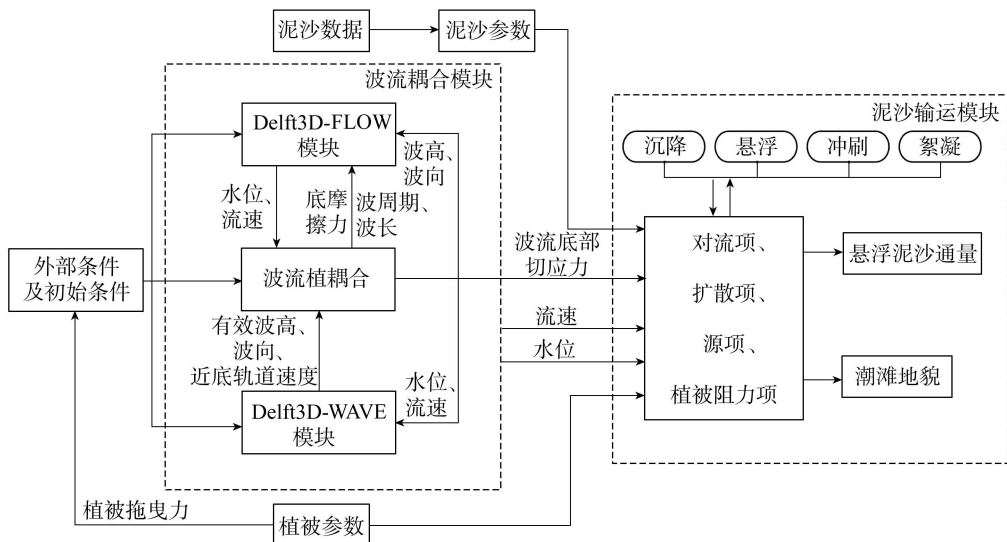


图 1 植被作用下波流耦合数值模型的信息交互方式

## 1.2 模型设置

辽河口潮滩湿地(图2)地处辽宁省盘锦市,其潮汐类型属非正规半日混合潮,既承接了上游河流的水和悬浮泥沙通量,又受湾内潮汐等动力的作用,水动力环境极其复杂<sup>[18]</sup>。水域底质主要由黏土质粉砂和粉砂等细颗粒泥沙组成,径流量和泥沙通量有明显的季节性差异<sup>[19]</sup>。

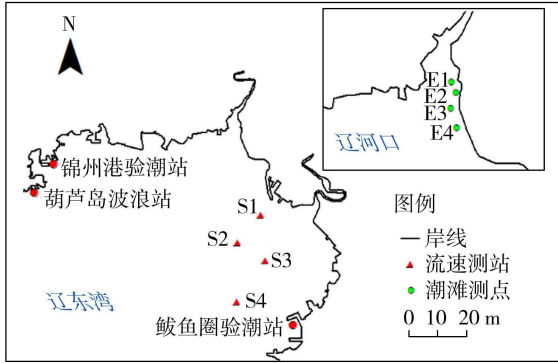


图2 研究区示意图及站点位置

本研究所用波流耦合数值模型网格采用嵌套方式进行模拟。大模型主要包含渤海海域,以大连和烟台作为开边界(图3(a)),开边界利用全球潮汐模型TPXO 8.0中的8个分潮(M2、S2、N2、K2、K1、O1、P1、Q1)计算得到。小模型模拟范围设定为渤海北部辽东湾 40°18'N ~ 41°08'N、120°54'E ~ 122°17'E 的水域(图3(b))。模型水平方向由16598个正交网格组成,垂向采用 $\sigma$ 坐标,均匀分为10层。率定后大模型模拟的潮位作为小模型的开边界条件。

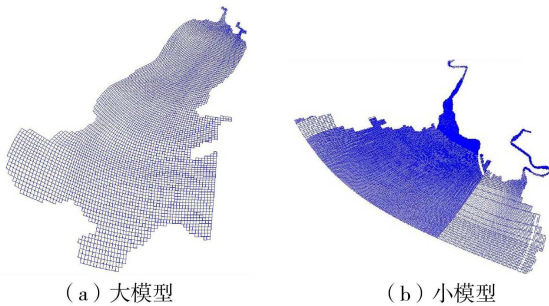


图3 研究区网格

计算时间为2019年4月1日至2019年5月1日,包含两次大小潮过程,时间步长为60s。模型将风速和气压要素纳入考量,采用欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts)的ERA5再分析数据集中的风速和气压数据作为背景风场<sup>[20-23]</sup>,空间分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ ,时间分辨率为1h。选取2019年5月中旬的Landsat8遥感影像,空间分辨率为30m,利用地物在多光谱遥感影像的光谱差异和谱间关系,通过归一化植被指数和修正的归一化差分法对影像中地物的

光谱特征进行分析,建立决策树,对辽河口潮滩湿地地物进行提取和分类,获取盐沼植被空间分布特征。图4为利用决策树算法的分类结果。根据辽河口潮滩湿地实地调查现状,参考前人相关研究<sup>[10,20]</sup>,对泥沙的相关参数进行设定,密度为 $2650 \text{ kg/m}^3$ ,沉降速度为 $0.00045 \text{ m/s}$ ,临界沉积床面剪切应力为 $0.75 \text{ N/m}^2$ ,临界侵蚀床面剪切应力为 $1.75 \text{ N/m}^2$ ,侵蚀系数为 $0.0001 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,干密度为 $952 \text{ kg/m}^3$ ,初始床沙厚度为 $0.05 \text{ m}$ 。同时对芦苇和盐地碱蓬的高度、密度、半径等进行参数设定,具体见表1。

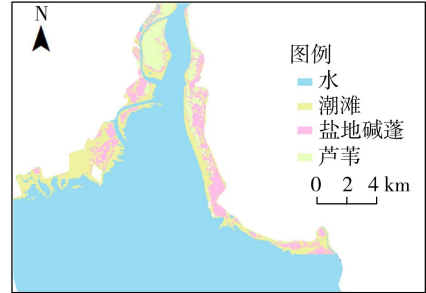


图4 研究区盐沼植被分布

表1 研究区盐沼植被参数

种类	高度/m	半径/m	密度/(株/ $\text{m}^2$ )	拖曳力系数
盐地碱蓬	0.25	0.002	250	1.0
芦苇	1.50	0.005	65	1.0

## 2 模型验证

### 2.1 波浪在植被水槽传播的数值试验

为说明模型在模拟波浪与植被相互作用方面的可靠性,采用已有波浪水槽试验数据<sup>[24]</sup>对模型进行验证,该水槽试验在一个长80m、宽1m、高1.2m的波浪槽中进行,水深为0.35m。水槽中部布设密度为 $1193 \text{ kg/m}^3$ 、直径为4mm、高为25cm的聚氨酯圆柱来模拟植被,比尺为1:1,植被区域长3.16m。将计算域划分成501个规则的矩形网格,单个网格的尺寸为0.02m,模拟总时间为400s,时间步长为0.05s,植被参数与物理模型试验中所用的参数一致。波浪数值模型范围和植被位置如图5所示。图6为有无植被工况下模拟波高与实测波高的结果比较,可以看出有无植被工况下模型模拟波高与试验值符合较好。波浪在通过植被区时,无植被工况下的波高沿程几乎没有变化,而在有植被工况下,当入射波高 $H=0.08 \text{ m}$ ,入射波周期 $T=1.4 \text{ s}$ 时,植被对于波高的衰减率约为15.7%;当 $H=0.12 \text{ m}$ 、 $T=1.8 \text{ s}$ 时,植被对于波高的衰减率为24.39%,其波高沿程均存在明显下降现象,说明波浪传播通过植物区时波能有较大的衰减,研究结果显示,Delift3D-WAVE模块构建的波浪模型能够精准地模拟波浪

在植被区的衰减和传播过程。

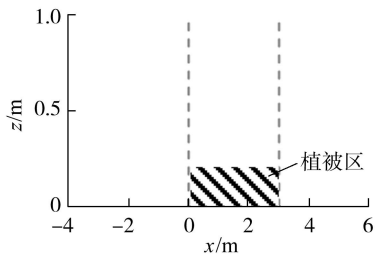


图5 波浪数值模型范围和植被位置示意图

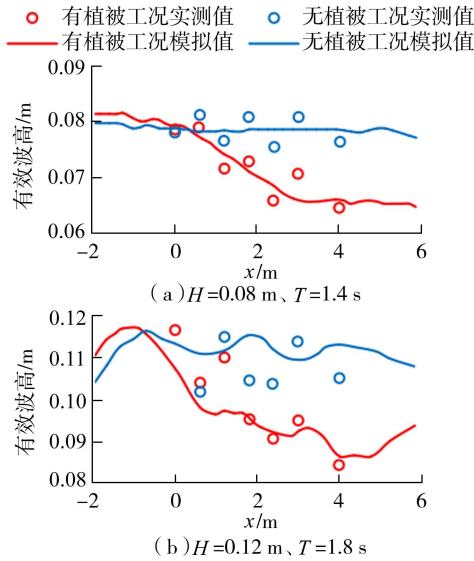


图6 有无植被工况下有效波高模拟值与实测值的对比

## 2.2 辽河口湿地海域水动力验证

数值模拟与实际现象相似的条件,主要取决于模型模拟结果与实测数据的吻合程度。为验证模型模拟波浪与潮流的准确性,模型利用研究区内一个波浪观测站(葫芦岛波浪站)、两个验潮站(鲅鱼圈验潮站和锦州港验潮站)以及4个流速测站(S1~S4)的观测数据与模拟值进行对比验证,并在潮滩上设置4个潮滩测点(E1~E4),用于分析盐沼植被对于水动力和悬浮泥沙的影响,具体位置如图2所示。

图7为葫芦岛波浪站有效波高和有效波周期的模拟值与实测值对比,模拟结果与实测结果总体变化趋势一致。图8为鲅鱼圈和锦州港两个验潮站的潮位模拟值和实测值的对比,图9为小潮期4个流速测站的表、底层流速和流向模拟值和实测值的对比。由图8和图9可知,模拟值和实测值吻合较好;两个验潮站均为不规则的半日潮,S1~S4测点的流速均从底部到表层逐渐增大;位于浅滩区附近的S1和S2速度相对较低,表明河口的浅滩地形对潮流流速具有一定的阻碍作用。图10为小潮期水体悬浮泥沙浓度模拟值与实测值的对比,模拟值与实测值表现出了较好的一致性。S1~S4这4个测点中,底层悬浮泥沙浓度均高于表层;而位于河口附近的S1

测点悬浮泥沙浓度远高于其他测点,表明距离河口区越近,水体中的悬浮泥沙浓度相应越大。综上所述,本文构建的辽河口潮滩湿地波流模型能够重现辽河口潮位、潮流和悬浮泥沙输运的变化过程,因此,该模型可进一步用于研究辽河口潮滩湿地区域的水动力过程和悬浮泥沙浓度分布特征。

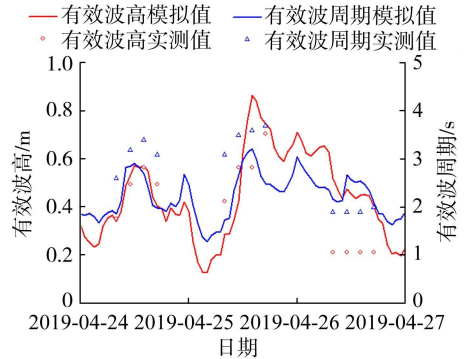


图7 葫芦岛波浪站有效波高和有效波周期模拟值与实测值的对比

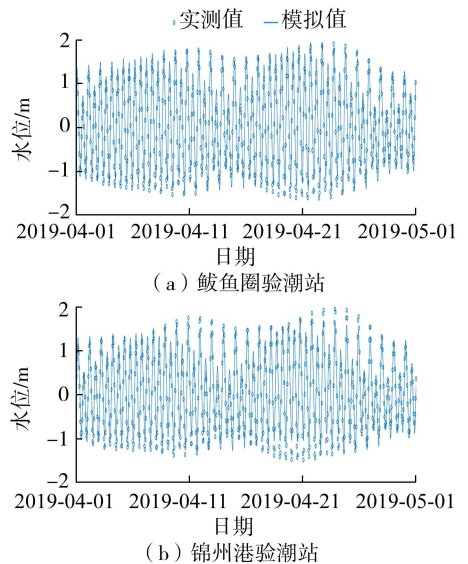


图8 鲅鱼圈和锦州港验潮站潮位模拟值与实测值的对比

## 3 结果与分析

### 3.1 盐沼植被区的水沙输运过程

潮滩水沙的输运过程是河口近岸泥沙运输的重要组成部分,也是诊断潮滩侵蚀-淤积的重要动力指标,特别是在地貌演变过程显著的区域更具指示意义。为了定量分析辽河口潮滩湿地中盐沼植被对于水沙过程的影响,本文选取E1~E4共4个测点(图2),对有无植被工况下的辽河口潮滩湿地动力特征分别进行了模拟研究。其中,E1和E4测点位于盐地碱蓬区,E2和E3测点位于芦苇区。选取2019年4月20日大潮期与4月26日小潮期两个时间段。图11为大潮期4个测点分别在涨落潮期间有无植被工况下流速的垂向分布图,其中E1、E2、

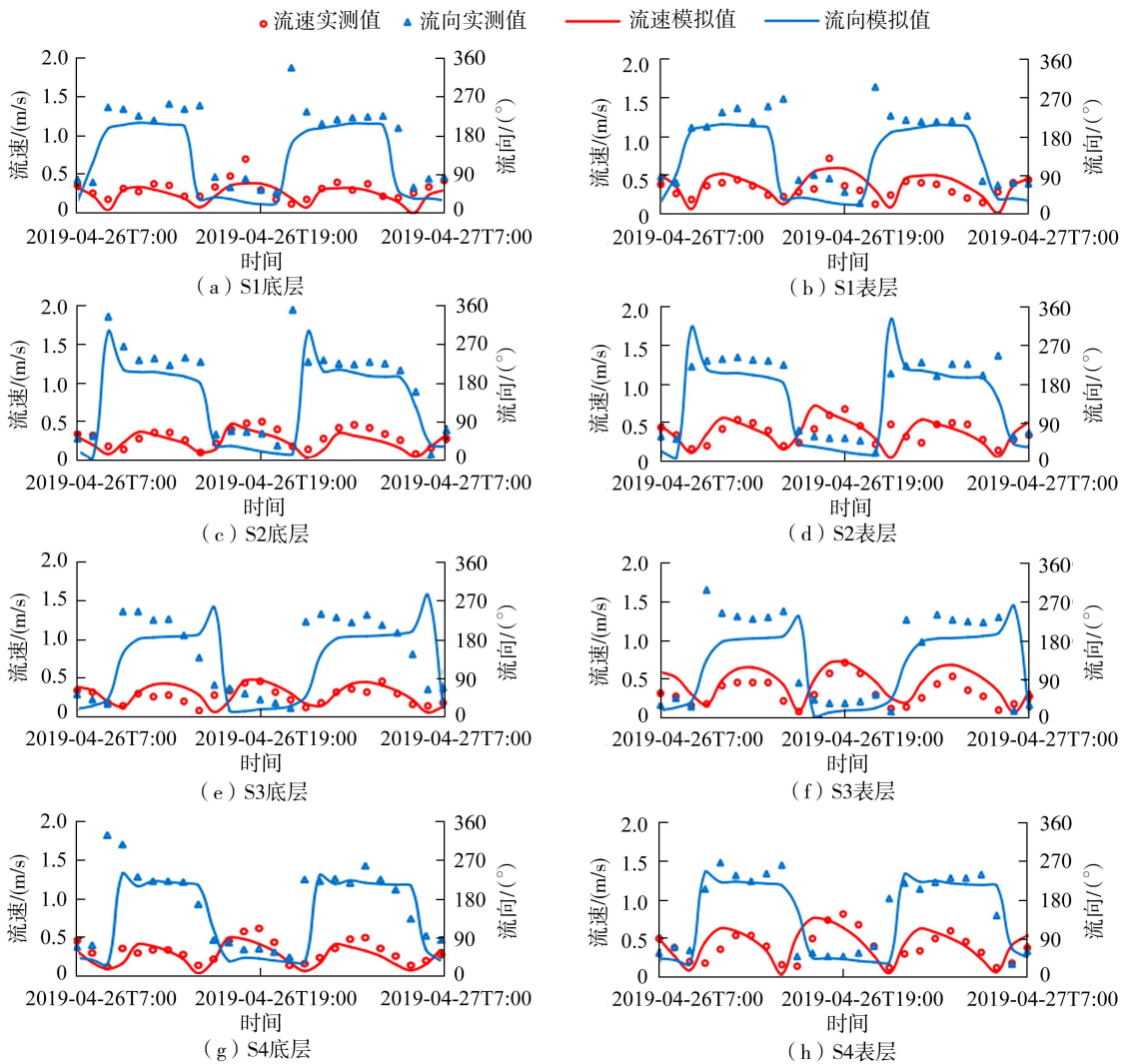


图9 S1~S4测站小潮期流速、流向模拟值与实测值的对比

E3、E4测点在1、2处均为涨潮，E2、E3、E4测点在3、4处均为落潮，由于E1测点落潮时间较短，仅在3处为落潮。无论是无植被还是有植被工况下，各测点流速自表层到底层均呈现下降趋势，且各测点涨潮期间的流速均高于退潮期间的流速。与无植被工况相比，有植被工况下E1~E4测点在涨潮期间的平均流速分别降低了55.89%、56.58%、43.55%和2.82%，这表明盐沼植被对涨潮期间的流速有显著的阻碍作用。其中，芦苇区E2和E3测点峰值流速衰减率分别为86.53%和28.51%，盐地碱蓬区E1和E4峰值流速衰减率分别为72.15%和2.13%。由此可见，相对盐地碱蓬区而言，芦苇区对流速的阻碍和衰减更为显著，这是由于芦苇区的植被高度、直径等参数较大，较大的阻力能有效阻碍水流运动。图12为大小潮期间各测点流速与悬浮泥沙浓度的垂向分布。由图12可以看出，大潮期和小潮期各站点的流速和悬浮泥沙的垂向分布均存在一定的差异，各站点大潮期的潮流流速均大于小潮期，大潮期

的悬浮泥沙浓度均高于小潮期，且研究区域底层悬浮泥沙浓度高于表层。

### 3.2 盐沼植被区的泥沙落淤过程

在研究区内选取一个典型的半封闭区域，该区域主要以盐地碱蓬植被为主，在外海连接处设置横断面(L1~L18)，半封闭区域及断面位置具体如图13(a)所示。对该区域大潮期内悬浮泥沙通量的变化情况进行数值分析。图13(b)为该区域在一个潮周期内各个断面悬浮泥沙通量的变化，结果显示总输入通量为177.99 kg，总输出通量为45.77 kg，涨潮期悬浮泥沙的输入通量较退潮期悬浮泥沙的输出通量大，表明在一个潮汐涨落过程中，该区域截留了一部分悬浮泥沙，存在泥沙落淤现象。表2为不同工况下研究区域的悬浮泥沙通量变化。结果显示：在大潮期的一个潮汐周期过程中，无植被工况下悬浮泥沙的输入通量为253.99 kg，悬浮泥沙输出通量为131.97 kg，截留通量为122.02 kg，截留通量占总通量的48.04%。与无植被工况相比，有植被工

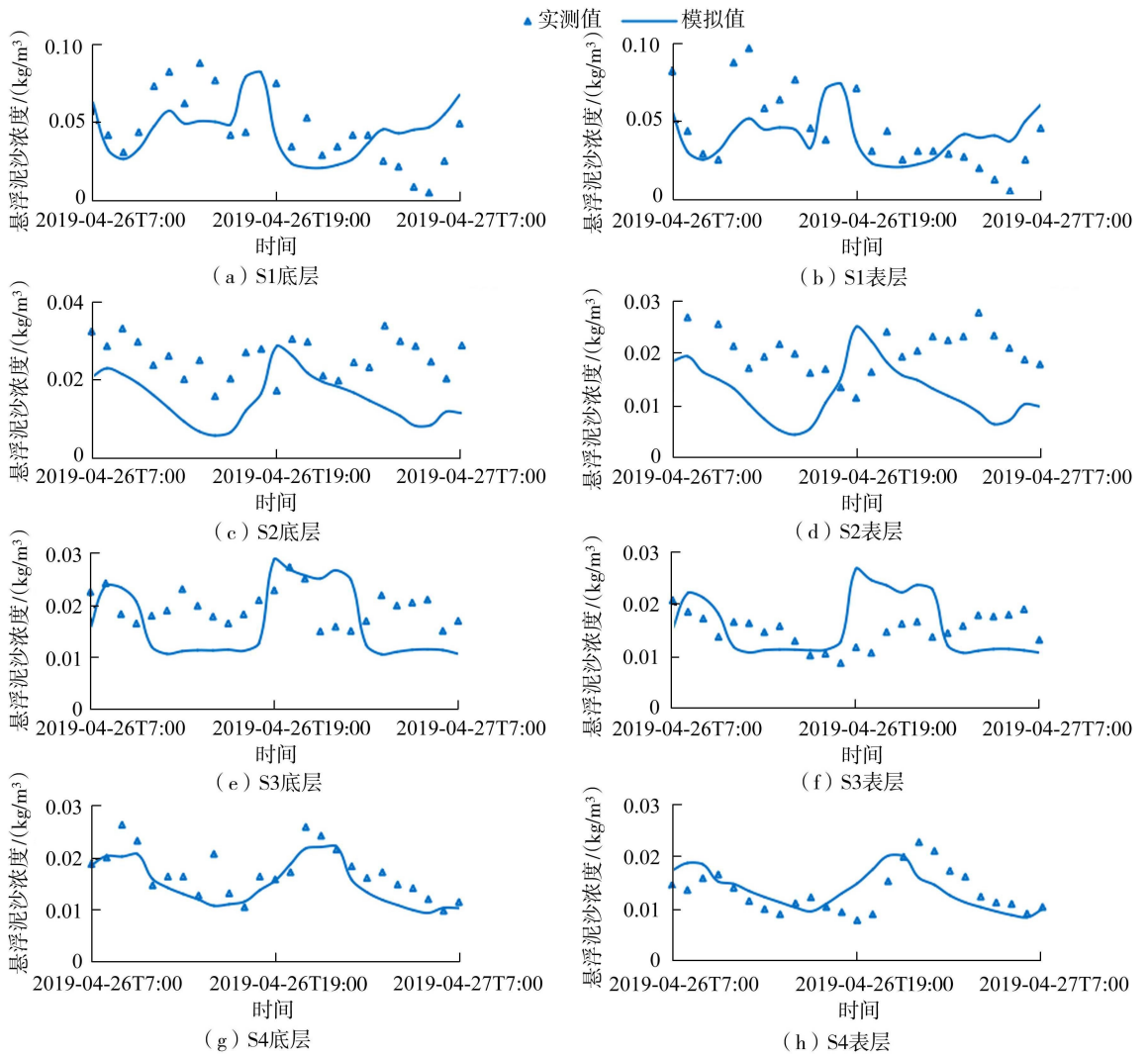


图 10 S1~S4 测站小潮期悬浮泥沙浓度模拟值与实测值的对比

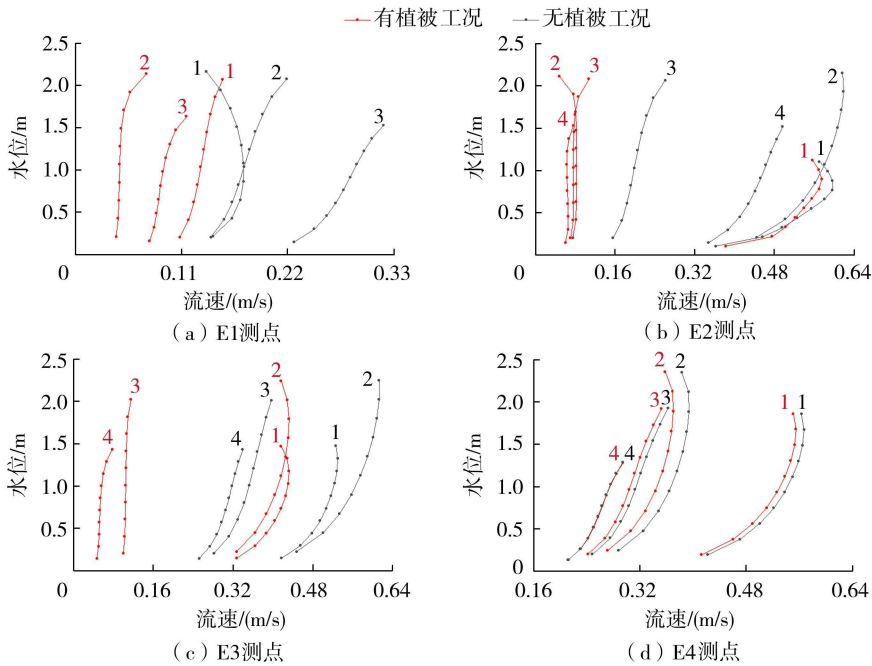


图 11 大潮期有无植被工况下各测点涨潮时和落潮时流速的垂向分布对比

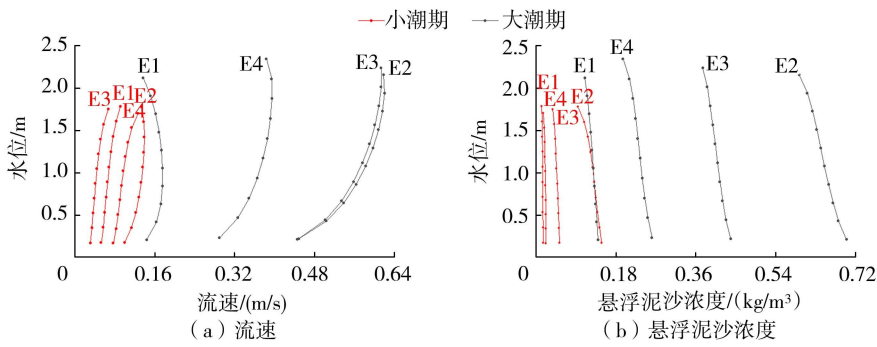
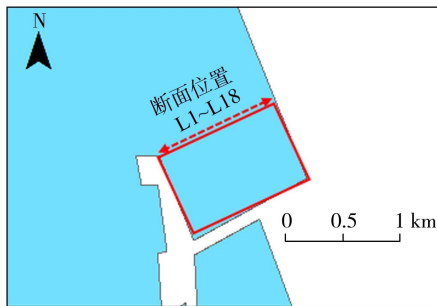


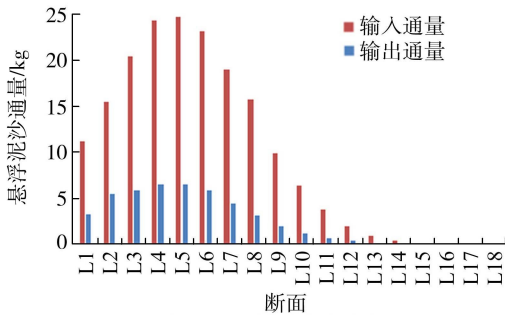
图 12 大潮期和小潮期各测点模拟的流速和悬浮泥沙浓度的垂向分布对比

况下的悬浮泥沙输出通量减少至 107.49 kg, 而截留通量则增加至 146.50 kg, 悬浮泥沙截留量占总通量的比值由 48.04% 上升至 57.68%。这表明盐沼植被的存在减少了悬浮泥沙的输出, 增加了植被区截留作用。大潮期和小潮期有植被工况下的悬浮泥沙通量变化存在显著差异。大潮期悬浮泥沙的输入通量为 253.99 kg, 而小潮期悬浮泥沙的输入通量为 76.55 kg, 大潮期的悬浮泥沙输入通量远大于小潮期的泥沙输入通量。大潮期和小潮期截留通量占输入通量比分别为 57.68% 和 86.63%, 可见在小潮期, 潮滩盐沼植被对水体中悬浮泥沙的截留量也不容忽视。

流的挟沙能力, 且在一定程度上抑制了底床悬浮泥沙的再悬浮, 同时也促进了泥沙落淤<sup>[2]</sup>。研究选取落淤显著且测点高程较为接近的 E2、E4 两个测点, 分析了盐沼植被作用下辽河口潮滩湿地的泥沙落淤过程。图 14 为大潮期 E2 和 E4 潮滩测点地形的高程变化图, E2 测点在没有植被工况下的淤积高度为 2 mm, 而在有植被工况下为 5 mm, 高程变化相差近 3 mm, 表明盐沼植被的存在导致了所在潮滩高程的升高。E4 测点在两种工况下的高程变化小于 1 mm, 推测其原因是受盐沼植被类型和地形因素的影响。首先, E4 测点区域为盐地碱蓬植被, 相比芦苇植株, 其植株矮且直径小, 植被附着悬浮泥沙量少, 受水动力影响较弱, 因此植被截留沉积的悬浮泥沙相对较少; 其次, E4 测点处海拔相对较高, 涨潮期内滞水时间较短, 导致通过潮沟流入潮滩湿地的水量减少, 进而影响输沙过程。总体而言, 盐沼植被可以捕获水体中的悬浮泥沙, 促进泥沙落淤, 最终使潮滩湿地地势升高。



(a) L1~L18断面位置 (从左到右)

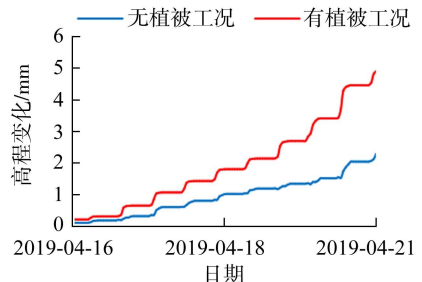


(b) L1~L18断面悬浮泥沙通量

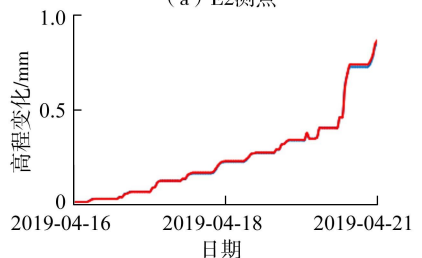
图 13 大潮期内半封闭区域的悬浮泥沙通量变化

表 2 不同工况下的研究区域模拟的悬浮泥沙通量变化

工况	输入通量/kg	输出通量/kg	截留通量/kg	截留通量占比/%
无植被(大潮期)	253.99	131.97	122.02	48.04
有植被(大潮期)	253.99	107.49	146.50	57.68
有植被(小潮期)	76.55	10.23	66.32	86.63



(a) E2测点



(b) E4测点

图 14 E2 和 E4 测点有无植被工况下高程变化

## 4 结论

### a. 构建的辽河口潮滩湿地波流植物作用下的三

盐沼植被通过消浪缓流作用减弱了盐沼区内水

维水沙数值模型对波浪、流速与悬浮泥沙等的模拟结果与实际测量结果具有较好的一致性。该模型能够准确再现波流植物作用下的潮滩湿地水沙运动过程。

**b.** 盐沼植被阻碍水沙输运,影响潮滩流速及悬浮泥沙浓度。在大潮期和小潮期内,相较于盐地碱蓬,芦苇对流速的衰减以及对悬浮泥沙的截留作用均更突出,在减缓水沙输运过程中的作用更明显。因此,在模拟水沙运动过程时,需考量不同植被类型,并结合波流相互作用,提高模拟精度。

**c.** 盐沼植被能够截留悬浮泥沙,抑制悬浮泥沙输出通量并增强悬浮泥沙的落淤效果。不同植被类型对于泥沙落淤的作用存在显著不同,相较于盐地碱蓬,芦苇捕获悬浮泥沙的能力更突出,泥沙沉积量更大。因此,盐沼植被不仅影响泥沙的落淤过程,还将导致潮滩湿地高程未来发生改变。

## 参考文献:

[ 1 ] KIRWAN M L, MEGONIGAL J P. Tidal wetland stability in the face of human impacts and sea-level rise [J]. *Nature*, 2013, 504(7478): 53-60.

[ 2 ] 张明亮. 滨海盐沼湿地退化机制及生态修复技术研究进展[J]. *大连海洋大学学报*, 2022, 37(4): 539-549. (ZHANG Mingliang. Research advancement on degradation mechanism and ecological restoration technology of coastal salt-marsh; a review [J]. *Journal of Dalian Ocean University*, 2022, 37(4): 539-549. (in Chinese))

[ 3 ] 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))

[ 4 ] 唐洪根, 周廷璋, 辛沛. 淤积刺激下滨海湿地植物根系吸水及土壤水分变化[J]. *水资源保护*, 2020, 36(4): 87-92. (TANG Honggen, ZHOU Tingzhang, XIN Pei. Stimulation of sediment deposition to root water uptake and soil water change in wetland near sea [J]. *Water Resources Protection*, 2020, 36(4): 87-92. (in Chinese))

[ 5 ] 周峰, 姜厦, RADNAEVA D L, 等. 柔性植物影响下水沙运动及物质输运研究进展[J]. *水利水电科技进展*, 2023, 43(3): 107-116. (ZHOU Feng, LOU Xia, RADNAEVA D L, et al. Research progress on sediment movement and substance transport in flows with flexible vegetation[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2023, 43(3): 107-116. (in Chinese))

[ 6 ] ASHALL L M, MULLIGAN R P, VAN PROOSDIJ D, et al. Application and validation of a three-dimensional hydrodynamic model of a macrotidal salt marsh [J].

*Coastal Engineering*, 2016, 114: 35-46.

[ 7 ] WU Guoxiang, SHI Fengyan, KIRBY J T, et al. A pre-storage, subgrid model for simulating flooding and draining processes in salt marshes [J]. *Coastal Engineering*, 2016, 108: 65-78.

[ 8 ] WU Weiming, MARSOOLI R. A depth-averaged 2D shallow water model for breaking and non-breaking long waves affected by rigid vegetation [J]. *Journal of Hydraulic Research*, 2012, 50(6): 558-575.

[ 9 ] ZHANG Mingliang, XU Hui. Numerical analysis of the potential effect of wetlands on reducing tidal currents in the Liao River Estuary, China [J]. *Environmental Modeling & Assessment*, 2020, 26(2): 205-220.

[ 10 ] 柴崇项, 赵梓宇, 弓耘, 等. 盐沼植被作用下的辽河口三维水动力数值模拟[J]. *水动力学研究与进展*, 2022, 37(3): 415-425. (CHAI Chongxu, ZHAO Ziyu, GONG Yun, et al. Three-dimensional hydrodynamic numerical simulation of Liao River Estuary with effect of salt marsh vegetation[J]. *Chinese Journal of Hydrodynamics*, 2022, 37(3): 415-425. (in Chinese))

[ 11 ] MA Gangfeng, HAN Yun, NIROOMANDI A, et al. Numerical study of sediment transport on a tidal flat with a patch of vegetation [J]. *Ocean Dynamics*, 2015, 65(2): 203-222.

[ 12 ] TEMMERMAN S, BOUMA T J, GOVERS G, et al. Impact of vegetation on flow routing and sedimentation patterns: three-dimensional modeling for a tidal marsh [J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2005, 110(F4): F04019.

[ 13 ] NARDIN W, LARSEN L, FAGHERAZZI S, et al. Tradeoffs among hydrodynamics, sediment fluxes and vegetation community in the Virginia Coast Reserve, USA [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2018, 210: 98-108.

[ 14 ] BENNETT W G, VAN VEELLEN T J, FAIRCHILD T P, et al. Computational modelling of the impacts of saltmarsh management interventions on hydrodynamics of a small macro-tidal estuary [J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2020, 8(5): 373.

[ 15 ] 陈橙, 李梓莹. 我国沿海生态植被消波研究进展[J]. *水利水电科技进展*, 2022, 42(5): 1-7. (CHEN Cheng, LI Zixuan. Research progress on wave dissipation of ecological vegetation in coastal area of China [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2022, 42(5): 1-7. (in Chinese))

[ 16 ] 韩志远, 谢华亮, 强海洋, 等. 近 50a 来辽河口水下三角洲演变特征研究[J]. *海洋学研究*, 2019, 37(3): 64-72. (HAN Zhiyuan, XIE Hualiang, QIANG Haiyang, et al. Evolution research on subaqueous delta of Liaohe Estuary in recent 50 years [J]. *Journal of Marine Sciences*, 2019, 37(3): 64-72. (in Chinese))

(下转第 61 页)



75. ( HAN Kai, DING Falong, MAO Zeyu. Numerical analysis of water hammer in a long-distance pressurized water transfer project [ J ]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2020, 40 ( 2 ): 69-75. ( in Chinese ) )
- [ 14 ] SHI Lin, ZHANG Jian, YU Xiaodong, et al. Water hammer protection for diversion systems in front of pumps in long-distance water supply projects [ J ]. Water Science and Engineering, 2023, 16(2) : 211-218.
- [ 15 ] 赵莉, 范闯, 申虎贲, 等. 液柱分离型水锤新空腔模型 [ J ]. 水利水电科技进展, 2024, 44 ( 2 ): 37-41. ( ZHAO Li, FAN Chuang, SHEN Huben, et al. New cavity model for water hammer with liquid column separation [ J ]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024, 44(2) : 37-41. ( in Chinese ) )
- [ 16 ] BERGANT A, SIMPSON A R, TIJSELING A S. Water hammer with column separation; a historical review [ J ]. Journal of Fluids and Structures, 2006, 22(2) : 135-171.
- [ 17 ] 金锥, 姜乃昌, 汪兴华. 停泵水锤及其防护 [ M ]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1993.
- [ 18 ] 杨春霞, 李倩, 马经童, 等. 多分水口长距离输水工程停泵水锤防护措施 [ J ]. 排灌机械工程学报, 2024, 42 ( 3 ): 250-255. ( YANG Chunxia, LI Qian, MA Jingtong, et al. Water hammer protection measures for long-distance water transmission projects during pump stop with multiple water diversions outlets [ J ]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2024, 42 ( 3 ): 250-
255. ( in Chinese ) )
- [ 19 ] 梁圣辰, 张健, 贺蔚, 等. 长距离输水系统串联多阻抗调压室的水锤防护效果 [ J ]. 河海大学学报 ( 自然科学版 ), 2021, 49 ( 2 ): 170-175. ( LIANG Shengchen, ZHANG Jian, HE Wei, et al. Water hammer protection effect of series throttled surge chambers in long-distance water conveyance system [ J ]. Journal of Hohai University ( Natural Sciences ), 2021, 49 ( 2 ): 170-175. ( in Chinese ) )
- [ 20 ] LI Xiaozhou, WANG Tao, ZHANG Yanhe, et al. Study on the factors influencing air valve protection against water hammer with column separation and rejoinder [ J ]. Water Infrastructure, Ecosystems and Society, 2022, 71 ( 9 ): 949-962.
- [ 21 ] LI Xiaozhou, YAN Tianzhu, BI Xiaojian, et al. Influence of traditional and antislam air valve characteristics on transient pressure control [ J ]. Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice, 2022, 13(3) : 04022022.
- [ 22 ] 高金良, 郑成志, 刁美玲, 等. 高起伏长输管线水锤模拟及防护方案优选 [ J ]. 哈尔滨工业大学学报, 2012, 44 ( 8 ): 24-26. ( GAO Jinliang, ZHENG Chengzhi, DIAO Meiling, et al. Study on optimal surge protection for high-undulate long-distance water transmission pipeline [ J ]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2012, 44 ( 8 ): 24-26. ( in Chinese ) )

( 收稿日期: 2023 - 11 - 08 编辑: 骆超 )

( 上接第 54 页 )

- [ 17 ] 殷锴. 海岸带柔性植被对极端风暴潮动力衰减规律研究 [ D ]. 南京: 东南大学, 2019.
- [ 18 ] 常留红, 覃瓶山, 郑景琦, 等. 水沙条件对大湖口河冲淤特性的影响 [ J ]. 水利水电科技进展, 2022, 42 ( 4 ): 15-20. ( CHANG Liuhong, QIN Pingshan, ZHENG Jingqi, et al. Influence of water and sediment conditions on scouring and silting characteristics of Dahukou River [ J ]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42 ( 4 ): 15-20. ( in Chinese ) )
- [ 19 ] 许慧. 植被型生态海岸对台风风暴潮灾害防护效应的数值模拟 [ D ]. 大连: 大连海洋大学, 2022.
- [ 20 ] 李爱莲, 刘泽, 洪新, 等. 台风条件下 ERA5 再分析数据对中国近海适用性评估 [ J ]. 海洋科学, 2021, 45 ( 10 ): 71-80. ( LI Ailian, LIU Ze, HONG Xin, et al. Applicability of the ERA5 reanalysis data to China adjacent sea under typhoon condition [ J ]. Marine Sciences, 2021, 45 ( 10 ): 71-80. ( in Chinese ) )
- [ 21 ] 孟宪贵, 郭俊建, 韩水清. ERA5 再分析数据适用性初步评估 [ J ]. 海洋气象学报, 2018, 38 ( 1 ): 91-99. ( MENG Xiangui, GUO Junjian, HAN Yongqing. Preliminarily assessment of ERA5 reanalysis data [ J ]. Journal of Marine Meteorology, 2018, 38(1) : 91-99. ( in Chinese ) )
- [ 22 ] 张鹏, 陈晓玲, 陆建忠, 等. 基于遥感的鄱阳湖丰水期悬浮泥沙数值模拟预测 [ J ]. 武汉大学学报 ( 信息科学版 ), 2017, 42 ( 3 ): 369-376. ( ZHANG Peng, CHEN Xiaoling, LU Jianzhong, et al. Suspended sediment transport modeling of Poyang Lake in the wet season based on remote sensing data [ J ]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2017, 42(3) : 369-376. ( in Chinese ) )
- [ 23 ] JIANG Shanhu, WEI Linyong, REN Liliang, et al. 2023. Evaluation of IMERG, TMPA, ERA5, and CPC precipitation products over Chinese mainland: spatiotemporal patterns and extremes [ J ]. Water Science and Engineering, 16(1) : 45-56.
- [ 24 ] HU Kelin, DING Pingxing, WANG Zhengbing, et al. A 2D/3D hydrodynamic and sediment transport model for the Yangtze Estuary, China [ J ]. Journal of Marine Systems, 2009, 77(1/2) : 114-136.

( 收稿日期: 2023 - 10 - 23 编辑: 俞云利 )