

粉砂质高回淤港口与航道疏浚扰动减淤数值模拟研究

莫志芳¹, 毛晓翀¹, 路川藤^{2*}, 王松¹

(1. 中交广航疏浚有限公司, 广东 广州 510000; 2. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029)

摘要: 射阳海域受强潮动力、高含沙量及平缓地形影响, 港口与航道泥沙回淤速率快、维护成本高。针对粉砂质港口减淤需求, 建立射阳海域二维潮流泥沙数学模型, 提出基于落潮动力调控的疏浚扰动减淤方法。研究表明: 疏浚扰动可显著提升泥沙外输效率, 港区泥沙扰动后, 大潮落潮期8.86%的扰动泥沙输出至航道口门外(小潮为3.66%), 且扰动区越靠近口门, 外输比例越高(达15%~50%); 扰动泥沙二次淤积呈现空间分异特征, 在口门内二次淤积占比中, 大潮期占46.25%、小潮期占49.74%, 扰动区下游2 km范围淤积量占口门内淤积总量的60%~70%; 径流量增大后, 泥沙外输比显著提升, 二次淤积占比下降。

关键词: 射阳港与航道; 疏浚扰动; 数值模拟; 泥沙淤积

中图分类号: P731.21 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2025)06-0034-12

0 引言

港口航道作为河口海岸地区经济发展的核心动脉, 其泥沙淤积问题直接威胁港口航道安全与可持续发展。近50年来, 国内外学者围绕泥沙输运机理、清淤技术优化及数值模拟方法开展了系统性研究, 但针对强潮缓坡型高含沙港口的泥沙淤积机制及清淤方法, 仍存在认知不足。

河口海岸地区的泥沙清淤一般分为机械清淤、水力清淤以及气动扰动清淤等^[1-2]。机械清淤依托疏浚船的挖泥作业, 是大型港口航道维护的主导方式^[3], 长江口深水航道每年都需通过疏浚船清除数千万方泥沙^[4-5]。水力清淤通过调节流量以增强水动力条件, 主要应用于引航道、闸下河口区域^[6-7]。近年来, 气动清淤技术发展迅速, 它利用高压气流扰动底部泥沙, 使其悬浮并随水流带离疏浚区, 陈犇等^[8]将该技术应用于新沂河口枢纽挡潮闸的闸下淤积治理, 取得较好效果。目前, 气动清淤技术在高坝水库、城市河流中^[9-10]应用较多, 在港口航道

的应用相对较少, 但其潜力不容忽视。

射阳港作为典型的强潮缓坡型港口, 具有潮差大、含沙量高、回淤速率快等特点^[11]。机械清淤虽然可以维持航道水深, 但维护成本极高。为此, 借鉴气动冲淤理念, 尝试在射阳港落潮期利用疏浚船扰动港池与航道河床泥沙, 借助落潮动力将泥沙带至口门外, 以期达到减淤效果。本研究采用数学模型方法, 深入探讨这一方法的可行性, 旨在为高回淤港口航道的减淤工作提供科学的理论支撑和技术指导, 为港口航道的可持续发展贡献新的思路和方法。

1 区域概况

射阳港是江苏省盐城港的重要组成部分, 位于射阳河口处, 射阳河下游建有射阳闸(见图1)。射阳海域潮波主要受黄海潮波系统控制, 平均潮差2.27 m^[12], 潮汐类型为正规半日潮。射阳港海域含沙量较高, 根据2024年射阳港航道水文测验结果分

收稿日期: 2024-10-09。

基金项目: 国家重点研发计划(2023YFC3208500)。

作者简介: 莫志芳(1967-), 男, 高级工程师, 本科。主要从事港口航道泥沙疏浚研究。E-mail: 337663097@qq.com

*通信作者: 路川藤(1983-), 男, 正高级工程师, 博士。主要从事港口航道潮流泥沙数值模拟工作。E-mail: ctlu@nhri.cn

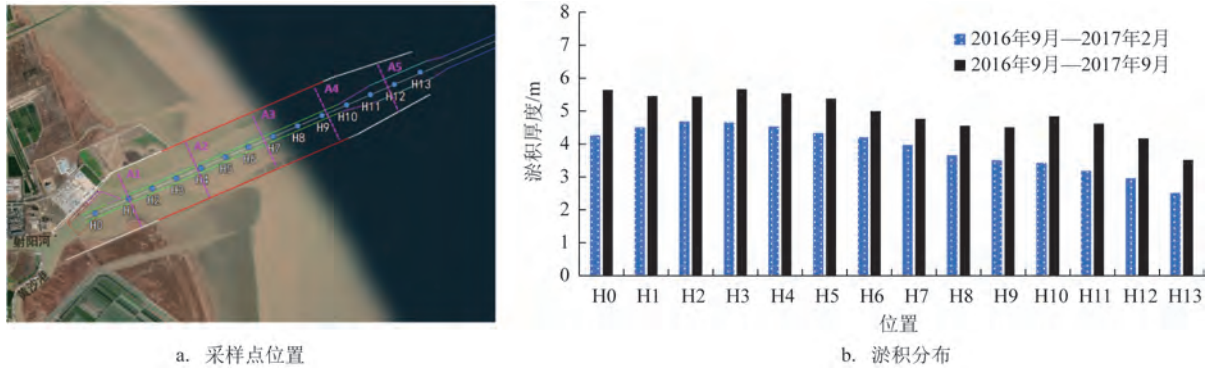


图1 射阳港航道淤积分布

Fig.1 Distribution of siltation in the Sheyang Port and Channel

析,该水域底层含沙量可达2.0~5.0 kg/m³(见表1),测点位置见图2。航道内表层沉积物中值粒径约0.010 mm,以淤泥质粉砂为主,悬沙中值粒径约为0.009 mm,与表层沉积物粒径基本相当。受苏北沿岸水沙条件及沉积物特性影响,射阳海域海床底坡平缓,-10 m等深线距岸6~8 km,浅水区范围广阔。目前,射阳港航道通过两条长防波堤(见图1a)将港池与外海深水区相连。

表1 2024年水文测验最大含沙量统计(单位:kg/m³)

Tab.1 Statistics of maximum sediment concentration in 2024 hydrological survey (unit: kg/m³)

垂线	相对水层	涨潮	落潮
C1	底层	2.716	3.182
C2	底层	2.001	3.415
C3	底层	3.300	3.194
C4	0.6H层	4.802	3.398

2015—2016年射阳港航道开展了维护性疏浚,航道疏浚底标高-10.0~-11.5 m(理论基面)。根据后期监测成果^[11],港口及航道年平均淤积厚度接近5 m,且航道淤积呈现“西侧大、东侧小”的特点;航道疏浚完成后,前期回淤速率较快,前5个月平均淤积约3.9 m,占全年回淤厚度的近80%(见图1b)。

射阳港区与航道泥沙淤积来源可分为三部分:流域来沙、航道口门来沙和越堤来沙。由于射阳河下游已建闸,流域来沙较少,相关研究表明,航道口门来沙是航道淤积的主要泥沙来源^[13]。

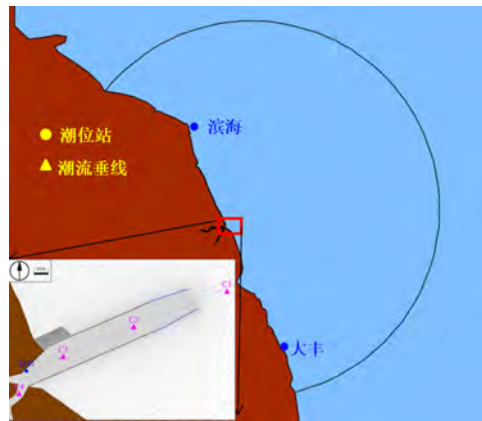


图2 数学模型范围、局部网格示意图

Fig.2 Schematic diagram of mathematical model range, local grid

2 研究方法

2.1 数值模拟方法

数学模型采用具有自主知识产权的数值模拟系统CJK3D-WEM进行计算,该系统于2014年取得国家软件著作权登记,适用于江河湖泊、河口海岸等涉水工程的水动力、泥沙、水质、温排及溢油模拟预测研究。

对于水平尺度远大于垂直尺度的河口海岸地区,通过一定的假设条件(均质不可压、静压、刚盖、Boussinesq等假定),沿水深方向积分取平均,可得到平面二维水流泥沙方程。公式为:

$$\frac{\partial z}{\partial t} + \frac{\partial(Hu)}{\partial x} + \frac{\partial(Hv)}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + g \frac{\partial z}{\partial x} - fv + g \frac{u\sqrt{u^2 + v^2}}{C^2 h} = N_x \frac{\partial^2 u}{\partial^2 x} + N_y \frac{\partial^2 u}{\partial^2 y} \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + g \frac{\partial z}{\partial y} + fu + g \frac{v\sqrt{u^2 + v^2}}{C^2 h} = N_x \frac{\partial^2 v}{\partial^2 x} + N_y \frac{\partial^2 v}{\partial^2 y} \quad (3)$$

$$\frac{\partial SH}{\partial t} + \frac{\partial SuH}{\partial x} + \frac{\partial SvH}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} (HK_x \frac{\partial S}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (HK_y \frac{\partial S}{\partial y}) + F_s \quad (4)$$

$$\gamma_0 \frac{\partial \Delta h}{\partial t} = F_s \quad (5)$$

式中： z 为潮位(单位:m)； h 为水深(单位:m)； H 为总水深(单位:m)， $H = h + z$ ； u, v 为流速矢量 V 沿 x, y 方向的速度分量(单位:m/s)； t 为时间(单位:s)； f 为科氏力(单位： s^{-1} ， $f = 2w \sin \phi$ ， w 为地球自转的角速度， ϕ 为所在地区的纬度)； g 为重力加速度(单位： m/s^2)； C 为谢才系数(单位： $m^{1/2}/s$)； N_x, N_y 为 x, y 向水流紊动粘性系数(单位： m^2/s)； S 为含沙量(单位： kg/m^3)； K_x, K_y 为水平紊流扩散系数(单位： m^2/s)； F_s —源汇函数(单位： $kg/(m^2 \cdot s)$)； Δh 为冲淤厚度(单位： m)； γ_0 为泥沙干容重(单位： kg/m^3)。

控制方程(1)—(4)式向量形式可表示为：

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \nabla E = M + \nabla E^d \quad (6)$$

式中： $U = (H, Hu, Hv, HS)^T$ ， $E = (F, G)$ ，其中

$$F = \begin{pmatrix} Hu \\ Hu^2 + gH^2/2 \\ Huv \\ HuS \end{pmatrix}, G = \begin{pmatrix} Hv \\ Huv \\ Hv^2 + gH^2/2 \\ HvS \end{pmatrix}$$

紊动扩散项 $E^d = (F^d, G^d)$ ，其中

$$F^d = \begin{pmatrix} 0 \\ \varepsilon_x H \partial u / \partial x \\ \varepsilon_x H \partial v / \partial x \\ K_x H \partial S / \partial x \end{pmatrix}, G^d = \begin{pmatrix} 0 \\ \varepsilon_y H \partial u / \partial y \\ \varepsilon_y H \partial v / \partial y \\ K_y H \partial S / \partial x \end{pmatrix}$$

$$\text{源项 } M \text{ 表示为 } M = M_0 + M_f = \begin{pmatrix} 0 \\ gH(M_{0x} + M_{fx}) + fv \\ gH(M_{0y} + M_{fy}) - fu \\ F_s \end{pmatrix}$$

M_{0x}, M_{0y} 分别是 x, y 方向的河床底部高程变化；

M_{fx}, M_{fy} 分别是 x, y 方向的底摩擦项；采用三角形单元作为控制单元，水深布置在网格顶点，其他物理变量配置在每个单元的中心。将第 i 号控制元记为 Ω_i ，在 Ω_i 上对向量式的基本方程组(6)进行积分，并利用Green公式将面积分化为线积分，得：

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega_i} U d\Omega_i + \oint_{\partial\Omega_i} (E \cdot \bar{n}_i - E^d \cdot \bar{n}_i) dl = \int_{\Omega_i} S d\Omega_i \quad (7)$$

方程(7)求解主要分三部分，一为对流项求解，二为紊动项求解，三为底坡项处理。对流项的数值通量采用Roe格式的近似Riemann解，紊动项采用单元交界面的平均值，计算通过该界面紊动粘性项的数值通量，底坡项采用斜底方法处理，具体见文献[14]。

2.2 模型范围

数学模型计算域东西长约120 km，南北宽约200 km，范围见图2。模型大范围水深由海军航保部海图提供，射阳港与航道水深采用2023年疏浚维护后的实测水深。模拟计算采用局部加密的非结构三角形网格，外海区域空间步长较大(最大约为7 000 m)，射阳港及其航道附近水域空间步长较小(约为15 m)。模型网格节点为30 635个，网格单元为59 005个，时间步长取0.5 s，紊动粘性系数取 kHU_* (k 为系数，取值0.1； U_* 为摩阻流速)，动边界采用干湿法处理，临界值取0.01 m，糙率采用附加糙率形式(见式(8))。悬沙中值粒径根据射阳港现场水文测验的悬沙粒径统计结果，取值0.008 mm，泥沙扩散系数取 kHU_* (k 取值0.1)，泥沙起动流速采用张瑞瑾公式，挟沙力采用窦国仁公式。计算公式为：

$$n = \begin{cases} 0.025 & H \leq 1.0 \text{ m} \\ 0.013 + \frac{0.012}{H} & H > 1.0 \text{ m} \end{cases} \quad (8)$$

$$V_c = \left(\frac{H}{d_{50}} \right)^{0.14} \left(17.6 \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} d_{50} + 6.05 \times 10^{-7} \frac{10 + H}{d_{50}^{0.72}} \right)^{1/2} \quad (9)$$

$$S_* = 0.023 \frac{\gamma \gamma_s}{\gamma_s - \gamma} \frac{V^3}{C^2 H w} \quad (10)$$

式中： n 为糙率(单位： $m^{-1/3} \cdot s$)； V_c 为泥沙起动流速(单位： m/s)； d_{50} 为悬沙中值粒径(单位： m)； γ 为水的容重(单位： kg/m^3)； γ_s 为泥沙的容重(单位： kg/m^3)； w 为泥沙沉降速度(单位： mm/s)。

2.3 模型验证

本文采用2024年3月射阳港航道疏浚维护后的水文测验资料,作为数学模型水沙验证数据。水文测验共布置4条垂线(位置见图2),同时收集周边潮位站潮位资料;观测时间为2024年3月11日09:00(北京时)—12日12:00(大潮期),潮差约为3.13 m。图3—5分别为数学模型潮位、垂向平均流速和垂线平均含沙量的验证结果。统计显示:大丰站和滨海站高、低潮位偏差小于0.1 m;射阳站为本次水文测验临时潮位站,位于浅水区,实测潮位过程波动较大,导致数模计算值与实测值偏差相对较大(高潮位偏高约0.18 m,低潮位偏低约0.16 m);C1、C3、C4测点潮流垂线平均流速数模计算值与实测值偏差在5%~10%之间,流向偏差基本在30°以内,C2测点潮流垂线平均流速偏差相对较大(约为15%),流向计算值与实测值基本接近,流速偏差大的主要原因可能是航道维护后的地形差异所致;C1、C2、C4测点垂线平均含沙量数模计算值与实测值偏差在10%~19%之间,C3测点计算值偏大,可能与航道维护后的局部地形变化有关。总体来说,本文数学模型大部分测点的验证结果满足相关规范要求,说明模型计算能够反映射阳河口的水流泥沙运动特征。

3 港区水流运动特征

3.1 流速强度分布

射阳海域为强潮海域,港区航道水流流速较大(见图6),采样点位置见图1。受导堤内地形分布不均影响,港区与航道的流速呈现显著区域差异。涨

潮时,水流自导堤口门进入航道,由于口门处水域整体水深较大,航道采样点流速较低,涨急流速低于1.0 m/s;在航道内部,由于航道与两侧浅滩高差大,航道内流速显著增大,涨急流速可达1.5 m/s,涨潮平均流速接近0.8 m/s;港池处深水区范围大,流速相对较小,最大流速不足1.0 m/s。落潮时,流速总体分布与涨潮类似,港池与导堤口门水域流速较小,航道中部水域流速较大。与涨潮流速相比,落潮流速强度相对较弱,最大流速约为1.3 m/s。

3.2 涨落潮量分布

射阳港进港航道疏浚完成后水深较深,可达-10.0~-11.5 m,而航道两侧边滩水深较浅。图7统计了大潮期航道采样断面的涨落潮潮量分布(断面位置见图1)。涨潮量、落潮量指在一个完整的潮汐周期内,涨潮、落潮阶段通过某一断面进入研究区域的水体体积,是表征水动力及物质运输特征的重要参数。计算方法为:

$$Q = \sum_{i=1}^n (A_i \cdot v_i \cdot \Delta t) \quad (11)$$

式中: Q 为涨/落潮量(单位: m^3); A_i 为第 i 时段的断面面积(单位: m^2); v_i 为第 i 时段的断面平均流速(单位: m/s); Δt 为时间间隔(单位: s); n 为涨/落潮时段,与 Δt 有关。

由图可以看到,航道处的涨潮量和落潮量显著大于航道两侧边滩。A1—A3断面,航道内涨潮量占整断面的75%~85%,A4断面约为70%;导堤口门处的A5断面,因涨潮流偏向南侧导堤,航道内涨潮量占比相对较低,约为57%。落潮流量航道内占

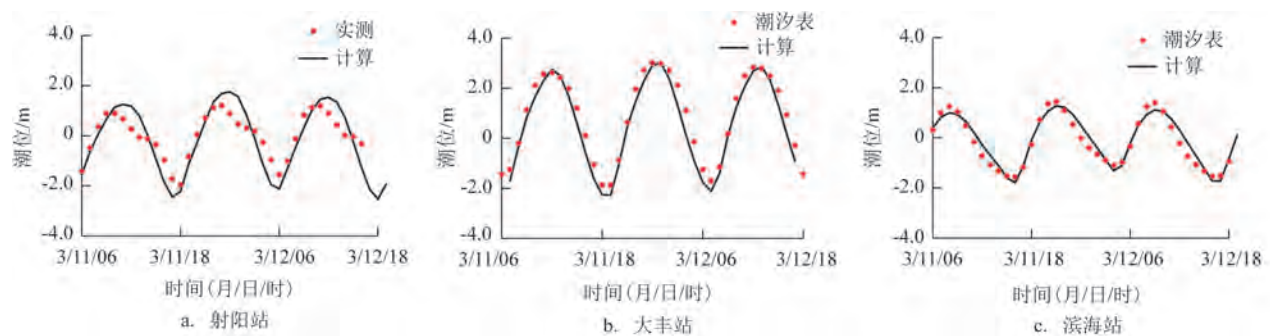


图3 潮位验证图

Fig.3 Tide level verification charts

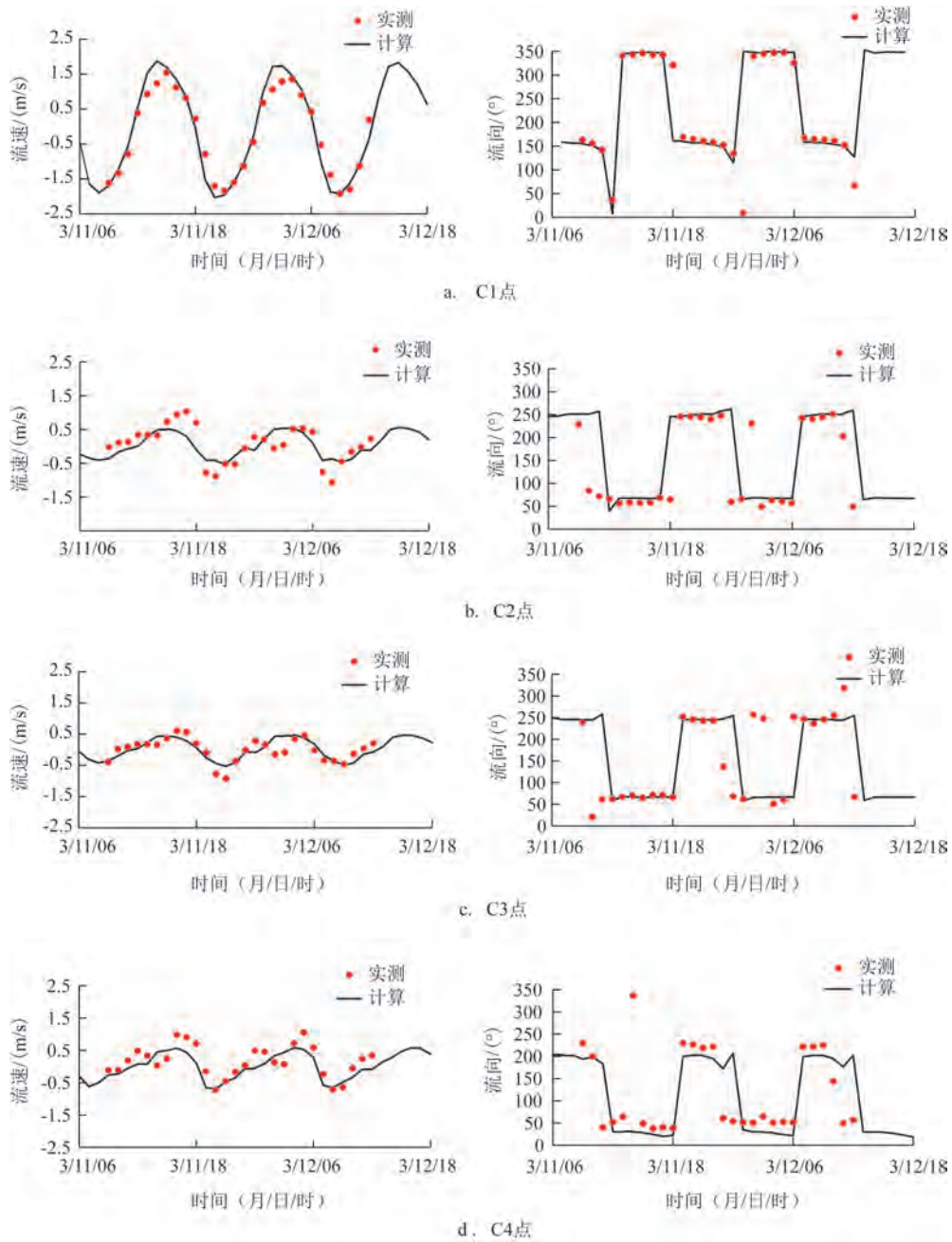


图4 潮流验证图

Fig.4 Tidal current verification charts

比与涨潮趋势一致,A1—A4断面航道内占比约为70%~85%,导堤口门处的A5断面,由于落潮流直接流向外海,航道内占比较大,约为76%。从航道内涨落潮流量占比来看,进出港区的水流主要从航道水域经过,两侧边滩占比较低,说明航道水域是泥沙运输的主通道。

4 疏浚扰动减淤分析

4.1 计算条件

射阳港与航道回淤量大、回淤速率快,若采用常规的疏浚维护手段,不仅维护成本高,且维护难

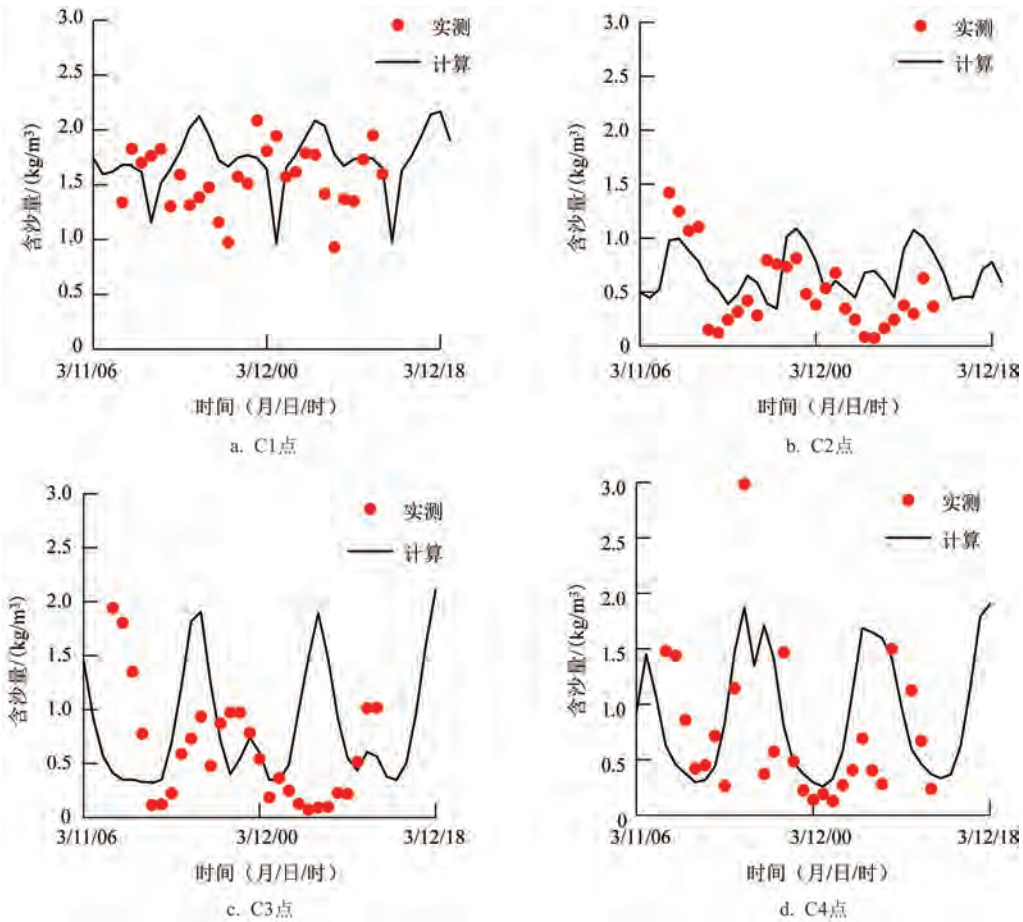


图5 含沙量验证图

Fig.5 Sediment concentration verification charts

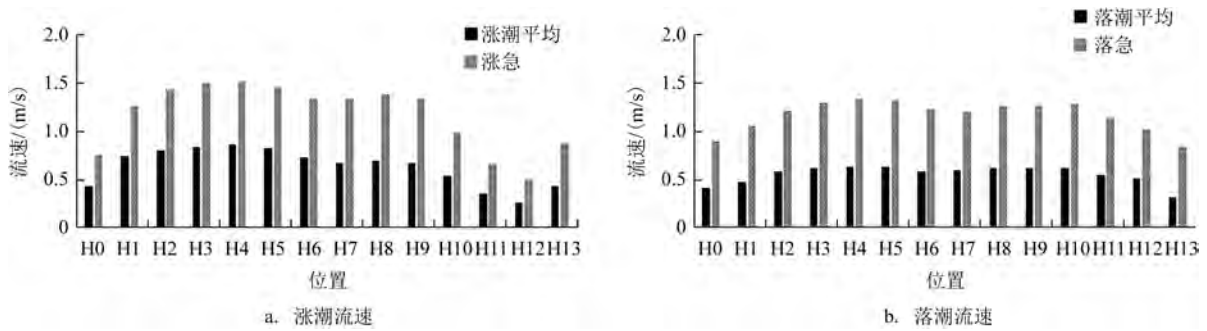


图6 港区与航道采样点大潮期涨落潮流速分布

Fig.6 Distribution of tidal current velocity during spring tide in port and channel

度大。近年来,随着科技的发展,气动冲淤技术长足发展,本文借鉴气动冲淤技术思路,研究在射阳港及航道进行疏浚扰动,利用落潮水流将扰动悬扬的泥沙输出航道口门外水域,以达到减淤目的。

距离射阳河口约 15 km 处建有射阳河闸,开闸放水时,径流量会增强落潮动力,因此下文考虑

50 m³/s 和 200 m³/s 两种射阳河径流量工况(见表 2)。疏浚船扰动泥沙的源强与船型、施工工艺、工作时效相关,施工中产生的源强存在较大差异^[15]。本研究中疏浚船采用自制气泡耙进行泥沙扰动,根据现场水样采集分析,定点作业时气泡耙的泥沙疏浚扰动源强约为 5 kg/s。

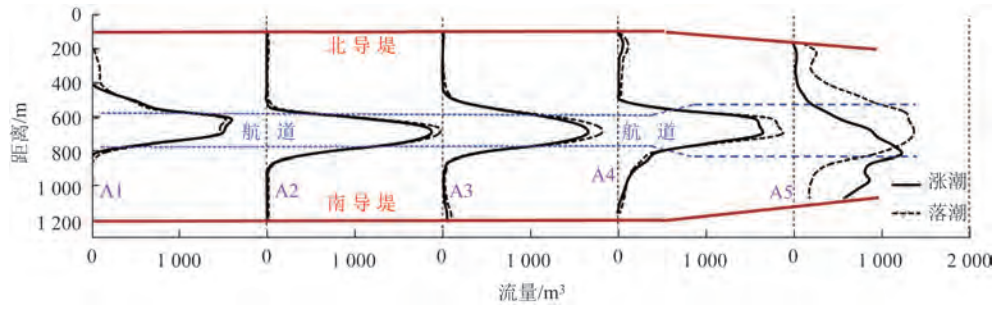


图7 导堤内水域断面大潮期潮量分布

Fig.7 Distribution of tidal volume during the spring tide in the water section of the bank

表2 计算方案表

Tab.2 Calculation scheme table

方案名称	扰动位置	径流/(m³/s)	潮型	扰动时间/h
方案1	港池	50	大潮、小潮	4
方案2	航道A区	50	大潮、小潮	4
方案3	航道B区	50	大潮、小潮	4
方案4	航道C区	50	大潮、小潮	4
方案5	港池	200	大潮、小潮	4
方案6	航道A区	200	大潮、小潮	4
方案7	航道B区	200	大潮、小潮	4
方案8	航道C区	200	大潮、小潮	4

在港池和航道的不同区域设置若干扰动点,计算潮型分为大潮和小潮,于落潮初期开始扰动泥沙,扰动时间取4 h,计算方案见表2,源强点位置见图8。泥沙被扰动悬扬后,在落潮水流的作用下向外海运动,期间伴随泥沙沉降。根据数学模型计算结果,统计不同潮型下泥沙输出航道口门的比例,

以及沿程泥沙落淤分布情况。

4.2 水质点轨迹分析

图9为大潮和小潮期港池与航道疏浚扰动区域水质点的运动轨迹,大潮期落潮动力强,港池与航道的水质点均能随着落潮流输运至外海。港池区域水质点3.8 h可以到达航道口门,航道A、B区水质点约3 h可运动至航道口门水域,航道C区水质点约1.8 h可抵达该区域。小潮期落潮动力较弱,各扰动区域水质点运动距离明显小于大潮,港池区域水质点在一个落潮期内未能到达航道口门,航道区A水质点约5 h可运动至航道口门水域,航道B区约为4.3 h,航道C区约为3.3 h。

从各区域的水质点落潮运动轨迹可见,大潮期港池、航道各区域水质点在一个落潮期内均可输送至航道口门外;小潮期港池中部区域的水质点在一个落潮期内无法到达航道口门区。若采用疏浚扰动方法减淤,需经多个周期且需对航道沿程泥沙进行扰动,方可达到减淤效果。

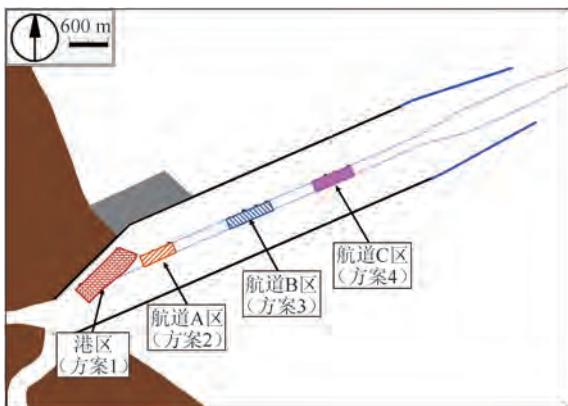


图8 挖泥船疏浚扰动区域位置图

Fig.8 Location map of dredging disturbance area by dredger

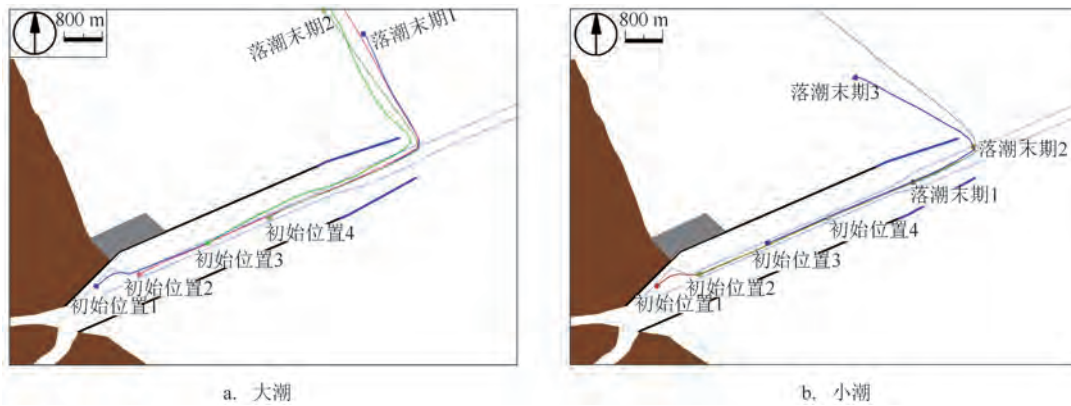


图9 疏浚扰动区水质点运动轨迹

Fig.9 Movement trajectory of water quality points in the dredging disturbance area

4.3 减淤效果分析

图10—11为径流量 $50 \text{ m}^3/\text{s}$ (方案一~四)条件

下,大潮期和小潮期港池与航道泥沙扰动后的悬沙输移包络线分布。由图可以看到,大潮期港池与航道泥沙扰动后,在1个落潮过程内,扰动悬浮泥沙均

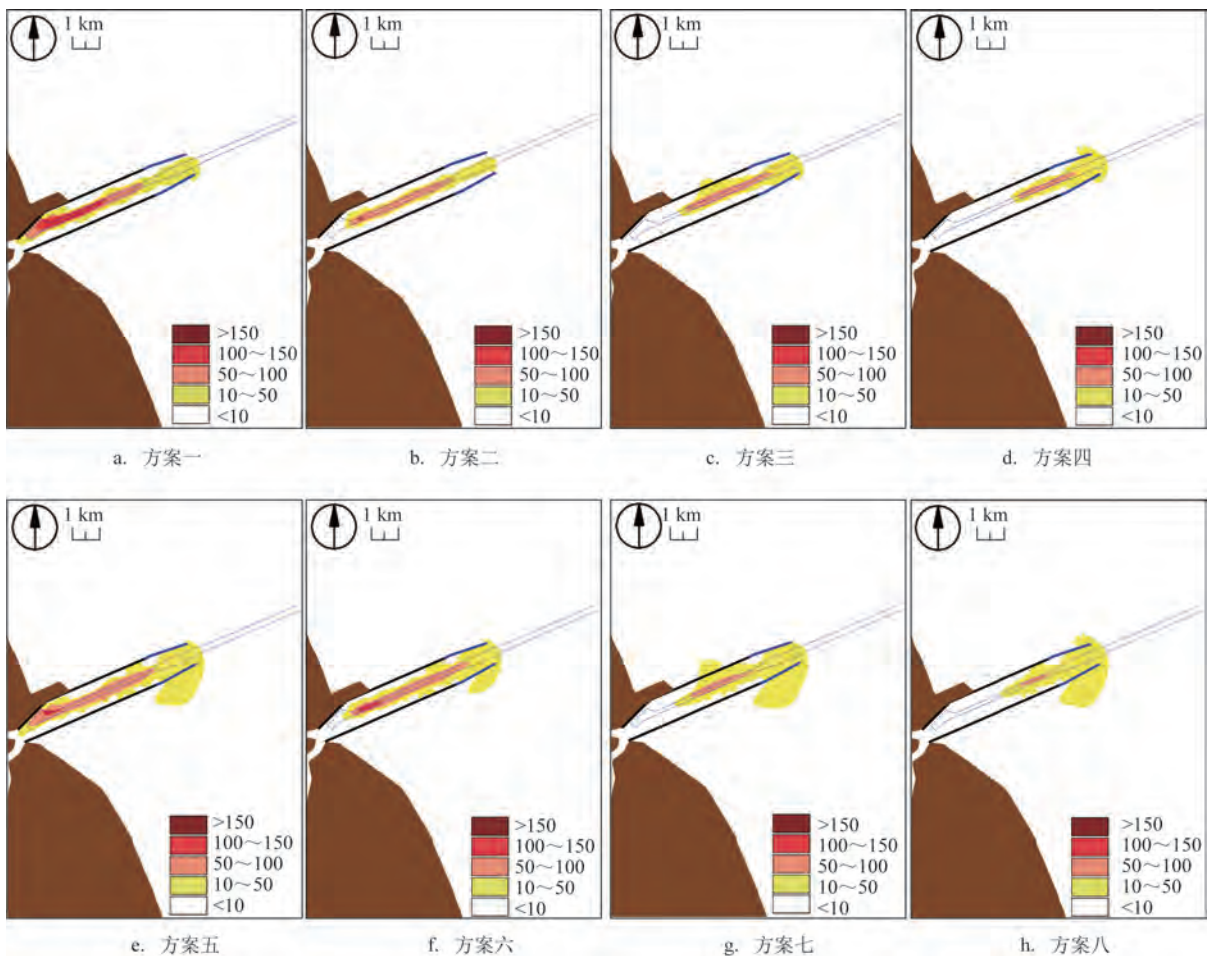


图10 大潮期各区域泥沙扰动后悬沙输移包络线分布(单位:mg/L)

Fig.10 Distribution of suspended sediment transport envelope lines after sediment disturbance in different regions during spring tide (unit: mg/L)

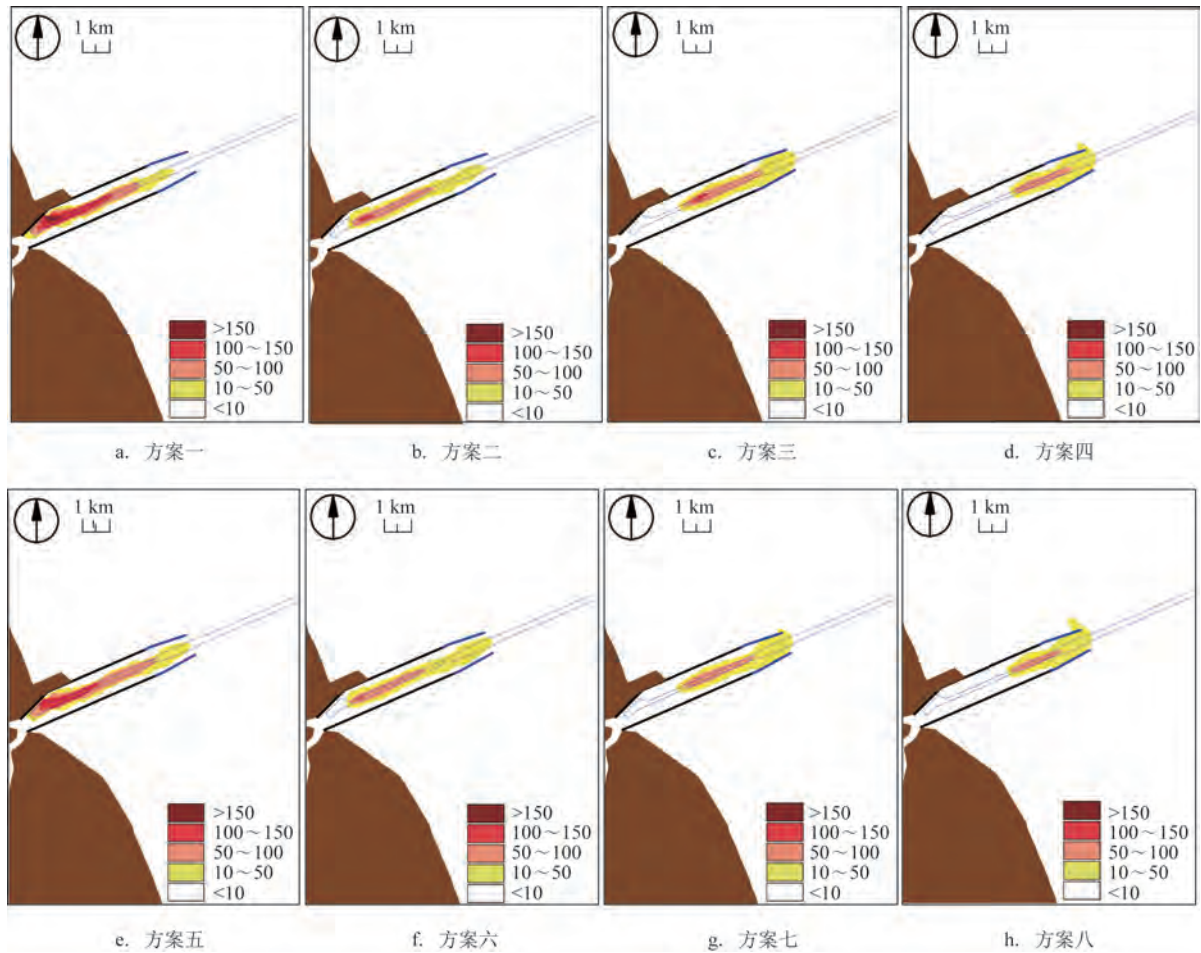


图 11 小潮期各区域泥沙扰动后悬沙输移包络线分布(单位:mg/L)

Fig.11 Distribution of suspended sediment transport envelope lines after sediment disturbance in different regions during neap tide (unit: mg/L)

可以输送至航道口门处;小潮期港池的扰动泥沙在 1 个落潮过程内基本未输送至航道口门,而航道区的扰动泥沙则可抵达该区域。

泥沙扰动后,在随落潮流向外海运动过程中,一部分泥沙沉降形成二次淤积,另一部分悬浮于水中随落潮流向外海输移。根据数学模型计算结果,可以统计出 1 个落潮过程(6 h)内港池与航道的泥沙落淤量和悬沙增量,进而得到泥沙输出航道口门外的比例以及沿程泥沙淤积分布情况。表 3 统计了各区域泥沙扰动后,一个落潮过程中泥沙输出至航道口门外的比例,以及航道口门内泥沙落淤的比例。由表中可以看到,大潮期港池内扰动后流出航道口门的泥沙约为 8.86%,小潮期仅有 3.66%;航道 A 区流出的泥沙量分别为大潮期 16.90%,小潮期

7.45%;航道 B 区大潮期 27.62%,小潮期 11.53%;航道 C 区大潮期 50.35%,小潮期 37.62%。扰动区域越靠近航道口门,输出口门外的泥沙比例越高。由表 3 还可以看出,港区泥沙扰动后,大潮期有 46.25% 的泥沙在航道口门内水域形成二次淤积,小潮期为 49.74%,且越往航道口门方向,泥沙二次淤积的比例越低(航道 C 区大潮期为 28.72%,小潮期为 37.58%)。当径流量为 $200 \text{ m}^3/\text{s}$ 时(方案五~八),各疏浚水域经扰动后,泥沙输出航道口门的比例(2%~12%,见表 3)明显提高,泥沙二次淤积幅度有所下降,说明径流量增大有利于扰动泥沙向口门外输送。

由以上分析可以看出,港池与航道各水域泥沙扰动后,一部分泥沙可随落潮流输运至航道口门外,其中港区及航道 A 区距航道口门较远,扰动泥

沙输出口门外的比例较低,且近50%的泥沙形成二次淤积,因此这两区域可以通过“扰动接力”形式达到减淤目的,即自港区向航道口门方向分时段扰动。

4.4 扰动泥沙二次淤积分布

由表3可以看到,港区及航道扰动悬扬的泥沙有30%~50%发生二次淤积。由于射阳港航道水深远大于两侧边滩,且落潮期水位较低,扰动泥沙主要通过航道水域向外海运动,即二次淤积也发生在航道水域。图12为不同径流条件下,大潮期和小潮

期航道沿程泥沙二次淤积的比例分布(采样点位置见图1a)。从图中可以看到,各扰动区域向航道口门方向,泥沙淤积比例逐渐减小;大潮期二次淤积比例小于小潮期,径流量增大时二次淤积幅度相对更小。在各扰动区域下游2 km范围内,泥沙二次淤积比例占航道口门内泥沙总淤积量的60%~70%,即各区域泥沙扰动后,有相当数量的泥沙在下游水域形成二次淤积。因此可以采用“扰动接力”的形式,自港区向航道口门方向分时段扰动,达到减淤目的。港区及航道扰动的泥沙输出至口门外水域后,可能对周边的水环境、水生态造成一定影响,因

表3 扰动悬扬泥沙流出航道口门及二次淤积比例统计(单位:%)

Tab.3 Statistics on the proportion of disturbed suspended sediment flowing out of the channel entrance and re siltation (unit:%)

方案名称	扰动位置	大潮		小潮	
		出航道口门比例	口门内二次淤积比例	出航道口门比例	口门内二次淤积比例
方案一	港区	8.86	46.25	3.66	49.74
方案二	航道区A	16.90	43.67	7.45	46.51
方案三	航道区B	27.62	39.92	11.53	45.06
方案四	航道区C	50.35	28.72	37.62	37.58
方案五	港区	14.39	43.37	5.17	45.98
方案六	航道区A	23.70	40.75	12.22	45.57
方案七	航道区B	36.43	36.14	23.99	43.16
方案八	航道区C	54.93	26.26	47.87	32.25

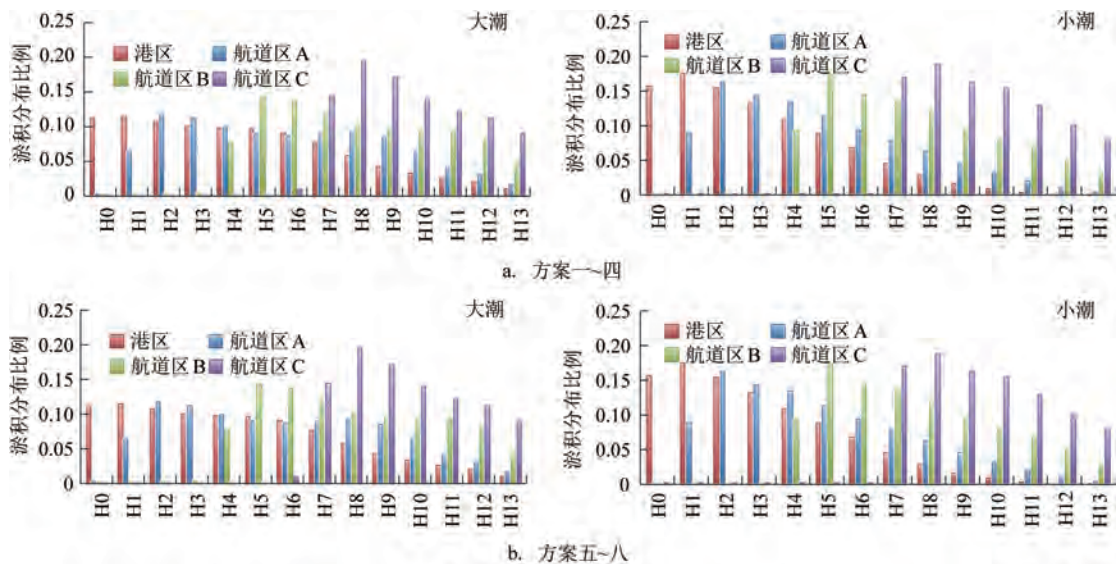


图12 不同区域泥沙二次淤积比例分布

Fig.12 Distribution of sediment re-deposition proportions in different regions

此需要深入评估扰动泥沙对周边水域的综合影响。

5 结论

本研究针对射阳港强潮缓坡型高含沙航道泥沙淤积严重、维护成本高的难题,基于水动力泥沙输运数值模拟,探讨疏浚扰动施工方法对港池航道的减淤效果。主要结论如下:

①射阳港航道内涨落潮量占导堤间全断面的70%~85%,是泥沙输运的主通道。

②大潮落潮期港区泥沙扰动后,8.86%的扰动泥沙输出至航道口门外(小潮期为3.66%);在靠近口门的C区,大潮期输出比例为50.35%,小潮期为37.62%;扰动区域越靠近航道口门,泥沙输出比例越高;径流量增大时,落潮期泥沙输出至口门外的比例提升2%~12%。

③泥沙扰动后二次淤积的占比呈空间梯度变化,航道口门下游2 km范围内淤积占比为60%~70%,靠近口门的C区大潮期二次淤积率(28.72%)较港区降低35%;径流量增大后,泥沙二次淤积的比例有所降低。

④通过“扰动接力”技术结合径流—潮汐协同调控的方法,能够实现航道减淤目的,降低施工成本。研究成果可为强潮缓坡河口航道淤积治理提供理论与技术支撑。

参考文献:

- [1] 任实, 胡兴娥, 邢龙, 等. 三峡水库坝前深水清淤疏浚技术研究[J]. 长江科学院院报, 2023, 40(1): 24-28.
REN S, HU X E, XING L, et al. Aerodynamic dredging technology for deep water in front of three gorges reservoir[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2023, 40(1): 24-28.
- [2] 王萍. 黄骅港航道淤积预测及优化清淤研究[D]. 保定: 河北农业大学, 2014.
WANG P. Prediction and optimization dredging research in port of Huanghua channel[D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2014.
- [3] 朱剑飞. 长江口深水航道治理二期工程疏浚工程的实施与工程管理[C]//第二届中国国际疏浚技术发展会议论文集. 广州, 2006: 1-9.
ZHU J F. Implementation and management of dredging project of Yangtze Estuary deepwater channel regulation phase II project[C]//Proceedings of the Second China International Dredging Technology Development Conference. Guangzhou, 2006: 1-9.
- [4] 路川藤, 贾晓, 韩玉芳, 等. 台风浪作用下长江口深水航道淤积数值模拟[J]. 水科学进展, 2018, 29(5): 696-705.
LU C T, JIA X, HAN Y F, et al. Numerical simulation of sudden silting in the Yangtze Estuary deepwater channel by the wave of typhoon[J]. Advances in Water Science, 2018, 29(5): 696-705.
- [5] 李观明, 朱永楷, 顾峰峰, 等. 长江口深水航道回淤量随水文条件变化的特征分析[J]. 水道港口, 2023, 44(5): 763-771.
LI G M, ZHU Y K, GU F F, et al. Characteristic analysis of the change of back-siltation with hydrological conditions in deep navigation of the Yangtze Estuary[J]. Journal of Waterway and Harbor, 2023, 44(5): 763-771.
- [6] 丛新, 朱文谨, 巩妮娜, 等. 近海挡潮闸下淤积问题及处理研究综述[J]. 盐城工学院学报(自然科学版), 2018, 31(1): 6-10.
CONG X, ZHU W J, GONG N N, et al. Research review on the problem and treatment of the siltation under the tidal gate in coastal waters[J]. Journal of Yancheng Institute of Technology (Natural Science Edition), 2018, 31(1): 6-10.
- [7] 徐进超, 李云, 宣国祥, 等. 船闸泄水作用下引航道中动水冲沙规律[J]. 水科学进展, 2016, 27(2): 186-195.
XU J C, LI Y, XUAN G X, et al. Study on the sediment scouring rules by dynamic water effect in approach channel under the action of ship lock sluicing[J]. Advances in Water Science, 2016, 27(2): 186-195.
- [8] 陈森, 丁磊, 丁跃, 等. 气动冲沙技术在新沂河口枢纽挡潮闸的应用[J]. 江苏水利, 2023(11): 8-12.
CHEN B, DING L, DING Y, et al. Application of pneumatic anti-silting technology in the tide gates of Xinyi River estuary hub[J]. Jiangsu Water Resources, 2023(11): 8-12.
- [9] 丁磊, 陈黎明, 罗勇, 等. 城市人工湖淤积模拟与“气动冲沙”防淤措施[C]//第十九届中国海洋(岸)工程学术讨论会论文集. 舟山, 2019: 947-954.
DING L, CHEN L M, LUO Y, et al. Urban artificial lake siltation simulation and pneumatic sand flushing anti-silting measures[C]//Proceedings of the 19th China Ocean (Shore) Engineering Symposium. Zhoushan, 2019: 947-954.
- [10] 杨啸宇, 丁磊, 罗勇, 等. 河口挡潮闸气动冲沙减淤防淤技术初探[C]//第二届中国海洋(岸)工程学术讨论会论文集. 湛江, 2022: 1030-1036.
YANG X Y, DING L, LUO Y, et al. Preliminary study on pneumatic sand flushing technology for sediment reduction and prevention at estuary tidal barriers[C]//Proceedings of the 20th China Ocean (Coastal) Engineering Symposium. Zhanjiang, 2022: 1030-1036.
- [11] 袁文昊, 刘红. 江苏射阳港3.5万吨级进港航道回淤特征研究[J]. 水运工程, 2022(1): 112-118.
YUAN W H, LIU H. Back silting characteristics of 35,000 DWT navigation channel at Sheyang Port in Jiangsu Province[J]. Port & Waterway Engineering, 2022(1): 112-118.

- [12] 刘加模, 栾加友. 射阳港潮汐与乘潮进港[J]. 海岸工程, 2000, 19(1): 54-58.
LIU J M, LUAN J Y. Tide and enter port of tidal boat of Sheyang harbor[J]. Coastal Engineering, 2000, 19(1): 54-58.
- [13] 刘强, 张刚, 项立辉, 等. 射阳港区双导堤建设前后冲淤变化及成因研究[J]. 海洋通报, 2017, 36(5): 561-567.
LIU Q, ZHANG G, XIANG L H, et al. Characteristics and genesis of erosion and deposition in Sheyang Port before and after double-dyke construction[J]. Marine Science Bulletin, 2017, 36(5): 561-567.
- [14] 孟江山, 路川藤, 罗小峰, 等. 基于GPU并行的厦门附近海域潮波传播数值模拟研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2021, 19(4): 424-433.
MENG J S, LU C T, LUO X F, et al. The tidal wave propagation simulation in sea area near Xiamen with GPU parallel computation [J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydro-power Research, 2021, 19(4): 424-433.
- [15] 王炯琦. 航道疏浚对水体水质影响的模拟研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2014.
WANG J Q. The quality simulating studies of the waterway dredging's impact on water quality[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2014.

Numerical simulation study on dredging disturbance for sediment reduction in silt-prone ports and channels with high siltation

MO Zhifang¹, MAO Xiaochong¹, LU Chuanteng^{2*}, WANG Song¹

(1. China Communications Guanghang Dredging Co., Ltd., Guangdong 510000, China; 2. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: The Sheyang coastal area is influenced by strong tidal dynamics, high sediment concentration, and gentle topography, leading to rapid siltation and high maintenance costs in its ports and navigation channels. To address the sediment reduction demands of silt-prone ports, this study establishes a two-dimensional tidal current and sediment transport mathematical model for the Sheyang coastal area and proposes a dredging disturbance method for sediment reduction based on ebb-tide dynamic regulation. The results show that dredging disturbance significantly enhances sediment transport efficiency. After sediment disturbance in the port area, 8.86% of the disturbed sediment are transported outside the channel entrance during spring tide ebb (3.66% during neap tide), with higher export ratios (15%~50%) observed when disturbance zones are closer to the entrance. The secondary siltation of disturbed sediment exhibits spatial heterogeneity: 46.25% of the disturbed sediment re-deposits within the channel during spring tide (49.74% during neap tide), and 60%~70% of the total re-deposition within the entrance occurs within 2 km downstream of the disturbance zones. Increased river discharge further improves sediment export ratios and reduces secondary siltation.

Key words: Sheyang Port and Channel; dredging disturbance; numerical simulation; siltation and sedimentation