

# 铁山港湾港口总体规划用海对海水动力环境的影响预测\*

## Impact Prediction of Sea Engineering of Tieshangang Bay Port Overall Planning on Hydrodynamic Environment

李小维, 裴木凤

LI Xiao-wei, PEI Mu-feng

(国家海洋局北海海洋环境监测中心站, 广西北海 536000)

(Beihai Marine Environmental Monitoring Central Station of State Oceanic Administration, Beihai, Guangxi, 536000, China)

**摘要:**【目的】研究铁山港湾港口总体规划工程的建设对周边海域潮位、纳潮量和流场 3 个方面的影响。【方法】采用二维潮流数学模型对铁山港湾海域的潮流场进行数值模拟, 分析工程前后水动力变化情况。【结果】铁山港湾港口总体规划实施后, 石头埠站、沙田站和安铺站最高潮位均有所增加, 增加幅度分别为 0.03 m、0.11 m、0.10 m; 石头埠断面潮流涨急流速略有减小, 平均减小幅度为 0.06 m/s, 落急流速略有增加, 平均增加幅度为 0.06 m/s; 沙田断面涨落潮流速均略有增大, 增加幅度为 0.11~0.17 m/s; 安铺断面主槽区流速基本上无变化; 工程后石头埠、沙田和安铺 3 个断面的纳潮量均有不同程度的增加, 分别为 1.8%、3.1% 和 4.3%, 沙田断面单宽纳潮量变化不大。【结论】港口总体规划工程实施后, 铁山湾内涨潮时流速较小、落潮时流速较大的分布规律没有改变, 对铁山港水动力环境影响较小。

**关键词:** 铁山港湾 港口规划 水动力 影响

中图分类号: P731.2 文献标识码: A 文章编号: 1005-9164(2015)03-0274-07

**Abstract:**【Objective】The impact of implementation of Tieshangang Bay port overall planning on the hydrodynamic environment was analyzed at three aspects, including the water level, flow field and tidal volume.【Methods】Two-dimensional flow circulation model was used to analyze the hydrodynamic environment changes before and after the project.【Results】The results show that the highest water level increases at all three stations of Shitoubu, Shatian and Anpu after the implementation of Tieshangang's port overall planning, and the amplitude increases 0.03 m, 0.11 m and 0.10 m, respectively. In Shitoubu section, the velocity of flow decreases slightly and the average decrease rate is 0.06 m/s while the velocity of ebb increases slightly and the average increase rate is 0.06 m/s. In Shatian section, fluctuation trend speed slightly increases and reaches to the range of 0.11~0.17 m/s. In Anpu section, there is basically no change in the velocity. The counting tidal flux of Shitoubu, Shatian and Anpu sections increases at different degrees, by 1.8%, 3.1% and 4.3%, respectively. Single-wide counting tidal flux changes little in Shatian section.【Conclusion】After the port planning is implemented, the situation that ebb velocity is greater than flood has not changed, and thus the change of hydrodynamic environment is small.

**Key words:** Tieshangang, port planning, hydrodynamic, impact

收稿日期: 2015-04-27

修回日期: 2015-05-26

作者简介: 李小维(1981-), 男, 工程师, 主要从事海洋资源开发与管理研究。

\* 国家海洋局南海分局 2014 年局长基金项目(编号 1469)资助。

### 0 引言

【研究意义】近 20 多年以来, 有关科研、勘察、设

计单位对铁山港的大量研究工作认为铁山港区建港自然条件优越,天然深水岸线长、自然掩护条件好、波浪小、水清沙粗,潮差大,是优质建港海岸<sup>[1]</sup>。随着广西北部湾经济区发展规划的实施,铁山港湾港口码头和临港工业建设的规模和速度都较以往有了大幅提高。大规模的填海工程势必导致海湾岸线和海底地形的变化,从而改变海湾的水动力环境,因此,弄清铁山港港口总体布局规划的实施对水动力环境的影响可为海洋资源的合理开发和环境保护提供有力支持。

**【前人研究进展】**目前潮流数学模型是分析研究海洋工程建设对潮流动力影响的重要手段之一,并在工程方案实施对海洋环境影响的分析研究中得到广泛应用<sup>[2~6]</sup>。关于铁山港湾水动力环境方面的研究,张卓等<sup>[7]</sup>利用二维潮流数学模型分析了铁山港建港对海湾潮流泥沙的影响;蒋昌波等<sup>[8]</sup>利用二维数学模型开展铁山港建港前后水体交换能力方面的研究;虽然包孝彩等<sup>[9]</sup>利用二维数学模型分析了港区围垦和航道工程建设对潮流动力的影响,但未综合考虑铁山港港口总体布局建设对水动力环境的影响。**【本研究切入点】**按照铁山港最新港口总体规划,从填海和航道疏浚两个方面综合界定工程后的数学模型边界和水深,从而正确反映规划的实施对铁山港湾水动力的影响情况。**【拟解决的关键问题】**利用二维潮流数学模型对工程附近海域的潮流场进行数值模拟,以期数值地再现工程海域潮汐潮流的运动过程,重点研究铁山港湾港口总体规划工程的建设对周边海域潮位、流场和纳潮量 3 个方面的影响。

## 1 模型与方法

### 1.1 模型

#### 1.1.1 基本方程

采用二维潮流连续方程和动量方程:

(1)连续方程:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial Hu}{\partial x} + \frac{\partial Hv}{\partial y} = 0, \quad (1)$$

(2)动量方程:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + g \frac{\partial \eta}{\partial x} - fv + g \frac{u \sqrt{u^2 + v^2}}{C^2 H} = 0, \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + g \frac{\partial \eta}{\partial y} + fu + g \frac{v \sqrt{u^2 + v^2}}{C^2 H} = 0. \quad (3)$$

式中:  $\eta$  为水位;  $H$  为水深,  $H = h + \eta$ , 其中  $h$  为海底到静止海面的距离;  $u$ 、 $v$  分别为沿  $x$ 、 $y$  方向的垂线平均流速分量;  $f$  为柯氏力系数,  $f = 2\omega \sin \varphi$ , 其中  $\omega$  是地转角速度,  $\varphi$  是地理纬度;  $C$  为谢才系数, 它与曼

宁数  $M$  的关系为  $C = M \times h^{1/6}$ ;  $t$  为时间;  $g$  为重力加速度。

方程(1),(2),(3)构成了求解潮流场的基本控制方程。为了求解这样一个初边值问题,必须给定适当的初始条件和边界条件。

#### 1.1.2 边界条件

在本研究采用的数学模型中,需给定两种边界条件,即开边界条件和闭边界条件。

##### 1.1.2.1 开边界条件

开边界条件即水域边界条件,本文采用北部湾粗网格嵌套小区模式的方法获得本区域潮位边界条件。北部湾大区模拟范围为  $106^{\circ}36' \sim 110^{\circ}00'E$ ,  $20^{\circ}45' \sim 22^{\circ}00'N$ , 矩形网格,分辨率为  $0.2' \times 0.2'$  ( $343 \text{ m} \times 370 \text{ m}$ )。大区外海开边界采用 16 个分潮调和常数计算水位边界,分潮调和常数来自 OTIS<sup>[10]</sup>。小区水位边界条件由大区潮位计算结果插值后给出。

##### 1.1.2.2 闭边界条件

闭边界条件即水陆交界条件,在该边界上,水质点的法向流速为 0,即  $V_n = 0$ 。

#### 1.1.3 初始条件

$$U(x, y, \sigma, t_0) = U_0(x, y, \sigma),$$

$$V(x, y, \sigma, t_0) = V_0(x, y, \sigma),$$

$$\eta(x, y, t_0) = \eta_0(x, y).$$

其中,  $U_0$ 、 $V_0$ 、 $\eta_0$  分别为初始流速和潮位。本研究中给定计算初始时刻的潮位值。

#### 1.1.4 计算方法

本数值模拟求解采用 ADI 法,对计算区域直接进行离散剖分及计算。在前半时间步长,连续方程(1)式和动量方程(2)式的  $x$  分量用隐式求解,而动量方程(3)式的  $y$  分量用显式求解;在后半时间步长,连续方程(1)式和动量方程(3)式的  $y$  分量用隐式求解,而动量方程(2)式的  $x$  分量用显式求解。在每个半时间步长,产生一个只包含水位点的 3 对角线性方程组,并用追赶法求解。

## 1.2 模拟与验证

### 1.2.1 资料选取及控制条件

#### 1.2.1.1 模型范围

如图 1 所示,模式计算区域为  $21^{\circ}18' \sim 21^{\circ}44.4' N$ ,  $119^{\circ}24' \sim 119^{\circ}55'E$ , 格步长为  $0.05'$  (约  $86.505 \text{ m} \times 92.655 \text{ m}$ ), 本计算域基本上将工程区域及可能受到影响的地区都包括在内。

#### 1.2.1.2 计算地形水深及验证资料的选取

计算域地形水深采用 2008 年 8 月中华人民共和国海事局海图(90401 铁山港及附近),局部地形结合 2011 年港口码头工程资料修正。模拟验证主要包括

潮位和潮流两方面,采用石头埠水文站 2008 年 4 月 11 日~12 日的大潮潮位、4 月 20 日~21 日小潮潮位及模拟期间 4 个站大潮实测海流资料做验证,潮位站和潮流站位置见图 1。

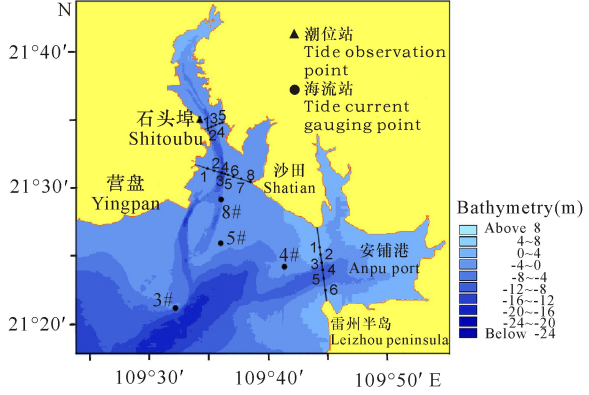


图 1 模型验证点及计算断面分布

Fig. 1 Model verification point and distribution of calculation section

1.2.2 模型验证

如图 2 所示,大、小潮期间潮位平均绝对误差分别为 5.5 cm、4.5 cm。模拟潮位与实测潮位基本吻合

合,日潮不等现象显著时,误差略大。模拟流速流向与实测值的变化趋势大体一致,流向模拟值与实测值符合程度较好,流速的模拟值与实测值符合程度较流向稍差,模拟最大流速与实测基本一致(图 3)。总体上,模拟结果基本可代表研究海域的流场状况。

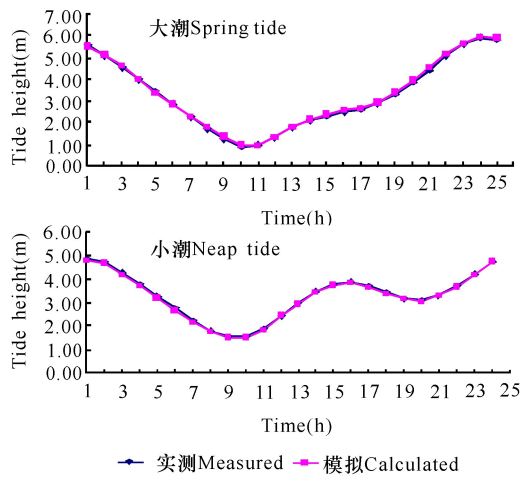


图 2 大小潮潮位过程验证

Fig. 2 Comparison of measured and calculated water levels of spring/neap tide

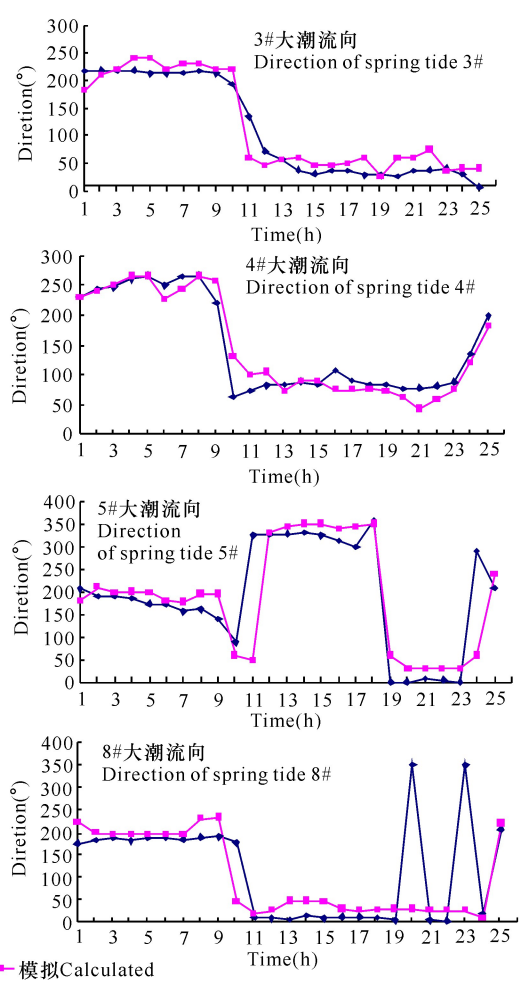
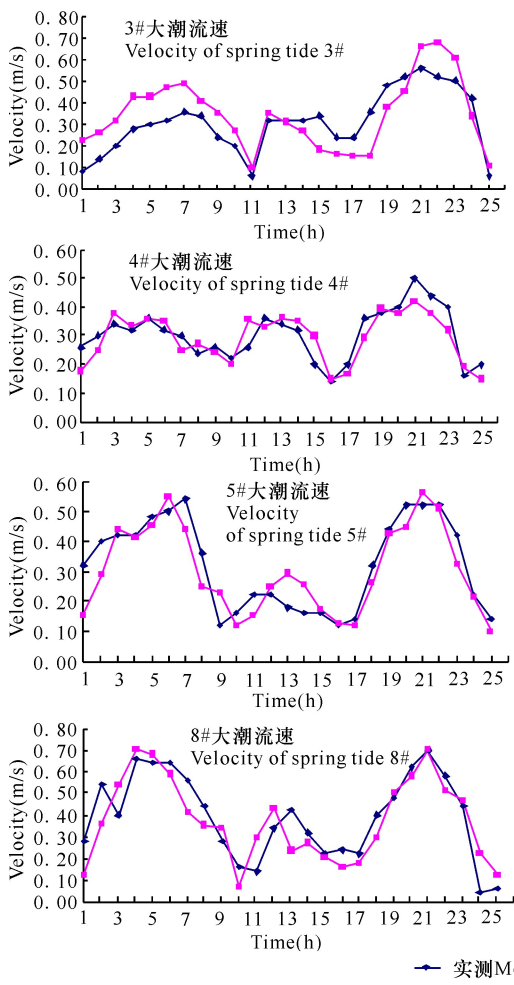


图 3 大潮流速、流向过程验证(3#、4#、5#、8#为测点)

Fig. 3 Comparison of measured and calculated velocity and direction of spring tides(3 #, 4 #, 5 # and 8 # are gauging points)

## 2 结果与分析

### 2.1 研究海域潮流场特征

采用以上潮流数学模型,计算研究海域的潮流场。图4给出了现状情况下研究海域的大潮涨落潮流场矢量图。

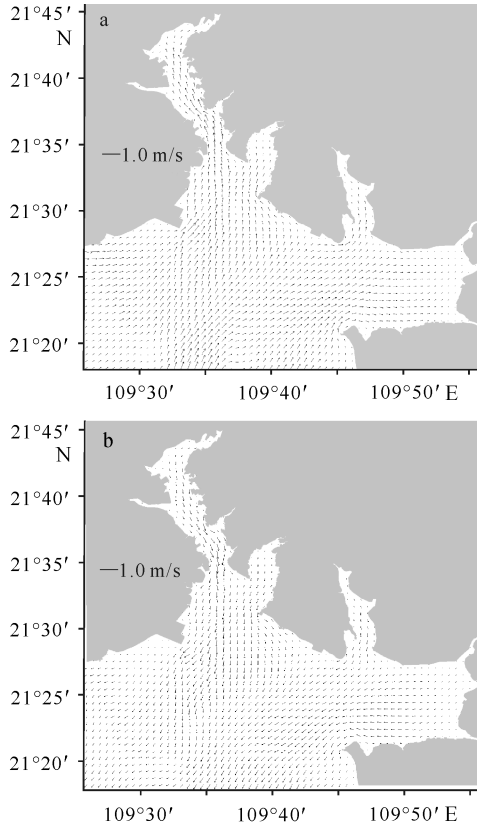


图4 研究海域现状流场(a为涨急时刻,b为落急时刻)

Fig. 4 The present velocity field in coastal research areas(a is flood time,b is ebb time)

通过对数值模拟结果进行分析,研究海域流场特征可总结如下:

- 1) 铁山港湾内为南北向的往复流;
- 2) 流速分布为外海水深处流速略小,狭窄水道处流速受地形影响,流速增大;
- 3) 因受地形的影响和制约,铁山港口附近的潮流呈沿等深线运动的往复流,转流历时较短,局部区域

表1 港口总体规划工程实施前后各站潮位分布值

Table 1 The tidal value before and after the port planning project(m)

潮位 Tide height	石头埠站 Shitoubu station		沙田站 Shatian station		安铺站 Anpu station	
	工程前 Before the project	工程后 After the project	工程前 Before the project	工程后 After the project	工程前 Before the project	工程后 After the project
最高 Highest	4.96	4.99	4.93	5.04	4.95	5.05
最低 Lowest	1.36	1.34	1.41	1.41	1.42	1.43

潮流归槽现象明显;

4) 通常涨潮历时大于落潮流速,落潮流速一般大于涨潮流速,并且涨潮流速过程线呈双峰型,即在中潮位附近,潮位曲线有时出现一个稳定的时间历程,有时略有回落,致使涨潮流速减小,甚至出现短暂的落潮流。

铁山港湾港口总体规划布置方案<sup>[1]</sup>是利用港山湾内的深槽走向,顺应深槽布置码头泊位,规划有铁山港区、榄根港区和沙田港区共3个作业区(图5)。港口规划完全实施需填海4248 hm<sup>2</sup>,形成码头岸线长约5.8 km。港口规划工程的实施改变了铁山港湾的地形条件,给水动力环境也造成了一定程度的影响。

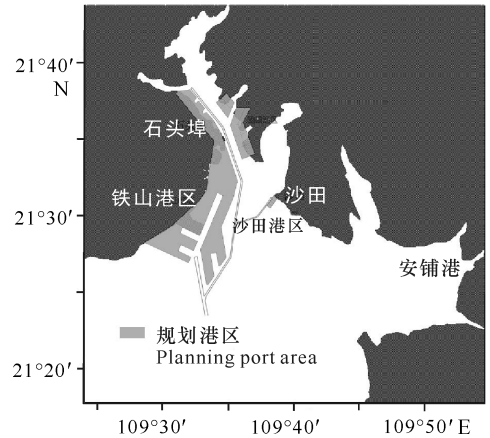


图5 铁山港港口总体规划示意图

Fig. 5 Diagram of tieshangang port planning

### 2.2 对潮位的影响

为分析总体规划工程引起的潮位变化,模型中选取了模拟范围内的3个代表潮位站(石头埠潮位站、沙田潮位站、安铺港湾口潮位站)观测对比工程前后的潮位变化。结果如表1所示,工程后的过水面积与工程前基本相同,没有发生断面大的收缩,表明规划工程实施后,由于铁山湾水深增大,水流阻力减小,中潮时高潮位略有升高,变化幅度在0.03~0.11 m,最低潮位则与工程前基本相同,变化幅度在-0.02~0.01 m。

## 2.3 对潮流场的影响

### 2.3.1 对石头埠断面的影响

石头埠断面设置在铁山湾的中部位置,是铁山港总体布局方案的北侧(图1)。在港口总体布局方案条件下,铁山湾西侧规划布置为铁山港西港区(石头埠作业区),铁山湾东侧规划布置为铁山港东港区,受两岸港口岸线压缩,水面宽度由工程前的高潮位下最大宽度3100 m束窄为工程后的水面宽度1800 m。模拟结果表明,除两侧流速代表点因工程阻挡出现无水过流变化较大外,相对而言主槽区西侧流速代表点临近主槽影响较大,东侧流速代表点位于滩地影响较小,但主槽区涨潮流速较小、落潮流速较大的态势没有改变,仍然保持着涨潮时流速小、落潮时流速大、西侧流速大于东侧流速的变化规律。工程后港池浚深,大、小潮最大落急流速普遍增加,变化幅度最大为0.06 m/s;大、小潮涨急流速普遍减弱,变化幅度最大为0.17 m/s。东侧原边滩区流速略有增强,在主流区其它3个流速代表点的涨落潮流速与工程前基本相同(表2)。

### 2.3.2 对沙田断面的影响

沙田断面设在铁山湾的口门部位,也是铁山港总体布局方案中主体铁山港区的關鍵部位(图1),规划

表2 工程前后石头埠断面流速变化

Table 2 The tide velocity in Shitoubu section before and after the project(m/s)

代表点 Representative point	大潮涨急 Flood time of spring tide		大潮落急 Ebb time of spring tide		小潮涨急 Flood time of neap tide		小潮落急 Ebb time of neap tide	
	工程前 Before the project	工程后 After the project	工程前 Before the project	工程后 After the project	工程前 Before the project	工程后 After the project	工程前 Before the project	工程后 After the project
1	0.52	/	0.56	/	0.48	/	0.65	/
2	0.52	0.47	0.64	0.54	0.54	0.65	0.54	0.54
3	0.52	0.41	0.58	0.65	0.54	0.37	0.59	0.54
4	0.19	0.25	0.22	0.26	0.31	0.26	0.26	0.31
5	0.19	/	0.21	/	0.20	/	0.20	/

注:/表示该处已形成陆域,不存在流速。Note:/ indicate the land has been formed but there is no velocity.

表3 工程前后沙田断面流速变化

Table 3 The tide velocity in Shatian section before and after the project(m/s)

代表点 Representative point	大潮涨急 Flood time of spring tide		大潮落急 Ebb time of spring tide		小潮涨急 Flood time of neap tide		小潮落急 Ebb time of neap tide	
	工程前 Before the project	工程后 After the project	工程前 Before the project	工程后 After the project	工程前 Before the project	工程后 After the project	工程前 Before the project	工程后 After the project
1	0.76	/	0.82	/	0.59	/	0.65	/
2	0.59	/	0.65	/	0.54	/	0.70	/
3	0.48	0.59	0.59	0.76	0.48	0.65	0.54	0.48
4	0.48	0.65	0.54	0.65	0.42	0.59	0.48	0.59
5	0.48	0.65	0.54	0.65	0.42	0.59	0.42	0.54
6	0.42	0.59	0.54	0.70	0.59	0.31	0.65	0.59
7	0.20	0.20	0.37	0.20	0.26	0.26	0.20	0.31
8	0.82	0.65	0.87	0.87	0.65	0.42	0.59	0.76

注:/表示该处已形成陆域,不存在流速。Note:/ indicate the land has been formed but there is no velocity.

在沙田断面两侧布设铁山港石头埠港区和沙田港区,将天然最大水面宽度由9330 m束窄为5500 m。由于天然深槽西偏,主流区偏向西岸,在实现工程规划时,除原有断面1号、2号流速代表点被铁山港石头埠港区围垦阻隔而出现无流速变化较大外,其它3~8号流速代表点在工程后流速总体变化不大。在规划工程实施后,由于水面宽度缩减,港池浚深,水深增大,测得的工程后涨落潮流速均略有增大,特别是西侧的石头埠港区港池和航道范围内的3~6号代表点流速增加明显,增加幅度为0.11~0.17 m/s,靠近港池的3号代表点流速增加相对更为明显;位于东侧的沙田港区前沿港池8号代表点落潮时最大落潮流速工程前后基本相同,工程后涨潮最大流速有所减小(表3)。

### 2.3.3 对安铺断面的影响

安铺港湾进口断面在铁山港总体规划布置方案条件下,过水断面未发生任何改变,1号、6号流速代表点位于两侧滩面,2~5号流速代表点位于进口深槽。从模拟结果来看,主槽区的2~5号代表点流速在工程前后基本没有发生变化,涨落潮流速略有增加,但增幅不明显(表4)。

表 4 工程前后安铺断面流速变化

Table 4 The tide velocity in Anpu section before and after the project(m/s)

代表点 Representative point	大潮涨急 Flood time of spring tide		大潮落急 Ebb time of spring tide		小潮涨急 Flood time of neap tide		小潮落急 Ebb time of neap tide	
	工程前 Before the project	工程后 After the project	工程前 Before the project	工程后 After the project	工程前 Before the project	工程后 After the project	工程前 Before the project	工程后 After the project
	1	0.26	0.31	0.37	0.31	0.37	0.26	0.42
2	0.42	0.48	0.54	0.59	0.42	0.37	0.48	0.48
3	0.48	0.54	0.54	0.59	0.42	0.54	0.65	0.54
4	0.48	0.59	0.59	0.59	0.48	0.59	0.65	0.59
5	0.54	0.42	0.54	0.48	0.48	0.48	0.76	0.70
6	0.37	0.34	0.54	0.42	0.54	0.48	0.59	0.59

综合铁山港湾 3 个断面工程前后的流速比较分析,总体来说,港口总体规划工程实施后,铁山湾内涨潮时流速较小、落潮时流速较大,西侧深槽区流速较大、东侧浅滩区流速较小的分布规律没有改变。就不同断面位置而言,上游石头埠断面除西侧近岸区受工程影响出现无流速变化较大外,其它主流区在布置方案条件下基本上均没有出现大的变化。

### 2.4 对纳潮量的影响

铁山港港口规划工程建设后,将改变铁山湾原有岸线和海底地形状况。为预测铁山湾在工程实施后可能引起的变化,模型中选择铁山湾石头埠和沙田两个封闭的断面,以及相邻的安铺湾进口断面,累积计算逐时整点时间纳进计算断面的流量。工程方案实施后,由于港池及航道的浚深,潮波发生变形,一定程度上增大了湾内的纳潮量,最大纳潮量变化 4.3%左右(表 5)。

表 5 工程前后各断面纳潮量

Table 5 The counting tidal flux before and after the project

计算断面 Calculated section	安铺断面 Anpu section	沙田断面 Shatian section	石头埠断面 Shitoubu section
工程前 Before the project ( $\times 10^9 \text{ m}^3$ )	4.85	3.94	2.29
工程后 After the project ( $\times 10^9 \text{ m}^3$ )	4.94	4.06	2.39
变化幅度 Variation range(%)	1.8	3.1	4.3

另外,数学模型计算的铁山湾沙田断面单宽纳潮量断面分布表明:工程前,主要纳潮通道位于距西岸边 3 km 处的深槽,最大单宽纳潮量接近 25 万  $\text{m}^3$ 。纳潮量主要分布在距西岸边 1~4 km 的横向范围内,其它分布在沙田港区,单宽纳潮量 5 万  $\text{m}^3$  左右;工程后,因西岸边 2.5 km 范围内围作码头用地,2.5~3.5 km 为码头泊位及航道,港池航道浚深使得广西科学 2015 年 6 月 第 22 卷第 3 期

单宽纳潮量大增,最大单宽纳潮量逾 35 万  $\text{m}^3$ ,而且单宽流量(即流速)分布较无工程时均匀,沙田港区单宽纳潮量变化不大。铁山湾进口沙田断面的单宽纳潮量横向分布变化见图 6。

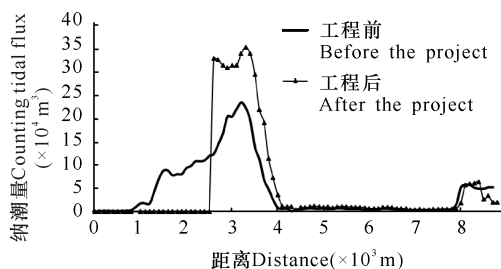


图 6 沙田断面纳潮量横向分布变化

Fig. 6 Transverse distribution of counting tidal flux in Shatian section

### 3 结论

1)铁山港湾港口总体规划工程实施后,石头埠站、沙田站和安铺站最高潮位均有所增加,增加幅度分别为 0.03 m、0.11 m、0.10m;最低潮位基本维持不变。

2)工程实施后,石头埠断面潮流涨急流速略有减小,平均减小幅度为 0.06 m/s,落急流速略有增加,平均增加幅度为 0.06 m/s;沙田断面涨落潮流速均略有增大,增加幅度为 0.11~0.17 m/s;安铺断面主槽区流速基本上无变化,涨落潮流速略有增加,但增幅不明显。

3)工程实施后,由于港池及航道的浚深,石头埠、沙田和安铺 3 个断面的纳潮量均有不同程度的增加,分别增加 1.8%,3.1%和 4.3%,沙田断面单宽纳潮量变化不大。

4)工程实施后,铁山湾内涨潮时流速较小、落潮时流速较大,西侧深槽区流速较大、东侧浅滩区流速较小的分布规律没有改变,对水动力环境影响较小。就不同断面位置而言,上游石头埠断面除西侧近岸区

受工程影响出现无流速变化较大外,其它主流区在布置方案条件下基本上均没有出现大的变化。

#### 参考文献:

- [1] 辛文杰. 北海铁山港航道工程潮流数值计算分析[R]. 南京:南京水利科学研究院,1994.  
Xin W J. Numerical Simulation of Tidal Current by Tieshangang Channel Project in Beihai[R]. Nanjing: Nanjing Institute of Water Resources Science,1994.
- [2] 郭伟,朱大奎. 深圳围海造地对海洋环境影响的分析[J]. 南京大学学报:自然科学版,2005,41(3):286-296.  
Guo W, Zhu D K. Reclamation and its impact on marine environment in Shenzhen area[J]. Journal of Nanjing University: Natural Sciences, 2005, 41(3): 286-296.
- [3] 李希彬,鲍献文,马超,等. 东海大堤对湛江湾水动力环境影响的研究[J]. 中国海洋大学学报:自然科学版, 2009, 39: 287-296.  
Li X B, Bao X W, Ma C, et al. Effects of Donghai Dam on the hydrodynamic environment of the Zhanjiang Bay [J]. Periodical of Ocean University of China: Natural Sciences, 2009, 39: 287-296.
- [4] 蒋磊明,陈波,邱绍芳. 围填海工程对防城港湾及其周边水动力条件环境变化的影响分析[J]. 广西科学院学报, 2009, 25(2): 116-118.  
Jiang L M, Chen B, Qiu S F. Analysis on the effect of coast reclamation works on hydraulic environment variation in Fangchenggang Bay and neighborhood[J]. Journal of Guangxi Academy of Sciences, 2009, 25(2): 116-118.
- [5] 韩树宗,吴柳,朱君. 围海建设对天津近海水动力环境的影响研究[J]. 中国海洋大学学报:自然科学版, 2012, 42(S): 1-9.  
Han S Z, Wu L, Zhu J. The research of reclamation to Tianjin coastal hydrodynamic environment[J]. Periodical of Ocean University of China: Natural Sciences, 2012, 42(S): 1-9.
- [6] 董德信,李谊纯,陈宪云,等. 大规模填海工程对钦州湾水动力环境的影响[J]. 广西科学, 2014, 21(4): 357-364, 369.  
Dong D X, Li Y C, Chen X Y, et al. Impacts of hydrodynamic environment caused by large-scale reclamation in Qinzhou Bay[J]. Guangxi Sciences, 2014, 21(4): 357-364, 369.
- [7] 张卓,叶荣辉,卜春春,等. 北海铁山港建港方案对铁山湾潮流泥沙的影响研究[J]. 水道港口, 2009, 30(6): 402-407.  
Zhang Z, Ye R H, Bu C C, et al. Influence on tidal flow and sediment by planning Tieshan Port project in Beihai [J]. Journal of Waterway and Harbor, 2009, 30(6): 402-407.
- [8] 蒋昌波,李媛,官志鑫,等. 铁山湾建港前后水体交换能力的数值模拟[J]. 热带海洋学报, 2013, 32(1): 81-86.  
Jiang C B, Li Y, Guan Z X, et al. Numerical simulation of water exchange capability before and after port construction in Tieshan Bay[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2013, 32(1): 81-86.
- [9] 包孝彩,阮伟,黄志扬,等. 北海铁山港区围垦与航道工程对铁山湾潮流动力的影响[J]. 中国港湾建设, 2010, 165(1): 7-10.  
Bao X C, Ruan W, Huang Z Y, et al. Influence of reclamation and channel construction on the hydrodynamic characteristics of Tieshan Bay[J]. China Harbour Engineering, 2010, 165(1): 7-10.
- [10] Egbert G D, Erofeeva S Y. Efficient inverse modeling of barotropic ocean tides[J]. J Atmos and Oceanic Technology, 2002, 19: 183-204.
- [11] 广西壮族自治区交通厅. 广西北部湾港总体规划(报批本)[R]. 南宁:广西壮族自治区交通厅, 2012.  
Traffic Department of Guangxi Zhuang Autonomous Region, Overall Planning for the Beibuwan Gulf Port of Guangxi (Approval draft) [R]. Nanning: Guangxi Zhuang Autonomous Region Traffic Department, 2012.

(责任编辑:陆雁)