

基于挡潮闸调度的 纳潮冲淤方法数值模拟研究

——以苏北灌河为例

刘雨轩¹, 鲁春辉², 沈城吉³

(1. 河海大学 水利水电学院, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学 水文水资源学院, 江苏 南京 210098;
3. 河海大学 港口海岸与近海工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要:以河口未建挡潮闸的苏北灌河为研究对象,在河口两处位置分别设置假想闸门,利用MIKE 21建立灌河及外海的潮流数值模型,研究了闸门建设位置及闸门调度方式对闸下冲淤效果的影响。结果表明,闸门启闭时的上下游水位差、闸门建设位置和泥沙特性对冲淤效果有决定性影响,在大潮期间进行纳潮冲淤能够取得更优的效果。但是,纳潮冲淤期间存在闸上淤积的风险,因此有必要联合多种清淤手段同时清淤。

关键词:挡潮闸; 纳潮冲淤; MIKE 21水动力模型; 临界冲刷切应力

中图分类号:TV68 文献标识码:B 文章编号:1007-7839(2024)04-0005-0006

Numerical simulation of silt washing by tide based on tidal gate scheduling: Taking the Guan River in the northern Jiangsu Province as an Example

LIU Yuxuan¹, LU Chunhui², SHEN Chengji³

(1. College of water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China;
3. College of Harbor, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: This study focuses on the Guan River in the northern Jiangsu province, where tidal gates have not yet been constructed. Two hypothetical gates are placed at different locations in the estuary. The numerical model of tidal flow in Guan River and the open sea was established by MIKE 21, and the influence of the gate construction location and the gate scheduling methods on the effectiveness of alleviating downstream sediment were investigated. The results indicate that the water level difference during the gate scheduling process, gate construction location, and sediment characteristics have a decisive impact on the dredging effect. Conducting silt washing by tide during high tide periods can achieve better results. However, there is a risk of upstream sedimentation of the gate during the process, it is necessary to combine multiple methods of desilting at the same time.

Key words: tidal gates; silt washing by tide; MIKE 21 hydrodynamic model; critical shear stress

收稿日期: 2024-01-23

基金项目: 江苏省水利科技项目(2021021)

作者简介: 刘雨轩(1998—),男,博士研究生,主要从事水力学及流体力学研究。E-mail: yxl025@hhu.edu.cn

通信作者: 鲁春辉(1981—),男,教授,博士生导师,主要从事水力学及河流动力学相关研究工作。E-mail: clu@hhu.edu.cn

1 概 述

为了解决沿海地区淡水资源利用问题,我国在中小型入海河口修建了大量挡潮闸^[1]。挡潮闸的综合运用能够发挥诸多效益,例如防潮抗台、排涝泄洪、防止土地盐碱化、缓解用水矛盾、御卤蓄淡等^[2]。但是,入海河口修建挡潮闸后改变了闸下河口区的潮波运动,径流与潮流之间的能量平衡都将重新调整,来沙因此受到不同程度的阻挡而发生淤积^[3]。沿海挡潮闸工程效益的发挥很大程度上受制于闸下泥沙淤积问题。闸下淤积会堵塞河口,降低江河的泄洪能力,影响河口防汛安全^[4]。对于有通航作用的河道,淤积的泥沙会降低河道下游的通航条件^[5]。此外,闸下淤积影响挡潮闸闸门的受力,进而威胁水闸的正常运行并提高工程维护成本。更为重要的是,当泥沙淤积到一定程度时,泥沙所带来的侧向推力将显著降低水闸的稳定性,诱发严重的安全隐患^[6]。

江苏省沿海入海河口修建挡潮闸十分普遍。据统计,江苏省内仅中、大型挡潮闸(过闸流量 $\geq 100 \text{ m}^3/\text{s}$)便有58座,而苏北的入海河口几乎都修建了挡潮闸,例如黄沙港闸、射阳河闸、斗龙港闸、新洋港闸、王港闸等^[7]。但是,这58座挡潮闸中,有35%(20座)发生一般闸下淤积,26%(15座)发生严重闸下淤积,更有9%(5座)已经基本淤死^[5]。可见,江苏省内,尤其是苏北地区,沿海挡潮闸泥沙闸下淤积问题不仅极为普遍,而且淤积程度较深。

目前,针对挡潮闸闸下淤积,主要有几种减淤方式:①扩大水源,引水冲淤;②控闸放水冲淤;③纳潮冲淤;④机械清淤。其中,纳潮冲淤已被证实是解决河口水力冲淤水源不足的有效方法^[8]。该方法在涨潮期间打开闸门,纳入下游潮水,当水位涨至高潮位后关闭闸门;待水位降至低潮位后再打开闸门,对下游河道进行冲刷^[9],如图1所示。针对江苏盐城大丰境内王港闸闸下淤积问题,施春香^[5]提出若干纳潮冲淤方案并利用二维泥沙数学模型对方案的可行性进行了研究,发现纳潮冲淤可以有效缓解王港闸下游河道泥沙淤积问题。纳潮冲淤在国外也有成功案例。为解决爱德河诺德费尔德闸下淤积问题,德国在闸下34 km处修建爱德河闸,并采用纳潮冲淤措施成功减淤^[10]。前人的研究重点关注纳潮冲淤的运行方式,发现闸门调度方式尤为重要,对减淤效果有着显著影响,需要因地制宜地优化闸门调度方式^[10]。目前,缺乏针对苏北沿海地区

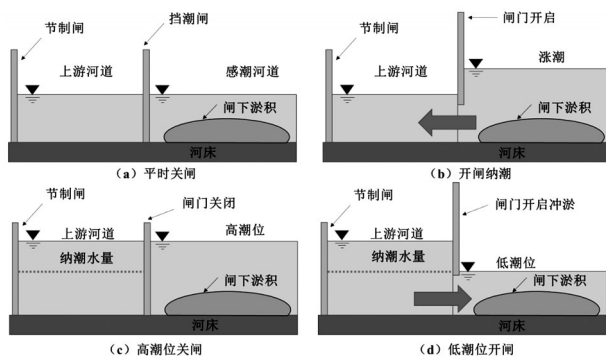


图2 纳潮冲淤示意

的基于挡潮闸调度的最优纳潮冲淤方式相关研究。

灌河是苏北地区唯一一条没有在干流上建闸的天然入海潮汐河道。因此,本研究选取灌河为研究对象,采用数值模拟手段,探究闸门建设位置与闸门调度方案对闸下减淤效果的影响,旨在为同类型的冲淤问题提供参考。

2 研究区域与模型构建

2.1 研究区域

本研究中的经纬度坐标系选用WGS84坐标系,投影坐标系统选择北京1954投影坐标系统,中央经线为东经120°经线(EPSSG:2437),基准面为当地平均海平面。波浪和潮流泥沙数学模型南起废黄河口附近,北至日照市,灌河上游至盐灌船闸,口外海域到-20 m等深线以外。网格采用非结构化三角形单元网格,计算节点16 147个,网格单元30 931个,在灌河河口处网格局部加密。地形数据由前人研究给出^[11],并根据坐标进行插值。模型区域及网格划分如图2所示。

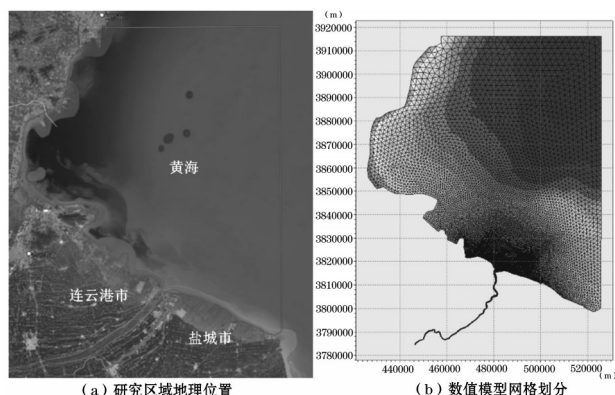


图2 研究区域位置及网格划分

2.2 控制方程

本研究采用MIKE 21构建灌河河口的水动力模

型,使用到的模块包括水动力模块和(HD)和黏性泥沙模块(MT)。

根据三维不可压缩流体雷诺时均N-S方程建立水动力模型,分别对连续性方程和动量方程在深度为 $h=\eta+d$ 的范围内进行积分,可以得到二维的浅水方程。连续方程和动量方程分别表示为

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial [(h+\zeta)\bar{u}]}{\partial x} + \frac{\partial [(h+\zeta)\bar{v}]}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + v \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = fv - g \frac{\partial \zeta}{\partial x} - \frac{\tau_{bx}}{\rho(h+\zeta)} + E_x \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) - \frac{1}{\rho h} \left(\frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{xy}}{\partial y} \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -fu - g \frac{\partial \zeta}{\partial y} - \frac{\tau_{by}}{\rho(h+\zeta)} + E_y \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - \frac{1}{\rho h} \left(\frac{\partial S_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{yy}}{\partial y} \right) \quad (3)$$

式中: t 为时间; ζ 为潮位值(相对于坐标基准面); h 为平均水深; η 为自由水面高程; d 为静水深度; x, y 为平面直角坐标系的坐标; \bar{u}, \bar{v} 分别为 x, y 方向上的垂线平均速度; g 为重力加速度; ρ 为流体密度; f 为科氏参数($f=2\omega \sin \theta$, ω 为地球旋转角速度; θ 为纬度); E_x 和 E_y 分别为 x 和 y 方向的水平紊动黏性系数; τ_x 和 τ_y 为波流共同作用下在 x 和 y 方向床面剪切应力的分量; S_{xx}, S_{xy} 和 S_{yy} 分别为波浪辐射切应力各方向的分量。水动力方程不考虑源汇项影响。

黏性泥沙的运动通过对流-扩散方程进行描述:

$$\frac{\partial \bar{c}}{\partial t} + u \frac{\partial \bar{c}}{\partial x} + v \frac{\partial \bar{c}}{\partial y} = \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial x} \left(h D_x \frac{\partial \bar{c}}{\partial x} \right) + \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial y} \left(h D_y \frac{\partial \bar{c}}{\partial y} \right) + Q_L C_L \frac{1}{h} - S \quad (4)$$

式中: \bar{c} 为垂线平均含沙量; D_x, D_y 分别为 x, y 方向上的悬浮泥沙扩散系数; S 为床沙侵蚀或淤积速率; Q_L 为泥沙输入源的流量; C_L 为泥沙输入源的含沙量。

2.3 边界条件与模拟参数

二维潮流水动力数学模型通常采用开边界(水边)和闭边界(岸边)两种边界条件。对于外海开边界,采用潮位(水位)过程进行控制:

$$\zeta_b = \zeta(x, y, t) \quad (5)$$

式中: ζ_b 为边界上的控制水位; $\zeta(x, y, t)$ 为 MIKE 21 结合全球潮位数据,根据给定坐标和时间生成的潮位。外海开边界的控制坐标位置为:东经 119°32'03", 北纬 35°22'22"和东经 120°17'02", 北纬 35°22'25"以及东经 120°16'45", 北纬 34°19'46"。外海开边界上给定潮位 ζ_b 。对于闭边界,取边界上法向流速为零。为了简化模型,本研究中将除潮位开边界处均

设置为闭边界,即陆地边界。模型的初始水位和流速均设置为零。初始含沙场取浓度为 0 kg/m³。水位开边界处给定固定流入含沙量 0.2 kg/m³;闭边界处取泥沙的法向通量为零。

水域糙率是影响计算结果的关键因素,经过参数率定,糙率 n 的取值范围为 0.02~0.05,根据水深进行线性插值。模型在预模拟期间选取时间步长为 1 h,在模拟纳潮冲淤期间设置时间步长为 30 s。

在模型中,将河床视为两层模型:上层为可动泥,下层为固结泥。可动泥层的干容重取值为 180 kg/m³,临界冲刷切应力 τ_{ce} 取值一般为 0.05~0.1 N/m²;固结泥层的干容重取值为 600 kg/m³,临界冲刷切应力 τ_{ce} 取值一般为 0.2~2 N/m²。本研究中考考虑的闸下淤积主要指固结泥层的淤积厚度。

2.4 模拟工况设置

考虑到灌河口干流上实际未建设挡潮闸,本研究通过 MIKE 21 潮流数学模型生成灌河河口 2030 年的模拟潮位。模拟在假想位置建立挡潮闸后且闸门关闭情况下,2030 年 1 月 1 日至 2030 年 7 月 1 日的挡潮闸闸下淤积情况;以 2030 年 7 月 1 日至 2030 年 8 月 1 日的模拟潮位,计算潮流冲淤方案和纳潮冲淤方案的冲淤效果。潮流冲淤方案指在冲淤期间挡潮闸全开,潮水自由进出河道进行冲淤;纳潮冲淤指挡潮闸的启闭通过闸下水位 h_c 进行控制,在涨潮过程中,当闸下水位超过预设控制水位,即 $h_c > h_{c1}$ 时,闸门关闭;在落潮过程中,当闸下水位低于预设控制水位,即 $h_c < h_{c1}$ 时,闸门开启,利用人工制造的水位差进行冲淤。具体工况设置如表 1 所示。

表 1 工况设置

组别	工况序号	闸门位置	水位差 $\Delta h / m$	关闸潮位 h_{c1} / m	开闸潮位 h_{c2} / m
潮流冲淤	1	1			
	2	2			
	3			0.8	-0.8
	4		1.6	0.6	-1.0
	5			1.0	-1.0
纳潮冲淤	6	1		1.2	-1.2
	7		2.4	1.0	-1.4
	8			1.4	-1.0
	9			0.8	-0.8
	10		1.6	0.6	-1.0
	11			1.0	-0.6
	12	2		1.2	-1.2
	13		2.4	1.0	-1.4
	14			1.4	-1.0

由于不同的引河长度对闸下水动力条件和泥沙淤积情况会产生不同的影响。因此,本项目在灌河河口处选取两处不同的位置建立挡潮闸,并模拟分析两种不同建闸情况下的淤积以及冲淤特点。建闸位置上下游布置水位测点控制闸门启闭,布置观测点 M1、M2、M3 监测冲刷深度。闸门位置如图3所示。

2.5 模型水动力验证

根据历史实测数据^[11],利用2004年6月4—5日大潮和8—9日中潮实测潮位、流速水文数据对所建模型进行参数率定。潮位观测资料包括燕尾港、开山岛、陈家港、响水4个测站在内的大潮、中潮潮位信息。潮位比对结果与实测数据整体误差小于10%,证明数值模拟结果整体可信。

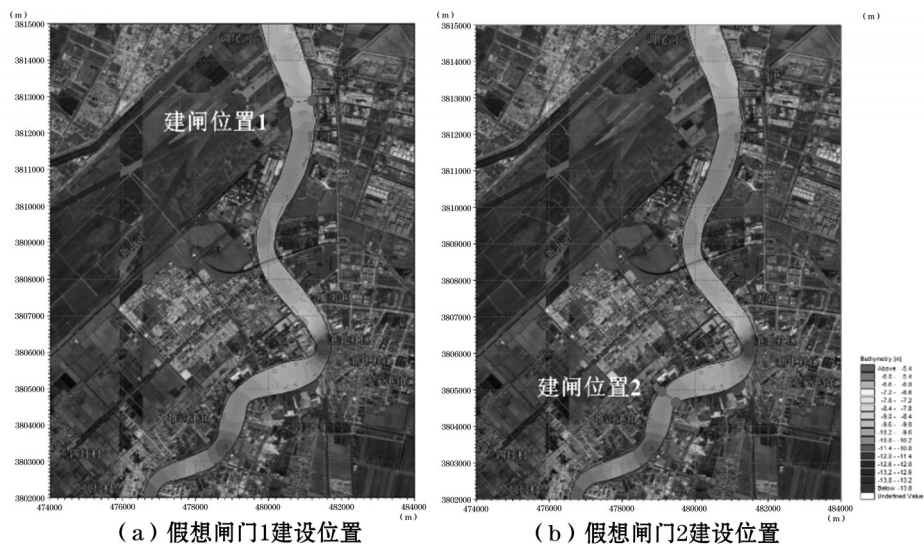


图3 假想闸门建设位置示意

3 模拟结果与分析

3.1 冲淤深度分析

本研究利用灌河河口二维潮流、泥沙数值模型计算出了闸门调度后的底部泥沙淤积变化量。针对不同的建闸位置,设置3组不同的控制水位差,探

究不同控制水位差对闸下冲淤的影响;在同一组水位差下,考虑闸门根据控制水位对称开启与不对称开启的工况,设置3组不同的闸门启闭控制水位,比较不同调度方式对于闸下冲淤效果的影响。

在建闸位置1,闸下引河长度较短,闸门处受河口水动力影响较强。床底淤积变化量云图如图4所示,

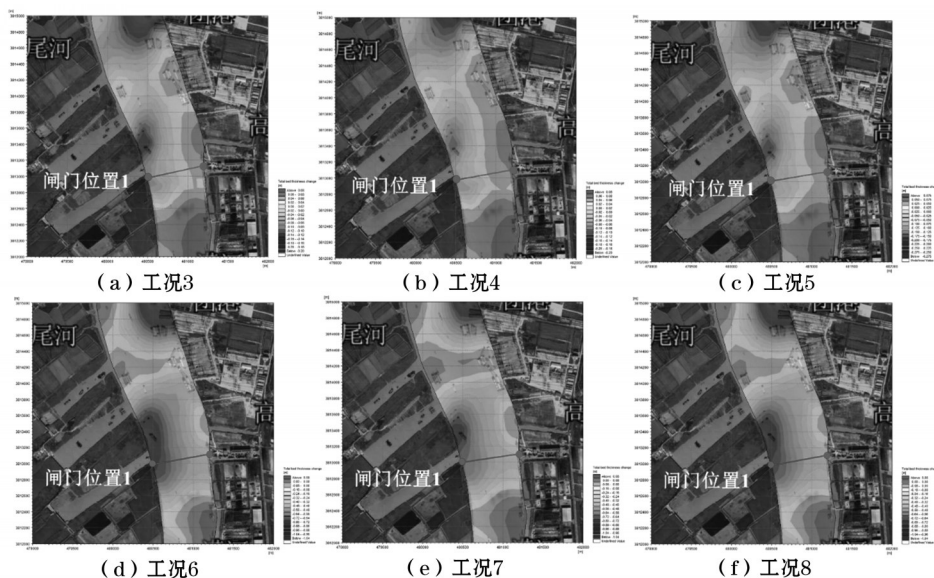


图4 建闸位置1冲淤后淤积变化量云图

床底各测点淤积变化量大小如图5所示。图中正值表示淤积量减少,负值表示淤积量增加。可以发现,在控制水位差为1.6 m的情况下调度闸门进行冲淤效果并不理想。除在工况5中测点M1的泥沙淤积量下降速度快于无调度工况1外,其余工况该测点的冲淤效果甚至不及无调度工况;测点M2和测点M3的泥沙淤积速度甚至超过了无调度工况。当控制水位差设置为2.4 m时,减淤效果相比1.6 m的控制水位有了大幅度的提高,测点M1的最大冲淤深度可达0.90 m。对于同样的测点来说,不同控制水位差与不同调度方式的组合也会对减淤结果产生显著的影响。在控制水位差为1.6 m时,高水位关闸、开闸的工况5能够取得优于工况3和4的冲淤效果;而在控制水位差为2.4 m时,对称启闭闸门的工况6的冲淤效果优于非对称启闭的工况7和8。这说明即使在同一调度方式下,由于受到不同的潮汐动力的影响,冲淤的效果也会有所不同。

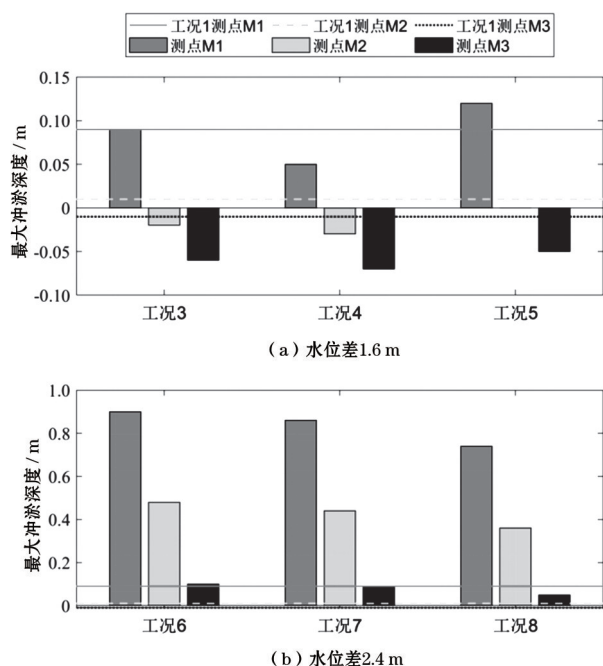


图5 建闸位置1各测点最大冲淤深度

需要说明的是,尽管在2.4 m的控制水位差下闸下的冲淤效果得到了大幅度的提升,但是如图4所示,闸上仍然产生了一定程度的淤积,这与控制水位差为1.6 m时的情况相同。因此要在进行纳潮冲淤时需要注意是否有可能导致闸上的淤积程度加重。

在建闸位置2,闸下引河长度较长,闸门处受河口水动力影响较弱,闸下的淤积与冲淤会表现出与建闸位置1不同的特性。床底各测点淤积变化量大

小如图6所示,床底淤积变化量云图如图7所示。从图7可见,控制水位差为1.6 m条件下的3种工况下闸上和闸下均产生了较为明显的淤积,如图7(a)~(c)所示,冲淤效果非常不理想。当控制水位差增加到2.4 m后,闸门上下游附近的冲淤效果较好,发现产生了较为明显的冲刷;但是距离挡潮闸一段距离处仍然发生了淤积,如图7(d)~(f)所示。由于在该条件下的监测点均布置于距离闸门一段距离处,因此工况9~14中测点的最大冲淤深度均为负值,即表现为淤积。从图5的结果中可以发现,调度挡潮闸进行纳潮冲淤工况产生的淤积厚度甚至大于了闸门全开时的工况2。这说明,当下游为长引河时,纳潮冲淤的效果会被大幅度限制,甚至在距离闸门较远的位置产生更严重的淤积。

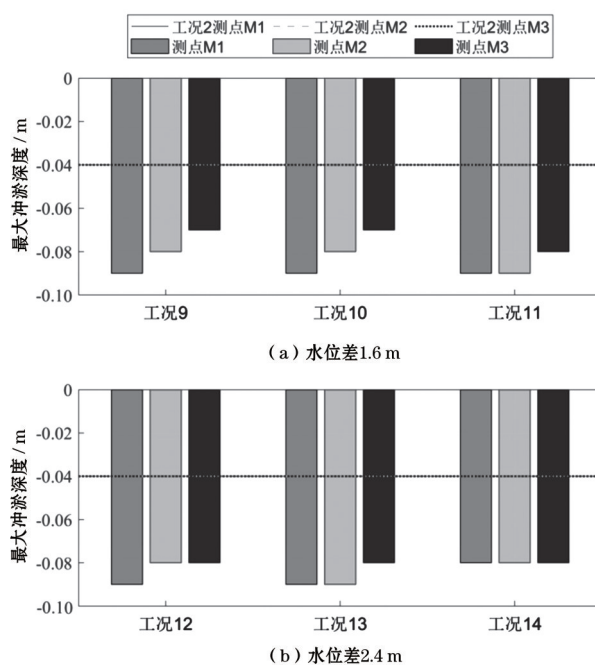


图6 建闸位置2各测点最大冲淤深度

3.2 床底切应力与冲淤效果的关系

床底的切应力 τ 是影响冲淤效果的关键因素。当切应力 τ 值小于临界冲刷切应力 τ_{ce} 时,固结泥并不会启动。因此 $\tau - \tau_{ce} > 0$ 的部分才是能够冲刷淤积的有效切应力。

床底有效切应力大小的时均值与和标准差与最大冲淤深度整体呈正相关关系。标准差越大,说明有效切应力的波动范围大,只有能够产生更大的上下游水位差时,才进行闸门启闭冲淤。如在控制水位差为1.6 m时,建闸位置1的工况3、4、5中,测点M1的有效切应力时均值分别为0.08 N/m²、0.06 N/m²和0.10 N/m²,标准差分别为0.19 N/m²、

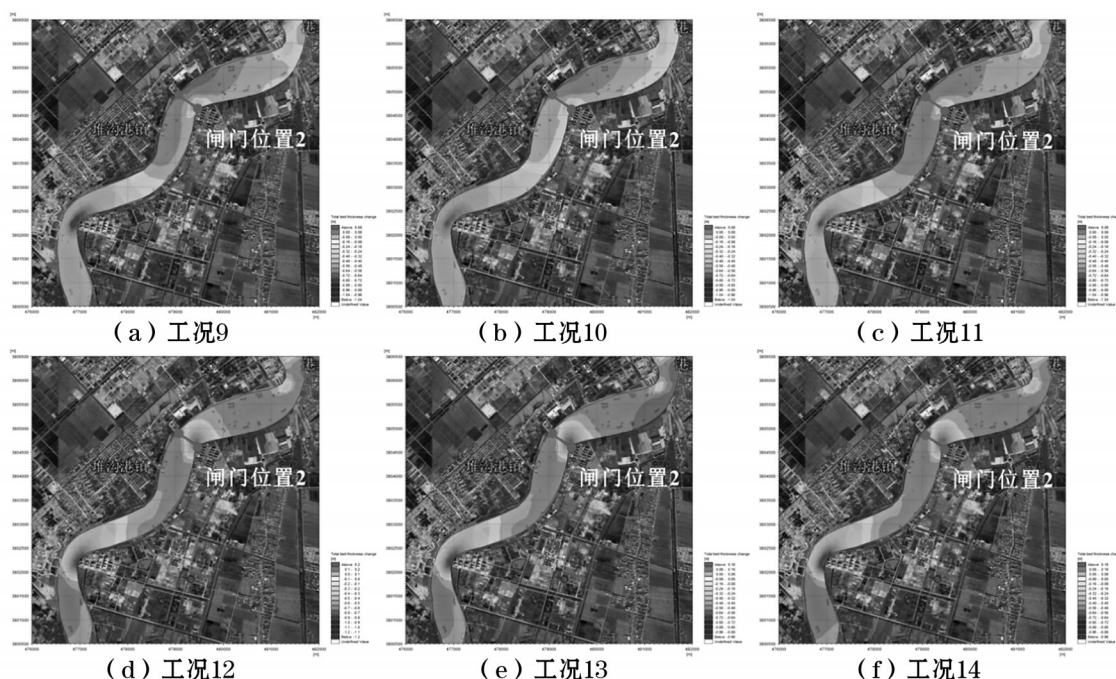


图7 建闸位置2冲淤后淤积变化量云图

0.16 N/m²、0.21 N/m²,对应的最大冲淤深度分别为0.09 m、0.05 m、0.12 m;当控制水位差提高到2.4 m后的工况6、7、8中,对应测点的有效切应力时均值分别为0.09 N/m²、0.08 N/m²、0.08 N/m²,变化不大,但标准差分别提高至0.27 N/m²、0.25 N/m²、0.26 N/m²,测点的最大冲淤深度提高至0.90 m、0.86 m、0.74 m,冲淤效果有了大幅度提高;而在建闸位置2的工况9、10、11中,各测点的有效切应力时均值均为零,底部淤积并不会启动,因此对应的测点处的淤积厚度增加。但是这三者并非简单的线性关系,不同的闸门调度方式对泥沙淤积的影响也会有所不同,为了追求更大的冲淤水位差而长期关闭闸门可能会导致淤积。

4 结 论

本研究在灌河河口设置假想挡潮闸,分析了不同建闸位置、启闭时的上下游水位差和调度方式对冲淤效果的影响,得出以下主要结论:①闸门建设位置对于闸底淤积特性以及冲淤效果有决定性影响:闸下引河长度较短时,闸门处水动力条件受潮流影响较大,冲淤效果更好;②提升床底切应力是保证冲淤效果的关键,大潮期间利用闸门调度制造更高的上下游水位差进行冲淤会更加经济,效果也更优;③纳潮冲淤有导致河道上游进一步淤积的风险。因此建议纳潮冲淤时要结合闸门建设位置、潮流过程以及泥沙特性具体分析调度方案,且建议辅

助采用多种清淤手段同时清淤。

参考文献:

- [1] 王向明,张新周,窦希萍,等. 入海河口闸下淤积机理及模拟技术研究进展[J]. 水利水运工程学报, 2013(2): 87-92.
- [2] 徐雪松,窦希萍,陈星,等. 建闸河口闸下淤积问题研究综述[J]. 水运工程, 2012(1): 116-121.
- [3] 陈静. 射阳河口挡潮闸闸下淤积分析与治理开发研究[D]. 南京:南京水利科学研究院, 2007.
- [4] 高祥宇,窦希萍,朱明成. 入海河口闸下河道泥沙淤积危害评估研究[J]. 海洋工程, 2013, 31(5): 55-61.
- [5] 施春香. 挡潮闸下游河道淤积原因分析及冲淤保港措施研究——以王港闸为例[D]. 南京:河海大学, 2006.
- [6] 郑华美,王均明. 苏北沿海挡潮闸闸下水道淤积的因素和影响机制分析[J]. 盐城工学院学报(自然科学版), 2005(3): 73-76.
- [7] 丛新,朱文谨,巩妮娜,等. 近海挡潮闸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.
- [8] 张媛媛. 泥质河口纳潮冲淤及拖淤效果分析[J]. 河北水利, 2007(11): 22.
- [9] 梁慧迪,匡翠萍,顾杰,等. 双龙河挡潮闸调度方案与闸下河道冲刷效果[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2016, 49(12): 1282-1289.
- [10] DUDLEY R W. Riverbed-sediment mapping in the Edwards Dam Impoundment on the Kennebec River, Maine, by use of geophysical techniques[M]. US Geological Survey, 1999.
- [11] 曹昊. 灌河口整治开发潮流泥沙数值模拟研究[D]. 南京:河海大学, 2015.