

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2015.01.015

# 泥沙数学模型在围填海工程促淤效果预报中的适用性

崔冬<sup>1,2</sup>, 刘新成<sup>1,2</sup>, 俞相成<sup>1,2</sup>

(1. 上海市水利工程设计研究院有限公司, 上海 200061; 2. 上海围海工程技术研究中心, 上海 200061)

**摘要:** 以长江口为例, 通过与已建典型围填海工程实际促淤效果的对比分析, 以及对长江口近期围填海工程促淤效果预报的合理性分析, 研究泥沙数学模型在围填海工程促淤效果预报中的适用性。分析结果表明, 所建泥沙数学模型计算的平面淤积形态、断面淤积形态、促淤区淤积量均与实际情况吻合较好, 在近期围填海工程中的促淤效果预报较合理, 表明该泥沙数学模型适用于长江口围填海工程促淤效果预报。

**关键词:** 泥沙数学模型; 围填海工程; 促淤效果预报; 长江口南汇东滩; 长江口横沙东滩

**中图分类号:** TV148; S289      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-1980(2015)01-0078-07

## Applicability of sediment numerical model to prediction of effect of reclamation project on accelerating sediment deposition

CUI Dong<sup>1, 2</sup>, LIU Xincheng<sup>1, 2</sup>, YU Xiangcheng<sup>1, 2</sup>

(1. Shanghai Water Engineering Design and Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200061, China;

2. Shanghai Engineering Research Center of Reclamation, Shanghai, 200061, China)

**Abstract:** Taking the Yangtze Estuary as an example, applicability of the sediment numerical model to prediction of the effect of the reclamation project on accelerating sediment deposition was examined through comparison of the simulated and measured results and reasonableness analysis of predictions. The results show that the plane deposition feature, cross-sectional deposition feature, and deposition amount calculated with the sediment numerical model agree with measurements, indicating that the sediment numerical model is applicable to prediction of the effect of the reclamation project in the Yangtze Estuary on accelerating sediment deposition.

**Key words:** sediment numerical model; reclamation project; prediction of effect on accelerating sediment deposition; Nanhui East Shoal in Yangtze Estuary; Hengsha East Shoal in Yangtze Estuary

近年来,随着计算机技术的迅猛发展和水动力学与泥沙动力学理论的不完善<sup>[1-3]</sup>,泥沙数学模型在河口海岸工程的规划、设计、研究中得到了广泛的应用<sup>[4-5]</sup>。围填海促淤工程作为一类重要的河口海岸工程,促淤效果直接影响土地成陆成本乃至工程的成败,较准确地预报促淤效果是围填海工程建设过程中的重要问题。泥沙数学模型作为研究泥沙运动的重要手段之一,已被应用于促淤效果的预报中,但往往缺乏已建工程实际促淤效果的检验,预报方法是否适用尚未可知。

笔者以长江口为例,通过与已建典型围填海工程实际促淤效果对比分析,以及对长江口近期围填海工程促淤成果预报的合理性分析,研究泥沙数学模型在围填海工程促淤效果预报中的适用性,目的在于为该方法的推广应用提供依据。鉴于近年来长江口围填海工程主要分布在南汇东滩与横沙东滩两大区域<sup>[6]</sup>(见图1),本文以这两大区域为重点展开相关研究。

## 1 工程区水沙基本特征

长江口是潮汐强度中等的河口,口外为正规半日潮,口内为浅海非正规半日潮。口门附近中浚潮位站多

收稿日期: 2014-01-08

基金项目: 上海市科学技术委员会资助课题(13DZ2251500)

作者简介: 崔冬(1982—),女,江苏徐州人,工程师,硕士,主要从事河口海岸工程研究。E-mail: njcuidong\_student@sina.com

年平均高潮位为 3.51 m(吴淞基面,下同),多年平均低潮位为 0.73 m,多年平均潮差为 2.77 m。含沙量平面分布具有 4 个方面的特征:(a)发育有最大浑浊带;(b)自口门向口外水体含沙量呈中—高一中—低的分布态势;(c)4 条入海通道中,平均含沙量以南槽最高,其次为北槽,且北港大于南港,北支大于南支;(d)长江口主槽表层沉积物中值粒径分布具有从江阴向口外逐渐变细、由江阴附近的  $217.8\text{ }\mu\text{m}$  减少到南槽口外  $12.1\text{ }\mu\text{m}$  的特征<sup>[7]</sup>。

南汇东滩是长江口高含沙区域之一。由历年观测的潮流、泥沙资料<sup>[8]</sup>可知,南汇东滩区域大潮最大流速一般在  $1.0\sim2.5\text{ m/s}$  之间,小潮最大流速在  $0.5\sim1.0\text{ m/s}$  之间;大潮平均含沙量(质量浓度,下同)普遍在  $0.5\sim2.0\text{ kg/m}^3$  之间,中、小潮平均含沙量普遍在  $0.6\sim1.2\text{ kg/m}^3$  之间。

横沙东滩位于横沙岛东端。在北港、北槽水流以及浅滩地形的共同影响下,潮流流向较分散<sup>[9]</sup>,涨潮流大于落潮流,且流速一般不超过  $1\text{ m/s}$ 。全年平均含沙量约为  $0.34\text{ kg/m}^3$ ,其中洪季和枯季大潮期间含沙量偏高。

2 泥沙数学模型的建立

采用丹麦水力学研究所(DHI)研发的 MIKE 系列 Flow Model(FM)模型的 Hd 模块与 Mud 模块建立长江口潮流、泥沙数学模型。采用无结构三角形、四边形混合网格技术,通过有限体积法求解,具备计算速度快、易收敛、计算精度高等优点。其中,潮流数学模型主要为泥沙数学模型提供水动力条件,相关参数已得到了很好的率定验证,限于篇幅不再赘述,以下重点介绍泥沙数学模型。

2.1 基本方程

a. 泥沙对流扩散方程<sup>[10]</sup>:

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

(1)

$$S = \begin{cases} \omega_s c_b \left( 1 - \frac{\tau_b}{\tau_{cd}} \right) & \tau_b < \tau_{cd}, \text{河床淤积} \\ 0 & \tau_{cd} \leq \tau_b \leq \tau_{ce}, \text{河床不冲不淤} \\ E \left( 1 - \frac{\tau_b}{\tau_{ce}} \right)^n & \tau_b > \tau_{ce}, \text{河床冲刷} \end{cases}$$

(2)

$$E = E_0 \exp[\alpha(\tau_b - \tau_{ce})]$$

(3)

式中: $\bar{c}$ ——垂线平均含沙量; $t$ ——时间; $x、y$ ——直角坐标系坐标; $\bar{u}、\bar{v}$ —— $x、y$  方向上的垂线平均流速; $h$ ——动态水深; $D_x、D_y$ —— $x、y$  方向的泥沙扩散系数; $S$ ——河床冲刷和淤积的源汇项; $\omega_s$ ——泥沙絮凝沉降速度; $c_b$ ——近底含沙量; $\tau_b$ ——瞬时底床切应力; $\tau_{cd}$ ——临界淤积切应力; $\tau_{ce}$ ——临界侵蚀切应力; $E$ ——侵蚀率; $E_0$ ——侵蚀系数; $\alpha$ ——系数。

b. 河床冲淤变化方程:

$$Z_{n+1} = Z_n + \Delta z_n S_{\text{speedup}}$$

(4)

式中: $Z_n、Z_{n+1}$ ——河床在第  $n$  步及第  $n+1$  步的高程; $\Delta z_n$ ——河床在第  $n$  步的高程变化; $S_{\text{speedup}}$ ——河床变形加速因子。

2.2 计算区域及网格

模型范围涵盖长江口与杭州湾(图 2),上游取至江阴,东至  $123^\circ\text{E}$ ,北至江苏吕泗港( $32^\circ15'\text{N}$ ),南至浙

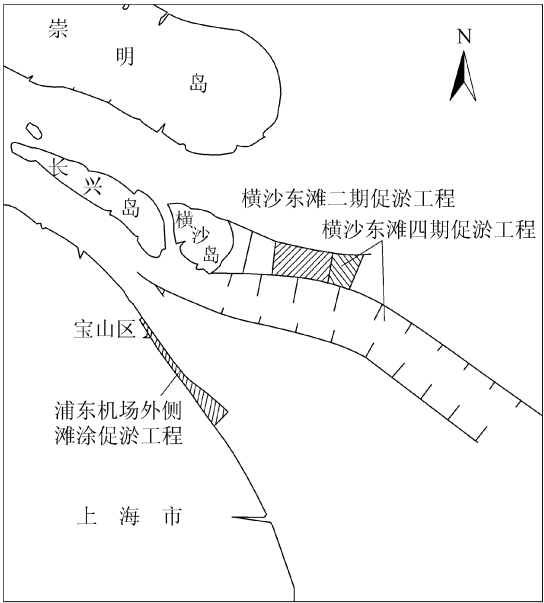


图 1 “十一五”期间长江口促淤工程位置示意图

Fig. 1 Sketch of reclamation projects in Yangtze Estuary during period of 11th Five-Year Plan

江象山港(29°30'N),模拟水域面积约为410万hm<sup>2</sup>。网格采用渐变技术,工程区域网格边长最小为5m。模型节点总数约10万个,网格总数约20万个。根据经验,模型范围及网格精度足够满足本研究需要。

2.3 边界条件设定及重要参数选取

悬沙边界条件中,上游江阴边界按大通站多年平均含沙量0.46kg/m<sup>3</sup>给定,外海的东边界位于低含沙区,含沙量按0kg/m<sup>3</sup>给定,北边界及南边界根据长江口外多年平均含沙量分布情况进行线性插值给定。

波浪场选用常浪向NE向波浪作为代表波浪,波高及平均周期按引水船站多年平均波高0.9m、平均周期3.9s计。

泥沙的絮凝沉降速度参照泥沙粒径和盐度的沿程分布情况在0.08~0.70mm/s之间取值,并根据验证情况进行适当修正。

床沙临界侵蚀切应力根据经验参照水深分布情况进行赋值,并根据验证情况进行修正。其中南北港取值范围为0.1~10Pa,南槽取值范围为0.1~2Pa,北槽取值范围为0.1~6Pa。侵蚀率按北槽现场观测资料取值, $E=8.7\times10^{-5}\text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 。

临界淤积切应力根据经验按0.05Pa给定。

2.4 含沙量的率定验证情况

泥沙数学模型计算的长江口洪季大潮期间垂线平均含沙量分布如图3(a)所示,可以看出,模拟的拦门沙地区的最大浑浊带以及4条入海通道的含沙量分布特征符合实际分布规律。此外,还采用2009年8月20日至9月5日的长江口悬沙观测资料对南港、北港、南槽、北槽等区域的含沙量进行率定验证,验证情况良好,限于篇幅,仅列出南槽测点的验证情况(图3(b))。

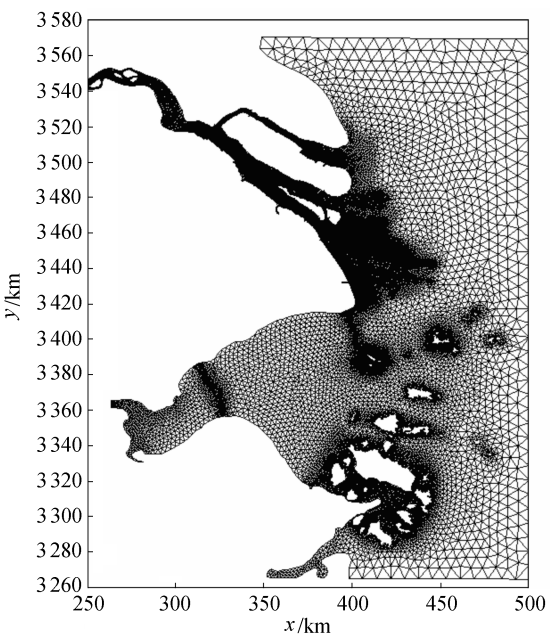
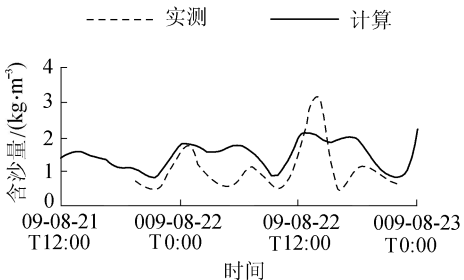
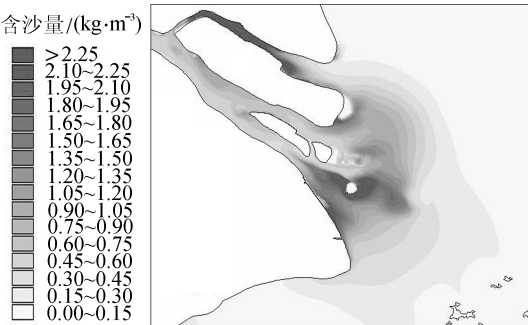


图2 模型范围及网格剖分  
Fig. 2 Model area and mesh generation



(a) 含沙量模拟结果  
(b) 南槽测点含沙量验证情况

图3 长江口大潮含沙量验证情况

Fig. 3 Comparison of simulated and measured sediment concentrations during spring tide in Yangtze Estuary

3 与已建围填海工程实际促淤效果对比分析

3.1 浦东机场外侧促淤工程分析

浦东机场外侧促淤工程<sup>[11]</sup>3号促淤区面积为1350hm<sup>2</sup>(位置见图1),工程于2007年12月开工,至2008年12月完工。促淤前地形为两滩加一槽(见图4(a));自北向南依次划分为3#a至3#d共4个小促淤区;纳潮口均布置在东侧的顺堤上,纳潮口与涨落潮方向平行,涨潮期间促淤区内形成回流,流速普遍较小(见图4(b)),有利于泥沙在促淤区落淤。

根据促淤前后地形测量资料统计,结果表明:促淤区实际促淤效果良好(见图5(a)),经过1a的工程促淤,平均淤积厚度达到1.4m,淤积总量达到1900万m<sup>3</sup>;浅滩段淤积厚度小,深槽段淤积厚度大;纳潮口段淤

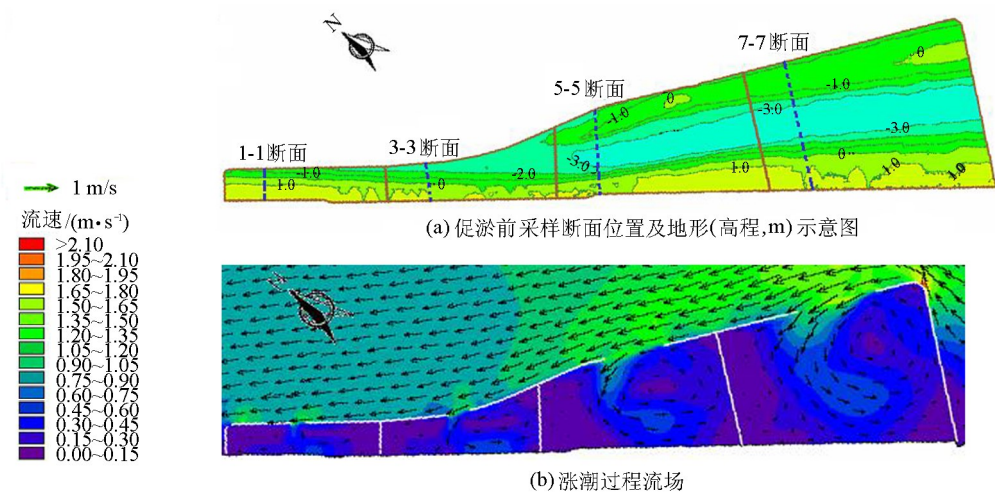


图 4 浦东机场外侧促淤工程 3 号促淤区地形及流场分布

Fig. 4 Bathymetry and local flow field in third accelerating deposition zone for reclamation project outside Pudong International Airport

积厚度小(局部略有冲刷),顺堤内侧非纳潮口段淤积强度大。

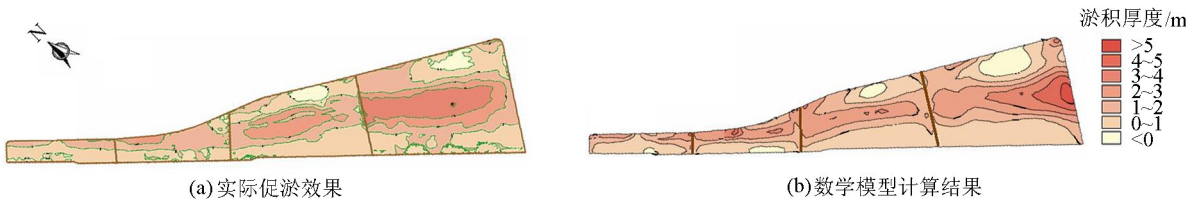


图 5 浦东机场外侧促淤工程 3 号促淤区淤积 1 a 效果对比

Fig. 5 Comparison of actual and calculated deposition depth isolines in third accelerating deposition zone after one year's implementation of reclamation project outside Pudong International Airport

将本次泥沙数学模型计算结果与实际淤积情况进行对比,结果如下:

a. 从平面淤积形态(图 5)来看,泥沙数学模型计算得到的平面淤积形态与实际淤积分布较一致,能反映浅滩段淤积厚度小、深槽段淤积厚度大以及纳潮口段淤积厚度小、非纳潮口段淤积厚度大等特征;冲淤等值线分布与实际情况较接近。

b. 从采样断面(位置见图 4(a))淤积形态(图 6)来看,泥沙数学模型计算得到的促淤后的地形与实际促淤后的地形,形态与具体量值均吻合较好。

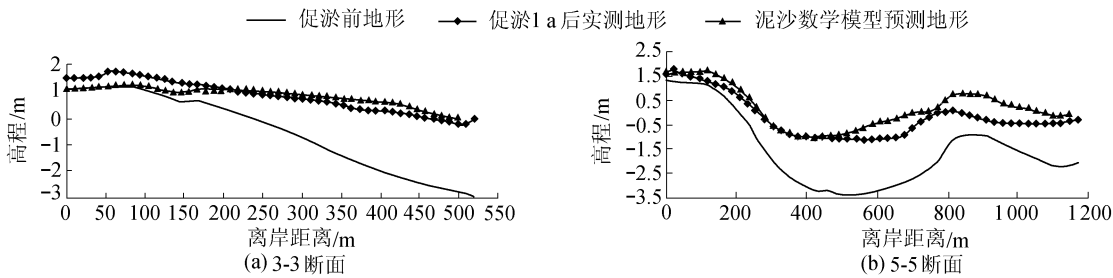


图 6 浦东机场外侧促淤工程断面冲淤形态对比

Fig. 6 Comparison of actual and calculated terrain in deposition zone for reclamation project outside Pudong International Airport

c. 从促淤区淤积量(表 1)来看,泥沙数学模型计算得到的淤积厚度与实际淤积厚度量值接近,各促淤区误差均在 50% 以内,符合 JTJ/T 233—1998《海岸与河口潮流泥沙模拟技术规程》相关要求。

3.2 横沙东滩四期促淤工程分析

横沙东滩四期促淤工程<sup>[12]</sup>位于二期工程的东侧(见图 1),促淤面积为 1 510 hm<sup>2</sup>;四期工程东侧(即新建

堤与 N23 丁坝之间) 亦形成一个新的促淤区, 面积为 3 130 hm<sup>2</sup>, 如图 7(a) 所示。该促淤工程 2007 年 12 月动工, 2009 年 5 月完工。促淤前地形相对平整, 除部分沟槽外, 四期及其东侧促淤区滩面高程普遍在 -2 ~ 2 m 之间 (见图 7(a))。纳潮口布置在北侧的顺堤上。涨潮水体主要漫过 N23 丁坝进入东侧促淤区, 并通过纳潮口进入四期促淤区 (见图 7(b))。

根据促淤前后地形测量资料统计, 经过 1.5 a 的工程促淤, 促淤区平均淤厚约 0.8 m,

表 1 浦东机场外侧促淤工程 3 号促淤区淤积 1 a 淤泥厚度对比  
Table 1 Comparison of actual and calculated deposition depths in third accelerating deposition zone after one-year implementation of reclamation project outside Pudong International Airport

| 促淤区分仓 | 淤泥厚度  |       |      |
|-------|-------|-------|------|
|       | 实测值/m | 计算值/m | 误差/% |
| 3#a   | 0.7   | 0.9   | 28   |
| 3#b   | 1.2   | 1.6   | 33   |
| 3#c   | 1.1   | 1.2   | 9    |
| 3#d   | 1.7   | 1.6   | -6   |
| 平均    | 1.4   | 1.5   | 7    |

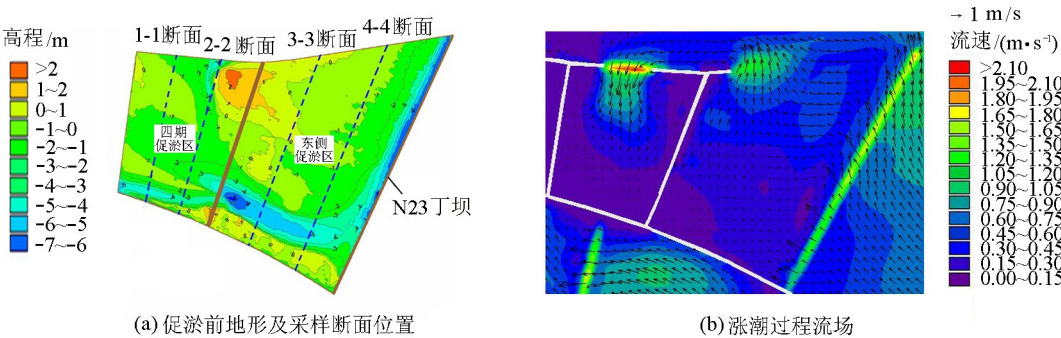


图 7 横沙东滩四期促淤工程地形及流场分布

Fig. 7 Bathymetry and local flow field of deposition zone for fourth-stage reclamation project in Hengsha East Shoal  
2 个促淤区淤积总量约 3 600 万 m<sup>3</sup>, 淤积速度远远超过自然淤积速度。纳潮口附近略有冲刷, 其余区域普遍淤积; 除近堤坝段沟槽的淤积幅度较大外, 促淤区淤积厚度分布相对均匀, 如图 8(a) 所示。

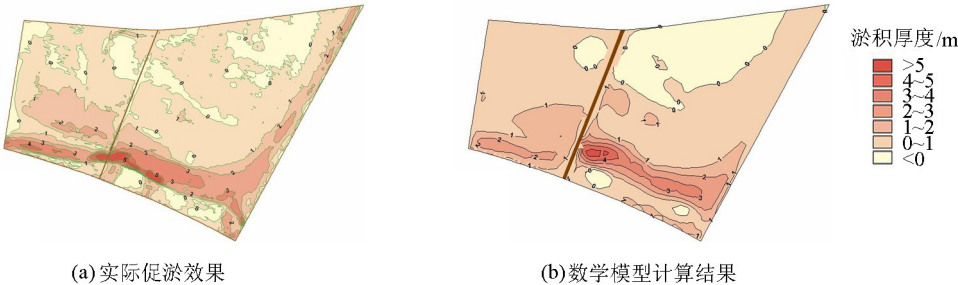


图 8 横沙东滩四期促淤工程促淤区促淤 1.5 a 效果对比

Fig. 8 Comparison of actual and calculated deposition depth isolines in accelerating deposition zone after 1.5-year implementation of fourth-stage reclamation project in Hengsha East Shoal

将本次泥沙数学模型计算结果与实际淤积情况进行对比, 可以看出: (a) 从平面淤积形态来看 (图 8), 泥沙数学模型计算得到的平面冲淤形态与实测冲淤分布较一致, 模拟出了纳潮口附近略有冲刷、局部深槽淤积厚度大的特点。 (b) 从采样断面 (断面位置见图 7(a)、淤积形态见图 9) 来看, 泥沙数学模型计算得到的促

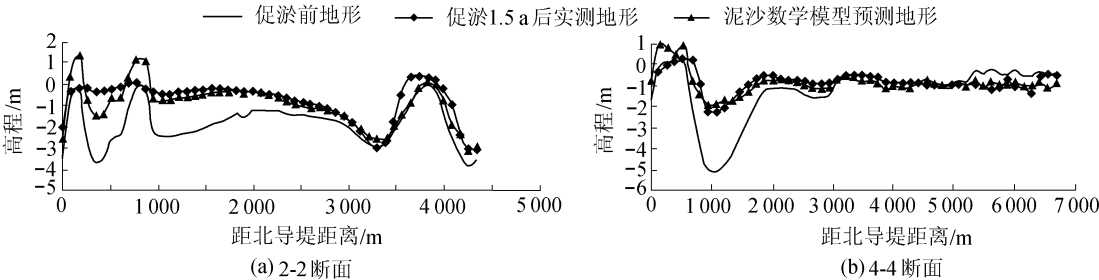


图 9 横沙东滩四期促淤工程断面冲淤形态对比

Fig. 9 Comparison of actual and calculated terrain for fourth-stage reclamation project in Hengsha East Shoal

淤后的地形与实际促淤后的地形形态吻合较好。(c)从促淤区淤积量(表 2)来看,泥沙数学模型计算得到的淤积厚度与实际淤积厚度接近,四期促淤区误差仅为 2.5%,东侧促淤区误差为 20%,误差均在 50% 以内,符合 JTJ/T 233—1998《海岸与河口潮流泥沙模拟技术规程》相关要求。

3.3 适用性分析小结

通过以上分析可以看出,在长江口南汇东滩与横沙东滩两大区域典型的围填海工程中,泥沙数学模型计算的平面淤积形态、断面淤积形态、促淤区淤积量均与实际情况吻合较好,表明采用泥沙数学模型进行促淤效果预报的方法在长江口是适用的。

4 近期围填海工程促淤效果预报的合理性分析

根据《上海市滩涂资源开发利用与保护“十二五”规划》<sup>[6]</sup>,长江口近期规划实施的围填海工程主要位于南汇东滩与横沙东滩(见图 10)。其中规划实施的南汇东滩促淤工程(一期)促淤面积约 10 340 hm<sup>2</sup>,已于 2013 年 3 月开工;规划实施的横沙东滩促淤工程约 3 130 hm<sup>2</sup>,相关前期研究正在进行中。参考相关前期研究确定的工程平面布置,采用上述建立的泥沙数学模型进行促淤效果预报,预报结果(图 11)表明:

a. 南汇东滩促淤工程第 1 年平均淤积厚度预计在 0.7 m,淤积总量预计在 7 000 万 m<sup>3</sup>;深槽段淤积厚度大、浅滩段淤积厚度小。将图 11(a)与图 5(a)进行对比可以看出,淤积形态与已完工的浦东机场外侧促淤工程类似,淤积厚度也具有可比性,说明了预报成果的合理性。

b. 横沙东滩促淤工程第 1 年平均淤积厚度预计在 0.9 m 左右,淤积总量预计在 2 800 万 m<sup>3</sup>;纳潮口附

表 2 横沙东滩四期促淤区淤积 1.5 a 淤泥厚度对比  
Table 2 Comparison of actual and calculated deposition depths in accelerating deposition zone after 1.5-year implementation of fourth-stage reclamation project in Hengsha East Shoal

| 促淤区分仓 | 淤泥厚度  |       |       |
|-------|-------|-------|-------|
|       | 实测值/m | 计算值/m | 误差/%  |
| 四期促淤区 | 0.80  | 0.82  | 2.50  |
| 东侧促淤区 | 0.75  | 0.60  | 20.00 |

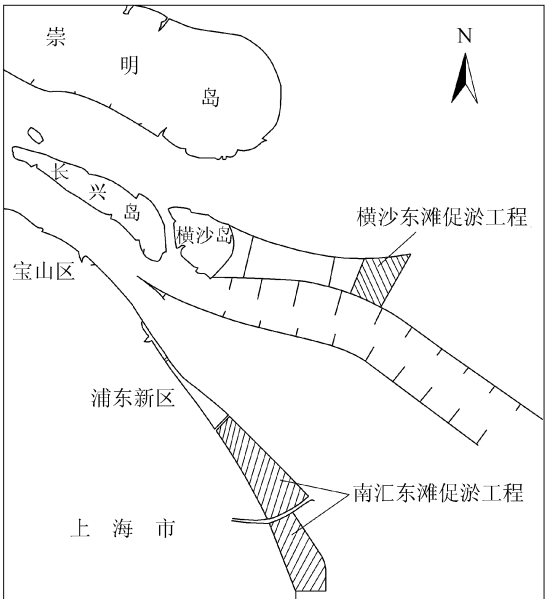


图 10 “十二五”期间长江口促淤工程位置示意图

Fig. 10 Sketch of reclamation projects in Yangtze Estuary during period of 12th Five-Year Plan

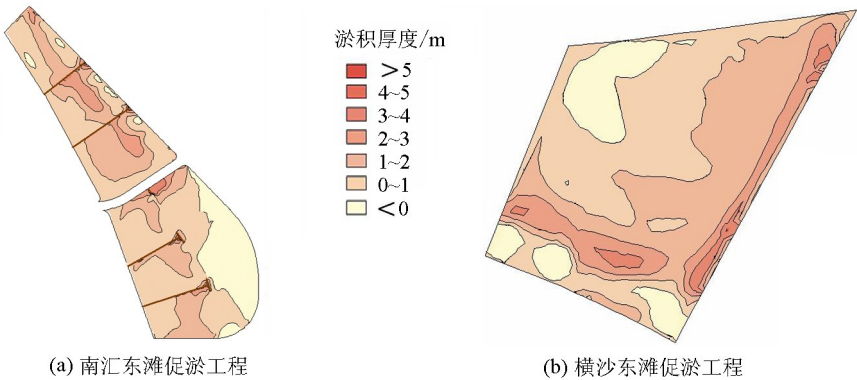


图 11 泥沙数学模型预报效果(1 a)

Fig. 11 Comparison of predicted and measured deposition depths after one-year implementation of reclamation project 近略有冲刷,局部深槽淤积厚度大;将图 11(b)与图 8(a)进行对比可以看出,淤积形态与已完工的横沙东滩四期促淤工程类似,淤积厚度也具有可比性,说明了预报成果的合理性。

长江口近期围填海工程促淤效果预报的合理性,进一步表明采用泥沙数学模型进行促淤效果预报的方法在长江口是适用的。

5 结 语

在分析长江口水沙特征的基础上,采用 MIKE 21 FM 商业软件建立了长江口泥沙数学模型,研究泥沙数学模型在围填海工程促淤效果预报中的适用性,主要结论如下:

- a. 较准确地预报促淤效果是围填海工程建设过程中的重要问题,应引起足够的重视。
- b. 与南汇东滩、横沙东滩两大区域已建典型围填海工程的实际促淤情况相比,所建泥沙数学模型计算得到的平面淤积形态、断面淤积形态、促淤区淤积量均与实际情况吻合较好,表明采用泥沙数学模型进行促淤效果预报的方法在长江口是适用的。
- c. 建立的泥沙数学模型对长江口近期围填海工程促淤效果预报成果较合理,进一步表明采用该泥沙数学模型进行促淤效果预报的方法在长江口是适用的。

参考文献:

[ 1 ] 刘家驹,喻国华. 海岸工程泥沙的研究和应用[J]. 水利水运工程学报,1995(3):221-233. (LIU Jiaju, YU Guohua. Study and application on sediment of coastal engineerings[J]. Hydro-Science and Engineering, 1995(3): 221-233. (in Chinese))

[ 2 ] 万远扬,金中武,黄仁勇. 泥沙模型研究述评与前景研究[J]. 南水北调与水利科技,2006, 4(1):48-51. (WAN Yuanyang, JIN Zhongwu, HUANG Renyong. Outlook and prospect on sedimentation model study[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2006, 4(1): 48-51. (in Chinese))

[ 3 ] 李孟国. 河口海岸泥沙数学模型研究进展[J]. 海洋工程, 2006, 24(1):139-154. (LI Mengguo. A review on mathematical models of sediment in coastal and estuarine waters[J]. The Ocean Engineering, 2006, 24(1):139-154. (in Chinese))

[ 4 ] 王新中,白玉川,槐文信. 钦州湾二维水流泥沙数学模型及应用[J]. 水科学与工程学报,2006(1):53-55. (WANG Xinzong, BAI Yuchuan, HUAI Wenxin. Application of two dimensional current sediment mathematical model in Qinzhou Bay [J]. Water Sciences and Engineering Technology, 2006(1): 53-55. (in Chinese))

[ 5 ] 李孟国. 温州浅滩围涂促淤工程泥沙数值模拟研究[J]. 泥沙研究,2005(5):5-12. (LI Mengguo. Numerical study on deposit-promoting schemes in the reclamation project of Wenzhou Shoal[J]. Journal of Sediment Research, 2005(5): 5-12. (in Chinese))

[ 6 ] 上海市水利工程设计研究院. 上海市滩涂资源开发利用与保护“十二五”规划[R]. 上海:上海市水利工程设计研究院, 2009.

[ 7 ] 刘红,何青,孟翊,等. 长江口表层沉积物分布特征及动力响应[J]. 地理学报, 2007, 62(1):81-92. (LIU Hong, HE Qing, MENG Yi, et al. Characteristics of surface sediment distribution and its hydrodynamic responses in the Yangtze River Estuary[J]. Acta Geographica Sinica, 2007, 62(1): 81-92. (in Chinese))

[ 8 ] 崔冬,刘新成,俞相成. 潮汐河口大型中低滩促淤工程围区内部布局研究[J]. 水利水运工程学报,2012(1):27-33. (CUI Dong, LIU Xincheng, YU Xiangcheng. The interior layout research of large-scaled reclaiming projects on middle and low beach in tidal estuary[J]. Hydro-Science and Engineering, 2012(1): 27-33. (in Chinese))

[ 9 ] 桑永尧,虞志英,金镠. 长江河口横沙东滩自然演变及工程影响[J]. 东海海洋,2003,21(3):14-23. (SANG Yongyao, YU Zhiying, JIN Liu. Natural evolution and effect of project in the Hengsha East Shoal of the Changjiang River Estuary[J]. Donghai Marine Science, 2003, 21(3): 14-23. (in Chinese))

[10] DHI. MIKE21 & MIKE3 Flow model mud transport module scientific documentation[M]. Copenhagen: DHI, 2009: 6-7.

[11] 上海市水利工程设计研究院. 浦东机场外侧滩涂促淤围区工程:促淤工程2标初步设计报告[R]. 上海:上海市水利工程设计研究院,2007.

[12] 上海市水利工程设计研究院. 横沙东滩促淤围区(四期)工程:勘察设计方案[R]. 上海:上海市水利工程设计研究院, 2007.