



# 崇明岛4座水闸外移工程水沙数学模型 \*

万远扬，王巍

(上海河口海岸科学研究中心，上海 201201)

**摘要：**受地理位置、水文气象、地形地貌等因素影响，崇明岛洪涝灾害频发，特别是中北部排水出口缺少且规模偏小，不满足暴雨期间排涝的要求。为科学评估崇明岛堡镇港北闸、四滧港北闸、六滧港北闸和八滧港北闸4座水闸外移工程对本区域水沙动力条件的影响，开展水沙数学模型研究工作。结合近年来该区域实测水文泥沙资料，分析该河段水文、泥沙特性及河势演变特征，研究工程河段水沙运动特性。建立工程河段三维水沙盐数学模型，在模型率定及验证的基础上，利用该模型对北支下段崇明岛北沿防汛除涝工程平面方案的实施效果进行模拟计算。结果表明：工程实施后对周边水域的水流条件以及周边水域及北支水道主槽的河床演变基本无影响。研究成果可为工程建设提供技术支撑。

**关键词：**长江口；北支；数学模型；工程效果

中图分类号：U 641

文献标志码：A

文章编号：1002-4972(2021)09-0120-06

## Numerical model on four sluices outward relocation project of Chongming Island

WAN Yuan-yang, WANG Wei

(Shanghai Estuarine and Coastal Science Research Center, Shanghai 201201, China)

**Abstract:** Affected by the geographical location, hydrometeorology, topography and geomorphology, flood disasters occur frequently in Chongming Island of Shanghai. Especially, due to the lack of drainage outlets in the north and central part of the island, it cannot meet the requirements of drainage during the rainstorm. To scientifically evaluate the influence of the four sluices outward relocation project of Chongming Island on the dynamic conditions of water and sediment in this area, we carry out numerical modeling of hydrodynamics and morphology. Combined with the measured hydrological and sediment data in this area in recent years, we analyze the characteristics of hydrology, sediment, and river regime evolution in this reach, and study the characteristics of water and sediment movement in the engineering reach. Meanwhile, we establish a three-dimensional numerical model of water, and sediment in the engineering reach to simulate and calculate the implementation effect of the plane scheme of flood control and de-watering project along the north side of Chongming Island in the lower section of the North Branch based on model calibration and verification. The results show that the implementation of the project has little influence on the flow condition of the surrounding water areas and the bed evolution of the surrounding water area and the North Branch channel. This study provides technical support for engineering construction.

**Keywords:** the Yangtze Estuary; North Branch; numerical model; engineering effect

## 1 工程概况

2016年底上海市政府审议通过的《崇明世界级生态岛发展“十三五”规划》提出，到2020年，

崇明将形成现代化生态岛基本框架。崇明岛作为世界级生态岛的核心载体，迎来高标准、高质量的快速发展期，崇明岛防洪减灾面临更高的要求。

收稿日期：2020-12-31

\*基金项目：国家重点研发计划项目(2017YFC0405403)

作者简介：万远扬(1981—)，男，副研究员，从事河口海岸工程研究。

根据2016年堡镇港北闸、六激港北闸和八激港北闸3座水闸的安全鉴定成果, 堡镇港北闸、六激港北闸为四类水闸, 工程存在严重的安全问题, 需降低标准运用或报废重建; 八激港北闸为三类水闸, 工程损坏严重, 经除险加固后才能正常运行<sup>[1]</sup>。

目前未达规划规模的水闸均分布于崇明岛北侧(图1), 这些水闸存在的安全及运行问题大大增加了崇明岛的排涝隐患。为从根本上解决崇明岛区域的除涝问题, 结合国务院2008年批准的

《长江口综合整治开发规划》, 拟对堡镇港北闸、六激港北闸和八激港北闸3座水闸外移重建<sup>[2]</sup>, 对四激港北闸按规划重建。上述拟实施工程目标效果的评价、工程对周边水域水文、河势、防洪排涝以及通航安全等影响的研究论证工作是该工程可行性研究中极为重要的一环。为科学评估崇明岛堡镇港北4座水闸外移工程对工程河段水沙动力条件的影响, 开展水沙数学模型研究, 为项目建设提供技术支撑。



图1 工程位置

## 2 自然条件

长江口北支是长江流入东海的第1级分汊的北汊, 上起崇明洲头, 下至连兴港, 河段长约90 km, 最窄处青龙港断面仅1.8 km, 最宽处连兴港断面为16 km, 总水域面积约534 km<sup>2</sup>。从河道地貌上看, 自青龙港往东河道拓宽, 至大新港河道收缩, 大新港以下河道渐渐展宽。在三条港以下, 河道深槽及涨落潮主流均偏向北侧; 在南侧, 受科氏力作用及涨潮流受新隆沙和黄瓜沙的阻挡, 呈逐年淤积态势。北支上口分泄长江径流比例仅在5%以下, 主要受涨潮流动力控制。受北支喇叭状平面形态、上口狭窄等影响, 北支涨潮潮波极易产生较大变形, 引起北支水沙盐向南支倒灌,

进而影响北支口门及白茆沙北水道进口段的淤积。近年来随着上游来沙量减小、北支围垦、北支中下段河道缩窄等因素影响, 北支水沙倒灌的强度已有所减弱(北支河段属喇叭形涨潮槽河口)。

北支河段潮汐性质属非正规半日浅海潮。潮位每天两涨两落, 潮汐日不等现象明显。一般涨潮历时约4 h, 落潮历时约8 h, 一涨一落平均历时约12 h 25 min。

根据2016年3月北支实测水文资料, 北支大潮涨潮平均流速基本大于落潮平均流速。2016年3月北支沿程含沙量分布见图2。含沙量高低与潮流动力相关, 涨潮动力较强, 大部分垂线涨潮平均含沙量高于落潮期。涨潮最大含沙量为4.37 kg/m<sup>3</sup>,

落潮最大含沙量为  $3.18 \text{ kg/m}^3$ 。

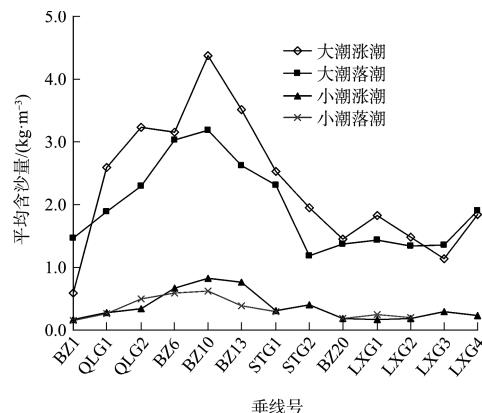


图 2 2016 年 3 月北支沿程涨、落潮平均含沙量分布

根据泥沙颗粒分析成果得知, 北支河段悬沙主要由黏粒和粉砂组成, 中值粒径在  $0.005\sim0.0234 \text{ mm}$ ; 河床质主要由粉砂和砂粒组成, 中值粒径在  $0.008\sim0.154 \text{ mm}$ 。

2010 年以来, 北支的河床冲淤变化大体如下几个阶段: 1) 2010—2013 年, 北支上段(青龙港以上)淤积, 左岸有大范围的暗沙发育, 青龙港断面深槽明显南移刷深; 中段新村沙水域因河道整治工程实施, 过流断面缩窄, 基本处于冲刷状态(冲幅大多在  $1.0 \text{ m}$  以上); 北支下段整体呈南侧边滩淤积、北侧主槽北冲态势。2) 2013—2016 年, 北支上段主槽整体微冲; 中段新村沙水域由冲刷转为淤积; 北支下段整体呈淤积态势。3) 2016—2018 年, 北支中上段主槽整体微冲; 下段继续呈滩淤槽冲态势。

总的来看, 2010—2018 年, 北支深槽紧贴北岸的微弯河型基本稳定, 局部冲淤变化较为明显的是: 北支上段青龙港处由于暗沙发育, 使得  $-5 \text{ m}$  主槽南移, 且大新河附近凸岸明显淤积, 凹岸主槽冲刷明显; 北支中段河道缩窄后, 束流作用明显, 以微冲为主; 北支下段南侧边滩淤积明显, 淤积幅度普遍在  $2.0 \text{ m}$  左右,  $-2 \text{ m}$  等深线明显内推, 主槽整体冲淤变化不大, 幅度基本在  $1.0 \text{ m}$  以下, 较为稳定(图 3)。从航道开发治理及河势控制角度看, 北支中下段河道的进一步缩窄尤其崇明北沿浅滩促淤围垦工程的实施, 可促进北支北岸深槽的稳定和发展, 从而有利于稳定北

支河势和改善航道开发条件。

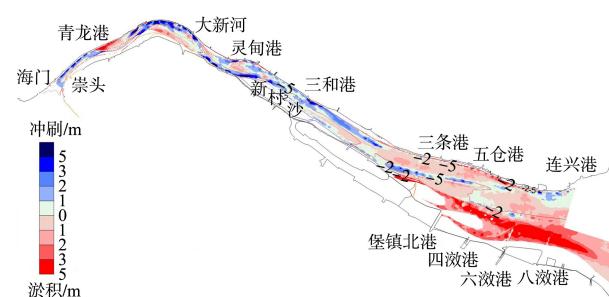


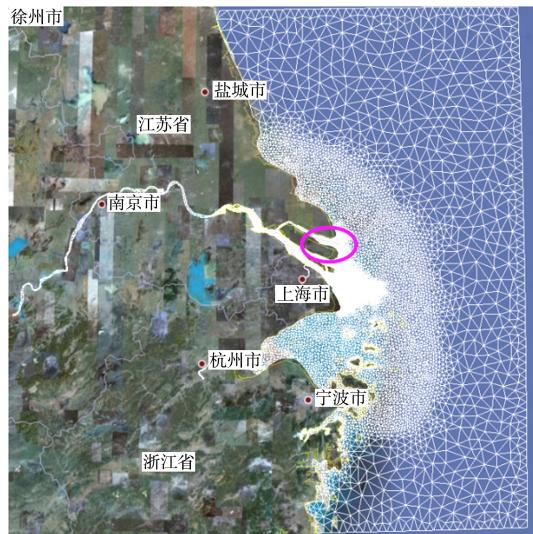
图 3 2010—2018 年长江口北支河段冲淤变化

### 3 数学模型

采用长江口航道维护管理核心计算系统 SWEM2D/3D 中的三维潮流泥沙模块进行数值模拟计算<sup>[3-4]</sup>。该模型具有以下特点: 1) 应用无结构化混合计算网格(三角形+四边形), 使计算域能更好地模拟长江口复杂的岸线。整体模型上游边界可以直接延伸到长江口的枯季潮区界(潮差为 0)大通。2) 采用有限体积法作为离散格式的基础, 比有限差分法更贴近物理量守恒定律, 使计算的总体精度能够得到有效保证。3) 采用半隐半显格式<sup>[5-6]</sup>, 计算稳定性好。同时克服 ADI 计算格式中不能考虑不同方向流动之间相互作用的不足, 且采用变时间步长计算, 计算效率有所提高。4) 计算基于 Linux 系统, 与 Windows 系统相比, Linux 系统能较好地兼顾模型的计算精度(最小网格尺度)和计算效率。5) 经过多次专业应用于长江口的动态率定和验证, 且和商业软件 MIKE 21/3 及 Delft 3D 的对照, 模拟结果与长江口实测数据相似性良好, 并已成功应用于长江口多项工程的科研咨询。

数值计算网格如图 4 所示, 计算范围西起上游的大通, 东至外海  $-40 \text{ m}$  等深线, 北边界接近渤海湾, 南边界包括杭州湾整个区域, 其中东西向的长度约  $600 \text{ km}$ , 南北向的宽度约  $600 \text{ km}$ 。采用无结构化计算网格覆盖整个计算域, 且计算网格完全贴合工程建筑物的形状及走向, 并且对北支中下段局部区域加密, 最小网格间距约为  $10 \text{ m}$ , 网格单元总数为 84 773 个。

上游进口给定实测大通流量; 模型下游边界由 16 个分潮的天文潮波调和常数和余水位给定。



注:圆圈所示为网格加密区。

图4 模型范围及计算网格

#### 4 计算结果分析

兼顾考虑其它专题研究成果、生态红线以及与《长江口综合整治开发规划》等的关系,前期各专题研究已基本确认了本工程的推荐方案,见图5。1)新建堡镇港北闸、四滧港北闸、六滧港北闸和八滧港北闸等4座水闸,各闸位于现有一线海塘前沿附近;2)新闸闸外导堤建设:新建水闸外侧建设导堤,堡镇港北闸、四滧港北闸、六滧

港北闸和八滧港北闸长度分别约为490、2180、820和290 m;3)水闸配套衔接段大堤建设:按照主海塘标准进行,与现有一线海塘(或拟达标主海塘)衔接;4)新闸闸内河道延伸:外延河道断面、底高程等特征参数与《崇明岛域水利规划修编(2011年)》一致;5)闸外排水通道疏浚:底宽、底高程与相应闸内河道相同,河道边坡按照边坡稳定要求设为1:5。

数学模型计算基于前期研究、已率定的模型参数和前期论证,首先采用潮流数学模型研究推荐方案对水动力的影响,重点关注对北支潮位、潮量以及对流速的影响;在此基础上通过大范围泥沙数学模型,分析方案实施后周边冲淤的变化,并对由于冲淤变化引起的生态环境影响进行定量分析。

采用2002年9月大潮期水文条件计算。北支采用2016年地形,工程区采用2018年地形。现状本底工况包括新农村整治工程、北支灵甸港整治工程、戤效港—连兴港整治工程、圆陀角整治工程、崇明北沿二期一阶段围垦工程、互花米草控制工程及鸟类栖息地优化工程等已实施的工程。

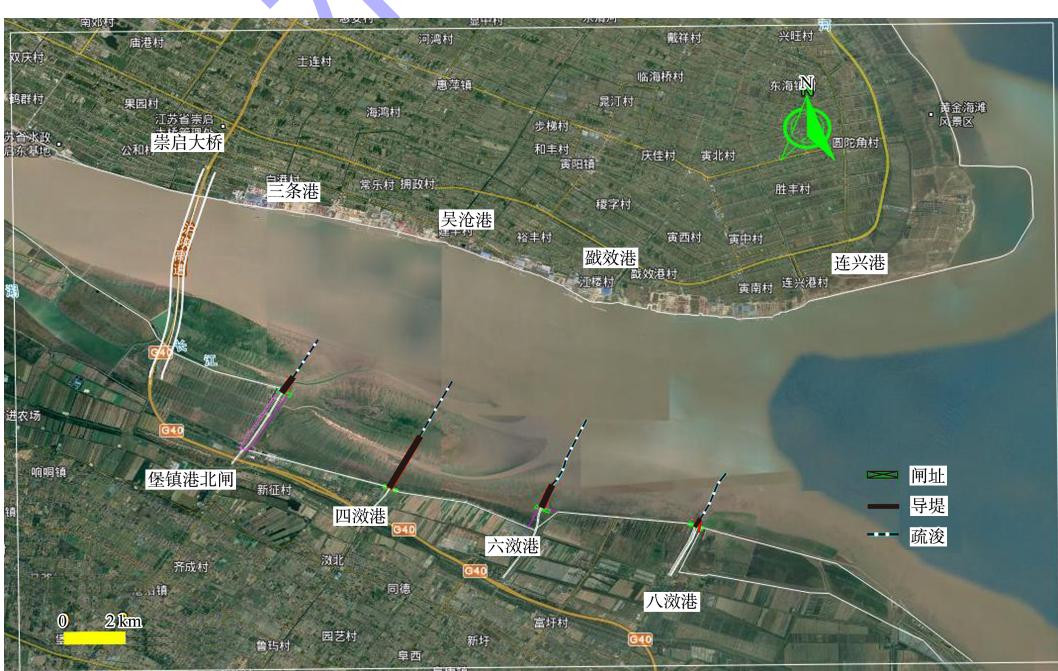


图5 推荐方案布置

#### 4.1 潮位变化

工程实施前后周边主要潮位站高低潮位见

表 1。从表 1 可知，工程实施后及运营期的潮位与工程实施前相同，潮位无变化。

表 1 工程实施前后及运营期潮位变化

测站	高高潮位/m			低低潮位/m		
	工程实施前	工程实施后	工程运营期 (最大排水工况)	工程实施前	工程实施后	工程运营期 (最大排水工况)
崇头	4.09	4.09	4.09	1.48	1.48	1.48
青龙港	4.17	4.17	4.17	1.27	1.27	1.27
灵甸港	4.25	4.25	4.25	0.77	0.77	0.77
三条港	4.03	4.03	4.03	0.44	0.44	0.44
连兴港	3.89	3.89	3.89	0.48	0.48	0.48

#### 4.2 潮量变化

工程实施前后周边主要通江口门涨落潮量的变化如表 2 所示。从表 2 可知：工程实施后，北

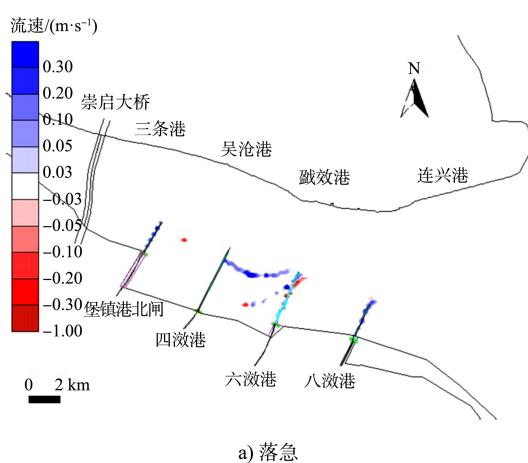
支下段涨落潮量略有增加，最大增加幅度不超过 0.4%，北支中上段涨落潮量微弱减小，减小幅度在 0.08% 以内。北支进口处涨落潮量略有增加。

表 2 工程实施前后涨落潮量变化

断面	落潮量			涨潮量			差异/%
	工程实施前/亿 m <sup>3</sup>	工程实施后/亿 m <sup>3</sup>	差异/%	工程实施前/亿 m <sup>3</sup>	工程实施后/亿 m <sup>3</sup>	差异/%	
南支	47.30	47.30	0.00	14.20	14.20	0.00	0.00
崇头	1.97	1.97	0.01	0.89	0.89	0.15	-0.08
青龙港	1.68	1.68	-0.08	1.03	1.03	0.00	-0.06
大新河	2.98	2.97	-0.06	2.06	2.06	0.00	-0.04
灵甸港	3.43	3.43	-0.03	2.82	2.82	0.00	-0.01
三和港	4.02	4.02	-0.01	3.49	3.49	0.00	-0.01
启东港	5.51	5.51	0.00	4.97	4.97	0.02	-0.02
三条港	6.58	6.58	0.01	6.22	6.22	0.03	-0.02
五仓港	8.15	8.16	0.17	7.80	7.82	0.19	-0.02
戤效港	9.75	9.77	0.26	9.48	9.51	0.30	-0.03
连兴港	12.30	12.30	0.32	12.10	12.10	0.37	-0.05

#### 4.3 流速变化

图 6 为工程实施后周边水域落急、涨急流速流向的变化分布。从图 6 可知：1) 工程实施后，北支水道主槽及对岸码头前沿水域涨落急流速基本无变化；2) 总体来说，工程实施后，流速测点的涨落急流速变化在 0~0.01 m/s 以内，对周边水域、北支水道主槽及启东一侧沿岸码头前沿的水流条件影响均较小。流速影响的主要区域在疏浚区附近及浅滩的串沟处。



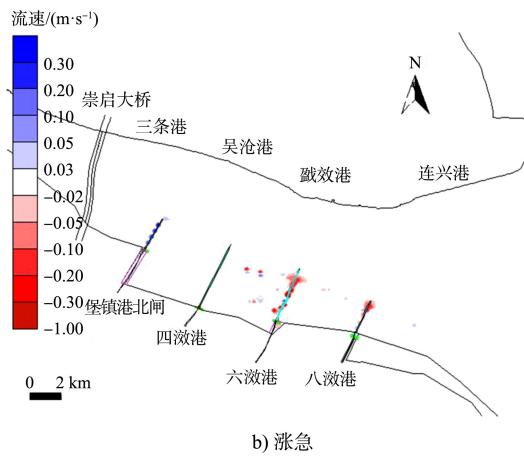


图6 推荐方案大潮涨、落急流速变化分布

#### 4.4 冲淤变化

泥沙模型计算的核心是对现状及方案实施后的淤积进行预测。预测的时间为工程后3 a，重点预测崇明北沿的淤积，包括崇明北沿等深线的变化、沙体形态的变化、涨潮槽的变化以及局部冲淤幅度的统计等。

在2018年地形基础上，崇明岛北沿4座水闸外移工程方案实施3 a后，淤积分布见图7，北支下段冲淤统计分区见图8，分区淤积量如表3所示。

天然情况下(无工程)，崇明北沿正好处于北支进口拦门沙段，含沙量高，动力弱，沙量丰富，因此淤积效果较好。I、II、III区平均淤积厚度依

次为20、30、18 cm。淤积后，I区前沿的沙包继续“长大长高”，与后方逐渐连接成片，且该区域地形大部分已接近高潮位。方案实施后，I、II、III区平均淤积厚度依次为26、29、18 cm，与天然情况基本接近。

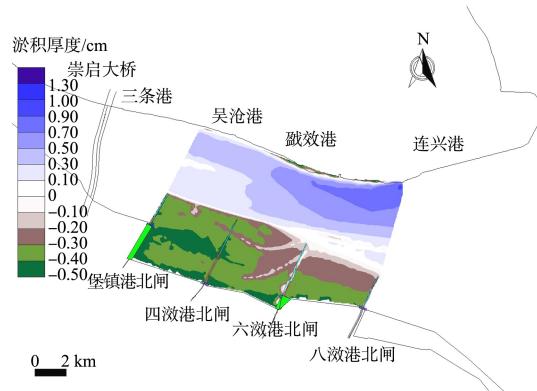


图7 推荐方案实施3 a后模型预测淤积效果



图8 北支下段冲淤分区

表3 实施3 a后淤积量分区

分区	面积/万m <sup>2</sup>	2018年平均高程/m	天然情况		方案实施后	
			淤积量/万m <sup>3</sup>	平均淤厚/m	淤积量/万m <sup>3</sup>	平均淤厚/m
I	2 200	-3.68	446	0.20	593	0.26
II	2 200	-2.87	659	0.30	638	0.29
III	1 470	-2.68	263	0.18	265	0.18
IV	6 900	4.14	4 290	0.62	4 140	0.60

#### 5 结语

1) 工程的实施对周边水域的水流条件和周边水域及北支水道主槽的河床演变基本无影响。

2) 推荐方案按规划实施，与规划的符合性较好，对对岸影响较小，能够达到减轻北支水沙盐

倒灌南支、减缓北支淤积萎缩速率、维持北支引排水功能等规划目标。

3) 鉴于北支水沙条件较为复杂，建议后期项目建成后加强监测，持续跟踪北支中下段相关工程进展及河势演变趋势。

(下转第166页)