



通扬运河与泰东河交叉河口航道冲淤 数值模拟及工程方案优化^{*}

高志峰¹, 冒刘燕², 李梦琦², 谢 雯², 徐宿东², 殷 锴²

(1. 江苏省泰州市港航事业发展中心, 江苏 泰州 225309;

2. 东南大学 交通学院港航工程系, 江苏 南京 211189)

摘要: 交叉河口淤积影响船舶正常航行, 易发生搁浅事故。为充分发挥航道的航运功能, 应及时分析碍航原因, 制定航道疏浚方案, 确保航道通航顺畅与安全。以通扬运河与泰东河交叉河口为研究区域, 构建二维 Delft 3D 水沙模型, 结合实测分析其泥沙运动规律与地貌演变特征。基于不同疏浚高程和疏浚边坡设计 6 个航道尺度方案, 并通过模拟分析得到兼顾过往船舶航行安全和疏浚经济成本的优化方案。本研究可为类似交叉河口的航道尺度设计与优化提供借鉴。

关键词: 交叉河口; 航道冲淤; Delft 3D 水沙模型; 航道尺度优化

中图分类号: U617.6

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)08-0063-07

Erosion and deposition numerical simulation and engineering scheme optimization of cross estuary of Tongyang Canal and Taidong River

GAO Zhifeng¹, MAO Liuyan², LI Mengqi², XIE Wen², XU Sudong², YIN Kai²

(1. Taizhou Port and Waterway Development Center, Taizhou 225309, China;

2. Department of Port and Waterway Engineering, School of Transportation, Southeast University, Nanjing 211189, China)

Abstract: Deposition at cross estuary affects the normal navigation of ships and leads to grounding accidents. In order to make full use of the navigation function of the waterway, it is necessary to analyze the causes of navigation obstruction in time and formulate waterway dredging plans to ensure smooth and safe navigation of the waterway. This study takes the cross estuary of Tongyang Canal and Taidong River as the research area, and establishes a two-dimensional Delft 3D water-sediment model to analyze its sediment movement law and geomorphic evolution characteristics in combination with the actual measurement. Based on different dredging elevation and dredging slope, six channel scale schemes are designed, and through simulation analysis, an optimization scheme that takes into account the navigation safety of passing ships and the economic cost of dredging is obtained. This study can provide reference for the channel scale design and optimization of similar crossing estuaries.

Keywords: cross estuary; waterway erosion and deposition; Delft 3D water-sediment model; waterway size optimization

通扬运河是江苏省境内能源、工业原材料、矿建材料调入和产业输出的一条内河主通道, 通

扬运河泰州段于 2018 年由七级航道整治提升为三级航道。整治工程竣工后, 通扬运河与泰东河

收稿日期: 2022-11-09

^{*}基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (51879043)

作者简介: 高志峰 (1973—), 男, 高级工程师, 从事水运工程项目的建设、管理工作。

交叉河口(图1)拐点处由于河口输沙不平衡导致泥沙淤积,将影响通航和防洪安全^[1-3]。当船舶从通扬运河驶入泰东河时,多次发生搁浅事故。泰东河航道底宽 45 m,通航水深 6.18 m,设计河底高程-5.5 m。通扬运河航道典型设计断面如图2所示,航道底宽 45 m,口宽 ≥ 70 m,最小通航水深 3.2 m,设计河底高程-2.52 m,全线航宽 60 m,除局部段落转弯半径为 250 m 外,最小弯道半径 480 m。



图1 项目所在位置

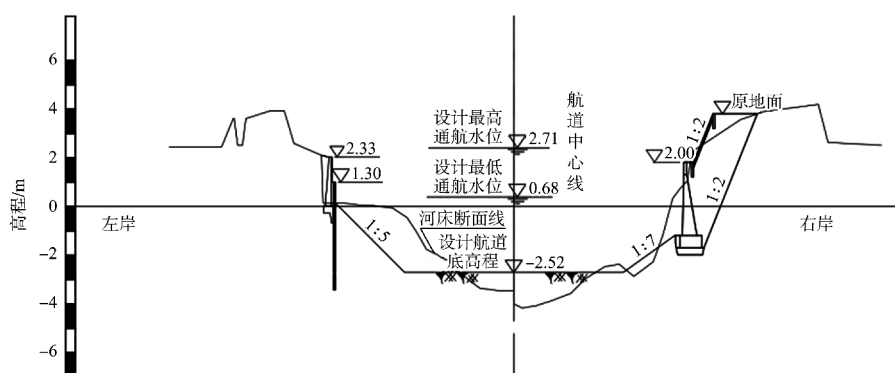


图2 交叉河口航道典型设计断面

为充分发挥通扬运河的航运功能,需分析通扬运河与泰东河交叉河口航道的碍航搁浅因素。本文以通扬运河与泰东河交叉河口为研究区域,构建二维 Delft 3D 水沙模型,模拟其水文泥沙与地貌演变特征,分析研究区域泥沙运动规律。结合实测资料分析,提出相应航道尺度优化方案,为后续整治工程实施提供科学依据。本文的研究方法可以完善和深化对交叉口水沙特性及河道演变规律的认识,为类似航道交叉河口的航道尺度设计提供借鉴。

1 Delft 3D 水沙模型构建

Delft 3D 模型根据浅水特性和 Boussinesq 假定,通过适当的边界条件求解不可压缩流体的 Navier-Stokes 方程组,包括水平动量方程、连续性方程、输运方程和湍流闭合模型。本文假设水体处于静水压强下,不存在垂向加速度,垂向动量方程变成流体静压方程,三维模型中的垂向流速可由连续方程推导。模型上、下游分别为新通扬运河和泰东河,模拟河段东西方向全长约 2 716 m,

南北方向全长约 1 939 m,生成的网格尺寸大小为 4.5 m \times 4.5 m,共设置模型网格 34 547 个,网格划分见图3。

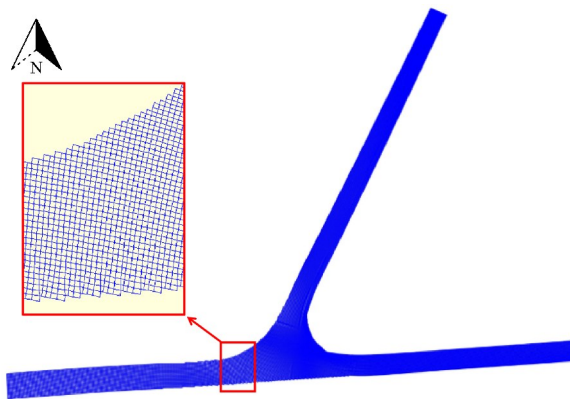


图3 网格划分

1.1 控制方程

1) 沿深度平均的连续性方程:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}} \sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial [(d+\zeta) U \sqrt{G_{\eta\eta}}]}{\partial \xi} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}} \sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial [(d+\zeta) V \sqrt{G_{\xi\xi}}]}{\partial \eta} = (d+\zeta) Q \quad (1)$$

$$U = \frac{1}{d + \zeta} \int_d^\zeta u dz = \int_{-1}^0 u d\sigma \quad (2)$$

$$V = \frac{1}{d + \zeta} \int_d^\zeta v dz = \int_{-1}^0 v d\sigma \quad (3)$$

$$Q = \int_{-1}^0 (q_{in} - q_{out}) d\sigma + P - E \quad (4)$$

式中: ζ 为水面高于 z 坐标零刻度线的高度, m ; d 为 z 坐标零刻度线到水底的深度, m ; U 、 V 为沿 ξ 、 η 方向的平均速度, m/s ; u 、 v 为 ξ 、 η 方向的流速, m/s ; σ 为垂向坐标; Q 为单位面积下的源汇, m/s ; P 为降雨, m/s ; E 为蒸发, m/s ; q_{in} 、 q_{out} 为单位体积下的局部源汇, $1/s$; $\sqrt{G_{\eta\eta}}$ 、 $\sqrt{G_{\xi\xi}}$ 分别为曲线坐标系 η 向直角坐标系 y 的转换系数和曲线坐标系 ξ 向直角坐标系 x 的转换系数, m 。

2) ξ 方向的动量方程:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial u}{\partial \xi} + \frac{v}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial u}{\partial \eta} + \frac{\omega}{d + \zeta} \frac{\partial u}{\partial \sigma} - \\ & \frac{v^2}{\sqrt{G_{\xi\xi}} \sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\eta\eta}}}{\partial \xi} + \frac{uv}{\sqrt{G_{\xi\xi}} \sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\xi\xi}}}{\partial \eta} - f v = \\ & - \frac{1}{\rho_0 \sqrt{G_{\xi\xi}}} P_\xi + F_\xi + \frac{1}{(d + \zeta)^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(v_v \frac{\partial u}{\partial \sigma} \right) + M_\xi \quad (5) \end{aligned}$$

3) η 方向的动量方程:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{v}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial v}{\partial \xi} + \frac{u}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial v}{\partial \eta} + \frac{\omega}{d + \zeta} \frac{\partial v}{\partial \sigma} - \\ & \frac{uv}{\sqrt{G_{\xi\xi}} \sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\eta\eta}}}{\partial \xi} - \frac{u^2}{\sqrt{G_{\xi\xi}} \sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\xi\xi}}}{\partial \eta} + f u = \\ & - \frac{1}{\rho_0 \sqrt{G_{\eta\eta}}} P_\eta + F_\eta + \frac{1}{(d + \zeta)^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(v_v \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right) + M_\eta \quad (6) \end{aligned}$$

式中: ω 为 σ 坐标系下的垂向速度, m/s ; f 为科氏力参数, $1/s$; ρ_0 为水的参考密度, kg/m^3 ; P_ξ 、 P_η 分别为 ξ 、 η 方向上的静水压力梯度, $kg/(m^2 \cdot s^2)$; F_ξ 、 F_η 为 ξ 、 η 方向的湍流动量通量, 代表了不平衡的雷诺应力, m/s^2 ; v_v 为垂直紊流黏性系数, m^2/s ; M_ξ 、 M_η 为 ξ 、 η 方向动量的源汇, 代表了额外的动量, m/s^2 。

4) 垂直方向的连续性方程:

σ 坐标系下的垂直方向的速度 ω 由连续性方程求得:

$$\begin{aligned} \omega = & w + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}} \sqrt{G_{\eta\eta}}} \left[u \sqrt{G_{\eta\eta}} \left(\sigma \frac{\partial H}{\partial \xi} + \frac{\partial \zeta}{\partial \xi} \right) + \right. \\ & \left. v \sqrt{G_{\xi\xi}} \left(\sigma \frac{\partial H}{\partial \eta} + \frac{\partial \zeta}{\partial \eta} \right) \right] + \left(\sigma \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial \zeta}{\partial t} \right) \quad (7) \end{aligned}$$

式中: w 为 ζ 方向的流速分量, m/s 。

1.2 泥沙输运方程

通过求解悬浮泥沙的三维对流-扩散(质量平衡)方程计算悬浮泥沙的三维输运的方程如下:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial c^{(\ell)}}{\partial t} + \frac{\partial u c^{(\ell)}}{\partial x} + \frac{\partial v c^{(\ell)}}{\partial y} + \frac{\partial (w - w_s^{(\ell)}) c^{(\ell)}}{\partial z} - \\ & \frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon_{s,x}^{(\ell)} \frac{\partial c^{(\ell)}}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon_{s,y}^{(\ell)} \frac{\partial c^{(\ell)}}{\partial y} \right) - \\ & \frac{\partial}{\partial z} \left(\varepsilon_{s,z}^{(\ell)} \frac{\partial c^{(\ell)}}{\partial z} \right) = 0 \quad (8) \end{aligned}$$

式中: $c^{(\ell)}$ 为泥沙分量(ℓ)的质量浓度, kg/m^3 ; $\varepsilon_{s,x}^{(\ell)}$ 、 $\varepsilon_{s,y}^{(\ell)}$ 、 $\varepsilon_{s,z}^{(\ell)}$ 为涡流扩散系数, m^2/s ; $w_s^{(\ell)}$ 为泥沙分量(ℓ)的沉降速率, m/s 。

2 水沙模型率定和验证

2.1 现场测点与数据采集

项目所在地每年5—9月为洪水季,上游水文站进行泄洪,8月为排水期,1—4月和10—12月为枯季。枯水季和洪水季,通扬运河为上游,泰东河为下游;洪水季排水期水流方向与之相反,泰东河为上游,通扬运河为下游。

验证数据为现场测量的2020年12月泰东河口水下地形和2021年1月观测点(图4)的流速、泥沙含量数据。测点坐标、水文测量数据与泥沙含量分析结果见表1。



图4 观测点位置

表 1 水文测量数据与泥沙含量分析结果

测点	坐标	水深/m	水温/℃	流速/(m·s ⁻¹)	采样点实际水深/m	垂向位置	泥沙含量/(g·m ⁻³)
1	E119°56'34.41" N32°31'30.24"	0.196	9.466	-0.160	5.3	表层	39
						中层	334
						底层	773
2	E119°56'49.08" N32°31'14.61"	0.392	10.745	0.042	2.0	表层	28
						中层	36
						底层	27
3	E119°56'5.07" N32°31'13.35"	0.206	10.118	-0.094	4.0	表层	48
						中层	39
						底层	47
4	E119°56'17.88" N32°31'14.46"	0.289	9.933	-0.095	3.5	表层	43
						中层	40
						底层	46
5	E119°56'35.17" N32°31'13.22"	0.250	9.621	0.081	1.5	表层	22
						中层	34
						底层	37
6	E119°56'27.09" N32°31'20.21"	0.279	10.495	-0.041	2.5	表层	56
						中层	58
						底层	59

2.2 水动力与泥沙含量模型验证

模型率定和验证内容包括枯水季测点的流速和泥沙含量、航道回淤量以及洪水季泥沙回淤量。

边界条件设定：以通扬运河东、西两侧断面的实测流量作为上游进口边界条件，以泰东河断面的实测水位作为下游出口边界条件进行水动力验证。在此基础上，在模型初始条件及边界条件中加入悬移质泥沙，进行泥沙含量验证。选择 2021 年 1 月 30 日该河段内观测点的流速和泥沙含量观测数据，水动力验证边界条件设置为新通扬运河东侧输入流量为 70 m³/s、西侧输入流量为 -18 m³/s；选择中层泥沙含量作为泥沙含量验证数据，边界条件设置为泰东河方向泥沙含量 934 g/m³、通扬线东侧泥沙含量 80 g/m³、通扬线西侧泥沙含量 39 g/m³。

交叉河口模拟结果如图 5 所示，模拟区域流速和泥沙含量分布并不均匀。由图 5a)可知，泰东河流速较大，约为 0.14 m/s；通扬运河西侧次之，水流流速为 0.08~0.12 m/s；通扬运河东侧流速最低，流速小于 0.05 m/s。由于测量时间为冬季末，航道水流流速较小，因此流速分布计算结果与自

然条件下吻合良好。由图 5b)可知，新通扬运河整体泥沙含量较低，为 35~50 g/m³；泰东河泥沙含量较高，泰东河泥沙含量为 100~300 g/m³，且越接近下游泥沙含量越高。观测点泥沙含量与实际相符，模型计算结果与自然条件下吻合良好。

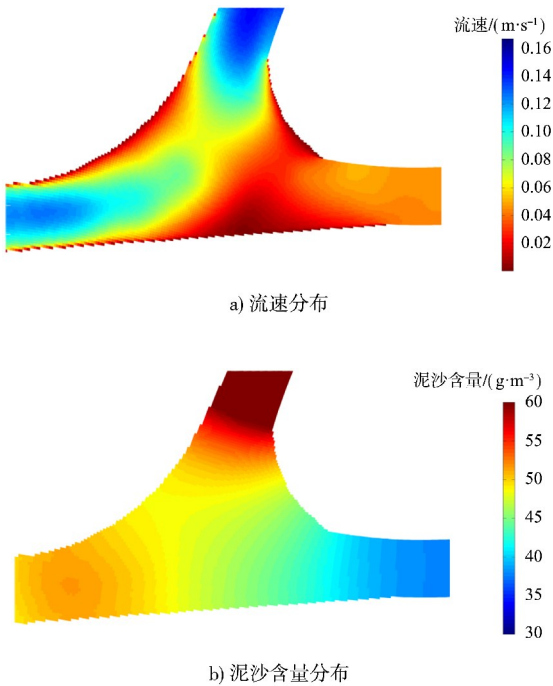


图 5 交叉河口模拟结果

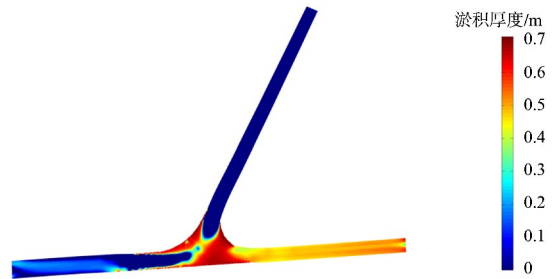
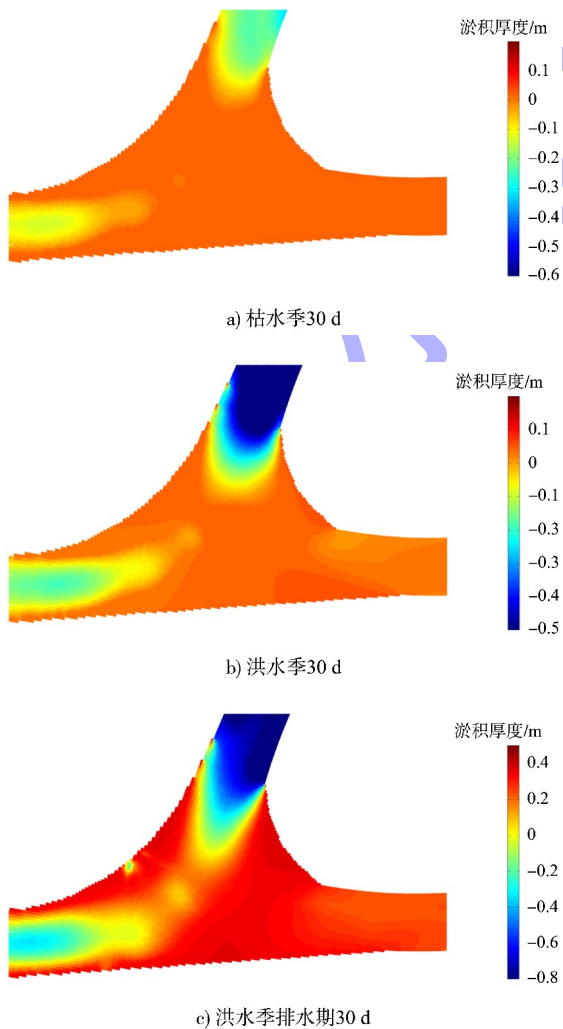
模型计算结果与实测数据的拟合程度见表2。从表中可以看出,6个观测点的模拟流速与实测流速基本一致,最大流速差值为0.018 m/s,最小流速差值为0 m/s,误差在可接受范围内,表明模型可以真实反映新通扬运河与泰东河交叉河口水动力环境,模拟效果良好。

表2 模拟值与实测值拟合结果

观测点	流速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)			泥沙含量/($\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)		
	实测值	模拟值	误差	实测值	模拟值	误差
1	0.160	0.142	0.018	334	118	216
2	0.042	0.044	0.002	36	39	3
3	0.094	0.094	0.000	39	39	0
4	0.095	0.095	0.000	40	50	8
5	0.041	0.025	0.016	34	41	7
6	0.081	0.076	0.005	58	48	10

2.3 淤积量验证

模拟2019年12月—2020年12月枯水季、洪水季以及洪水季排水期航道冲淤变化,见图6。



d) 2019—2020年模型模拟

图6 2019—2020年淤积厚度分布

模型模拟结果表明,枯水季和洪水季航道冲刷主要分布在老泰东河和新通扬线西侧航道,淤积发生在新通扬运河与泰东河交叉河口和新通扬线东侧航道,与实际淤积分布情况一致。从淤积量上看,新通扬运河东侧航道沿线淤积深度约为0.50 m,新通扬运河与泰东河交叉河口淤积量较大,约为0.65 m,最高可达到0.70 m。新通扬运河西侧航道沿线冲刷深度约为0.5 m,泰东河冲刷深度为2.0~3.0 m,与实际地形相比,模型范围较小,因此淤积深度相比实际略小。如表3所示,模型模拟结果与实际淤积厚度基本符合。

表3 2019—2020年测点实际与模拟淤积厚度对比

测点	实际淤积厚度/m	模拟淤积厚度/m
1	0.82	0.65
2	0.80	0.65
3	0.61	0.52
4	0.65	0.68
5	0.63	0.61
6	0.76	0.72

相比枯水季和洪水季,洪水季排水期水流流速较大,冲淤过程持续时间较长,变化程度更大。淤积泥沙在交叉河口、通扬线东西侧航道和泰东河主体河道均发生冲刷。洪水季排水期,上游泰东河流速较大,泰东河航道发生冲刷,水流流向新通扬线时,带来大量泥沙;同时交叉河口河道断面变宽,水流流速减小,泥沙沉降导致航道发生淤积;新通扬线西侧航道由于流速较大也发生冲刷作用。交叉河口淤积厚度约为0.35 m,两拐点处淤积深度最大,约为0.4 m。新通扬线西侧航道

冲刷深度整体分布在 0.2 m 左右。

3 工程方案比选

3.1 疏浚方案设计

在原有疏浚方案的基础上,保持老泰东河疏浚方案不变,考虑适当降低新通扬运河断面的疏浚高程,以减少通扬运河与泰东河交叉河口淤积对船舶航行的影响^[4-5]。根据各断面的水深情况,交叉河口区域设计河底高程分别取-3.5、-4.5、-5.5 m,边坡取 1:7 和 1:5,设计 6 种疏浚方案(表 4)进行模型模拟计算,模拟时间 1 a。根据模型计算结果,综合对比分析原设计方案与新疏浚方案的航道淤积量、边坡坡度疏浚前后的变化情况。

表 4 设计疏浚方案参数

方案编号	航道底宽/m	全线航宽/m	疏浚河底高程/m	疏浚边坡
原方案	45	60	-2.52	1:7
1	45	60	-3.50	1:7
2	45	60	-4.50	1:7
3	45	60	-5.50	1:7
4	45	60	-3.50	1:5
5	45	60	-4.50	1:5
6	45	60	-5.50	1:5

3.2 观测断面选取

为了对比疏浚前后新通扬运河与泰东河交叉河口区域淤积情况,在交叉河口区域 2 个拐角处设置 4 个观测断面(图 7),通过观测断面冲淤变化情况,分析整治效果并进行方案比选。

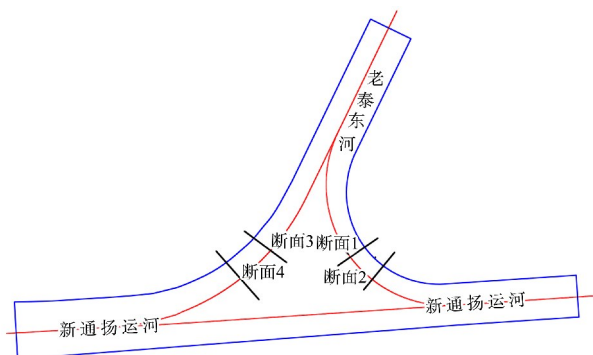


图 7 断面位置

3.3 断面冲淤形态及淤积量

设计方案各断面疏浚前后的冲淤形态见图 8,各断面淤积量见表 5。模拟结果表明,疏浚方案不同,淤积量大小也不完全一致,但 4 个断面在刚疏浚完成和疏浚 1 a 以后的断面形态变化是一致的:右岸拐角处的断面 1、2 经过 1 a 以后,整个断面均发生严重淤积,淤积量由岸向航道中心线基本相同;左岸拐角处的断面 3 淤积量由岸向中心线淤积高度逐渐减小;断面 4 近岸处发生严重淤积,淤积量由岸向中心线逐渐减小。

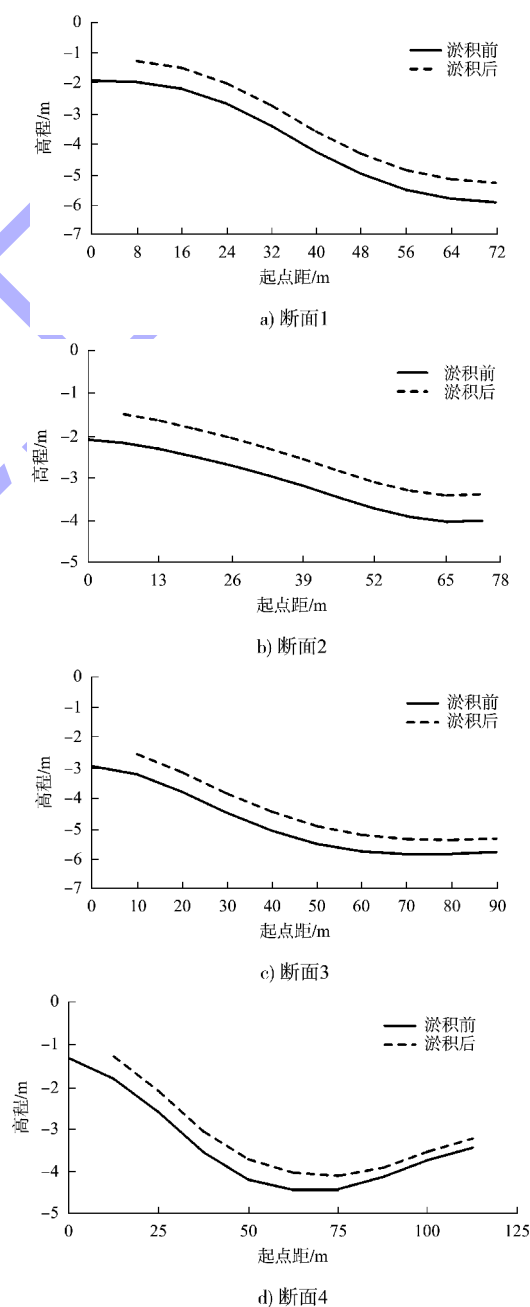


图 8 原设计方案各断面冲淤形态

表 5 各设计方案各断面淤积厚度				
方案	淤积厚度/m			
	断面 1	断面 2	断面 3	断面 4
原方案	0.65~0.69	0.62~0.68	0.45~0.67	0.25~0.65
1	0.65~0.70	0.64~0.70	0.47~0.68	0.31~0.64
2	0.65~0.70	0.64~0.70	0.47~0.68	0.33~0.64
3	0.64~0.70	0.64~0.69	0.47~0.67	0.45~0.64
4	0.65~0.70	0.64~0.70	0.47~0.68	0.31~0.64
5	0.65~0.70	0.65~0.70	0.47~0.68	0.37~0.64
6	0.64~0.70	0.65~0.69	0.46~0.67	0.47~0.64

各方案 1 a 淤积量以及在原方案基础上增加的疏浚量见表 6。对比分析可知,疏浚量越大,1 a 以后淤积量也越多;疏浚边坡增大后,疏浚量明显增加,1 a 后淤积量也有所增加,但疏浚量的增长量远高于淤积量的增加。

表 6 各方案疏浚和淤积体积		
方案	疏浚量/万 m ³	1 a 淤积量/万 m ³
1	1.858 5	6.754 8
2	4.714 7	7.070 9
3	7.299 4	7.124 5
4	3.032 6	6.971 1
5	6.369 8	7.086 2
6	10.085 2	7.188 9

3.4 淤积后边坡坡度变化

比较各方案航道边坡坡度大小,并根据高程结果选出符合通航要求的方案,见表 7。通过对比各方案各断面的淤积后边坡坡度可知,疏浚方案所有断面的航道边坡坡度均小于原设计坡度。综合比较淤积后边坡坡度和高程结果,方案 6 更优。

表 7 各方案淤积后边坡坡度				
方案	边坡坡度			
	断面 1	断面 2	断面 3	断面 4
原设计方案	1:15	1:32	1:16	1:12
1	1:20	1:24	1:22	1:13
2	1:21	1:21	1:22	1:13
3	1:22	1:22	1:22	1:13
4	1:21	1:26	1:22	1:13
5	1:19	1:40	1:22	1:13
6	1:26	1:38	1:22	1:13

4 结论

- 1) 洪水季淤积分布在交叉河口和通扬线东侧航道,通扬线西侧航道与泰东河主体河道均发生冲刷。交叉河口淤积厚度约为 0.35 m,两拐点处淤积深度最大,约为 0.40 m。新通扬线西侧航道冲刷深度整体分布在 0.20 m 左右。
- 2) 模拟结果表明,在疏浚方案不同、淤积量大小也不完全一致的情况下,选取的 4 个断面在刚疏浚完成和疏浚 1 a 以后的断面形态的变化均是一致的。
- 3) 模拟结果表明:疏浚量越大,1 a 以后淤积量也越大;疏浚边坡增大后,疏浚量明显增加,1 a 后淤积量也有所增加,但疏浚量的增长量远高于淤积量的增加。

参考文献:

[1] 徐华,薛伟,闫杰超,等.巢湖风浪特征及泥沙运动对口门航道淤积的影响[J].水运工程,2021(6): 115-120.

[2] 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, 139.

[3] 罗优,简鸿福,罗琳,等.多沙河流河口泥沙淤积自生性过程试验研究[J].水科学进展,2018,29(3): 348-356.

[4] 张功瑾,路川藤,罗小峰,等.长江口深水航道治理工程不同阶段北槽丁坝群坝田泥沙冲淤分析[J].水运工程,2017(9): 121-125, 143.

[5] 熊海滨,孙昭华,李明,等.长江中游芦家河水道航道维护性疏浚方案[J].水运工程,2019(10): 106-112.

(本文编辑 王传瑜)