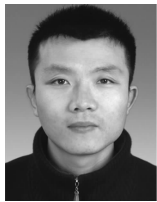


· 航道及通航建筑物 ·



长江口横沙东滩 建港水动力泥沙环境三维数值模拟

曹慧江, 王大伟, 袁文昊

(中交上海航道勘察设计研究院有限公司, 上海 200120)

摘要: 横沙东滩是横沙岛东侧的大型水下浅滩, 与崇明东滩、九段沙同为长江河口拦门沙地区的3大浅滩之一; 长期以来位置和 seabed 均十分稳定, 是建设挖入式港池的理想区域。利用三维潮流泥沙数学模型从水动力、泥沙输运角度对长江口横沙浅滩建设挖入式港池方案进行数值模拟研究, 分析了工程前后潮流泥沙变化, 为横沙东滩建港及影响分析提供科学依据。

关键词: 横沙东滩; 三维数值模拟; 建港; 水沙条件

中图分类号: TV 142

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2015)12-0074-06

Three-dimensional numerical simulation of hydrodynamic sediment environment at Hengsha east shoal in the Yangtze estuary after harbor-building

CAO Hui-jiang, WANG Da-wei, YUAN Wen-hao

(Shanghai Waterway Engineering Design and Consulting Co., Ltd., Shanghai 200120, China)

Abstract: Hengsha east shoal is a large underwater bank located at the east side of Hengsha island. Hengsha east shoal, together with Chongming eastern shoal and Jiudian shoal are three largest shoals in the Yangtze mouth-bar area. The Hengsha east shoal is an ideal area for port construction because of its stable location and seabed form. A 3-D tidal-sediment model is used to simulate the current dynamics and sediment transport with a dig-in harbor basin built at the Hengsha east shoal. The changes of tidal current and sediment flux before and after the project are compared to analyze the impact of port-building.

Keywords: Hengsha east shoal; 3-D numerical simulation; harbor building; hydrodynamic sediment environment

横沙东滩是长江河口横沙岛东侧的大型水下浅滩, 也是长江口3大拦门沙浅滩之一, 是北港与北槽的主要水沙交换区域。横沙东滩5 m水深以浅滩地东西长约45 km, 南北宽4~11 km, 由西向东呈舌状分布。历史上, 横沙东滩以横沙东滩串沟为界, 西侧为狭义的横沙东滩, 20世纪80年代以前东侧称铜沙浅滩, 80年代后期海岛调查定名为横沙浅滩; 广义的横沙东滩为以上两部分的总称。目前, 西侧滩面已在进行促淤圈围工程, 获批

的促淤圈围面积为113.33 km²(17万亩); 东侧为自然滩地, 北高南低, 滩面高程为1.6~-5 m。

横沙东滩南贴长江口北槽12.5 m深水航道, 北靠北港航道(规划10 m航道), 东临东海, 经吹填成陆可新增土地约480 km²(72万亩), 可新增深水岸线超过100 km, 依托东接外海深水区的优势, 可建设大型挖入式深水大港港区, 实现20 m深水港的突破。港区的建设, 尤其是如此世界性深水大港港区的建设, 对自然和环境条件具

收稿日期: 2015-05-14

作者简介: 曹慧江(1981—), 男, 高级工程师, 从事港口航道工程设计及水沙动力研究。

有特殊的要求, 横沙浅滩地处拦门沙, 其水动力泥沙条件及浅滩沉积稳定性, 是建港可行性中必须具备的重要基础^[1-4]。

横沙东滩位于河口地段, 存在着细颗粒泥沙絮凝沉降、盐水楔, 表、底层泥沙浓度差异巨大, 某些时刻甚至输运方向相反。这些河口特有的特征现象, 仅靠平面二维潮流泥沙数学模型是难以模拟的。因此若要解决研究水域的潮流泥沙模拟问题必须采用三维潮流泥沙数学模型^[2]。本文利用三维潮流泥沙数学模型^[2]研究了横沙东滩建设挖入式港池方案的水动力、泥沙环境条件及变化, 为科学分析建港条件提供研究基础。



图 1 横沙东滩位置

1 三维潮流泥沙数学模型

1.1 模型控制方程

在流体不可压缩、Boussinesq 和静压近似下, 引入水平非正交曲线和垂向 σ 坐标系: $\xi = \xi(x, y)$, $\eta = \eta(x, y)$, $\sigma = \frac{z - \zeta}{H + \zeta}$, 三维潮流控制方程组(包括动量、连续、温度、盐度和密度方程)变换为:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(DJv_1)}{\partial t} + \frac{\partial(DJ\hat{U}v_1)}{\partial \xi} + \frac{\partial(DJ\hat{V}v_1)}{\partial \eta} + \frac{\partial(J\omega v_1)}{\partial \sigma} + \\ & Dh_1\hat{U}\left[v_1\frac{\partial}{\partial \xi}\left(\frac{J}{h_1}\right) - u_1\frac{\partial}{\partial \eta}\left(\frac{J}{h_2}\right) + Jf\right] - \\ & Dh_1u_1v_1\frac{\partial}{\partial \eta}\left(\frac{h_3}{h_1h_2}\right) = -h_1gD\frac{\partial \zeta}{\partial \eta} + \frac{gh_1D}{\rho_o}\frac{\partial D}{\partial \eta}\int_{\sigma}^0\sigma\frac{\partial \rho}{\partial \sigma}d\sigma - \\ & \frac{gh_1D^2}{\rho_o}\frac{\partial}{\partial \eta}\int_{\sigma}^0\rho d\sigma + \frac{1}{D}\frac{\partial}{\partial \sigma}\left[K_m\frac{\partial(Jv_1)}{\partial \sigma}\right] + DJF_y \quad (1) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(DJv_1)}{\partial t} + \frac{\partial(DJ\hat{U}v_1)}{\partial \xi} + \frac{\partial(DJ\hat{V}v_1)}{\partial \eta} + \frac{\partial(J\omega v_1)}{\partial \sigma} + \\ & Dh_1\hat{U}\left[v_1\frac{\partial}{\partial \xi}\left(\frac{J}{h_1}\right) - u_1\frac{\partial}{\partial \eta}\left(\frac{J}{h_2}\right) + Jf\right] - \\ & Dh_1u_1v_1\frac{\partial}{\partial \eta}\left(\frac{h_3}{h_1h_2}\right) = -h_1gD\frac{\partial \zeta}{\partial \eta} + \frac{gh_1D}{\rho_o}\frac{\partial D}{\partial \eta}\int_{\sigma}^0\sigma\frac{\partial \rho}{\partial \sigma}d\sigma - \\ & \frac{gh_1D^2}{\rho_o}\frac{\partial}{\partial \eta}\int_{\sigma}^0\rho d\sigma + \frac{1}{D}\frac{\partial}{\partial \sigma}\left[K_m\frac{\partial(Jv_1)}{\partial \sigma}\right] + DJF_y \quad (2) \end{aligned}$$

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{1}{J}\left[\frac{\partial}{\partial \xi}(DJ\hat{U}) + \frac{\partial}{\partial \eta}(DJ\hat{V})\right] + \frac{\partial \omega}{\partial \sigma} = 0 \quad (3)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(JDs)}{\partial t} + \frac{\partial(JD\hat{U}s)}{\partial \xi} + \frac{\partial(JD\hat{V}s)}{\partial \eta} + \frac{\partial(J\omega s)}{\partial \sigma} = \\ & \frac{1}{D}\frac{\partial}{\partial \sigma}\left[K_h\frac{\partial(Js)}{\partial \sigma}\right] + DJF_s \quad (4) \end{aligned}$$

$$\omega = w - \sigma\left(\hat{U}\frac{\partial D}{\partial \xi} + \hat{V}\frac{\partial D}{\partial \eta}\right) - \left[(1 + \sigma)\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \hat{U}\frac{\partial \zeta}{\partial \xi} + \hat{V}\frac{\partial \zeta}{\partial \eta}\right] \quad (5)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial S_c}{\partial t} + u\frac{\partial S_c}{\partial x} + v\frac{\partial S_c}{\partial y} + \frac{w - w_s}{H}\frac{\partial S_c}{\partial \sigma} = \frac{\partial}{\partial x}\left(K_h\frac{\partial S_c}{\partial x}\right) + \\ & \frac{\partial}{\partial y}\left(K_h\frac{\partial S_c}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial \sigma}\left(K_v\frac{\partial S_c}{\partial \sigma}\right) \quad (6) \end{aligned}$$

式中: S_c 为悬浮泥沙浓度; W_s 为泥沙沉降速度。

在 σ 坐标系下海表面垂向流速为 0 ($w = 0$), 因而方程的海表面边界条件有:

$$\begin{cases} -w_s S_c - \left(\frac{K_v}{H}\frac{\partial S_c}{\partial \sigma}\right) = 0 \\ \sigma = 0 \end{cases} \quad (7)$$

在海底处, 由于水动力随时间变化, 底沙与水体中悬沙发生交换, 方程的海底边界条件可用下式表示:

$$\begin{cases} -w_s S_c - \left(\frac{K_v}{H}\frac{\partial S_c}{\partial \sigma}\right) = F \\ \sigma = -1 \end{cases} \quad (8)$$

式中: F 为源汇项, 即单位时间单位面积由海底进出水体的净物质通量, 包括河床的冲刷和淤积, $F = q_{ero} - q_{dep}$, q_{ero} 、 q_{dep} 分别为海底的侵蚀通量和泥沙的沉积通量, 计算如下:

$$q_{ero} = \begin{cases} 0 & \tau < \tau_e \\ M \left(\frac{\tau}{\tau_e} - 1 \right) & \tau \geq \tau_e \end{cases} \quad (9)$$

$$q_{dep} = \begin{cases} 0 & \tau > \tau_d \\ \alpha' w_s S_c \left(1 - \frac{\tau}{\tau_d} \right) & \tau \leq \tau_d \end{cases} \quad (10)$$

式中： τ 为海底拖曳力； τ_e 为临界冲刷切应力； τ_d 为临界淤积切应力。

1.2 有关重要系数和参数的确定

1.2.1 泥沙沉降速度

为了更好地考虑盐度和含沙量对絮凝的影响，引进盐度和含沙量影响因子，构造了如下絮凝公式：

$$w = FDw_0 \quad (11)$$

$$其中 \quad F = 0.00177 \times d_{50}^{-1.82} \quad (12)$$

式中： w_0 是某一粒径单颗粒泥沙的沉降速度； F 是Mignoit的絮凝因子； D 是和含沙量和盐度、温度有关系的影响因子，可以表达为 $D = f(C, S, t)$ ， C 是含沙量， S 是盐度， t 是温度。根据不同盐度、温度，计算沉降速度主要在 $0.2 \sim 0.6 \text{ mm/s}$ 。

1.2.2 底切应力

根据验证情况作一定的修正， τ_e 取值在 $0.4 \sim 0.6 \text{ N/m}^2$ ， τ_d 取值在 $0.1 \sim 0.3 \text{ N/m}^2$ 。

1.2.3 淤积冲刷系数

根据现场实测资料进行验算，初步估算模型冲刷系数范围为 $0.00002 \sim 0.00007$ 。而后根据模型调试冲刷系数 M ，模型取值 0.00004 ；根据文献研究，长江口沉降概率系数 α' 取值范围为 $0.2 \sim 0.9$ ，模型中取值为 0.7 。

1.3 模型计算网格及范围

模型计算范围上游起自大通，下游至绿华山以东约 250 km ，北至大丰港附近，南侧包括整个杭州湾。为了准确反映工程区的潮流场，模型网格很好地拟合了深水航道工程及长江口自然岸线，并在工程区局部加密，工程附近网格空间步长最小约为 20 m (图3)，计算网格单元为 741×755 ，垂线分 10 层，时间步长采用变时间步长，为 $10 \sim 30 \text{ s}$ 。

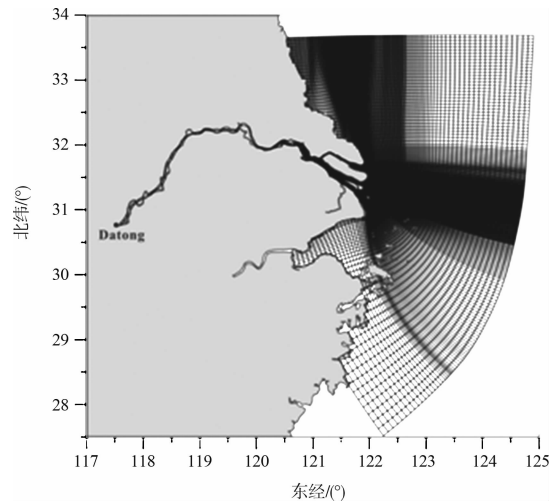


图2 模型计算范围及网格剖分

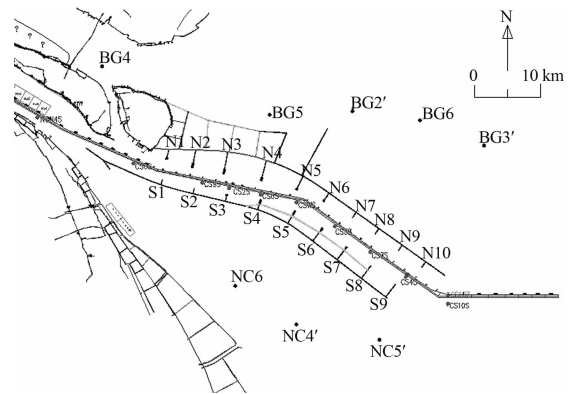
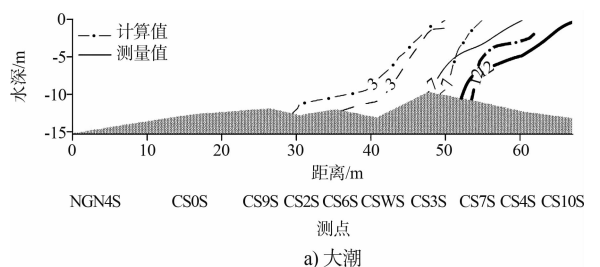


图3 2012年8月测点位置

2 模型验证

利用2012年2月及8月资料，对长江口南港、北槽、北港河段进行了大、小潮全潮水文测验^[5-6]，洪枯季两次水文测验布置基本一致(图4)。观测内容包括流速、流向、悬移质含沙量、含盐度等。本文采用实测水流、盐度、泥沙含量模型实测水文测验资料分别进行了验证。从模型计算值与实测值对比来看，水流、含沙量过程及趋势基本一致，无论是计算的量值还是位相，均与实测值基本吻合(图5)。模型计算的盐水楔位置与测验中的实际位置也基本一致，模型的验证是基本成功的^[11]。



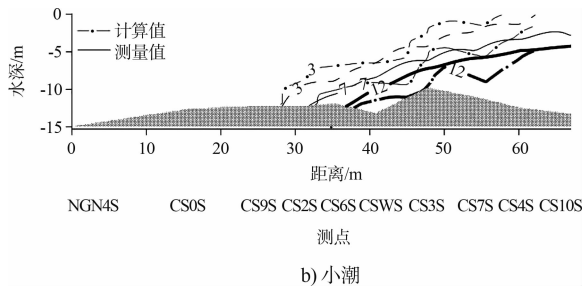
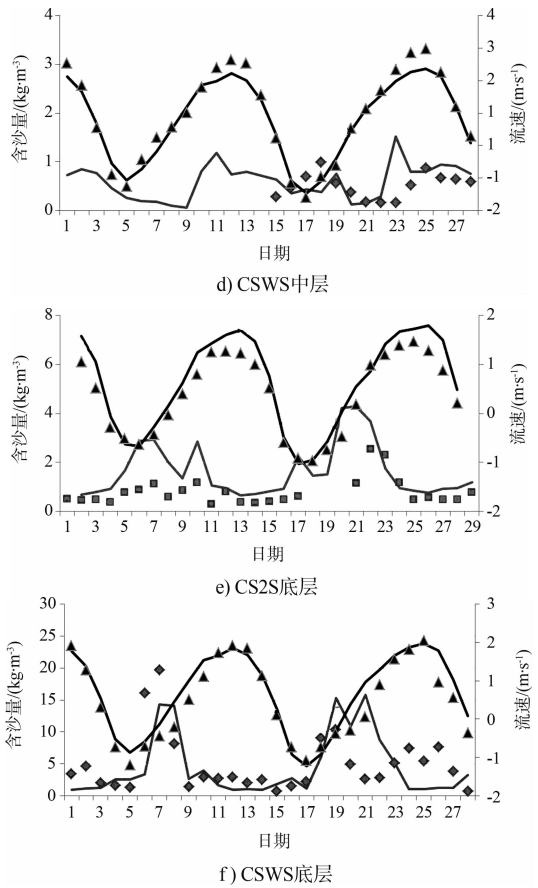
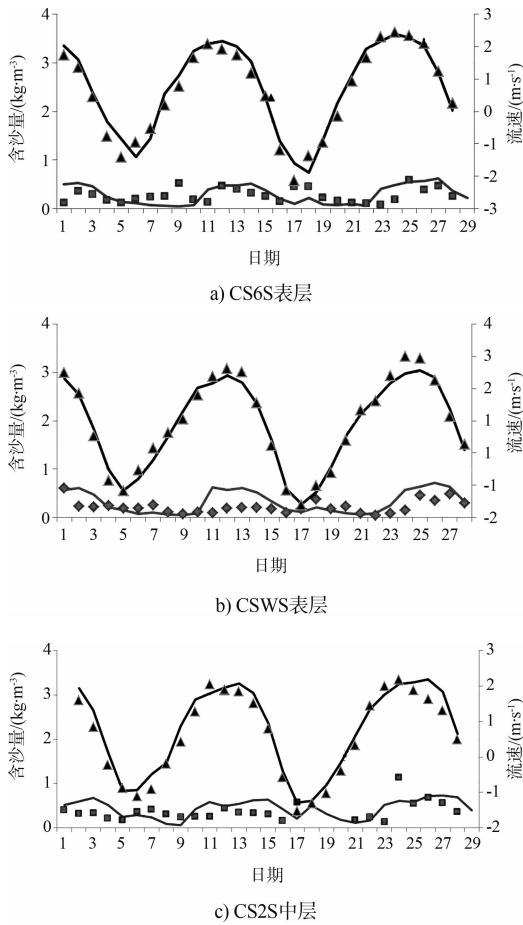


图 4 南港—北槽大小潮沿程盐度纵剖面计算值与实测值对比 (盐度单位:‰)



注: ▲为流速测量值, ◆为含沙量测量值, —为计算值。

图 5 2012 年 8 月部分测点流速及含沙量过程线验证

回淤量验证见图 6, 2012 年实测洪季回淤量 7 077 万 m^3 , 数模计算值约为 6 290 万 m^3 , 误差约为 -11.2%; 2012 年实测枯季回淤量 1 548 万 m^3 , 数模计算值约为 1 493 万 m^3 , 误差约为 -3.6%; 实测全年回淤量 8 626 万 m^3 , 数模计算值约为 7 783 万 m^3 , 误差约为 -9.8%。

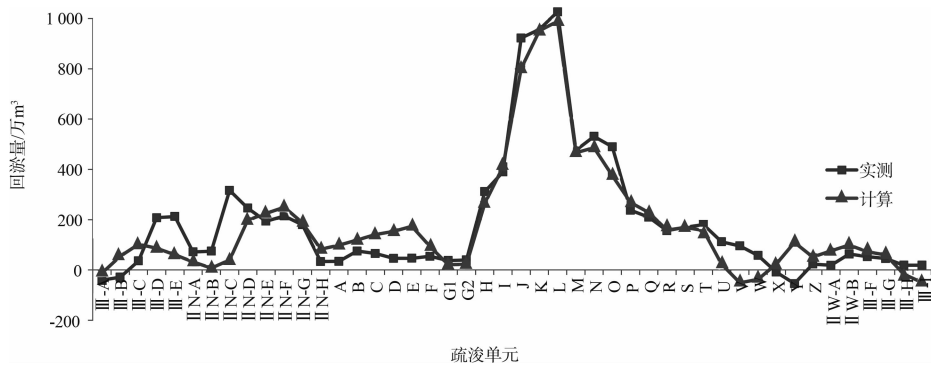


图 6 全年回淤量率定

3 港区方案布置及采样点的布设

港区根据横沙浅滩形状与外轮廓线，沿横沙浅滩 -2 ~ -5 m 等深线布置，挖入式港区口位于北导堤北侧，并设置防波堤，上游以人工运河与北港水道相接。

人工运河按 7.5 m 水深设置，大型船舶港区和口外进港航道均按 20 m 水深设置，小型船舶港区按 7.5 m 设置。沿人工运河至口外进港航道每隔 2 km 布置 1 个采样点 (图 7)，共 23 个(编号:C1 ~ C23)，港区支航道布置 5 个采样点(编号:Z1 ~ Z5)。

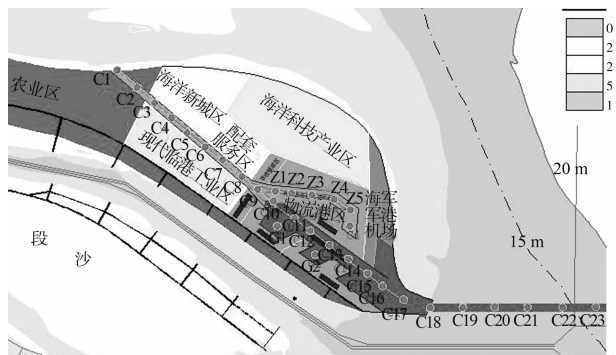


图 7 建港方案港区及采样点布置

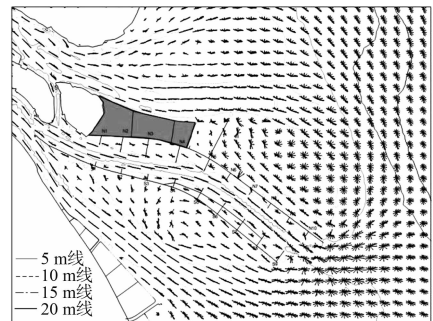
4 水动力、泥沙条件分析

流场计算开边界条件采用了长江口洪季代表流量 40 000 m³/s，口外采用 2012 年 8 月大潮潮汐边界条件，横沙潮差为 5.18 m，平均潮位为 2.27 m (吴淞基面)。

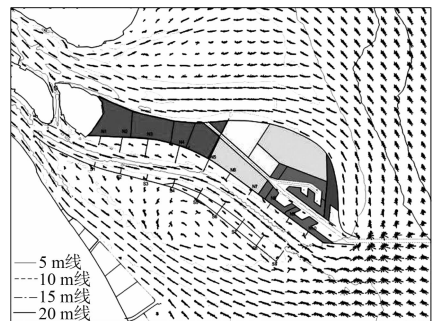
4.1 流态变化

受港区工程影响，北港下段由旋转流向往复流转变，旋转性质有所减弱；横沙东滩外海侧旋转流特性有所减弱，水流沿港区岸界方向流动增加；北槽口外水流变化较小，仍为旋转流 (图 8)。港区内航道受两侧港区岸界影响基本呈现往复流状态；港区内存在局部绕流现象，尤其在港池航道连接区域，特别是在涨、落憩时刻绕流比较明显，但流速不大；口外仍呈现旋转流状态，表、底层流速变化趋势基本一致。工程实施后，运河内的涨落潮流向与运河走向基本一致，落潮平均流速为 0.8 ~ 1.2 m/s，涨潮平均流速为 0.6 ~ 0.9 m/s；落潮表层流速为 1.4 ~ 1.7 m/s，涨潮表层流速为

0.8 ~ 1.4 m/s，大型港区主航道内涨落潮平均流速为 0.3 ~ 0.7 m/s，涨落潮表层流速为 0.6 ~ 1.5 m/s；在港池停泊区域涨落潮平均流速为 0.3 ~ 0.5 m/s，涨落潮表层流速为 0.4 ~ 0.8 m/s；内支线船舶港区涨落潮平均流速和涨落潮表层流速均小于 0.8 m/s；口外航道以旋转流为主，落潮表层流速为 0.8 ~ 1.8 m/s，涨潮表层流速约 0.8 ~ 1.5 m/s。



a) 工程前



b) 工程后

图 8 工程前、后大范围流场玫瑰图

4.2 港区纳潮量

港区内纳潮量的变化对于港区内航道、港池水深条件的维护及港区水体生态环境的保持至关重要。沿港区上下进口各布置一个断面，统计其进出潮量。实施建港方案后，在一个大潮全潮内(25 h)上口涨潮量为 2.56 亿 m³，落潮量为 5.96 亿 m³；下口涨潮量为 7.35 亿 m³，落潮量为 9.38 亿 m³。

4.3 口门横流

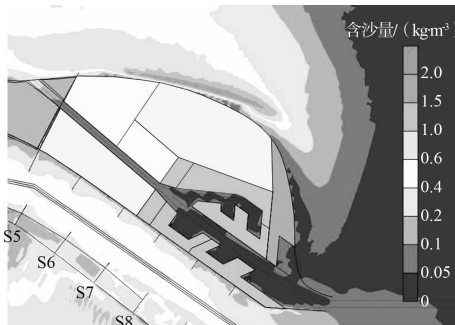
港区口门内水流受港区岸线控制，各个方案水流方向基本与航道方向一致。口外，各方案水流与航道交角均有较明显加大。建港方案口门处水流与航道交角大于 30°历时约在 4.5 ~ 11 h。口外呈现旋转流特征，越往口外旋转流特征越明显，横流也越大，表层最大横流约 0.65 m/s。

表1 建港方案航道口外采点表层横流大小 m/s

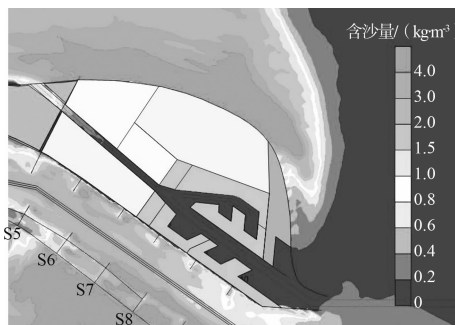
采点	涨潮最大横流	落潮最大横流
C19	0.35	0.37
C20	0.45	0.44
C21	0.48	0.51
C22	0.56	0.55
C23	0.63	0.65

4.4 建港后潮平均含沙量分布

港区方案实施后,由于人工开挖航道流速基本以减小为主,航道含沙量略有减小,最大减幅可达 1.0 kg/m^3 。从含沙量分布上来看(图9),横沙浅滩外侧含沙量北侧略高、南侧略低,港区口门布置应尽量考虑含沙量的平面分布。



a) 垂直平均



b) 底层

图9 全潮平均含沙量分布

4.5 港池航道回淤强度分布

工程实施后港区内平均含沙量相对较低,港区内人工运河年淤强在 $0.17 \sim 0.34 \text{ m/a}$,平均淤强约 0.21 m/a ,年回淤量约为 183 万 m^3 ;港区回淤年淤强在 $0.11 \sim 0.42 \text{ m/a}$,平均淤强约 0.20 m/a ,年回淤量约为 $1\,017 \text{ 万 m}^3$;港区外航道回淤年淤强在 $0.26 \sim 0.65 \text{ m/a}$,平均淤强约 0.46 m/a ,年回淤量约为 586 万 m^3 ;合计回淤量约为 $1\,786 \text{ 万 m}^3$ 。

5 结语

建港方案实施后对长江口河势总体格局影响不大,港区建设后港池航道内总体垂线平均介于 $0.6 \sim 1.8 \text{ m}$,表层流速介于 $0.9 \sim 2.2 \text{ m/s}$,在保持了一定动力的同时,没有出现对船舶通航有影响的较大流速,口门存在一定的横流,但流速绝对值不大;在围垦浅滩后,两侧滩槽泥沙交换减少,港区内含沙量明显小于北港、北槽,总体港区航道回淤淤强大概在 $0.17 \sim 0.6 \text{ m/a}$ 。

从含沙量分布上来看,横沙浅滩外侧含沙量北侧略高、南侧略低,港区口门布置应尽量考虑含沙量的平面分布。港区平面布置从减小港池航道回淤角度来看,上游人工运河口门应尽量往上游布置,避让北港拦门沙最大浑浊带,在满足港区功能的条件下尽量减小连接水域面积。

长江口水流泥沙影响因子复杂,目前横沙浅滩水文测验资料较为缺乏,调查资料不足,今后应加强监测,并结合相关研究、积累资料后深入开展港区建设可行性的研究。

参考文献:

- [1] 中交上海航道勘察设计研究院有限公司. 长江口河势新格局、疏浚工程与横沙成陆、建港的关系——数学模型专题[R]. 上海: 中交上海航道勘察设计研究院有限公司, 2015.
- [2] 中交上海航道勘察设计研究院有限公司. 三维风浪、潮流、泥沙数值模拟系统及开发[R]. 上海: 中交上海航道勘察设计研究院有限公司, 2013.
- [3] 虞志英, 张志林, 金鏐, 等. 长江口横沙浅滩挖入式港池与入海航道区域海床稳定性分析[J]. 华东师范大学学报, 2013(4): 55-71.
- [4] 高敏, 顾峰峰, 范期锦. 长江口航道治理研究中数、物模技术的应用[J]. 水运工程, 2011(11): 166-180.
- [5] 长江委水文局长江口水文水资源勘测局. 长江口深水航道养护工程2012年2月长江口北槽水域水文测验[R]. 上海: 长江委水文局长江口水文水资源勘测局, 2012.
- [6] 长江委水文局长江口水文水资源勘测局. 长江口深水航道养护工程2012年8月长江口北槽水域水文测验[R]. 上海: 长江委水文局长江口水文水资源勘测局, 2012.

(本文编辑 武亚庆)