

黄哲, 刘强, 倪万洲, 等. 苏北废黄河口滨海港建设对近海水沙和床面冲淤的影响[J]. 海洋地质前沿, 2023, 39(12): 43-55.

HUANG Zhe, LIU Qiang, NI Wanzhou, et al. Impacts of Binhai Port construction on offshore water and sediment transportation along the abandoned Yellow River mouth[J]. Marine Geology Frontiers, 2023, 39(12): 43-55.

# 苏北废黄河口滨海港建设对近海水沙和床面冲淤的影响

黄哲<sup>1,2</sup>, 刘强<sup>3</sup>, 倪万洲<sup>1,2</sup>, 徐海珏<sup>1,2\*</sup>, 白玉川<sup>1,2</sup>

(1 天津大学水利工程智能建设与运维全国重点实验室, 天津 300350;

2 天津大学河流海岸工程泥沙研究所, 天津 300350; 3 中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007)

**摘要:**以废黄河三角洲海岸盐城市滨海港的建设为背景, 通过建立二维潮流泥沙数学模型, 模拟建港前后水动力场环境与泥沙运移变化, 分析滨海港建设对近海水沙的影响。南北堤建成后, 流速变化主要集中在防波堤建设区域 15 m 等深线以内海域, 变化量为 $-0.8\sim 0.5$  m/s。北堤堤头流速增幅明显, 除大潮落急外港区均处在流速减小区, 流速衰减幅度最高可达 0.6 m/s。建港工程造成海域内潮汐不规则性减弱, 主要分潮的平均振幅比降低约 10%。建港工程对近海地貌格局的影响集中在港区周围 8 km 范围, 且基本在 16 m 等深线以内海域, 淤积区域分布在港区口门周围, 冲刷区域分布在北堤堤头, 床面变化随着时间推移加剧。

**关键词:**滨海港; 废黄河口; 水动力环境; 泥沙运动

中图分类号: P736; P731.2

文献标识码: A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2022.229

## 0 引言

大河三角洲区域是人口和经济活动的聚集区, 其地貌形态的演变得到了全世界范围内的关注<sup>[1-4]</sup>。由于河流改道或上游的水库建设, 导致三角洲失去泥沙来源, 出现了显著的河口侵蚀甚至废弃情况<sup>[5-7]</sup>, 从而对近岸三角洲地形和海港建设带来影响<sup>[8-9]</sup>。废黄河三角洲处于苏北平原东北部, 北自灌河口, 南至射阳河口。在国内外对于废河口三角洲的研究中, 其作为典型的现代废弃三角洲占有重要地位, 1128 年黄河在这里夺淮河入海, 并在之后的 700 多年间(1128—1855 年)在这里入海所运输的大量泥沙造就了苏北广阔的冲积平原<sup>[10-11]</sup>, 造就了陆上面积约 9 000 km<sup>2</sup>, 水下面积约 25 000 km<sup>2</sup>的三角

洲<sup>[12]</sup>。1855 年黄河北归流入渤海, 来自陆地方向的泥沙供应断绝, 在海洋动力作用下该地区进入全面侵蚀改造的过程<sup>[13-14]</sup>。截止到 2014 年, 废黄河三角洲海岸全长约 127.5 km, 地貌面积约 857.67 km<sup>2</sup><sup>[15]</sup>。在此背景下, 随着江苏沿海开发战略的实施, 沿岸兴起港口码头、航道工程的开发建设, 形成了连云港、滨海、射阳、大丰、吕四、灌河口和通州湾诸港等初具规模的港口<sup>[16-17]</sup>。

建港工程在产生经济效益的同时, 也会对近岸水动力与地貌格局演变产生影响。季则舟<sup>[18]</sup>探讨了粉砂质海岸港口建设平面布局与水路域布置的考虑因素; 在渤海湾海域, 白玉川等<sup>[19]</sup>分析了天津港附近潮流场对于大规模围填海工程建设的响应; 白玉川等<sup>[19]</sup>、冯海防等<sup>[20]</sup>模拟了黄骅港工程与外航道防波堤外延工程下潮流场, 模拟结果显示相较于渤海湾, 工程区附近的潮流场变化更加剧烈, 港池与防波堤内潮动力受此影响减弱, 导致泥沙在港池与规划航道发生淤积; 李少红<sup>[21]</sup>认为京唐港平面布局有效抑制了泥沙的集中淤积, 骤淤碍航的可能性降低; 蔡学石等<sup>[22]</sup>建立数学模型, 模拟波流作用下威海中心渔港工程建设前后水动力与床面变化; 在浙江沿岸海域, 王震等<sup>[23]</sup>在淤泥质海岸港口工

收稿日期: 2022-08-15

资助项目: 国家自然科学基金(52109097); 天津市科技计划项目(21JC-QNJ00480)

作者简介: 黄哲(1991—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事河口海岸工程泥沙方面的研究工作。E-mail: huangzhe1829@tju.edu.cn

\* 通讯作者: 徐海珏(1977—), 女, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事河口海岸动力及演变方面的研究工作。E-mail: xiaoxiaoxu\_2004@163.com

程建设的背景下,探讨在坎门渔港三期防波堤工程背景下潮流、泥沙淤积对防波堤布置的响应;在江苏沿岸海域,张玮等<sup>[24]</sup>模拟苏北连云港、徐圩港区和灌河口导堤工程实施后水流泥沙场的变化。谢灵运等<sup>[25]</sup>对通州湾工程规划前后水动力及泥沙冲淤变化情况进行分析,其附近区域水动力有明显削弱,但辐射沙脊群主体演化未受到较大影响。现有研究表明,建港工程对近岸水动力场与泥沙场产生了影响,而这类研究在废黄河口的滨海港区还相对缺乏。滨海港建设完成后港池与航道内泥沙回淤现象较严重,北堤堤头外侧出现侵蚀深坑,对软体排稳定及北堤安全造成威胁,加之近些年来黄河北归后岸滩侵蚀加剧,滨海港区的建设对于该地区近海水动力及泥沙运动的影响更加具有研究的典型性<sup>[15]</sup>。已有研究也表明,局部的航道工程改变了水下地形,从而影响了水下岸坡的稳定性<sup>[26]</sup>。但是对于港口建设引起的近岸水动力场、悬沙场及水下三角洲地形演变的研究还较为缺乏。利用数值模拟的方法科学分析废黄河三角洲近海水沙场对港区建设的动力响应,理清近岸水下地貌演变规律,对废黄河三角洲海岸今后的开发利用与防灾减灾具有理论意义与工程意义。

本文选择苏北废黄河三角洲及其毗邻海域为研究区域,以潮汐、潮流等水动力场环境与泥沙运移为研究对象,通过所建立的二维潮流泥沙数学模

型进行模拟,分析滨海港建设对近海水沙的影响。

## 1 模型建立

### 1.1 区域概况

盐城市滨海港位置突出,地处废黄河三角洲海岸尖部(图1),2011年在突出部位建成了环抱式防波堤并投入使用<sup>[27]</sup>(图2)。北堤堤头水深约14 m处,南堤头约10 m,港池水域面积约为5 km<sup>2</sup>,口门段距离约为900 m。

### 1.2 基本理论

#### 1.2.1 控制方程

##### (1)潮流数学模型

平面二维水流连续方程:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}h}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}h}{\partial y} = hs \quad (1)$$

动量方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{u}h}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}^2h}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}\bar{u}h}{\partial y} &= f\bar{v}h - gh \frac{\partial \eta}{\partial x} - \\ \frac{h\partial p_a}{\rho_0 \partial x} - \frac{gh^2}{2\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{\tau_{sx}}{\rho_0} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_0} & \\ + \frac{\partial (hT_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial (hT_{xy})}{\partial y} + hu_s s & \end{aligned} \quad (2)$$

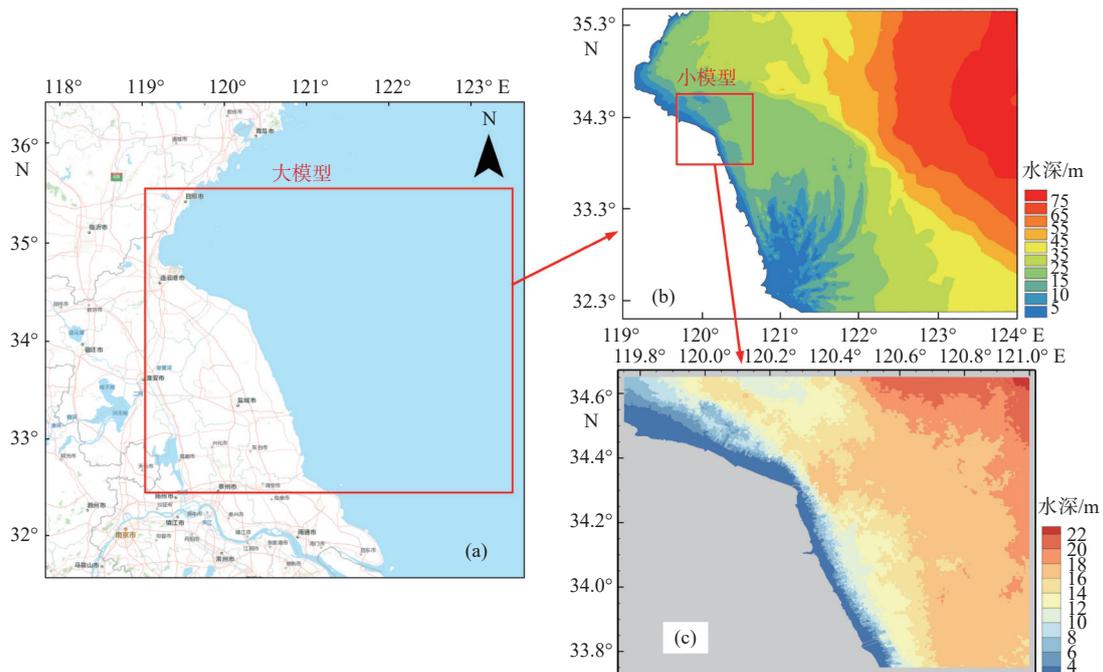


图1 研究区域废黄河口位置 (a)、大模型计算区域水深云图 (b) 和小模型计算区域水深云图 (c)

Fig.1 Location of the old Yellow River mouth (a), water depth distribution in the area calculated by the large model (b) and water depth distribution in the area calculated by the small model (c) in the study area

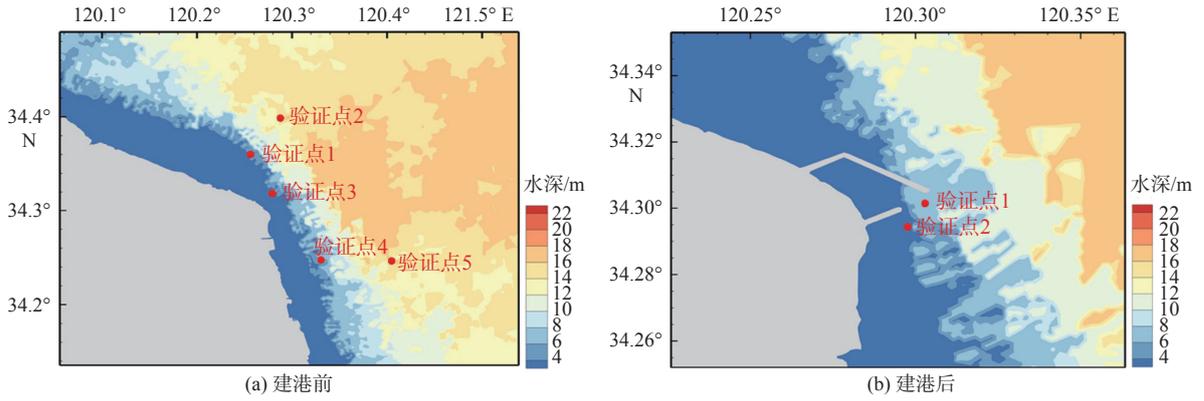


图 2 建港前后变化

Fig.2 Changes before and after the port construction

$$\frac{\partial \bar{v} \bar{u} h}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}^2 h}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v} h}{\partial t} = f \bar{u} h - g h \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{h \partial p_a}{\rho_0 \partial y} - \frac{g h^2}{2 \rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial y} + \frac{\tau_{sy}}{\rho_0} - \frac{\tau_{by}}{\rho_0} + \frac{\partial (h T_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial (h T_{yy})}{\partial y} + h v_s s \quad (3)$$

$$h \bar{u} = \int_{-d}^{\eta} u dz, h \bar{v} = \int_{-d}^{\eta} v dz \quad (4)$$

式中:  $\eta$  为水面高程;

$d$  为静水水深;

$h$  为水深,  $h = \eta + d$ ;

$\bar{u}$  和  $\bar{v}$  分别为沿水深和水平方向的平均流速;

$\rho_0$  为水的相对密度;

$\tau_{sx}$ 、 $\tau_{bx}$ 、 $\tau_{sy}$ 、 $\tau_{by}$  分别为自由表面和底床表面的水平剪切力;

$s$  为点源流量大小, 由于本文主要研究滨海港建设对废黄河三角洲潮流场的影响, 不考虑河流的输入, 因此  $s$  取值为 0;

$u_s$  和  $v_s$  分别为源汇项水流流速;

$T_{ij}$  为侧向应力项, 包括粘滞摩擦、湍流摩擦和差异平流, 其值由基于水深平均的流速梯度涡粘性公式计算。

### (2) 泥沙数学模型

包括悬沙质输移方程、推移质输沙方程及河床变形方程。

悬沙质输移方程:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \omega_s \frac{\partial c}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left( v_T \frac{\partial c}{\partial z} \right) \quad (5)$$

$$q_s = \int_{2d_{50}}^D U(z, t) c(z, t) dz \quad (6)$$

推移质输沙方程:

$$q_b = 5p \left( \sqrt{\theta'} - 0.07 \sqrt{\theta_c} \right) \sqrt{(s-1)gd} \quad (7)$$

床面变形公式:

$$\rho_d \frac{\partial z_b}{\partial t} + \frac{\partial g_{bx}}{\partial x} + \frac{\partial g_{by}}{\partial y} = \alpha \omega (S - S_*) \quad (8)$$

式中:  $\theta'$  为与底表面摩擦相关的无量纲剪切应力;

$p$  为层内所有的沙粒全部起动的概率;

$v_T$  为垂向涡黏系数;

$s$  为泥沙的相对密度;

$\theta_c$  为泥沙的起动临界剪切应力;

$d$  为泥沙粒径;

$\beta$  为动摩擦参数;

$U$  为瞬时速度;

$c$  为瞬时悬沙浓度;

$d_{50}$  为中值粒径;

$D$  为瞬时水深;

$\rho_d$  为底床泥沙容重;

$z_b$  为河床的高程;

$\alpha$  为泥沙恢复饱和系数;

$\omega$  为垂线平均泥沙流速;

$\omega_s$  为泥沙沉速;

$S$  为单位水体含沙量;

$S_*$  为与  $c$  相对应的水流挟沙力;

$g_{bx}$ 、 $g_{by}$  分别为推移质单宽输沙率矢量在  $x$ 、 $y$  方向上的分量。

$$\theta' = \frac{U^2}{(s-1)gd} \quad (9)$$

$$p = \left( 1 + \left( \frac{\frac{\pi}{6}\beta}{\theta' - \theta_c} \right)^4 \right)^{-1/4} \quad (10)$$

### 1.2.2 计算方法

采用有限差分方法, 计算网格采用不规则三角网格, 方程的求解采用隐式交替方向法 (ADI) 在时间和空间上对质量和动量守恒方程进行积分。

### 1.3 模型设置

在近海海域大范围水动力及泥沙运动模拟中,二维潮流泥沙模型有着广泛应用。考虑到计算海域地域辽阔,垂直尺度(即水深)将远小于模型的范围(即水平尺度),水力参数沿垂向变化要远小于水平向变化,鉴于此采用二维潮流泥沙数学模型进行数值模拟。模型中,陆地边界设定为固边界,水位过程指定为开边界。采取大、小两层模型嵌套的方式进行计算,大模型为小模型提供边界条件,大模型开边界潮位使用 CHINA TIDE 潮汐预报软件<sup>[28]</sup>用分潮调和常数预报潮汐获取。大小模型水深资料均取自中国人民解放军海军海道测量局出版的日照港至辐射沙洲海域海图。大模型北至山东省日照市日照港,南至江苏省南通市辐射沙洲海域(32.5°—35.5°N, 119°—124.5°E),网格步长由近岸 800 m 过渡到外海 5 000 m。模拟时间为 2002 年 6 月 1 日—8 月 1 日、2012 年 2 月 1 日—3 月 1 日与 2012 年 6 月 1 日—8 月 1 日。小模型北至江苏省连云港灌河口,南至江苏省盐城市射阳河口(33.75°—34.65°N, 119.75°—121°E),南北跨度约 100 km,东西跨度约 115.5 km,模拟时间为 2002 年 6 月 1 日—8 月 1 日与 2012 年 6 月 1 日—8 月 1 日,网格步长由近岸 150 m 过渡到外海 800 m。2002 年模型单元数 55 548,节点数 28 242;2012 年模型单元数 113 452,节点数 57 485。计算网格均采用不规则三角网。大小模型网格分布如图 3 所示。废黄河三角洲底层沉积物泥沙中值粒径变化范围为 0.004~0.176 mm,平均为 0.016 mm,分为 10 个组分进行模拟,在小模型潮流率定基础上,根据实测资料<sup>[29]</sup>进行泥沙模块参数的率定,建立潮流泥沙数学模型。模型计算主要针对滨海港建设对水沙变化和泥沙

冲淤的短期影响,因此,模型计算时间设置为 12 个月(360 天)。

### 1.4 模型验证

#### 1.4.1 潮流模型

为了验证潮流泥沙数学模型计算的准确性,引入模型技能得分(Skill Score, SS)来量化模型误差<sup>[30]</sup>。SS 为均方根(RMS)误差与观测值标准差的比值<sup>[31]</sup>, $SS > 0.65$ ,认为模拟得很好; $0.65 \geq SS \geq 0.2$ ,认为模拟得较好; $SS \leq 0.2$ ,认为模拟得较差<sup>[32]</sup>。同时引入相关性系数(Correlation Coefficient, CC)来量化模型相关性, $CC > 0.8$ ,属于强相关; $0.8 \geq CC \geq 0.5$ ,属于中等相关; $0.5 \geq CC \geq 0.3$ ,属于弱相关; $CC < 0.3$ ,属于不相关。

$$SS = 1 - \frac{\sum (X_{\text{mod}} - X_{\text{obs}})^2}{\sum (X_{\text{obs}} - \overline{X_{\text{obs}}})^2} \quad (11)$$

$$CC = \frac{\sum (X_{\text{mod}} - \overline{X_{\text{mod}}})(X_{\text{obs}} - \overline{X_{\text{obs}}})}{\left[ \sum (X_{\text{mod}} - \overline{X_{\text{mod}}})^2 \sum (X_{\text{obs}} - \overline{X_{\text{obs}}})^2 \right]^{1/2}} \quad (12)$$

式中:  $X_{\text{mod}}$  为模型计算值;

$X_{\text{obs}}$  为实测值;

$\overline{X_{\text{mod}}}$  为计算值均值;

$\overline{X_{\text{obs}}}$  为实测值均值。

大模型采用连云港港、日照港 2 个潮位观测站 2012 年 2 月 16 日—2 月 20 日 4 d 的实测值进行潮位验证(图 4)。小模型同时验证潮位与潮流,潮位验证选取滨海港潮位站 2012 年 6 月 5 日 8 点至 6 月 11 日 0 点实测潮位,潮流验证选取图 2b 中滨海港附近的 2 个测流点 2012 年 6 月 13 日 8 点至 6 月 14 日 9 点小潮时实测流速流向<sup>[29]</sup>,2 个测流点均分布在防波堤周围,验证点 1 位于规划航道上,

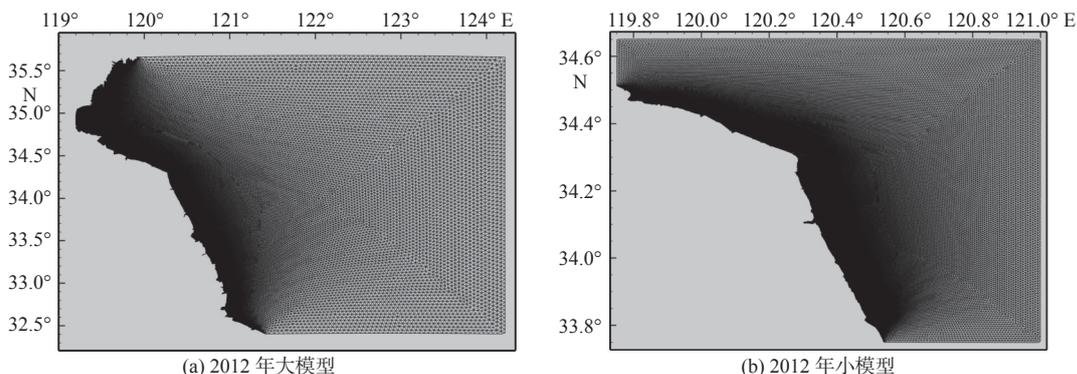


图 3 大小模型计算区域网格剖分图

Fig. 3 The griddings of the calculation area for the large and small models

验证点 2 在南堤堤头外侧。

表 1 所示为模型验证的相关性系数和技能得分, 大小模型潮位实测资料与模型模拟结果验证均较好, 相关性系数(CC)均>0.89, 属强相关, 模型技能得分(SS)均>0.79, 可认为大模型可为小模型提供精确的开边界条件, 小模型计算结果能够准确模拟海域内涨落潮潮位变化过程。

小模型验证点 1、2 两点的流速、流向模拟值与实测历史资料吻合度较高(图 5), 两点流速的变化趋势与实测资料相同, 其中验证点 1 涨急与落急时的流速略大于计算结果, 平均误差在 0.2 m/s 之内, 相关性系数为 0.85, 技能得分为 0.58; 验证点 2 流速模拟结果相关性较点 1 稍差, 平均误差在 0.15 m/s 之内, 相关性系数为 0.54, 技能得分 0.59。两点流向变化趋势与实测资料基本相同, 均为往复流, 相关性系数均>0.85, 点 1 平均误差在 30°之内, 技能得分 0.62。点 2 变化趋势与实测资料吻合更优, 平均误差在 20°以内, 技能得分 0.71。因此, 可认为小模型可较好地模拟海域内潮流运动过程。

1.4.2 泥沙模型

在小模型潮流率定基础上, 根据中国海洋大

表 1 模型验证的相关性系数和技能得分

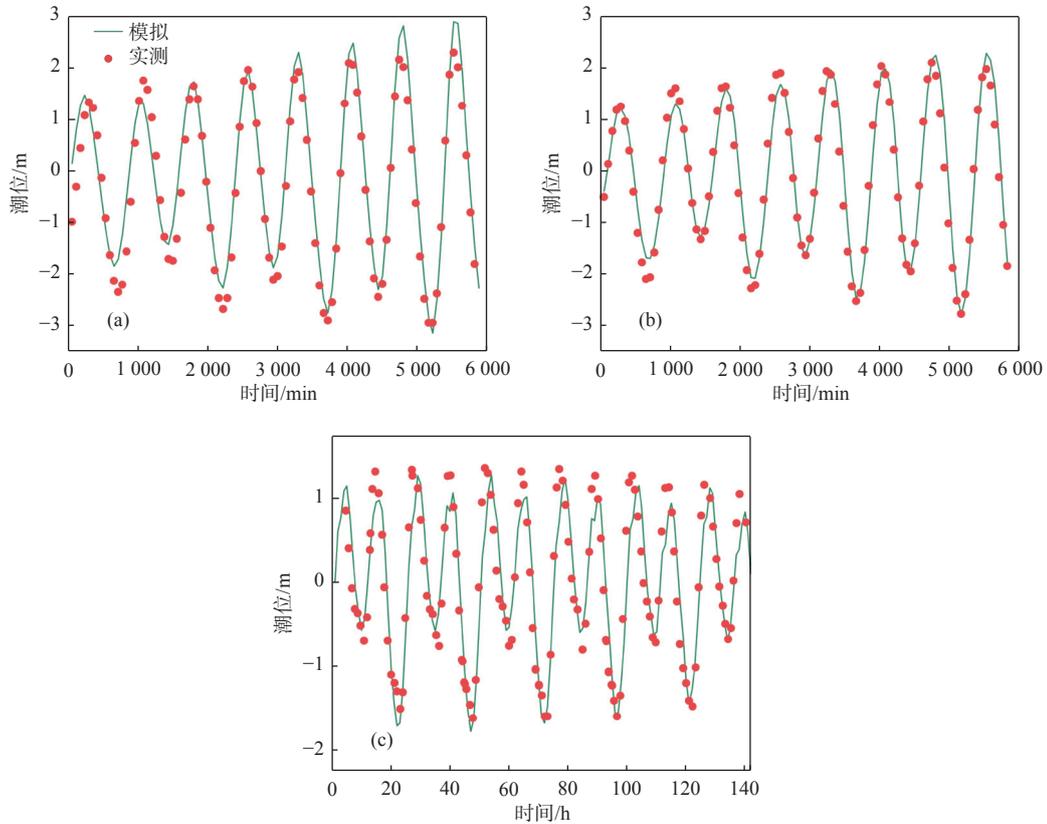
Table 1 Correlation coefficient and skill score of model validation

	大模型潮位	小模型潮位	小模型流速	小模型流向
CC	0.97(连云港) 0.97(日照)	0.89	0.85(点1) 0.54(点2)	0.87(点1) 0.62(点2)
SS	0.91(连云港) 0.94(日照)	0.79	0.58(点1) 0.59(点2)	0.86(点1) 0.71(点2)

学于 2006 年 9 月 7—8 日大潮期间和 2006 年 9 月 15—16 日小潮期间水沙实测资料<sup>[29]</sup> 进行泥沙模块参数的率定如图 2a 所示, 验证结果见图 6。在各测点中, 模型计算值的悬沙浓度与实测值较为接近且变化趋势一致, 除点 5 外其余的点大潮悬沙浓度约为小潮时 2 倍, 模型计算值与实测资料的极大与极小值与处于同一区间, 可认为计算海区的悬浮泥沙运动趋势得到较好模拟, 可以基本反映泥沙运动实际情况。

1.5 潮流特征分析和泥沙冲淤分析

在小模型模拟结果的基础上, 应用 S\_TIDE 潮汐调和和分析工具包<sup>[33-34]</sup> 进行数据处理。为了对比分析潮汐与潮差在建港工程前后的变化特征, 在小



(a)大模型: 连云港; (b)大模型: 日照; (c)小模型

图 4 潮位验证

Fig.4 Tide level verification

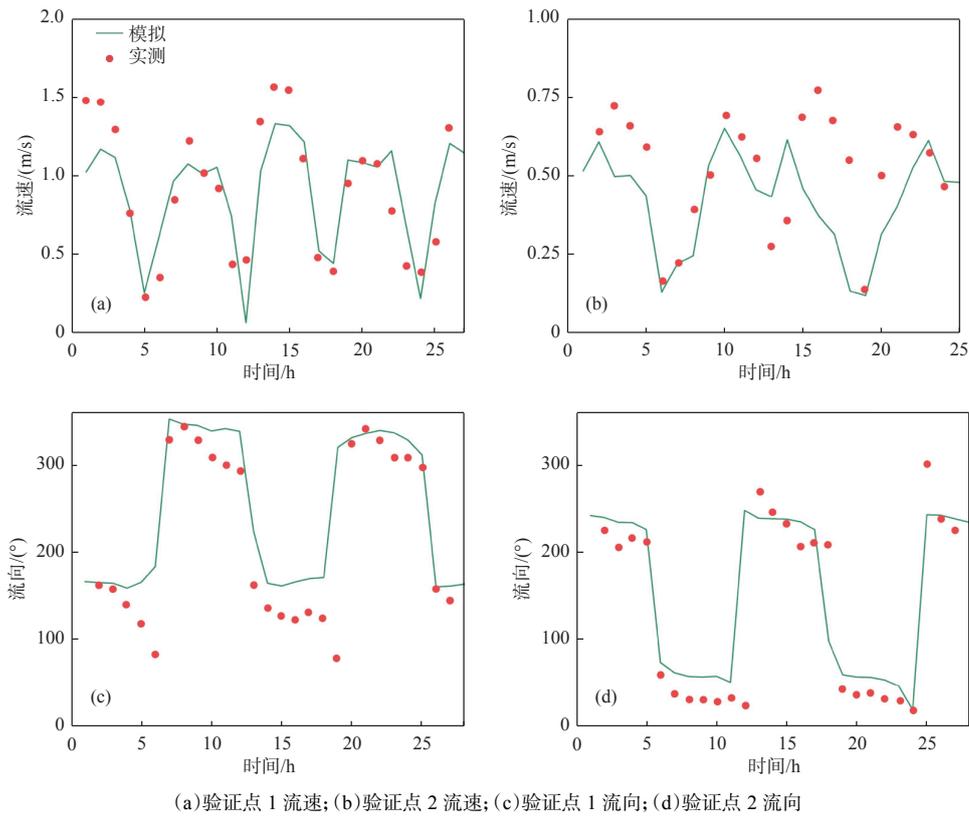


图 5 小模型的流速流向验证

Fig.5 Validation of the small model for velocity

模型区域内选取了 21 个特征点(图 7), 主要分布在港区附近, 废黄河口尖的南北两翼以及距废黄河口尖较远的东边海域。

潮汐类型一般由主要分潮平均振幅比值的大小为判断依据, 按潮汐类型由以下公式计算:

$$T = \frac{H_{K_1} + H_{O_1}}{H_{M_2} + H_{S_2}} \quad (13)$$

式中:  $H$  分别为  $M_2$ 、 $S_2$ 、 $K_1$ 、 $O_1$  分潮的振幅。

中国大多采用:  $0.0 < T \leq 0.25$  为规则半日潮;  $0.25 < T \leq 1.5$  为不规则半日潮;  $1.5 < T \leq 3.0$  为不规则全日潮;  $3.0 < T$  为规则全日潮。

为了探究潮汐振幅随月相与地域的变化, 按以下公式计算大小潮的潮差<sup>[35]</sup>:

$$M_n = 2.02H_{M_2} + 0.58(H_{S_2}^2/H_{M_2}) + 0.08(H_{K_1} + H_{O_1})^2/H_{M_2} \quad (14)$$

$$S_g = 2.014(H_{M_2} + H_{S_2}) + 0.05(H_{K_1} + H_{O_1})^2/H_{M_2} \quad (15)$$

$$N_p = 2.114(H_{M_2} - H_{S_2}) + 0.148(H_{K_1} + H_{O_1})^2/H_{M_2} \quad (16)$$

式中:  $M_n$  为平均潮差;

$S_g$  为平均大潮差;

$N_p$  为平均小潮差。

针对床面变化显著区域选取建港后特征点进行分析(图 8), 共选取 8 个特征点。其中, 特征点 1—4 在防波堤周围, 特征点 1 位于北防波堤转折处, 特征点 2 位于北防波堤堤头处, 特征点 3 位于港区的口门区域, 特征点 4 位于南防波堤南侧; 特征点 5—8 位于较远的外海区域, 特征点 5 位于北侧, 特征点 6、7 位于东侧, 特征点 8 位于南侧。

## 2 建港工程对海域水动力环境的影响

### 2.1 潮流动力场

为了直观研究工程建设对原有海域水动力环境的影响, 将工程建设前后大潮涨急、落急时刻的流场数据与小潮涨急、落急时刻的流场数据分别相减, 得到流场变化情况(图 9)。工程前后的流线变化如图 10 所示。

大潮涨急时, 由图 9a 分析可得, 潮流流速变化主要在 15 m 等深线内(图 10), 在废黄河三角洲北翼距港区约 15 km 海域增大, 变化量在 0.05~0.08 m/s, 距港区 10 km 以内近岸海域减小, 变化量

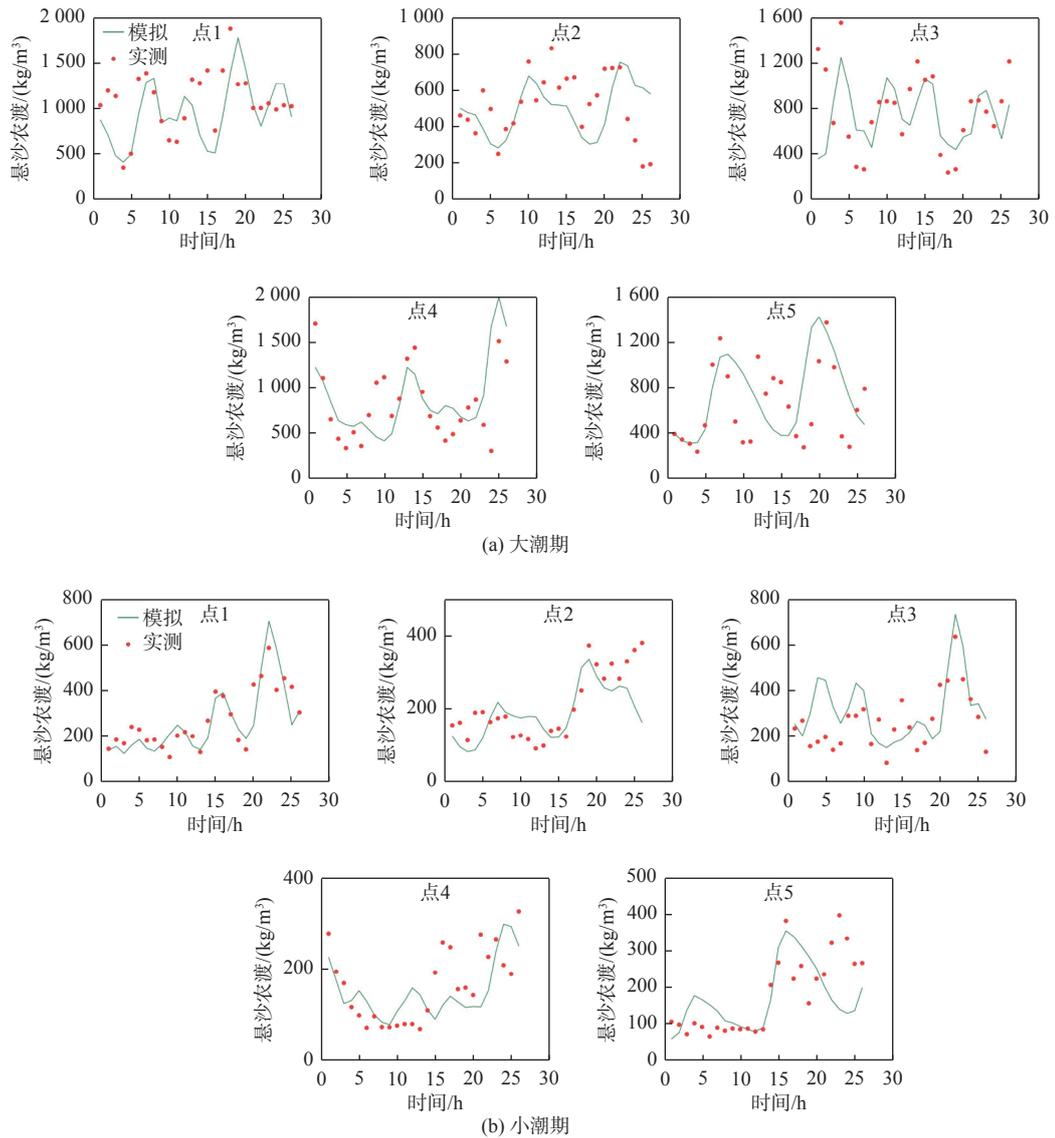


图 6 1—5 测点大潮期 (a) 和小潮期 (b) 模拟结果与实测悬沙浓度验证

Fig.6 Verification of suspended sand concentration at measurement points 1-5 at spring tide (a) and neap tide (b)

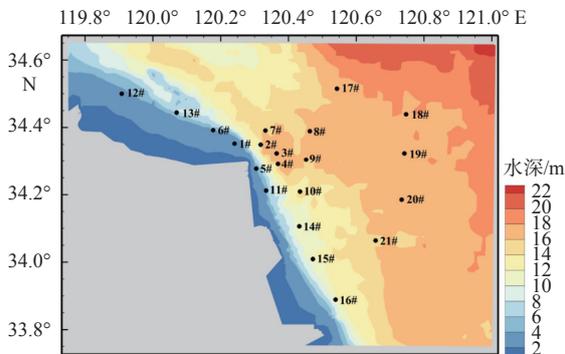


图 7 潮流特征分析的特征点位置

Fig.7 Feature point location for tide analysis

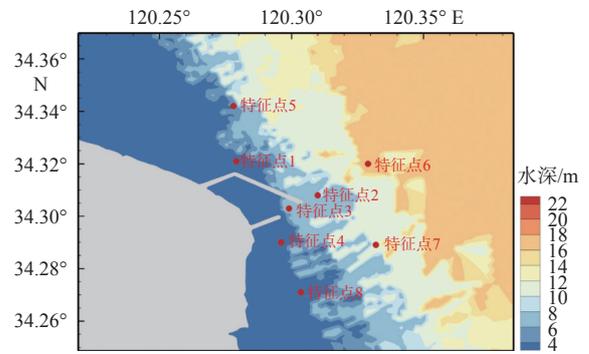
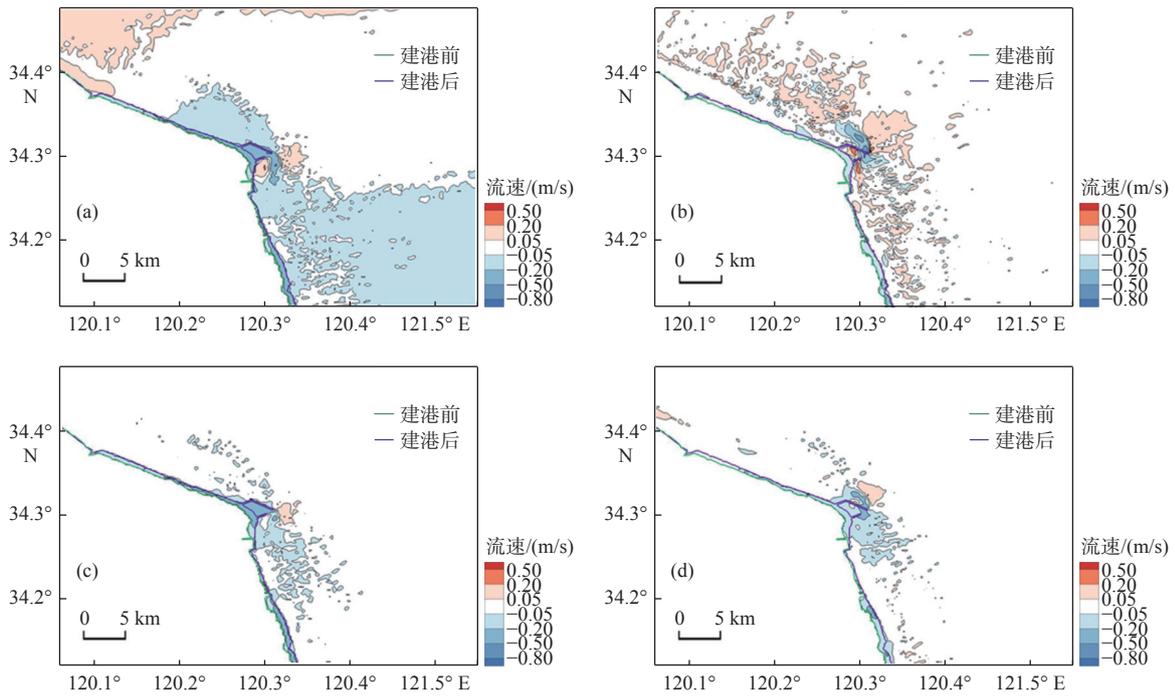


图 8 泥沙冲淤分析的特征点位置

Fig.8 Location of feature point for sedimentation dynamics analysis

在 0.06~0.1 m/s; 在南翼距港区 15 km 以内减小, 变化量在 0.04~0.2 m/s。距防波堤建设区域 5 km, 12 m 等深线范围内存在-0.6~0.25 m/s 的流速变化,

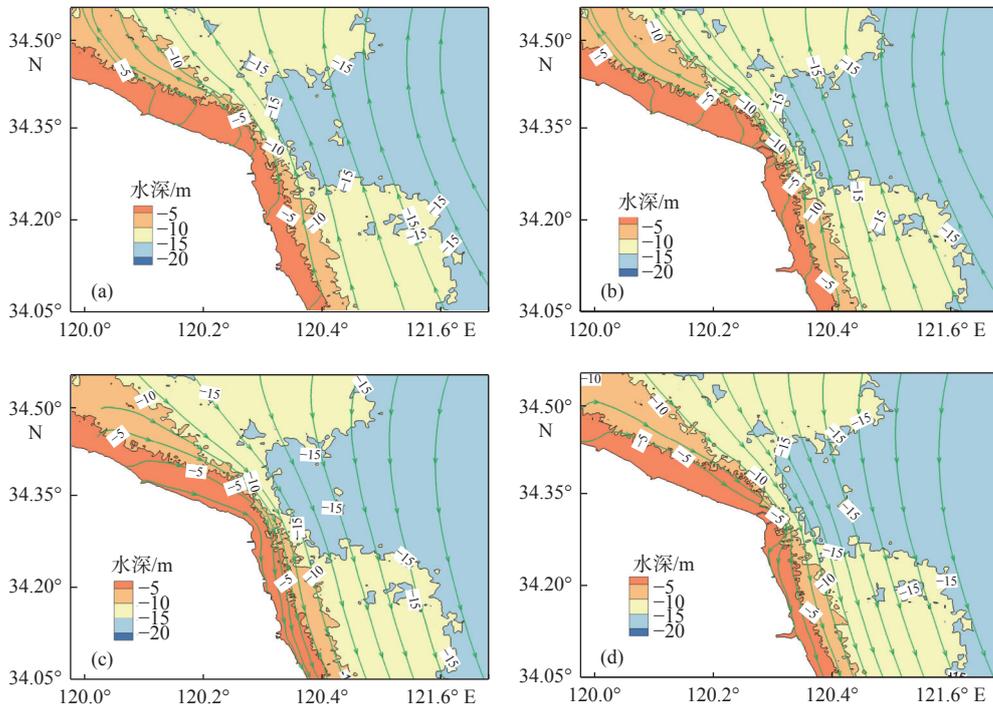
流速增大的区域主要发生在南防波堤南侧 2 km 范围内与防波堤口门东侧 1~3 km 处, 流速增加量



(a)大潮涨急;(b)大潮落急;(c)小潮涨急;(d)小潮落急

图 9 工程前后计算区域流场变化图

Fig.9 The flow field changes in the calculation area before and after the construction



(a)工程前大潮落急;(b)工程后大潮落急;(c)工程前大潮涨急;(d)工程后大潮涨急

图 10 工程前后计算区域流线变化图

Fig.10 The streamline changes in the calculation area before and after the construction

在 0.25 m/s 以内,其中变化量最大的区域在南防波堤南侧约 1 km 处。流速减小的区域主要发生在港区内部与口门及南侧的宽约 1 km、长约 2.5 km 的狭长空间,减少量在 0.6 m/s 以内;其中,变化量最

大的区域为北堤堤头,主要原因是港区建设改变了潮流流向(图 10),在防波堤掩蔽区域流速较小,而受堤头挑流作用局部流速有所增大。在南防波堤南侧形成大尺度环流,掩蔽了部分水域,但是受岸

线前移和防波堤建设的双重影响,起到了约束水流的作用,因此局部流速也有所增加。

大潮落急时,由图 9b 分析可得,潮流流速变化区域主要在 15 m 等深线内(图 10),南北翼变化量  $j$  介于  $-0.08 \sim 0.15$  m/s。距防波堤建设区域 7 km 范围内,且基本在 15 m 等深线内存在  $-0.8 \sim 0.5$  m/s 的流速变化,流速增大的区域主要发生在港池内部与南方波堤的南侧,变化量在 0.5 m/s 以内,北堤内靠海转轴段与南堤南侧 1 km 内变化量最大。流速减小的区域主要发生在北堤北侧与两堤之间的口门处,变化量在 0.8 m/s 以内,北堤堤头与北堤北侧约 2 km 处变化量最大。落潮时,流向基本从南到北(图 10),退潮水流灌入港区,同时直接冲击南防波堤外侧从而导致流速增加。北侧防波堤以北受到较好掩护,流速减小。

小潮时,由图 9c、d 分析可得,在防波堤建设区域以外的海域较大潮时未形成流速变化区,变化量为 0.05 m/s 以内。距防波堤建设区域 4.5 km, 10 m 等深线内存在  $-0.4 \sim 0.2$  m/s 流速变化。小潮时港区内流速始终减小。可见,小潮时的流速变化范围与幅度均较大潮时小。

滨海港南北堤建成后,流速变化主要集中在距防波堤建设区域 7 km 范围内,且基本在 15 m 等深线以内海域,变化量为  $-0.8 \sim 0.5$  m/s。整个滨海港区在除大潮落潮急外绝大多数的时间内均处在流速减小区,流速衰减幅度最高可达 0.6 m/s,可维护港内水域平稳。

## 2.2 潮流调和析

如表 2 和图 11 所示,计算区域所取特征点模拟时间段内潮汐类型均为不规则半日潮,防波堤外围海域(1#—11#)特征值较小,其中北防波堤北 20 km 左右的 3 点(6#、7#、8#)较易受到涨落潮流与北防波堤相互作用的影响,具有更明显的不规则半日潮特征;北翼(12#、13#)的不规则半日潮特征相较南翼(14#—16#)强;远海(17#—21#)特征值处在较高水平,特征值最大出现在距废黄河口约 50 km 处(18#),在众多特征点中据岸线最远。

建港前所有特征点的  $T$  值范围在 0.503~0.648,建港后  $T$  值范围在 0.45~0.583,降低量介于 0.042~0.065,建港工程使不规则性减弱, $T$  值减少量存在近岸由北至南由高到低的分布格局。

如图 12 所示,研究区域内 3 个潮差特征值沿水深分布,滨海港区附近(1#—11#)和南北翼近岸海

表 2 废黄河口区域特征点  $T$  值

Table 2 The  $T$ -value of feature points in the old Yellow River mouth area

特征点	建港工程前	建港工程后	变化量	变化率
	$T$ 值	$T$ 值		
1	0.516	0.459	0.057	-10.98%
2	0.519	0.457	0.063	-12.11%
3	0.521	0.462	0.059	-11.36%
4	0.514	0.459	0.054	-10.59%
5	0.503	0.450	0.054	-10.66%
6	0.542	0.479	0.063	-11.54%
7	0.540	0.476	0.064	-11.90%
8	0.565	0.502	0.063	-11.18%
9	0.536	0.479	0.056	-10.53%
10	0.514	0.464	0.049	-9.59%
11	0.510	0.464	0.046	-8.93%
12	0.593	0.528	0.065	-10.89%
13	0.551	0.493	0.058	-10.57%
14	0.506	0.463	0.044	-8.61%
15	0.507	0.465	0.043	-8.40%
16	0.517	0.475	0.042	-8.13%
17	0.613	0.550	0.063	-10.30%
18	0.648	0.583	0.065	-9.99%
19	0.631	0.566	0.065	-10.37%
20	0.592	0.535	0.057	-9.62%
21	0.569	0.526	0.044	-7.70%

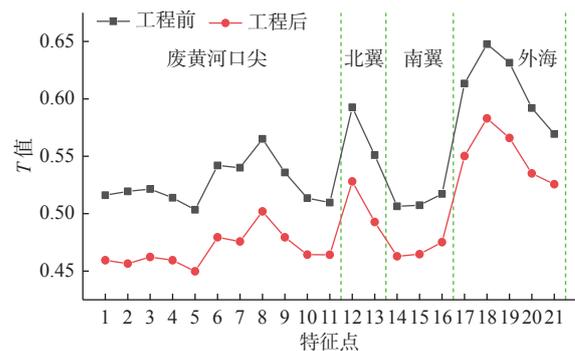


图 11 工程前后各特征点  $T$  值变化图

Fig.11 Change in the  $T$ -value of each feature point before and after the construction

域(12#—16#)平均潮差较大,这是因为特征点靠近海岸,涨潮时潮流先流向海岸,由于海岸陆边界的原因,水位在近岸地带壅高,潮流到达海岸后的反射波与入射叠加,造成近岸潮位的扩大,离岸最近(5#、11#)尤为明显,另由于废黄河口尖独特的岸线排布,潮流能量在此处聚集,潮流叠加效应较南北两翼平滑岸线处强烈,潮位的扩大现象也相应地比

南北翼处的明显。同时,距离岸线较远处(17#—21#)地形开阔,水深较大,导致涨落潮的流速均较缓,潮差变化较小。

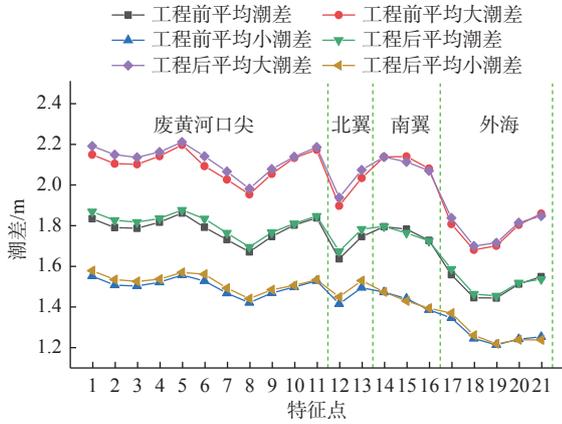


图 12 工程前后各特征点特征潮差  
Fig.12 The tidal range at each feature point before and after the construction

建港工程前各特征点平均潮差约为 1.708 m, 平均大潮差约为 2.013 m, 平均小潮差约为 1.432 m。建港工程后平均潮差约为 1.726 m, 平均大潮差约为 2.033 m, 平均小潮差约为 1.446 m。建港工程使沿岸潮差小幅增加, 推测这与港口建设减小了近岸水域面积有关。在同样的来潮条件下, 近岸水深有所减小, 导致局部区域出现潮位壅高现象。但是这种潮差增加的幅度非常有限, 可以判断港口建设对沿岸水深变化趋势影响较小。

### 3 建港工程对近海地貌演变的影响

为了比较建港工程短期内对泥沙冲淤的影响, 分别将建港前后模型运行 150 d 与 330 d 的床面高程做差(图 13)。150 d 时, 床面变化集中在港区周围 5、12 m 等深线以内海域, 变化范围在-8~4.5 m, 淤积区域分布在港区口门周围, 冲刷区域分布在北堤堤头, 泥沙冲淤的空间分布与之前的研究结果类似<sup>[27]</sup>; 330 d 时, 床面变化主要集中在在港区周围 8 km 范围内, 且基本在 16 m 等深线内海域, 变化范围在-13~6 m, 北堤堤头与港区口门床面变化加剧。杨肖迪<sup>[29]</sup>通过断面分析, 认为建港工程后港区周边 1 年的冲淤影响基本在 16 m 等深线以内, 且建港工程引起了较为剧烈的局部泥沙冲淤, 最大淤积厚度约为 5 m, 这与本文研究结果大致相当; 其研究还认为, 冲刷主要分布在防波堤外侧, 深度基本在 1~2 m, 而本研究最大冲刷深度可达 10 m 以上, 这

种现象可能与涨落潮的反复作用有关。同时, 本文的底床泥沙全部采用均匀沙, 而实际近岸泥沙是偏粗的, 有可能加剧了这种堤头的冲刷过程。

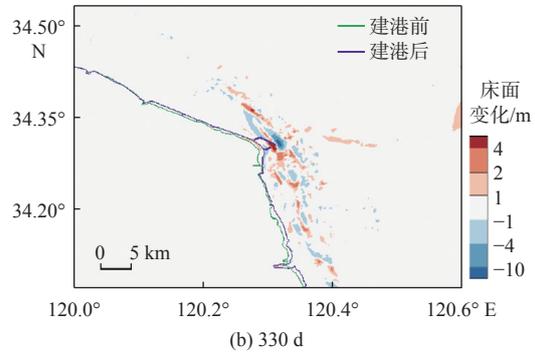
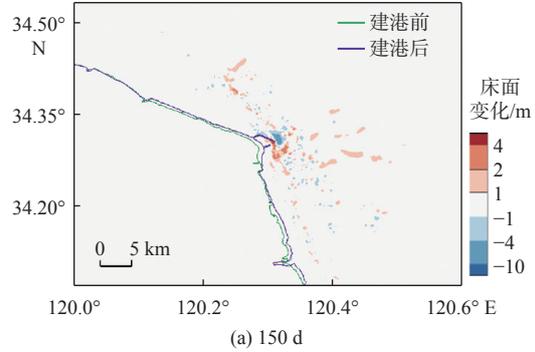


图 13 建港前后床面变化对比

Fig.13 Changes in seabed surface before and after the port construction

各特征点的床面随时间变化情况如图 14。其中, 特征点 1、2、5 的床面有不同程度的冲刷, 强度在 300~330 d 进入到较稳定的状态, 北堤北侧 2 点冲刷深度 2.5 m, 北堤堤头处冲刷深度约为 15 m, 北堤北侧稍远处(特征点 5)前期(150 d 内)的冲刷强度比转角处大。特征点 3、4、6、7、8 处床面有不同程度的淤积, 强度在 250~330 d 时进入到较稳定的状态, 口门处淤积深度 4.6 m, 南堤南侧淤积深度 2.4 m, 距岸较远的 3 处, 防波堤东侧稍远的特征点 6、7 淤积过程较为一致, 淤积深度分别为 5.9、7.1 m,

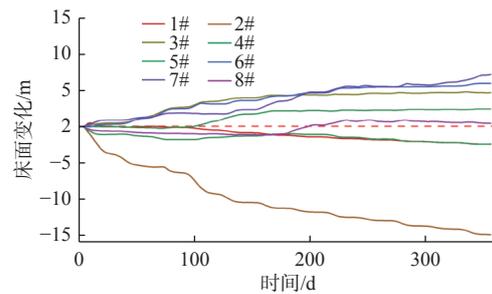


图 14 建港后各特征点床面变化情况

Fig.14 Morphological changes of the seabed surface in feature points after the port construction

南堤南侧稍远(特征点 8)则以 200 d 为分界, 经历了先冲刷后淤积的过程, 最后淤积深度约 0.5 m。

统计建港后的各特征点的流速、悬沙浓度和床面冲淤情况用于分析建港工程后引起的近岸海床冲淤的原因。选取特征点 1—4, 提取 2012 年 6 月 3—5 日计算结果, 包括水位、流速、悬沙浓度、床面变化等进行对比分析(图 15)。特征点 2、3 冲淤强度较突出, 故着重分析。点 2 位于北堤堤头, 冲刷严重, 深度达 15 m, 该点流速峰值时悬沙浓度较大, 流速谷值时悬沙浓度较小, 泥沙易输运, 较难落淤, 故海床受到持续冲刷; 涨落潮时流速变化规律较一致, 但悬沙浓度在落潮时较大, 故北堤堤头处泥沙

在潮流作用下大部分向外海方向发生输移。特征点 3 位于港区口门, 淤积严重, 深度达 4.6 m, 该点悬沙浓度较大时, 对应的较小流速概率较大, 悬沙浓度较小时流速均较大, 泥沙难起动, 较易落淤, 与模拟结果吻合; 涨落潮时流速与悬沙浓度变化较一致, 故口门处的泥沙运动在涨落潮潮流 2 个方向的强度较一致, 即淤积的泥沙同时来自于港区内部与外海方向。点 1 处冲刷, 流速与悬沙浓度分布规律与特征点 2 相同; 点 4 处淤积, 流速与悬沙浓度分布规律与点 3 相同。总之, 建港工程后局部的泥沙冲淤与局部地形变化引起的水流条件变化密切相关。

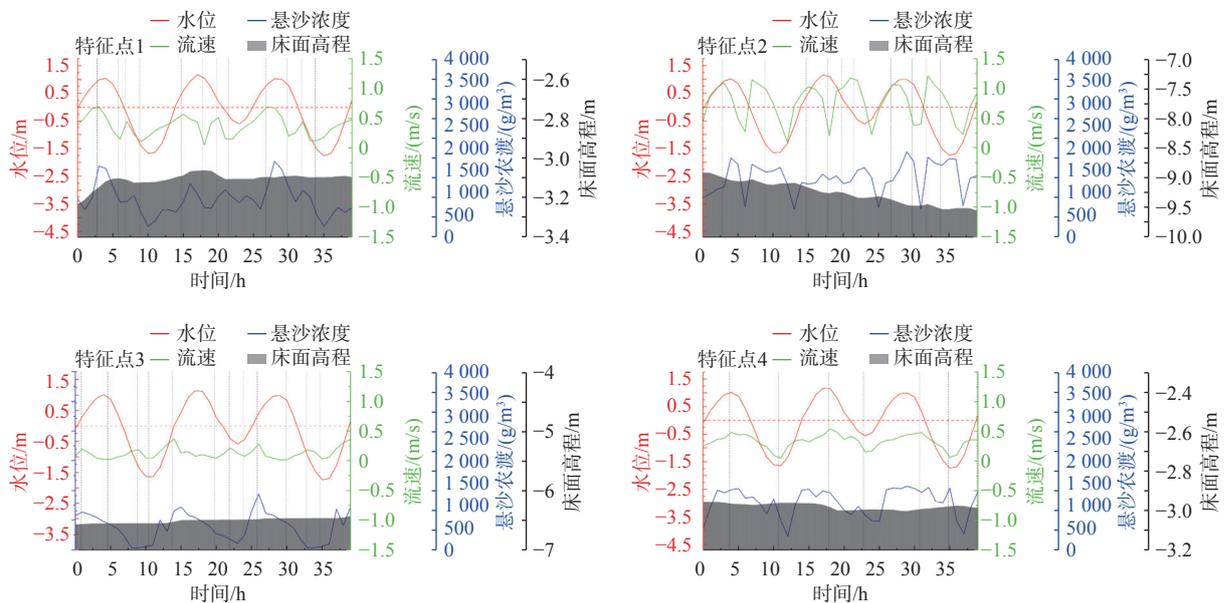


图 15 特征点水位、流速、悬沙浓度、床面变化

Fig.15 Variations of water level, flow velocity, suspended sand concentration and seabed surface in feature points

## 4 结论

通过建立二维潮流泥沙数学模型, 模拟废黄河三角洲附近海域潮流泥沙运动, 运用调和分析等方法对比建港前后潮汐、潮流等水动力场变化与泥沙输移及床面冲淤变化, 探究滨海港建设对近海水沙的影响, 结论如下:

(1) 滨海港南北堤建成后, 流速变化主要集中在距防波堤建设区域 7 km 范围内, 且基本在 15 m 等深线以内海域, 变化量为  $-0.8 \sim 0.5$  m/s。除大潮落潮急外, 整个滨海港区在绝大多数时间内均处在流速减小区, 流速衰减幅度最高可达 0.6 m/s, 可维护港内水域平稳, 有利于维持港区的航道和港池。

(2) 废黄河三角洲近海为不规则半日潮, 在近

岸, 建港前后不规则半日潮沿岸线自北向南有逐渐减弱的趋势; 在远海, 不规则半日潮随距离岸线距离的增加有逐渐加强的趋势。港口建设造成海域内潮汐不规则性减弱,  $T$  值降低约 10%。建港后平均潮差、平均大潮差与平均小潮差小幅增加, 其沿水深变化趋势受工程影响均较小, 由外海至近岸逐渐增大, 在近岸由废黄河口尖向两翼逐渐减小。

(3) 建港工程对近海地貌格局的影响集中在港区周围 8 km 范围内, 且基本在 16 m 等深线以内海域, 淤积区域分布在港区口门周围, 冲刷区域分布在北堤堤头, 床面变化随着时间推移加剧。结合悬沙浓度变化与流速及水位关系, 建港后港区周围北堤堤头冲刷最为严重, 泥沙在潮流作用下向外海方向输移, 口门处淤积最为严重, 淤积的泥沙同时来自于港区内部与外海方向。

## 参考文献:

- [1] BANNA M M E, FRIHY O E. Human-induced changes in the geomorphology of the northeastern coast of the Nile Delta, Egypt[J]. *Geomorphology*, 2009, 107(1/2): 72-78.
- [2] 高善明. 全新世滦河三角洲相和沉积模式[J]. *地理学报*, 1981, 36(3): 303-314.
- [3] FRAZIER D E. Recent deltaic deposits of the Mississippi River: their development and chronology[J]. *Gulf Coast Association of Geological Societies Transactions*, 1967, 17(2): 205-230.
- [4] MIKHAILOV V N, MIKHAILOVA M V. Delta formation processes at the Mississippi River mouth[J]. *Water Resources*, 2010, 37(5): 515-530.
- [5] PENLAND S, SUTER J R, BOYD R. Barrier island arcs along abandoned Mississippi River deltas[J]. *Marine Geology*, 1985, 63(1/4): 197-233.
- [6] FRIHY O E, KOMAR P D. Patterns of beach-sand sorting and shoreline erosion on the Nile Delta[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1991, 61(4): 544-550.
- [7] SMITH S E, ABDEL-KADER A. Coastal erosion along the Egyptian delta[J]. *Journal of Coastal Research*, 1988, 4(2): 245-255.
- [8] 李从先, 陈刚, 王利. 滦河废弃三角洲和砂坝: 泻湖沉积体系[J]. *沉积学报*, 1983, 1(2): 60-72.
- [9] 刘益旭, 朱力康, 王连和. 滦河废弃三角洲泻湖沙坝海岸演变与海港建设[J]. *海洋学报*, 1994, 16(5): 60-67.
- [10] 张忍顺. 苏北黄河三角洲及滨海平原的成陆过程[J]. *地理学报*, 1984, 39(2): 173-184.
- [11] 叶青超. 试论苏北黄河三角洲的发育[J]. *地理学报*, 1986, 41: 112-122.
- [12] 李元芳. 废黄河三角洲的演变[J]. *地理研究*, 1991, 10(4): 29-39.
- [13] 任于灿, 周永青. 废弃的黄河三角洲的地貌特征及演化[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 1994, 14(2): 19-28.
- [14] 陈斌, 周良勇, 刘健, 等. 废黄河口海域潮流动力与悬沙输运特征[J]. *海洋科学*, 2011, 35(5): 73-81.
- [15] 胡进. 废黄河三角洲海岸演变过程与悬浮泥沙研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2014.
- [16] 张长宽, 陈君, 林康, 等. 江苏沿海滩涂围垦空间布局研究[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2011, 39(2): 206-212.
- [17] 王芳, 朱跃华. 江苏省沿海滩涂资源开发模式及其适宜性评价[J]. *资源科学*, 2009, 31(4): 619-628.
- [18] 季则舟. 粉砂质海岸港口水域平面布局特点[J]. *海洋工程*, 2006, 24(4): 81-85.
- [19] 白玉川, 史丰硕, 徐海珏, 等. 渤海湾大规模围填海导致的岸线变化及潮流场响应分析[J]. *海洋通报*, 2021, 40(6): 621-635.
- [20] 冯海防, 匡翠萍, 刘曙光, 等. 黄骅港工程对其海域流场影响的计算分析[J]. *华北水利水电大学学报(自然科学版)*, 2008, 29(4): 20-24.
- [21] 李少红. 京唐港泥沙淤积原因分析[J]. *水道港口*, 2001, 22(4): 187-190.
- [22] 蔡学石, 王永学. 波流共同作用下威海中心渔港泥沙冲淤变化数值模型研究[J]. *中国水运(下半月)*, 2011, 11: 70-72.
- [23] 王震, 张春风, 赵明志, 等. 淤泥质海岸防波堤布置潮流泥沙数值分析[J]. *水道港口*, 2013, 34(1): 1-6.
- [24] 张玮, 刘燃, 钱伟, 等. 大型海岸工程对水流和泥沙运动的影响研究[J]. *水道港口*, 2014, 35(1): 1-7.
- [25] 谢灵运, 王勇, 白玉川. 通州湾建港工程对辐射沙洲海域潮流泥沙条件的影响[J]. *港工技术*, 2016, 53(4): 1-6.
- [26] 裴义婷, 陆培东. 滨海港区海岸稳定性及深水航道工程对其的影响研究[J]. *现代交通技术*, 2011, 8(6): 87-91.
- [27] 李安龙, 杨肖迪, 罗小桥, 等. 防波堤建设前后废黄河水下三角洲冲淤变化特征与成因研究[J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2015, 45: 85-90.
- [28] 李孟国, 郑敬云. 中国海域潮汐预报软件Chinatide的应用[J]. *水道港口*, 2007, 28(1): 65-68.
- [29] 杨肖迪. 废黄河水下三角洲海底冲淤变化对建港的响应[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2015.
- [30] SONG D H, WANG X H, CAO Z Y, et al. Suspended sediment transport in the Deepwater Navigation Channel, Yangtze River Estuary, China, in the dry season 2009: 1. Observations over spring and neap tidal cycles[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2013, 118(10): 5555-5567.
- [31] MURPHY A H. Skill scores based on the mean square error and their relationships to the correlation coefficient[J]. *Monthly Weather Review*, 1988, 116(12): 990-991.
- [32] ALLEN J I, SOMERFIELD P J, GILBERT F J. Quantifying uncertainty in high-resolution coupled hydrodynamic-ecosystem models[J]. *Journal of Marine Systems*, 2007, 64(1): 3-14.
- [33] PAN H D, LV X Q, WANG Y Y, et al. Exploration of tidal - fluvial interaction in the Columbia River Estuary using S\_TIDE[J]. *Journal of Geophysical Research Oceans*, 2018, 123(9): 6598-6619.
- [34] JIN G Z, PAN H D, ZHANG Q L, et al. Determination of harmonic parameters with temporal variations: an enhanced harmonic analysis algorithm and application to internal tidal currents in the South China Sea[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2018, 35(7): 1375-1398.
- [35] 王立杨, 桑金, 乔守文, 等. 渤海沿岸4个验潮站潮汐特征分析[J]. *海洋湖沼通报*, 2020(4): 23-29.

## Impacts of Binhai Port construction on offshore water and sediment transportation along the abandoned Yellow River mouth

HUANG Zhe<sup>1,2</sup>, LIU Qiang<sup>3</sup>, NI Wanzhou<sup>1,2</sup>, XU Haijue<sup>1,2\*</sup>, BAI Yuchuan<sup>1,2</sup>

(1 State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Intelligent Construction and Operation, Tianjin University, Tianjin 300350, China;

2 Institute for sedimentation on River and Coastal Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China;

3 CCCC Water Transportation Consultants Co. Ltd., Beijing 100007, China)

**Abstract:** Taking the Binhai Port in the old Yellow River Delta as the background, a two-dimensional hydro-sediment model was established to simulate the changes in hydrodynamics and sediment transport due to the port construction. Results indicate the changes of tidal current velocity after the breakwater completion was from  $-0.8$  to  $0.5$  m/s and concentrated mainly within 15 m isobath near breakwater construction area. The flow velocity at the head of the north breakwater increased significantly. The port area was featured with flow velocity reduction for as much as  $0.6$  m/s except for the ebb stage of spring tide. The port construction weakened the tidal irregularity as average amplitude of main tidal components was reduced by about 10%. The impact of the port construction on the offshore geomorphic evolution was concentrated within 8 km around the port and within the 16 m isobath areas. The head of the north breakwater was severely eroded, while sediment siltation was distributed mostly at the harbor entrance.

**Key words:** Binhai Port; abandoned Yellow River mouth; hydrodynamic environment; sediment transportation