

# 长江口深水航道及横沙东滩促淤圈围对滞流点的影响

匡翠萍, 董智超, 陈 括, 刘 旭

(同济大学 土木工程学院, 上海 200092)

**摘要:** 滞流点位置的变化对河口拦门沙的形成和泥沙淤积具有极大的影响. 基于 MIKE3 软件建立长江口水动力和盐度运输三维数学模型, 采用实测资料对模型的潮位、流速、流向和盐度进行验证. 运用验证好的数学模型模拟和分析长江口深水航道工程及横沙东滩促淤圈围工程对河口滞流点位置的影响, 结果表明, ①应用改进的近底层平均单宽通量计算公式确定滞流点的位置, 验证结果良好, 可以用该公式确定滞流点的位置; ②深水航道工程的建设增大了水深和涨落潮流速, 各汊道内落潮流量的增加明显高于涨潮流量的增加, 且滞流点均向下游移动; ③横沙东滩促淤圈围工程建成后, 北港滞流点向下游移动约 5 km, 北槽和南槽的滞流点则向上游移动约 1 km.

**关键词:** 长江口; 深水航道; 横沙东滩; 促淤圈围; 滞流点; 数学模型

**中图分类号:** TV148

**文献标志码:** A

## Impacts of Yangtze Estuary Deepwater Channel Project and Hengsha East Shoal Siltation and Reclamation Project on Stagnation Point

KUANG Cuiping, DONG Zhichao, CHEN Kuo, LIU Xu

(College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** Variation of stagnation point has significant influence on mouth bar formation and sediment deposition. A three-dimensional hydrodynamic and salinity transport model based on MIKE 3 which has well been validated through observation data of tidal level, velocity magnitude and direction, and salinity was established to simulate and analyze the movement of the stagnation points caused by the Yangtze estuary deepwater channel project and the Hengsha east shoal siltation and reclamation project. It reveals that, ①Position of stagnation point is determined by an improved bottom average unit-width flux formula, and the verification of stagnation point is good. ②Water depth and current speed has

increased after construction of the Yangtze estuary deepwater channel project, the increase of ebb discharge is obviously large than the increase of flood discharge, and stagnation points move downstream in all bifurcations. ③ After the Hengsha east shoal siltation and reclamation project, stagnation point moves about 5 km downstream in the North Channel and moves about 1 km upstream in both North Passage and South Passage.

**Key words:** Yangtze estuary; deepwater channel; Hengsha east shoal; siltation and reclamation; stagnation point; three-dimensional model

近年来, 长江口深水航道治理工程促进了长江航运业的发展, 为长三角地区的经济快速发展提供了良好的条件, 充分发挥了长江黄金水道的作用. 随着经济的快速发展, 土地紧缺的问题日益突出, 横沙东滩促淤圈围工程正在紧锣密鼓地进行, 从而有效地缓解上海市的土地压力, 具有极大的经济和社会价值. 但是, 在工程的施工和维护过程中, 由于长江口独特的水文和泥沙特点, 航道内泥沙回淤的现象屡见不鲜, 且通常发生在河口最大浑浊带. 河口最大浑浊带是河口环境中一个特殊的区域, 位于海水与河水交汇的底层滞流点附近<sup>[1]</sup>, 在滞流点处近底含沙浓度极高, 泥沙集中落淤形成拦门沙, 在航道内形成碍航区段<sup>[2]</sup>.

滞流点的位置变化主要受径流、潮流、盐水入侵等多种因素的影响. 长江上游的三峡工程和南水北调工程对径流量和泥沙产生了一定的影响, 改变了长江口的水动力条件, 影响航道内泥沙的冲淤状态, 所以河口拦门沙、滞流点和最大浑浊带一直是诸多学者关注的焦点, 并做了大量的研究. 魏守林等<sup>[2]</sup>应用 Galerkin 权余法建立河口最大浑浊带数学模型, 计算结果表明河口重力环流是最大浑浊带形成的重

收稿日期: 2016-12-16

基金项目: 国家“九七三”重点基础研究发展计划(2012CB957704)

第一作者: 匡翠萍(1966—), 女, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为海岸工程. E-mail: cpkuang@tongji.edu.cn

通讯作者: 董智超(1992—), 男, 博士生, 主要研究方向为海岸工程. E-mail: 228dongzc@tongji.edu.cn

要动力条件,径流量和潮差的改变均会影响滞流点的位置,且最大浑浊带的核心部分总是与滞流点的位置非常吻合。顾伟浩<sup>[3]</sup>通过分析 1960—1975 年共计 5 次的观测数据,根据 Simmons 水流优势度<sup>[4]</sup>的理论绘制每个汉道纵向断面的底层流的优势度曲线确定滞流点的位置,采用多元回归分析的方法,利用回归方程估算了长江口南槽拦门沙的位置。朱建荣等<sup>[1]</sup>基于改进的 ECOM (Estuarine, Coastal and Ocean Model) 模式,耦合泥沙输运方程,建立理想河口数学模型,研究了径流量和海平面变化对最大浑浊带的影响,研究表明上下游余流共同向滞流点处输沙,径流量的增大使滞流点向下移动且海平面的上升使滞流点向上移动。王晓莉等<sup>[5]</sup>通过 Delft3D 软件建立二维数学模型模拟了长江口滞流点随季节的变化,分析长江口各汉道滞流点均存在洪季下移枯季上移的现象。徐锴<sup>[6]</sup>基于改进的三维数值模式 ECOM-si,采用单宽余通量的方法计算确定滞流点的位置,分析径流变化和风速变化对滞流点的影响,表明径流增大会使滞流点下移,而风速的变化在洪枯季不同动力条件下对各汉道滞流点的影响机制不同。黄李冰等<sup>[7]</sup>应用三维 ECOMSED 模型,模拟长江口不同径流和潮流条件下的滞流点的变化规律,并分析得知三峡蓄水后径流变化范围缩小会引起各分汉滞流点的变化范围不同程度的缩小。

对长江口滞流点的分布和影响因素已经有了颇多研究,而长江口深水航道工程及横沙东滩促淤圈围工程背景下对滞流点位置的影响分析涉及较少。本文考虑盐度引起的河口异重流对水动力的影响,基于 MIKE3 软件建立长江口三维水动力与盐度输运数学模型,计算不同工程条件下的近底层流速,采用近底层平均单宽通量确定滞流点的位置,分析并总结工程对滞流点的影响及其变化趋势,以期对长江口泥沙回淤问题及拦门沙的整治问题的研究提供一定的理论依据。

## 1 数学模型的建立与验证

MIKE3 是丹麦水力学研究所研发的通用数学模拟系统,其中 FM 模块为三维水动力模型,它基于 Boussinesq 假设、静水压力假设,应用控制体积法求解不可压缩雷诺平均 Navier-Stokes 方程,并通过盐度守恒方程求解盐度及其对密度变化造成的影响<sup>[8]</sup>。

### 1.1 模型区域和网格

模型的区域为长江口,其位于径流和潮流相互作用的区域,模型范围自南向北长为 200 km (30.7°N—32.5°N),南至上海金山,北至江苏洋口港。自西向东长为 317 km (120°E—124°E),西起江阴,东至东海海域,包括南支北支、南港北港、南槽北槽在内的整个长江口。由于长江口海域岸线曲折,为了更好地拟合岸线,模型应用三角非结构网格(图 1),网格包含 6 631 个节点和 12 199 个单元,网格尺度自东向西,自外海向口门内依次减小,空间步长在 90~3 000 m。采用三维水动力模型进行模拟,考虑近底层水动力对泥沙的影响,通过近底层流速确定滞流点的位置。近底层厚度影响了底层垂向平均流速,从而影响滞流点的位置。模型垂向采用  $\sigma$  坐标系,并通过滞流点位置的率定和验证将模型均分 5 层,即相对水深为 0.8~1.0 的平均流速确定滞流点的位置。

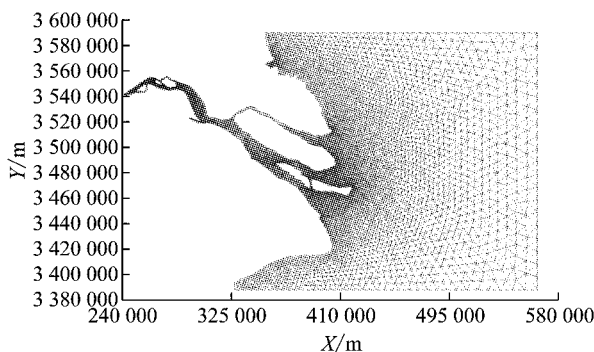


图 1 模型区域及网格

Fig. 1 Computational domain and mesh

### 1.2 边界条件和参数设定

长江口上游江阴为模型的河流边界,根据大通径流量和江阴径流量的相关性分析<sup>[9]</sup>,江阴径流量和大通径流量基本相等,江阴边界采用大通实测流量进行控制,外海开边界条件采用潮位控制,该潮位采用 TOPEX/Poseidon 卫星高程数据衍生的全球潮汐模型得到。江阴的上游盐度设置为零,在外海开边界处的盐度边界通过实测资料进行线性插值给定。风应力采用欧洲中期天气预报中心(ECMWF)给出的海面 10 m 以上、间隔为 6 h 的风场资料。底部摩擦力由粗糙高度决定,粗糙高度由曼宁数计算得到,取值范围为 0.000 2~0.001 2 m,时间步长由模型自动调节,为 0.001~60 s,柯朗数限值为 0.8。水平涡黏系数采用 Smagorinsky 公式计算,垂向涡黏系数采用  $k-\epsilon$  模型计算。模型采用干湿动边界处理技术,模型中干点临界水深取 0.005 m,湿点临界水深

取 0.05 m.

### 1.3 模型验证

模型潮位验证资料采用 2012 年 8 月 28 日 0:00 至 2012 年 8 月 28 日 23:00 连兴港和共青圩站的实测潮位数据. 流速和流向验证资料采用 2014 年 2 月 28 日 8:00 至 2014 年 3 月 1 日 7:00 的 SC 站实测流速和流向数据, 验证了该点的表层、中层、底层的流速和垂线平均流向. 盐度验证资料采用 2014 年 7 月 20 日 8:00 至 2014 年 7 月 21 日 7:00 的  $S_A$  站实测盐度数据, 验证了该点的表层和底层盐度. 模型验证点位如图 2 所示. 图 3 为潮位、流速、流向和盐度验证图, 从图中可以看出, 计算值基本与实测值相符, 模型验证结果很好.

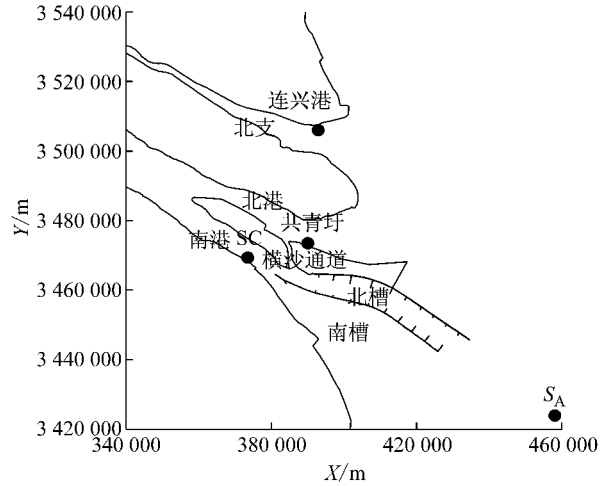


图 2 模型验证点位

Fig. 2 Location of verified stations

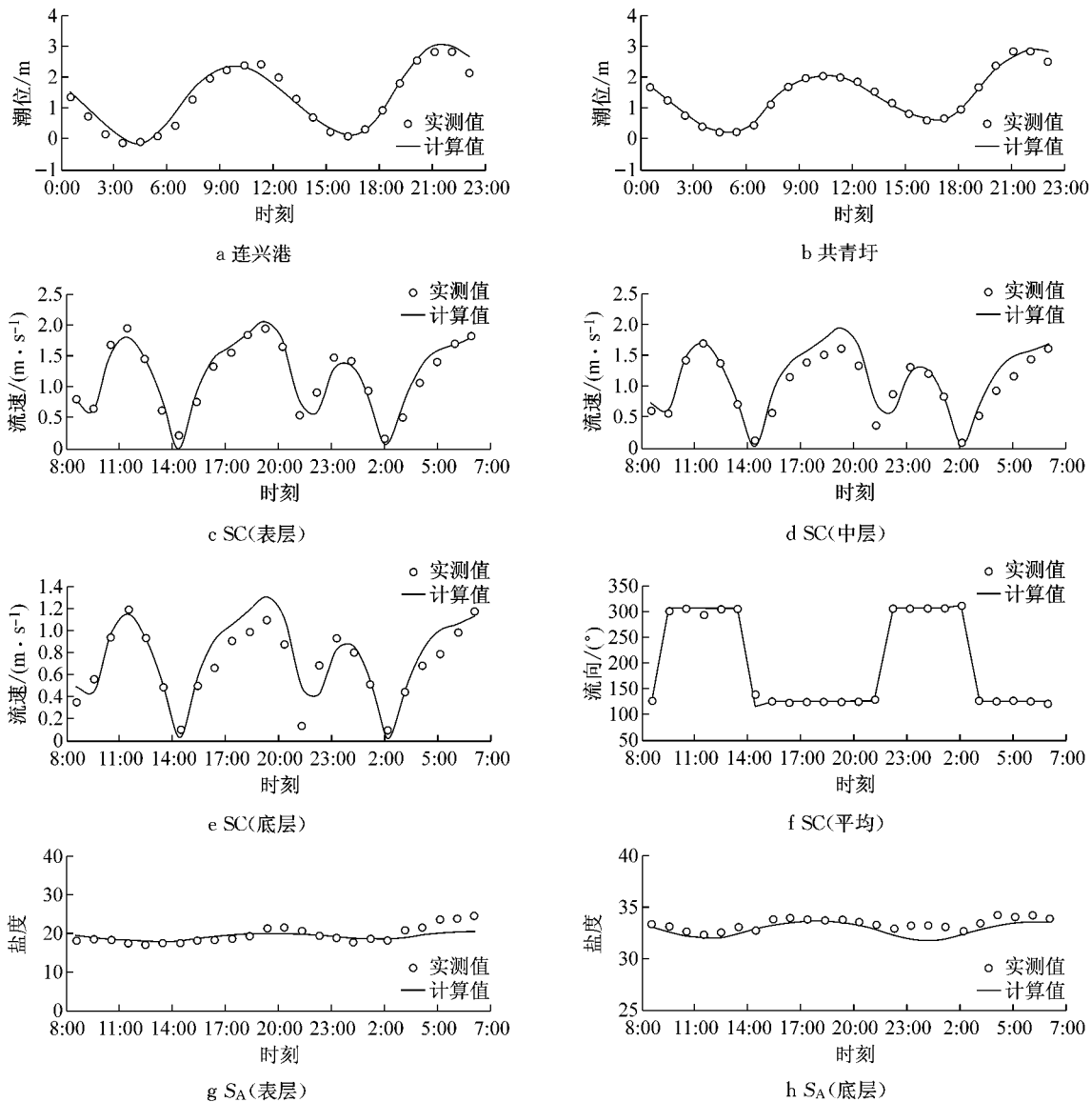


图 3 潮位、流速、流向及盐度验证

Fig.3 Verification of tidal level, velocity magnitude, current direction and salinity

为了对该模型的验证效果进行定量评价,引入模型效率这一概念进行评价模型计算结果的优劣,采用 Willmott<sup>[10]</sup>提出的方法来计算实测值( $D$ )与实测平均值( $\bar{D}$ )的偏差、模型计算值( $M$ )和( $\bar{D}$ )的偏差这两者的相关程度( $S$ ),评价公式如下:

$$S = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N |M - D|^2}{\sum_{i=1}^N (|M - \bar{D}| + |D - \bar{D}|)^2} \quad (1)$$

式中: $i$  为时间编号; $N$  为总时间。

$S$  值的范围在 0 至 1.00 之间。当  $S=1.00$  时,代表模型计算值和实测值之间完全相符; $S>0.65$  时,表示模型计算结果为极好; $0.50<S\leq 0.65$ ,表示模型计算结果为非常好; $0.20\leq S\leq 0.50$ ,表示模型计算结果为好; $S<0.20$  时,表示模型计算结果为差; $S=0$  时,代表模型计算值和实测值之间完全不相符。该模型各验证点潮位、流速、流向和盐度的  $S$  评价如表 1 所示。从表中可以看出,模型各个验证点的效率评价均为极好,所以可以应用该模型进行滞流点位置的模拟和研究。

表 1 模型效率评估

Tab.1 Model efficiency assessment

分类	测站	$S$ 值	评价
潮位	连兴港	0.995	极好
	共青圩	0.996	极好
流速	SC 表层	0.982	极好
	SC 中层	0.960	极好
	SC 底层	0.945	极好
流向	SC	0.999	极好
盐度	$S_A$ 表层	0.701	极好
	$S_A$ 底层	0.714	极好

## 2 滞流点位置的确定

滞流点概念最早见于 Simmons 等<sup>[4]</sup>对优势流的论述,认为滞流点位于河口地区涨落潮流程相等的位置。随着对河口浑浊带的成因机制和输沙机制的深入研究,认为欧拉余流断面平均为零的位置为滞流点<sup>[11]</sup>。在 Simmons 的论述中,优势流为流程的概念,由于河流地形是变化的,特别是横断面地形变化较大时,仅以河流断面平均流速作为单一变量不够准确。

本文在优势流和欧拉余流分析方法的基础上,考虑河流地形的变化,引入水深要素;考虑泥沙的运动主要由底层流速决定,采用底层流速进行计算;在河流断面上选取多个控制点,计算不同断面的河口近底层平均单宽通量。当 2 个断面的近底层平均单

宽通量方向相反,即可判定滞流点的位置位于 2 个断面间。近底层平均单宽通量 $\bar{Q}$ 计算公式如下:

$$\bar{Q} = \frac{\sum_{a=1}^T \sum_{b=1}^{M-1} (V_{ab} + V_{ab+1}) S_b D_{ab} \alpha}{2T \sum_{b=1}^{M-1} S_b} \quad (2)$$

式中: $T$  为总时间; $M$  为一个断面上控制点的个数; $a$  为时间编号; $b$  为断面上的点位编号; $V_{ab}$  为断面上一点的瞬时流速(矢量); $D_{ab}$  为瞬时流速对应的瞬时水深; $S_b$  为断面上相邻两点之间的距离; $\alpha$  为模型分层系数, $\alpha=1/Z$ ,其中  $Z$  为层数。各计算参数及河道横断面示意图如图 4 所示,图中以一个断面上选取 5 个控制点为例。

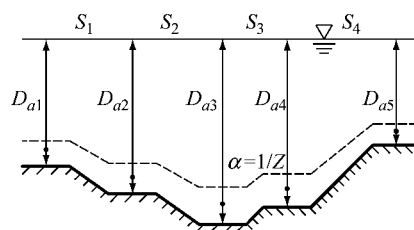


图 4 参数及横断面示意

Fig.4 Parameters and schematic diagram of cross-section

为了验证模型对滞流点位置模拟的准确性,对滞流点的模拟结果分别进行两方面的验证,模拟滞流点位置的验证结果如图 5 所示。

(1) 采用模拟的滞流点位置与实测拦门沙位置进行对比,模型外海开边界控制中浚站潮差为中等潮差 2.7 m<sup>[12]</sup>,上游江阴径流开边界条件采用统计 1950—2011 年的大通站多年平均径流量 28 200 m<sup>3</sup> · s<sup>-1</sup>。实测北港拦门沙距离横沙通道北口下游 20~55 km<sup>[13]</sup>,北槽 12.5 m 航道在 2012 年主要淤积区段为北槽中下游,即距离南北槽分流口 20~45 km<sup>[14]</sup>,南槽拦门沙长约 40 km,位于距南北槽分流口 23~63 km 处<sup>[15]</sup>。

(2) 模型外海开边界和上游江阴径流开边界均采用 2012 年 7 月实测值,参考 2012 年 7 月洪季进行的双潮同步观测的数据<sup>[16]</sup>,选取最高悬沙浓度的位置(即拦门沙测点)与 2012 年 7 月模拟滞流点的位置进行验证。

从图 5 可以看出,在多年平均径流和中等潮位条件下,模拟的滞流点位置在拦门沙的范围内。在 2012 年 7 月实际潮位和径流条件下模拟的滞流点与实测最高悬沙浓度的位置接近。总体而言,该模型模拟的滞流点的位置与泥沙淤积的位置相吻合,可以应用式(2)和该模型计算和模拟长江口滞流点位置

的变化,并分析工程对滞流点的影响。

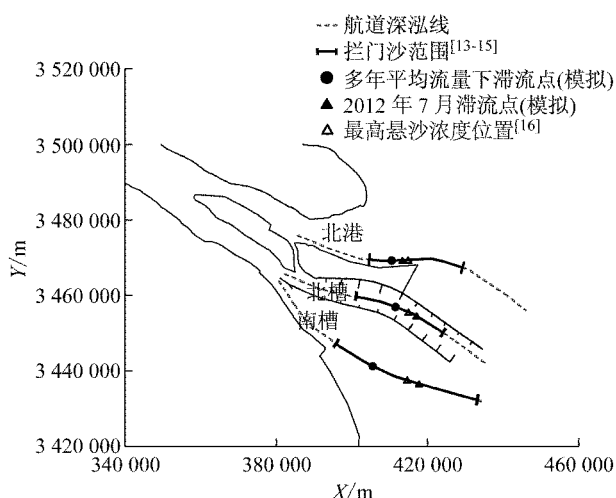


图 5 滞流点位置的验证

Fig. 5 Verification of position of stagnation points

王晓莉等<sup>[5]</sup>应用 Simmons 提出的水流优势度的算法确定滞流点的位置,采用深槽内一点的垂向平均流速进行计算。黄李冰等<sup>[7]</sup>采用底层单宽流量的算法确定滞流点的位置,但仅采用底层的流速进行计算,未考虑水深这个要素,将底层假想为一个矩形断面进行处理。分别采用上述 2 种方法进行滞流点位置的确定,并与本文采用改进后的近底层平均单宽通量公式确定的滞流点和 2012 年 7 月最高悬沙浓度的位置进行比较。从图 6 中可以看出,在水流优势度的算法下,由于仅考虑深槽内的流速,流速较大,滞流点均靠近外海,各航道滞流点的位置距离最高悬沙浓度的位置为 14.9~23.4 km。采用黄李冰

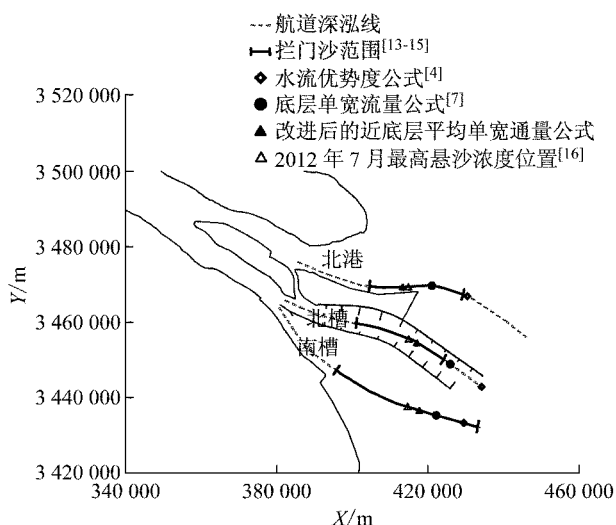


图 6 不同算法下滞流点位置的比较

Fig. 6 Comparison of positions of stagnation points calculated by different algorithms

等<sup>[7]</sup>底层单宽流量的算法,由于底层流速较垂向平均流速小,其滞流点的位置较采用优势度算法的滞流点向西移动,各航道滞流点的位置距离最高悬沙浓度的位置为 5.9~12.8 km。采用本文改进后的算法进行计算时,考虑了随时间变化的水深要素,航道内地形复杂多变,滞流点的位置距最高悬沙浓度的位置为 1.8~3.0 km。通过比较这 3 种不同算法,可以说明考虑了近底层流速和随时间变化的水深要素的改进后的算法确定的滞流点的位置与实际情况更加吻合。

### 3 长江口深水航道及横沙东滩促淤圈围工程对滞流点位置的影响

长江口深水航道工程分三期进行实施,一期和二期工程主要为修建南北双导堤、丁坝和进行河槽疏浚,三期工程主要以疏浚为主,整治建筑物包括部分丁坝加长工程、长兴潜堤工程及南坝田固沙工程<sup>[17]</sup>,使航道设计水深从 7.0 m 增加到 12.5 m,航道底宽达到 350~400 m,以满足第 4 代集装箱全潮通航和第 5 代集装箱船 10 万 t 级散货船乘潮通航的要求<sup>[18]</sup>。横沙东滩促淤圈围工程位于长江口北槽北导堤的北侧,紧邻长江口北槽深水航道,是《上海滩涂资源开发利用与保护“十二五”规划》开发利用的重点区域<sup>[19]</sup>,该工程控制长江口北港主槽的摆动,使北港下口边界稳定,同时防止滩面由于“风浪掀沙”使泥沙进入深水航槽,有利于长江口深水航道的维护。横沙东滩促淤圈围工程分期实施,目前正在进行第八期的促淤圈围工作。

滞流点的位置由近底层平均单宽通量决定,而工程的建设对长江口水动力有明显的影响,从而影响滞流点的位置。本文采用控制变量的方法,控制上游径流量为大通站多年平均流量  $28\,200\text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ,外海开边界控制中浚站潮差为中等潮差 2.7 m。通过改变长江口地形和网格,分别模拟长江口深水航道工程前、长江口深水航道工程建设后横沙东滩尚未促淤圈围及横沙东滩促淤圈围(八期)工程后 3 种工程条件下滞流点的位置。

在建立长江口模型时,综合考虑了长江口下游工程的建设。南槽和北港在深水航道工程建设的同期受到下游工程的影响,北港上段由于青草沙水库和上海长江大桥的建设,束窄了北港上段河槽,导致河槽发生大量的冲刷;由于深水航道工程的建设,增大了南槽的分流比,南槽上段的水流动力不断增强,

河床刷深,深槽展宽.这些均导致航道水深增大,改变了航槽内水动力,造成了滞流点位置的迁移.

从图 7 中可以看出,长江口深水航道工程建设前,北港滞流点靠近横沙通道,距横沙通道仅有 8 km,北槽滞流点距南北槽分流口约 27 km,南槽滞流点距南北槽分流口约为 28 km.而在深水航道工程建成以后,滞流点明显向外海移动,在横沙东滩促淤圈围的工况条件下,北港滞流点的移动距离最大为 12 km,南槽滞流点移动距离为 7 km,北槽移动距离最小为 5 km.在横沙东滩促淤圈围以后,北港的滞流点继续向海移动 5 km,而南槽和北槽的滞流点则向上游移动约 1 km,由于其水动力条件受到横沙东滩促淤圈围工程的影响较小,滞流点移动距离较小.

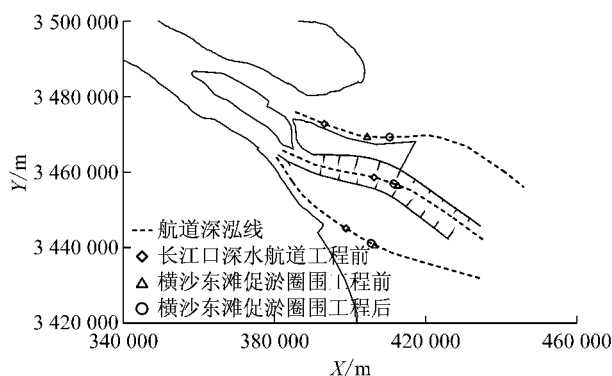


图 7 不同工程条件下滞流点的位置

Fig.7 Positions of stagnation points under different project scenarios

滞流点的移动主要是由于工程改变了涨落潮流量及其比值,航道内由于工程的建设,水动力复杂多变,为了尽可能降低其他因素的影响,更好地研究工程前后对各汊道流量与滞流点之间的关系,分别在北港、北槽和南槽上游选取如图 8 所示的 3 个断面的流量过程,其中涨潮流为正值,落潮流为负值,通

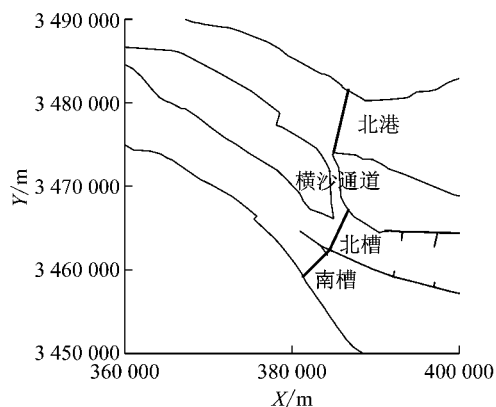


图 8 3 条分汊的典型断面选取

Fig.8 Selected three channel cross-sections

过比较工程前后流量之间的差异,分析影响滞流点的机理和范围.

在进行深水航道工程后,航道水深显著增大.从图 9 断面流量过程线中可以看出,深水航道工程前的流量明显低于深水航道工程后的流量,由于断面选择在航道的上游,落潮流历时大于涨潮流历时,且工程后的落潮流历时缩短,涨潮流历时增长,深水航道工程后增大了落潮流量的比例,这也是深水航道工程建成后滞流点下移的机理.促淤圈围工程前后的流量变化较小,变化主要集中在涨潮流过程中,北港的涨潮流历时减少,落潮流历时增加,北槽和南槽的涨落潮流历时变化趋势与北港相反.为了定量分析工程对 3 条分汊水动力的影响,图 10 给出 3 个断面不同工况下最大涨落潮流量及南北槽分流比的变化.

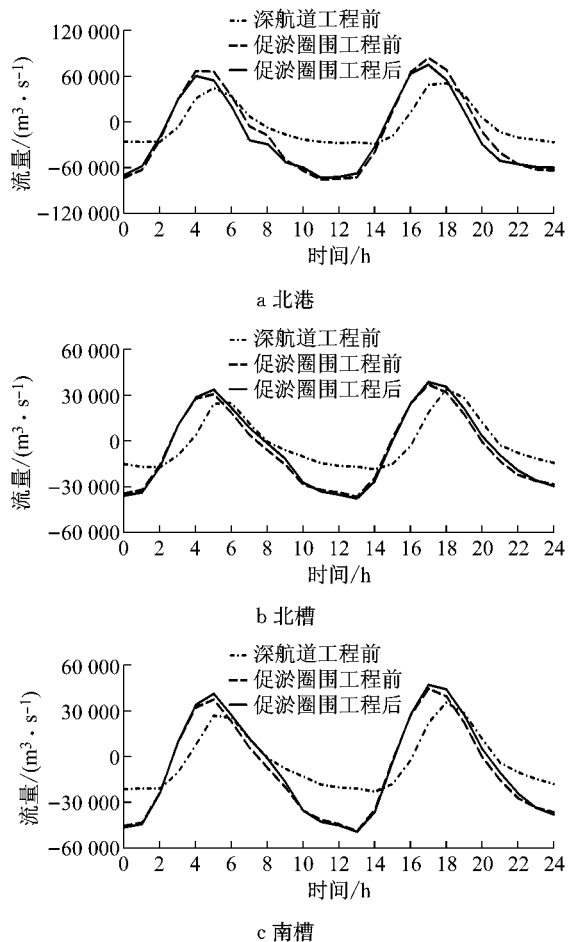


图 9 不同工程条件下流量过程比较

Fig.9 Comparisons of discharge process under different project scenarios

从图 10 中可以看出,在进行深水航道工程后,落潮流量的增加幅度明显大于涨潮流量的增加幅度,北港断面流量受到的影响最为显著,南槽和北槽

次之,这与滞流点移动距离的大小相一致.且深水航道工程后的南槽落潮分流比增加,北槽落潮分流比减小,造成南槽滞流点下移(7 km)比北槽下移(5 km)远.

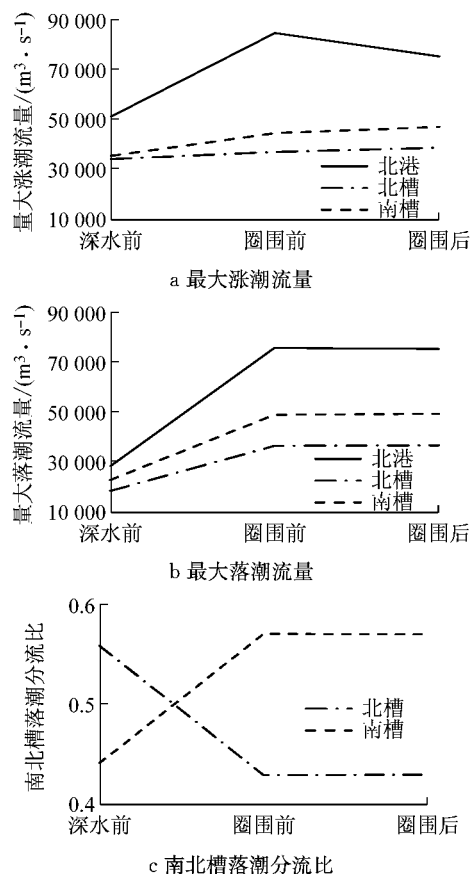


图 10 不同工况下最大涨落潮流量及南北槽分流比

Fig. 10 Maximum flood and ebb discharges and split ratio of ebb discharge of North Passage and South Passage under different project scenarios

在横沙东滩促淤圈围工程后,3 个分汊断面流量的变化幅度较小,且变化趋势不同,北港最大涨潮流量受到工程的影响较南北槽的影响大,减小幅度为 12%,而落潮流量几乎不变,因此北港的滞流点向下游移动.南槽为流量增加的趋势,增加幅度为 3%,北槽同样为增加的趋势,增加幅度为 2%,涨潮流量的增加使得落潮流量占比降低,所以南北槽在促淤圈围工程后滞流点向上游移动.工程建成后,3 个分汊断面的最大落潮流量和南北槽分流比几乎不发生变化.由此可以看出,横沙东滩促淤圈围工程对航道内的落潮流影响很小,对北港上断面涨潮流量的影响最为显著,下游工程的修建减小了北港的进水面,导致涨潮流量降低,涨潮流部分分流至北槽和南槽,由于北槽深水航道工程中导流堤的建成,北槽受

到的影响相对减小,3 条航道上断面受到促淤圈围工程的影响从大到小依次为北港、南槽、北槽.

## 4 结论

基于 MIKE3 软件建立长江口三维水动力及盐度输运数学模型,研究和分析长江口深水航道工程和横沙东滩促淤圈围工程对滞流点位置的影响,得到如下结论:

(1)在优势流和欧拉余流的基础上考虑河流地形的变化和底层流速,通过改进的近底层平均单宽通量公式确定滞流点的位置,将计算得到的滞流点的位置与拦门沙的位置和实测最大悬沙浓度的位置进行对比,表明可以应用该公式进行滞流点位置的计算.

(2)长江口深水航道工程建成后,水深增大,3 条分汊涨落潮流量均有所增加,落潮流量的增加明显高于涨潮流量的增加,增大了落潮流量的比例,滞流点均向下游移动,北港的移动距离最大,为 12 km;南槽的移动距离次之,为 7 km;北槽的移动距离最小,为 5 km.

(3)深水航道工程的建设改变了南北槽落潮分流比,工程后的南槽落潮分流比增大,北槽落潮分流比减小.

(4)横沙东滩促淤圈围工程对落潮流量的影响较小,北港涨潮流量减小,北槽和南槽涨潮流量增大.工程建成后,北港滞流点向下游移动 5 km,北槽和南槽则向上游移动约 1 km.

## 参考文献:

- [1] 朱建荣, 戚定满, 肖成猷, 等. 径流量和海平面变化对河口最大浑浊带的影响[J]. 海洋学报, 2004, 26(5):12.  
ZHU Jianrong, QI Dingman, XIAO Chengyou, et al. Impacts of change of river discharge and sea level on estuarine turbidity maximum zone [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2004, 26(5):12.
- [2] 魏守林, 郑漓, 杨作升. 河口最大浑浊带的数值模拟[J]. 海洋湖沼通报, 1990(4):14.  
WEI Shoulin, ZHENG Li, YANG Zuosheng. A numerical simulation of the turbidity maxima in estuaries [J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 1990(4):14.
- [3] 顾伟浩. 长江口滞流点位置的预测[J]. 水运工程, 1982(9):26.  
GU Weihao. Prediction of position of stagnation point in Yangtze River [J]. Port and Waterway Engineering, 1982(9):26.
- [4] SIMMONS H B, BROUN F R. Salinity effect on hydraulics and

- shoaling in estuary [C]// The 13th International Association for Hydro-Environment Engineering and Research World Congress. Kyoto: IAHR Committee, 1969(3):311-326.
- [5] 王晓莉, 顾杰, 马丹青, 等. 数值模拟长江口滞流点的季节变化[C]//第十二届全国水动力学学术会议文集. 北京:海洋出版社, 2013:1081-1087.
- WANG Xiaoli, GU Jie, MA Danqing, *et al.* Numerical simulation of the seasonal movement of stagnation points in the Yangtze Estuary [C]// The 12th National Congress on Hydrodynamics Conference Proceedings. Beijing: Ocean Press, 2013:1081-1087.
- [6] 徐锟. 长江口滞流点的数值模拟[D]. 上海:华东师范大学, 2012.
- XU Kun. Numerical simulation of the stagnation points in the Yangtze Estuary [D]. Shanghai: East China Normal University, 2012.
- [7] 黄李冰, 李义天, 韩剑桥, 等. 径潮动力对长江河口滞流点的影响[J]. 水科学进展, 2015, 26(4):572.
- HUANG Libing, LI Yitian, HAN Jianqiao, *et al.* Influence of change in river discharge and tides on stagnation points in the Yangtze estuary [J]. *Advances in Water Science*, 2015, 26(4):572.
- [8] Danish Hydraulic Institute. Mike 21 & Mike 3 Flow Model FM hydrodynamic and transport module scientific documentation [EB/OL]. [2016-10-15]. <http://www.dhigroup.com/>.
- [9] 孙波. 三峡与南水北调工程对长江口盐水楔影响的数值研究[D]. 上海:同济大学, 2009.
- SUN Bo. Numerical study on impact of South-to-North Water Transfer Project on the saline wedge of Yangtze estuary [D]. Shanghai: Tongji University, 2009.
- [10] WILLMOTT Cort J. On the validation of models [J]. *Physical Geography*, 1981, 2(55):184.
- [11] 时伟荣, 李九发. 长江河口南北槽输沙机制及浑浊带发育分析[J]. 海洋通报, 1993, 12(4):69.
- SHI Weirong, LI Jiufa. Mud transport calculation in Yangtze estuary and analyses of formation of turbidity maximum [J]. *Marine Science Bulletin*, 1993, 12(4):69.
- [12] 周念清, 王燕, 夏明亮. 长江口的演化与发展趋势[J]. 水土保持通报, 2007, 27(3):132.
- ZHOU Nianqing, WANG Yan, XIA Mingliang. Estuarine evolvement of the Yangtze River and its developing trend [J]. *Bulletin of Soil & Water Conservation*, 2007, 27(3):132.
- [13] 孔令双, 戚定满, 赵德招. 长江口北港航道整治方案初步研究[C]//第十五届中国海洋工程学术讨论会. 太原:海洋工程学会, 2011:1129-1134.
- KONG Lingshuang, QI Dingman, ZHAO Dezhaoh. Preliminary study of regulation scheme of North Channel in Yangtze estuary [C]//The 15th China Ocean Engineering Academic Conference. Taiyuan: Ocean Engineering Institute, 2011:1129-1134.
- [14] 左书华, 李松喆, 韩志远, 等. 长江口北槽河槽地形变化及深水航道回淤特征分析[J]. 水道港口, 2015, 36(1):1.
- ZUO Shuhua, LI Songzhe, HAN Zhiyuan, *et al.* Morphological change and siltation in North Passage deep waterways in Yangtze Estuary [J]. *Journal of Waterway & Harbor*, 2015, 36(1):1.
- [15] 赵德招, 张俊勇. 长江口南槽航道进一步开发的基本思路及框架[J]. 水运工程, 2016(3):89.
- ZHAO Dezhaoh, ZHANG Junyong. Basic idea and framework on further development of navigation channel of South Passage in the Yangtze estuary [J]. *Port and Waterway Engineering*, 2016(3):89.
- [16] 陆叶峰, 杨世伦, 刘建华, 等. 长江口悬沙浓度时空变化研究——以2012年和2013年洪季为例[J]. 人民长江, 2015, 46(5):19.
- LU Yefeng, YANG Shilun, LIU Jianhua, *et al.* Spatial and temporal variation of suspended sediment concentration (SSC) in Yangtze estuary: A case study on flood seasons of 2012 and 2013 [J]. *Yangtze River*, 2015, 46(5):19.
- [17] 窦润青, 郭文云, 葛建忠, 等. 长江口北槽落潮分流比变化原因分析[J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 2014(3):93.
- DOU Runqing, GUO Wenyun, GE Jianzhong, *et al.* Analysis for variation of the ebb flow diversion ratios in the North Passage of the Yangtze River Estuary [J]. *Journal of East China Normal University*, 2014(3):93.
- [18] 陈卫中. 长江口深水航道治理工程概况[J]. 水利水电技术, 1999, 30(9):69.
- CHEN Weizhong. Brief introduction of regulation project for deep water navigation channel in Yangtze estuary [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 1999, 30(9):69.
- [19] 赵恩宝, 王大伟, 曹慧江. 横沙东滩促淤圈围工程对长江口北槽深水航道的影响[J]. 中国港湾建设, 2015, 35(9):14.
- ZHAO Enbao, WANG Dawei, CAO Huijiang. Influence of Hengsha east shoal siltation and reclamation project on North Passage of Yangtze estuary deepwater channel [J]. *China Harbour Engineering*, 2015, 35(9):14.