

· 数模研究 ·



# 无结构潮流泥沙数学模型 在南通港通海港区总体规划中的应用\*

戚定满, 万远扬, 顾峰峰

(上海河口海岸科学研究中心, 上海 201201)

**摘要:** 采用长江口航道维护管理核心计算平台《SWEM2D/3D》对南通港通海港区总体规划方案进行了潮流场的数值模拟研究。研究表明港区工程实施后对于徐六泾河段而言, 是进一步加强了束流作用, 工程效应范围集中在束流段的上段及围堰线前沿约1.5 km处; 码头工程对苏通大桥主通航孔影响较小, 落潮主流走主通航孔的情况不会改变, 通航孔处流向基本无变化。规划港区码头工程对长江主航道、白茆沙水道、北支水道、新开沙夹槽、福山倒套等影响较围堰工程而言微小, 对航线安全和船舶安全使用航道不构成威胁。

**关键词:** 长江口; 南通港通海港区; 潮流泥沙数学模型

中图分类号: TV 148

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2013)11-0136-06

## Numerical modeling of tidal current and sediment on general planning scheme of Tonghai harbor area at Nantong port

QI Ding-man, WAN Yuan-yang, GU Feng-feng

(Shanghai Estuarine and Coastal Science Research Center, Shanghai 201210, China)

**Abstract:** 2-D tidal and sediment numerical model with triangular grids is set up to study the general planning scheme of Tonghai harbor area at Nantong port based on the Yangtze estuary waterway maintenance management platform "SWEM2D / 3D". According to the simulation results, the impacts of the general planning scheme on the nearby main waterways (main channel of Yangtze, Baimao channel, Beizhi channel, Xinkasha channel and Fushan channel) are analyzed. The numerical simulation result shows that current on the Xuliujing section is further strengthened after the implementation of the general planning scheme. The impact scope of the general planning scheme is about 1.5 km away from the harbor. The affect of wharf engineering to Sutong bridge is very small, and its main navigable hole will keep stable. The general planning scheme of Tonghai harbor area has little influence on the tidal force in the nearby main waterways, and the general planning scheme is feasible.

**Key words:** the Yangtze estuary; Tonghai harbor area at Nantong port; tidal and sediment numerical model

长江是我国第一大河, 全长6 300 km。长江以宜昌和湖口为界, 分别为上游、中游和下游。其中下游又以南京为界分为上下两段, 上段湖口至南京长434 km, 河道为典型的分汊河型, 平面

形态多呈藕节状; 江阴以下江面逐渐成喇叭状展宽, 在南通附近宽达18 km, 至口门处总宽度达90 km。通海港区位于澄通河段下段, 长江口入口位置, 南与徐六泾隔岸相对。通海港区河段的演

收稿日期: 2013-08-25

\*基金项目: 交通运输重大科技专项(2011328A0670); 国家自然科学基金面上项目(51279134); 交通运输部科技项目(2012329A0640)

作者简介: 戚定满(1972—), 男, 博士, 研究员, 从事港口航道工程研究。

变上受通洲沙水道、狼山沙水道和通洲沙、狼山沙、新开沙等洲滩水道演变的影响, 往下直接影响南北支分汉口和南支、北支河段的河势演变, 地理位置较为敏感。通海港区位置及河段规划治理工程见图1。历史上工程及邻近河段河势演变剧烈, 滩槽变化频繁。随着建国后长江岸线的逐渐固定, 该河段的稳定性有所增强, 近年来河势相对较为稳定。水利部长江水利委员会编制的《长江口综合整治开发规划要点报告(2004年修订)》和《长江中下游河道治理规划》, 规划了一系列的河势控制工程, 这些工程的陆续实施, 为本河段的河势稳定以及通海港区的开发利用提供了良好的条件。本文利用长江口航道维护管理核心计算平台《SWEM2D/3D》建立南通港通海港区潮流泥沙数学模型, 通过数学模型计算结果对不同规划方案的可行性及对工程河段的影响进行研究。

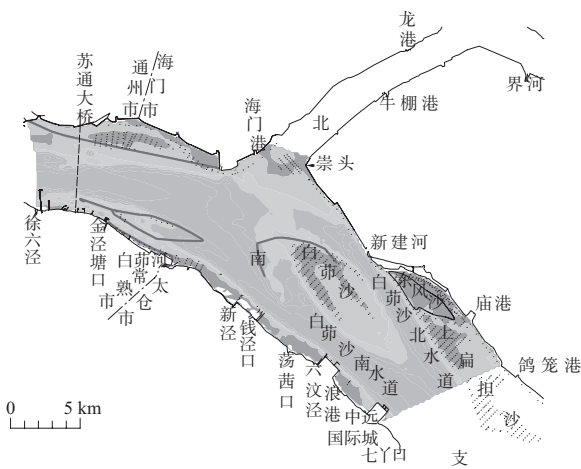


图1 通海港区位置及河段规划治理工程

### 1 南通通海港区的规划方案

新通海沙圈围方案见图2, 该方案采用的是水利部门提供的最终方案。通海港区规划码头方案见图3。其中码头前沿线布置在12 m等深线处, 离开圈围线约940 m, 走向基本和圈围线平行, 码头工程布置在苏通大桥下游<sup>[1]</sup>。

### 2 数学模型的建立

采用上海河口海岸科学研究中心自主开发的“长江口航道维护管理核心计算平台系统

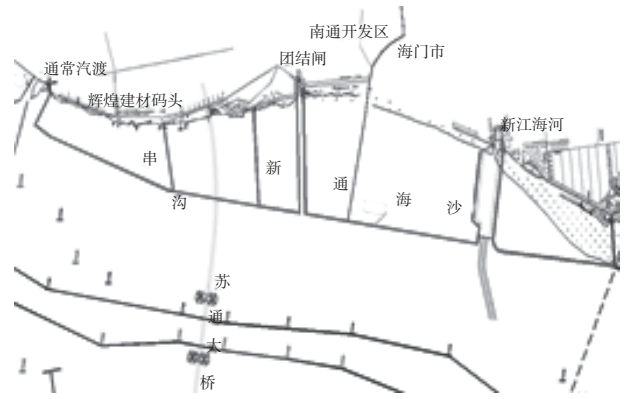


图2 新通海沙圈围方案

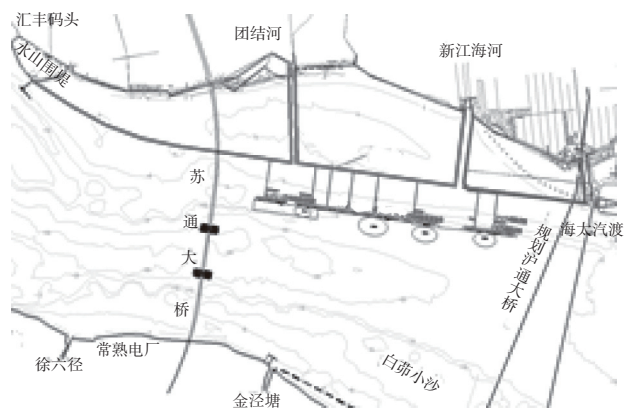


图3 通海港区规划码头方案

<SWEM2D/3D> (国家计算机软件著作权登记号: 2008SR33450)”中的平面二维潮流模块进行数值模拟计算。该模型利用无结构化计算网格, 能更好地模拟长江口复杂的岸线; 采用有限体积法作为离散格式的基础, 和有限差分法比具有物理量守恒等特点; 计算程序基于Linux系统, 较Windows系统而言计算效率高。已经应用于多项长江口工程, 较为成熟<sup>[2]</sup>。

#### 2.1 控制方程

水位控制方程

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{q} = 0 \quad (1)$$

动量方程

$$\frac{\partial \mathbf{q}}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{q} \times \mathbf{V}) = -gD\nabla \eta - \frac{g\mathbf{q}|\mathbf{q}|}{C^2 D^2} - 2\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{q} + \nabla \cdot [A_H(\nabla \mathbf{q} + \nabla^T \mathbf{q})] \quad (2)$$

式中:  $\eta$ 为水位值,  $D=H+\eta$ 为总水深;  $\mathbf{q}$ 为流量矢量,  $\mathbf{v} = \frac{\mathbf{q}}{D}$ 为流速;  $\boldsymbol{\Omega}$ 为地转速度, 描述地

球自转效应； $-2\Omega \times q \approx fq_y i - fq_x j$ ； $f$ 为Coriolis系数， $f=2\Omega \sin\theta$ ； $\theta$ 为地球纬度； $C$ 为Chezy系数，描述了床面摩阻效应， $C = \frac{D^{1/6}}{n}$ ； $n$ 为曼宁系数； $n = n_1 + \frac{n_2}{D}$ ， $n_1, n_2$ 通过两点线性插值得到； $A_H$ 为涡黏摩阻系数，本文采用基于SMAGORINSKY子网格模型的二维平面大涡模型。

$$A_H = c_s \Delta^2 \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + 0.5 \left( \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right]^{0.5} \quad (3)$$

式中： $C_s=0.01 \sim 0.2$ ； $\Delta=(da)^{1/2}$ ， $da$ 为网格控制体面积。

### 2.2 计算域及计算参数

数学模型的计算范围为：西起上游的长江口潮区界大通，东至六淤、长兴码头水文测站，北边界至连兴港的北侧，南边界包括南支、南港，覆盖江阴、徐六泾等在内的水域。其中东西向的长度大约320 km，南北向的宽度约为150 km，计算模型的网格采用无结构三角形网格，徐六泾至南支入口包括南通河段计算网格进行局部加密。模型共有网格66 338个，单元129 605个，最小网格间距为20 m左右。规划港区所在区域的局部网格见图4。规划中的通海港区工程的码头为高桩码头，对于桩群的当量糙率系数 $n_i$ 可通过下式进行计算：

$$n_i = \left( \frac{A'}{2g\Delta A} C_D H^{1/3} + n^2 \right)^{0.5} \quad (4)$$

式中： $A'$ 为单桩在垂直于水流方向上的投影面积； $C_D=C_d K_d N_d$ ； $C_d=2.0$ ； $K_d=0.5$ ； $N_d$ 为单元内的桩数； $H$ 为水深； $g=9.81 \text{ m/s}^2$ ； $\Delta A$ 为单元面积； $n$ 为河床糙率。

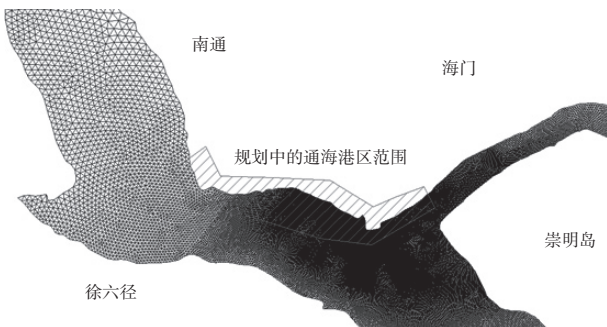


图4 规划港区前沿局部网格

### 2.3 模型验证

本次计算的二维潮流模型验证分为3个部分：潮位验证、测点流速验证、断面流速验证。

潮位的验证点包括：江阴、天生港、营船港、徐六泾、崇头、青龙港、石洞口。测点流速的验证分4组：第1组为2007年洪季大潮（8月15日—8月16日）流速流向验证，是长江口常规水文测验点；第2组为2007年洪季大潮（8月15日—8月16日）流速流向验证（苏通大桥附近，3<sup>#</sup>，4<sup>#</sup>，PT点；第3组为2007年枯季大潮（10月27日—28日）流速流向验证；第4组为2008年枯季大潮（3月8日—9日）流速流向验证；断面流速的验证是利用2007年10月海门电厂水文测验ADCP流速流向成果。泥沙模型的验证分为含沙量验证和2006—2007年局部冲淤地形验证。模型验证均符合《海岸与河口潮流泥沙模拟技术规程》的规定和要求<sup>[3-5]</sup>。

### 3 规划方案的影响分析

数模计算下边界给定2007年洪季大潮实测潮位过程线，上边界给出多年平均流量28 700 m<sup>3</sup>/s，图5和6分别给出了圈围方案与码头方案下的落急流速差值，图7和8为各自的流速矢量。可以看出，新通海沙圈围工程实施后，徐六泾近北岸段落急流速增加10~20 cm/s，主要增加区域在苏通大桥北侧；码头工程实施后，码头桩群区中下段落急流速减小50 cm/s，苏通大桥处落急流速略有增加，增加的范围和圈围工程差不多；码头工程的主要效应还是集中表现在码头工程建筑物附近。

为进一步研究工程方案实施后工程水域流场

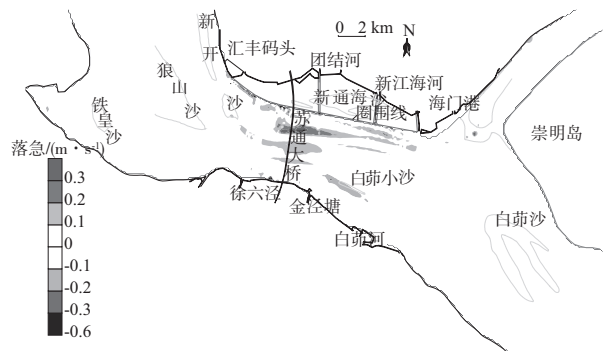


图5 圈围工程和本底工程落急差值

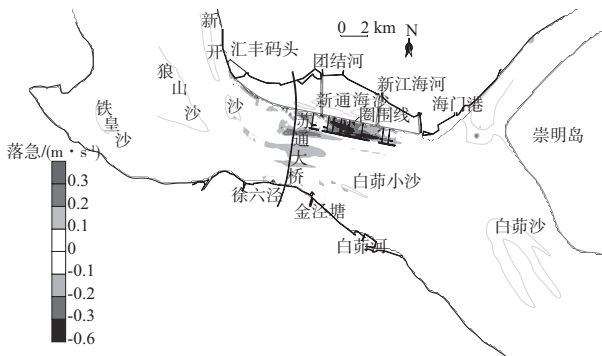


图6 码头工程和本底工程落急差值

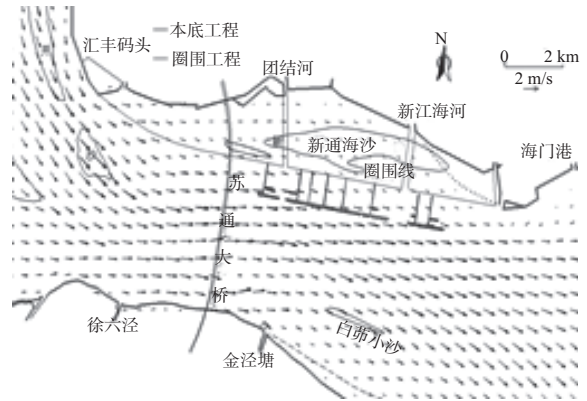


图8 码头工程和本底工程流速矢量

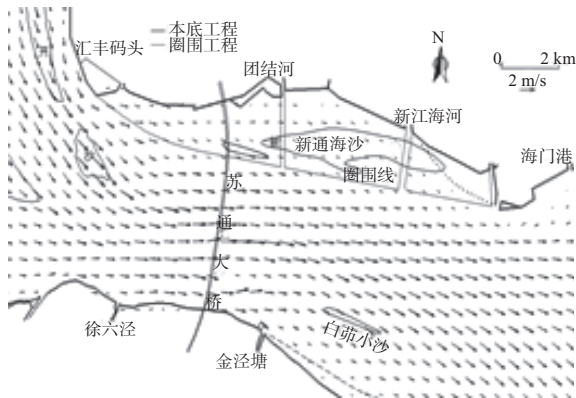


图7 圈围工程和本底工程流速矢量

的变化情况以及对长江主航道、苏通大桥、白茆沙水道、北支水道、新开沙夹槽、福山倒套等的影响, 特布置相应区域测点 (图9)。

### 3.1 苏通大桥的影响

苏通大桥主通航孔 (E1-E2): 主通航孔间涨落急流速为该河段主流区; 圈围工程和码头工程实施后, 大桥主通航孔涨、落急流速有所增加, 落急流速变化幅度在 20 cm/s 左右, 涨急流速

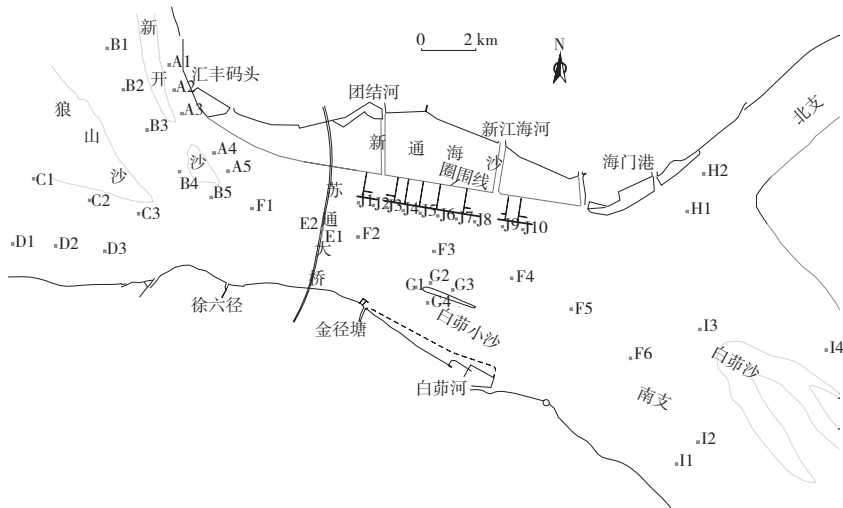


图9 测点布置

变化幅度在 10 cm/s 左右, 需要指出的是该影响主要是由圈围工程引起的, 码头工程减去圈围工程的影响就基本上为零了。涨落急流向都在  $1^\circ$  以内, 对流向影响很小。

### 3.2 新开沙夹槽的影响

新开沙夹槽 (A1-A5) 圈围工程和港区工程实施后, 新开沙夹槽上段 (A1-A3 测点) 涨落急流速均减小, 变化幅度在 2~10 cm/s; 下段 (A4-A5

测点) 落急流速减小, 涨急流速增加, 变化幅度在 20~40 cm/s。同样, 码头工程与圈围工程差值接近 0, 该变化幅度主要由圈围工程引起。A1-A3 测点涨落急流向差异在  $2^\circ$  以内, 下段 A4 测点涨急流向差异最大可达  $10^\circ$ 。但码头工程与圈围工程方案流向差值也接近于  $0^\circ$ 。

### 3.3 狼山沙东、西水道的影响

狼山沙东水道 (B1-B5): 由于东水道是该

区段主流区,工程影响稍大,圈围工程后,狼山沙东水道落急流速增加1~8 cm/s,涨急流速增加2~7 cm/s,码头工程与圈围工程差值也很小。狼山沙东水道落急流向差异在2°以内,涨急流速除B5测点外差异在0°~4°,B5测点和A5测点一样,是该水域涨急流向受圈围影响最大的区域,流向改变可达20°。

狼山沙西水道(C1-C3)、福山倒套(D1-D3):由于该区域远离主流区和工程区域,工程对西水道和福山倒套处涨落急流速微小,变化幅度在1~2 cm/s。涨落急流向改变1°~2°。

### 3.4 长江主航道的影晌

长江主航道(F1-F6):工程区域前沿的主航道亦为主流区,圈围工程实施后,位于圈围线前沿束流段的F1-F4测点落急流速增加3~17 cm/s,涨急流速增加0~6 cm/s;而稍微远离束流段的F5和F6测点涨落急流速略为减小1~2 cm/s。码头工程实施后,相当于在圈围的基础上继续增加一定束流作用,因此主流区落急流速在圈围的基础上也略增加2~3 cm/s,涨急流速在圈围工程的基础上F2测点附近增加10 cm/s,其他地方基本不变。主流带涨落急流向改变0°~4°。

### 3.5 码头附近的影响

码头前沿200 m(J1-J10):圈围工程实施后,圈围线前沿包括码头前沿200 m处,均为束流主要工程效应区,落急流速增加13~43 cm/s,涨急流速增加0~27 cm/s,增加幅度较大。继续施加码头工程后,该处落潮束流作用略往南岸推移,因此码头前沿200 m落急流速相对圈围工程略有减小,约0~9 cm/s,而涨潮束流作用在码头前沿明显增强0~30 cm/s。圈围工程后,落急流向上下测点减小,中间测点增加,整体效果就是落急流向更加顺直一些;而码头工程后,该拉直效果更加增强,尤其是下段,落急水流略为南偏。圈围工程和码头工程后,涨潮流向整体都减小,略为南偏。

### 3.6 白茆小沙的影响

白茆小沙(G1-G4):圈围实施后,落急流速有所减小,但港区工程实施后,在圈围工程的基础上,落急流速有小幅增加;涨急流速也有所

增加,最大改变在10 cm/s以内。落急流向改变略大,在5°左右,涨急流向改变在2°左右,而码头工程减去圈围工程涨落急流向改变都在2°以内。

### 3.7 北支入口的影响

北支入口(H1-H2):由于北支入口处于圈围工程流速影响的末端,H2测点落急流速增加2 cm/s,涨急流速基本不变。码头工程实施后,北支入口涨落急流速均略有增加。涨落急流向改变在2°左右。

白茆沙(I1-I4):由于距离工程主要效应区域较远,对涨落急流速的影响在5 cm/s以内,码头工程减去圈围工程基本都没有改变。流向的改变1°~2°。

### 3.8 断面潮量的影响

码头工程对南支落潮量减小约1%左右,对北支落潮量增加1%以内;对南支涨潮量减小约1.33%左右,对北支涨潮量增加1.02%;工程对南支落潮分流比略微减小0.41%,涨潮分流比减小0.11,影响甚微。

为了阐述圈围工程和港区规划工程对徐六泾河段潮量的影响,特在圈围区范围内布置3条断面,为了分辨圈围区外潮量、工程前后所占的比重,又把3条断面各分为两个断面,如图10所示。

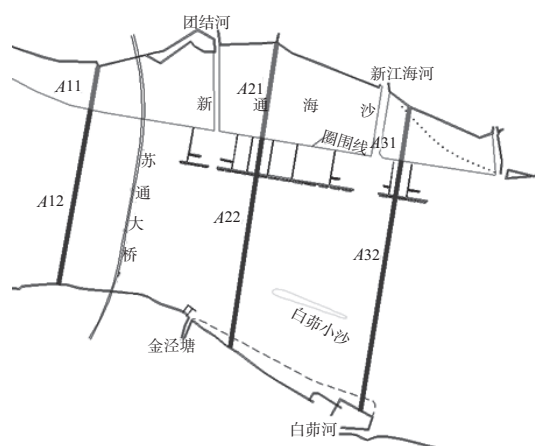


图10 潮量统计断面位置

1) A12,A22,A32断面(非圈围断面)分别占整个断面落潮量的95%~99%,占涨潮量的87%~97%。可见,虽然圈围区占该区域断面宽度的20%~30%,但是落潮量只占到1%~5%,

涨潮量也只占3%~13%。

2) 圈围工程实施后, 使得A12和A22断面落潮量增加0%~5%, 涨潮量增加1%~15%; 再施加港区工程后, 使得圈围工程的落潮量增加效果略微减小0.2%左右, 涨潮量的增加效果减小不到1%。圈围工程和码头工程实施后高高潮位增加值在2~5 cm, 低低潮位增加值在2~5 cm。

#### 4 结论

1) 圈围工程和港区工程实施后对于徐六泾河段而言, 是进一步加强了束流作用, 但由于圈围工程位于远离主流的北岸浅水区, 相当于在北岸增加导流堤的效果, 同时圈围区涨、落潮量所占比重较小(落潮量5%以内, 涨潮量10%以内), 涨、落急流速的主要工程(圈围)效应范围集中在束流段的上段及圈围线前沿约1.5 km处; 从码头工程方案减去圈围工程方案来看, 码头工程对该区域流场的影响较圈围工程而言小一些, 主要集中在码头前沿约200 m水域。

2) 计算结果表明, 相对圈围工程而言, 码头工程对苏通大桥主通航孔影响较小, 变化幅度在10 cm/s以内, 落潮主流走主通航孔的情况不会改变, 通航孔处流向基本无变化。

3) 规划港区码头工程对长江主航道、白茆沙

水道、北支水道、新开沙夹槽、福山倒套等影响较圈围工程而言微小, 对航线安全和船舶安全使用航道不构成威胁。

4) 圈围工程和码头工程对该区段高高潮位改变幅度在2~5 cm, 计算结果表明码头工程对该河段防洪排涝基本不产生影响。

5) 港区工程实施后, 对苏通大桥主流(流速/流向)、主桥墩的冲刷及主槽位置影响较小。

#### 参考文献:

- [1] 上海河口海岸科学研究中心. 南通港通海港区规划河势演变分析报告[R]. 上海: 上海河口海岸科学研究中心, 2008.
- [2] 上海河口海岸科学研究中心. 长江口航道核心计算平台开发研究及成果应用[R]. 上海: 上海河口海岸科学研究中心, 2007.
- [3] 上海河口海岸科学研究中心. 南通港通海港区附近水域水文测验成果报告[R]. 上海: 上海河口海岸科学研究中心, 2008.
- [4] 中交三航院勘察工程有限公司. 国电海门煤电基地码头工程技术报告[R]. 上海: 中交三航院勘察工程有限公司, 2007.
- [5] 长江委水文局长江口水文水资源勘测局. 国电海门电厂水文测验技术报告[R]. 苏州: 长江委水文局长江口水文水资源勘测局, 2007.

(本文编辑 武亚庆)

\*\*\*\*\*

## 著作权授权声明

全体著作权人同意: 论文将提交《水运工程》期刊发表, 一经录用, 本论文数字化复制权、发行权、汇编权及信息网络传播权将转让予《水运工程》期刊编辑部。