

文章编号:1672-9331(2017)02-0049-06

## 铁山湾海域风暴潮的数值模拟

蒋昌波<sup>1,2</sup>, 赵兵兵<sup>1</sup>, 邓斌<sup>1,2</sup>, 伍志元<sup>1</sup>

(1.长沙理工大学 水利工程学院,湖南 长沙 410004; 2.湖南省水沙科学与水灾害防治重点实验室,  
湖南 长沙 410004; 3.长沙理工大学 水科学与环境工程国际研究中心,湖南 长沙 410004)

**摘要:**铁山湾海域风暴潮灾害频发,为研究该海域风暴潮特征,基于 Delft 3D 模型和 Holland 台风模型,建立了一个高分辨率的风暴潮数值计算模型。通过对 1409 号“威马逊”和 1415 号“海鸥”台风风暴潮进行模拟,验证了模型的精确性。计算结果表明,由于铁山湾是个半封闭的喇叭形状港湾,港湾内侧的增水值大于港湾外侧,“威马逊”台风引发的内侧最大增水值达到 3.5 m,因此应更加重视港湾内侧的防灾减灾工作;同时,铁山湾海域风暴潮对台风参数的变化较为敏感,台风强度越大、路径距离铁山湾越近,其产生的增水越大。

**关键词:** Delft 3D; 威马逊; 海鸥; 铁山湾; 风暴潮; 数值模拟

**中图分类号:** P731.23

**文献标识码:** A

## Numerical simulation of storm surge in Tieshan Bay

JIANG Chang-bo<sup>1,2</sup>, ZHAO Bing-bing<sup>1</sup>, DENG Bin<sup>1,2</sup>, WU Zhi-yuan<sup>1</sup>

(1.School of Hydraulic Engineering,Changsha University of Science and Technology, Changsha 410004, China;  
2.Key Laboratory of Water-Sediment Flood and Water Disaster Prevention of Hunan Province,  
Changsha 410004, China3.International Research Center of Water Science and Environmental  
Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410004, China)

**Abstract:** The storm surge disaster in Tieshan Bay is frequent. In order to study the characteristics of storm surge in this area, a high resolution numerical model was established based on Delft 3D hydrodynamic model and Holland typhoon model. The accuracy of the model was validated with the simulation of storm surge induced by typhoon “Rammasun” (1409) and “Kalmaegi”(1415).The result shows that the storm surge inside the bay is greater than outside because of the shape of Tieshan Bay which is like a semi-enclosed horn, the maximum value inside the bay reached 3.5m, so more attention should be paid to storm surge disasterprevention and mitigation work inside the bay. At the same time, the storm surge in Tieshan Bay is sensitive to the typhoon parameters, the greater the typhoon intensity and the closer the route to Tieshan Bay, the greater the set-up is.

**Key words:** Delft 3D; Rammasun; Kalmaegi; Tieshan bay; storm surge; numerical simulation

风暴潮是沿海地区最严重的自然灾害之一,尤其是在水深较浅、地理条件复杂、人口密度较大

的北部湾广西沿海。铁山湾处于北部湾广西沿海经济枢纽的位置,每年都会因风暴潮的侵袭而造

**收稿日期:**2017-03-22

**基金项目:**国家自然科学基金资助项目(51239001);交通运输部应用基础研究项目(2015319825080)

**作者简介:**蒋昌波(1970-),男,陕西石泉人,长沙理工大学教授,博士生导师,主要从事河流、海岸动力过程及其模拟技术方面的研究。

成巨大的经济损失。尤其当风暴潮的最大增水与天文大潮的高潮相遇时,往往会使风暴潮的潮位超过当地警戒水位,造成海岸防御建筑物的破坏与内陆洪水的泛滥,同时会导致沙质岸滩严重的泥沙运动与岸滩侵蚀<sup>[1]</sup>。因此,对铁山湾海域的风暴潮进行研究不仅具有科研价值,而且对铁山湾海域的防灾减灾工作具有重要意义。

近年来,风暴潮数值计算模式得到了很大的发展。夏波等<sup>[2]</sup>基于 ADCIRC 模型建立了高分辨率的天文潮与风暴潮耦合数学数值模型,对渤海湾西南海域的风暴潮进行了模拟。李勇等<sup>[3]</sup>基于 ROMS 模式建立了风暴潮漫滩模型,对渤海湾西部重现期为 50,100,200,500 a 的风暴潮漫滩进行了研究,分析了不同重现期风暴潮漫滩的过程及最大漫滩范围。李明杰等<sup>[4]</sup>采用了 ADCIRC 和 SWAN 耦合模型研究了广西涠洲岛的风暴潮漫滩情况,分析了风暴潮和大潮对涠洲岛西南部沙滩侵蚀的影响。陈波<sup>[5]</sup>对北部湾广西沿海的风暴潮开展了系统的研究,揭示了不同台风路径和地形对风暴增减水的影响,并建立了大范围的风暴潮预报模型对台风的敏感性进行了分析。这些研究多致力于对多年一遇增水和漫滩的预报,而对于小区域风暴潮时空变化规律的研究较少,尤其是对港湾内侧风暴增水的变化规律研究较少。因此,建立一个高分辨率的风暴潮数学模型,不仅可以为提高单站风暴潮预报精度提供技术参考,而且还对铁山湾海域的风暴潮防灾减灾工作具有重要的意义。

作者基于 Delft 3D 水动力模型和 Holland 台风模型,建立一个适用于铁山湾海域的二维风暴潮数学模型。采用该模型对 1409 号“威马逊”和 1415 号“海鸥”台风风暴潮进行模拟,以研究铁山湾海域风暴增水的分布规律,并对两场台风引发风暴增水的差异性进行分析。

## 1 数值模型的建立

### 1.1 水动力模型控制方程

Delft 3D 模型是国际上较为常用的水动力计算模型<sup>[6-8]</sup>,其基于不可压缩流体假设、静压假设和 Boussinesq 假设求解雷诺平均 N-S 方程,数值计算方法采用交替隐式法(ADI),具有计算速度

快、计算稳定性和精确性高等特点。

在球坐标系中,Delft 3D 连续方程为:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{1}{(R \cos \phi) R} \frac{\partial [(d + \zeta) U R]}{\partial \lambda} + \frac{1}{(R \cos \phi) R} \frac{\partial [(d + \zeta) V R \cos \phi]}{\partial \phi} = Q. \quad (1)$$

式中: $\zeta$  是参考平面以上自由水面; $d$  是参考平面以下水深; $\lambda$  是经度; $\phi$  是纬度; $R$  是地球半径(6 378 137 km, WGS84); $U, V$  是水深平均流速; $Q$  代表单位面积上源和汇的作用,如:降水、蒸发等,

$$Q = H \int_{-1}^0 (q_{in} - q_{out}) d\sigma + P - E. \quad (2)$$

式中: $H = d + \zeta$ ;  $P$  是降雨; $E$  是蒸发; $q_{in}$  是水的来源; $q_{out}$  是水的渗流。

$\lambda$  和  $\phi$  方向的动量守恒方程为:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} = & -\frac{u}{R \cos \phi} \frac{\partial u}{\partial \lambda} - \frac{v}{R} \frac{\partial u}{\partial \phi} - \frac{\omega}{d + \zeta} \frac{\partial u}{\partial \sigma} + \\ & \frac{v^2}{(R \cos \phi) R} \frac{\partial R}{\partial \lambda} - \frac{1}{\rho_0 (R \cos \phi)} P_\lambda + \\ & f v - \frac{u v}{(R \cos \phi) R} \frac{\partial (R \cos \phi)}{\partial \phi} + \\ & F_\lambda + \frac{1}{(d + \zeta)^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left( v_v \frac{\partial u}{\partial \sigma} \right) + M_\lambda. \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} = & -\frac{u}{R \cos \phi} \frac{\partial v}{\partial \lambda} - \frac{v}{R} \frac{\partial v}{\partial \phi} - \frac{\omega}{d + \zeta} \frac{\partial v}{\partial \sigma} - \\ & \frac{u v}{(R \cos \phi) R} \frac{\partial R}{\partial \lambda} - \frac{1}{\rho_0 R} P_\phi - \\ & f u + \frac{u^2}{(R \cos \phi) R} \frac{\partial (R \cos \phi)}{\partial \phi} + \\ & F_\phi + \frac{1}{(d + \zeta)^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left( v_v \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right) + M_\phi. \end{aligned} \quad (4)$$

式中: $P_\lambda, P_\phi$  是压强梯度; $F_\lambda, F_\phi$  是雷诺应力项; $f$  是科氏力系数( $f = 2\Omega \sin \phi$ ,  $\Omega$  为地球公转角速度); $M_\lambda, M_\phi$  分别为外部源和汇的分量。

台风的作用是将风场和气压场按照静压假设和自由表面边界条件作用在水体上。Delft 3D 模型中,风应力的计算公式为:

$$\tau_a = C_D \rho_a |\vec{U}_{10}| \vec{U}_{10}. \quad (5)$$

式中: $\vec{U}_{10}$  为海平面以上 10 m 处的风速; $C_D$  为风应力拖曳力系数; $\rho_a$  是空气密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ 。

### 1.2 台风模型

风暴潮的计算精度很大程度上取决于风场和气压场的计算。目前,计算风场通常采用两种方

法;第一种是根据经验公式,假设风场的分布存在一定规律,通过最大风速和最大风速半径等参数来直接计算风场;第二种是首先计算气压场,随后根据梯度风原理由气压场推算风场的分布情况。本研究采用第二种方法计算风场的 Holland 台风模型。

气压场表示为:

$$P(r) = P_c + (P_n - P_c) \exp^{-(R_{\max}/r)^B} \quad (6)$$

根据梯度风原理计算的风场为:

$$V(r) = \left[ \frac{B}{\rho_a} \left( \frac{R_{\max}}{r} \right)^B (P_n - P_c) \exp^{-(R_{\max}/r)^B} + \left( \frac{rf}{2} \right)^2 \right]^{1/2} - \frac{rf}{2} \quad (7)$$

式中:  $P(r)$  是距台风中心  $r$  处的台风气压;  $P_n$  是外围表面气压;  $P_c$  是台风中心气压;  $V(r)$  是距离台风中心  $r$  处的切向风速;  $R_{\max}$  是最大风速半径;  $B$  是台风形状参数,一般取值为  $1 \sim 2.5$ 。

根据王秀芹等<sup>[9]</sup>的研究,Smith 风应力拖曳力系数公式对风暴潮的模拟效果较好,因此本研究选用 Smith 风应力拖曳力系数公式对风暴潮进行计算:

$$C_D = (0.61 + 0.063) \times 10^{-3}, \quad 6 < U_{10} < 22 \text{ m/s} \quad (8)$$

### 1.3 网格与边界条件

要得到较为精确的风暴潮计算结果,需对大范围的海域进行模拟<sup>[10]</sup>。而铁山湾海域范围较小,因此采用嵌套网格进行计算。网格一的计算范围为:  $105.5^\circ\text{E} \sim 117.8^\circ\text{E}, 16.0^\circ\text{N} \sim 23.9^\circ\text{N}$ , 开边界网格分辨率为  $5 \text{ km}$ ; 网格二的计算范围为: 北部湾广西沿海, 最高网格分辨率可达  $10 \text{ m}$ , 如图 1 所示。铁山湾海域的水深由数字化航海保证部海图得到, 其他位置采用 GEBCO\_14 的  $30''$  水深数据。

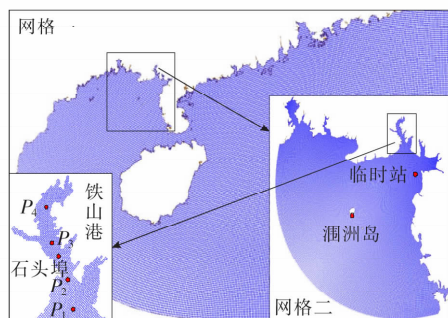


图1 计算区域及网格

Fig. 1 Computational domain and grid

初始条件:  $\zeta = u = v = 0$ 。

闭合边界条件: 采用自由滑移边界条件, 即岸线闭合边界上的切应力为 0。

开边界条件: 大模型是在开边界上提供  $M_2, N_2, S_2, K_2, K_1, O_1, P_1, Q_1$  等 8 个主要分潮调和常数作为驱动力, 潮汐调和常数取自全球潮流模型 TPXO7.2; 小模型的水位边界条件由大模型计算提供。

## 2 数值模型验证

利用上述风暴潮模型分别对 1409 号台风“威马逊”和 1415 号台风“海鸥”引起的风暴潮进行模拟, 台风资料来源于中国气象局热带气旋资料中心。“威马逊”台风风暴潮计算时间为 2014 年 7 月 10 日 0 时至 2014 年 7 月 20 日 18 时 (GMT+0, 下同), “海鸥”台风风暴潮计算时间为 2014 年 9 月 10 日 12 时至 2014 年 9 月 17 日 12 时, 时间步长均设定为  $60 \text{ s}$ 。两场台风引发的各站风暴增水 (风暴增水 = 风暴潮位 - 天文潮位) 见图 2 和图 3。

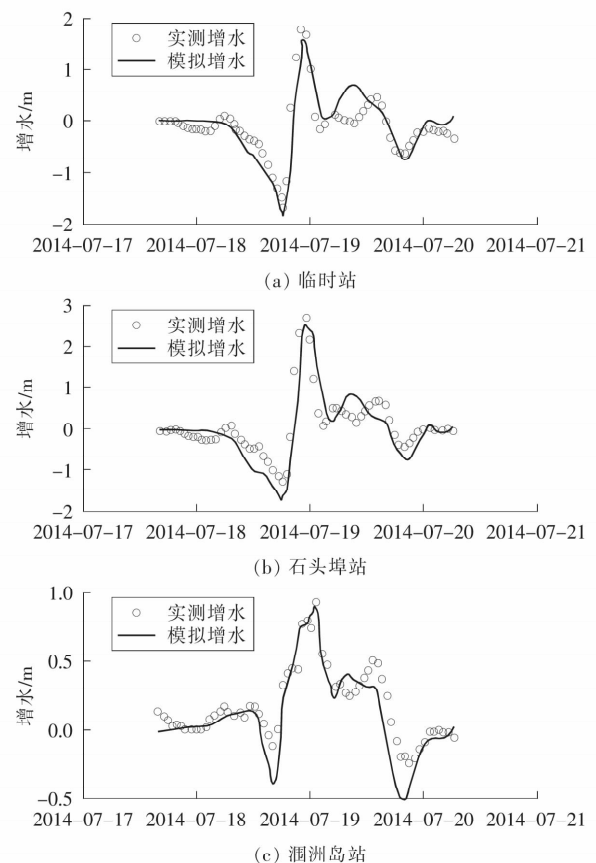


图2 1409号“威马逊”台风期间各站风暴增水验证图

Fig. 2 Verification of storm set-up caused by the typhoon 1409

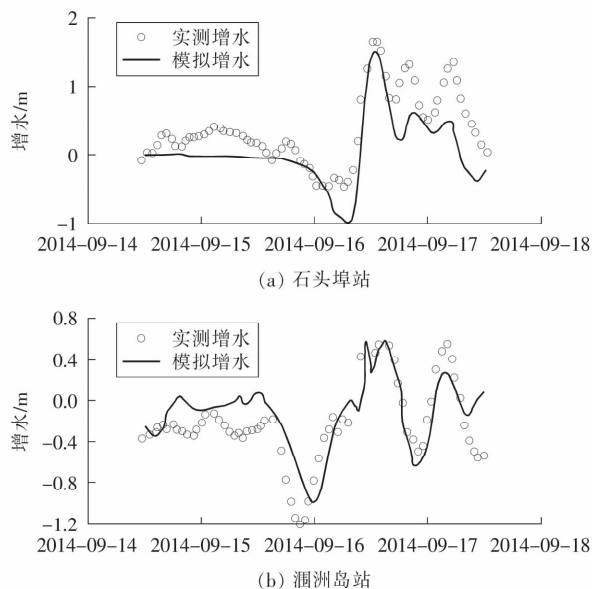


图3 1415号“海鸥”台风期间各站风暴增水验证图

Fig. 3 Verification of storm set-up caused by the typhoon 1415

从图2,3可以看出,两场台风引发的各站模拟风暴增水过程与实测过程吻合良好。表1为各站误差统计。1409号“威马逊”台风期间,各站最大增水平均误差为0.14 m,最大误差值为0.2 m; 1415号“海鸥”台风期间,各站最大增水平均误差为0.14 m,最大误差值为0.13 m。由此可见,本研究建立的风暴潮模型可以较为准确地模拟两场台风在铁山湾海域引发的风暴潮。

表1 两场台风引发各站最大风暴增水误差统计

Table 1 Statistics of the maximum set-up error of each station m

测站	1409号“威马逊”			1415号“海鸥”		
	实测值	模拟值	绝对误差	实测值	模拟值	绝对误差
石头埠	2.70	2.51	0.19	1.64	1.48	0.16
涠洲岛	0.94	0.90	0.04	0.56	0.65	0.09
临时站	1.78	1.58	0.20	—	—	—

### 3 铁山湾海域风暴潮特征分析

为了更全面地研究铁山湾海域在两场台风期间的风暴增水情况,本研究选取铁山湾外侧的P1

点、铁山湾口门处的P2点、铁山湾内侧的P3和P4点进行分析。4个测点的位置如图1所示。

图4为1409号和1415号台风引发铁山湾海域4个测站的风暴增水对比图。图5为两场台风引发的铁山湾海域风暴增水云图。从图4,5可以看出,台风“威马逊”期间,铁山湾外侧P1站最大增水为2.23 m,铁山湾口门P2处最大增水为2.45 m,铁山湾内侧的P3和P4处最大增水分别为2.95 m和3.18 m;台风“海鸥”期间,铁山湾外侧P1站最大增水为1.24 m,铁山湾口门P2处最大增水为1.39 m,铁山湾内侧的P3和P4处最大增水分别为1.60 m和1.75 m。两场台风期间,整个港湾的最大增水值分别在2.2~3.5 m和1.2~2 m之间,越进入铁山湾内侧,最大增水的值越大,这主要是由铁山湾独特的地理形状决定的。铁山湾是半封闭海湾,地理形状近似喇叭形,发生风暴潮时,海水容易涌入港湾内,越靠近内侧,水体越容易堆积,因此港湾内侧的最大增水值要大于港湾外侧。

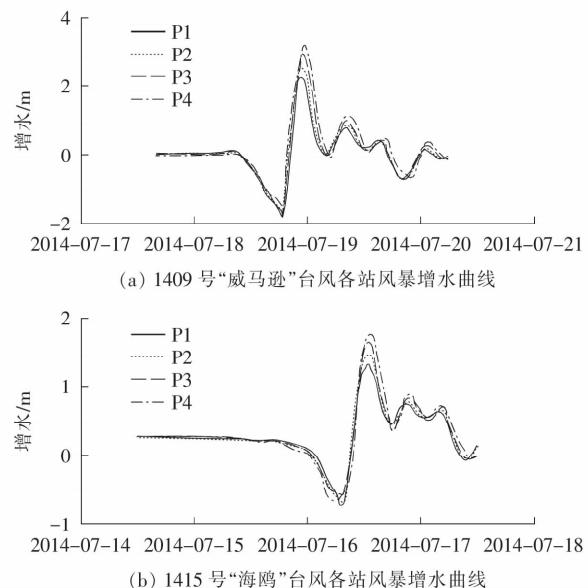


图4 两场台风期间铁山湾海域各站风暴增水曲线对比图

Fig. 4 Comparison of set-up curve of each station in Tieshan Bay during the two typhoons

从图5可以看出,台风“威马逊”引发的铁山湾海域各位置的风暴增水均大于台风“海鸥”,这主要是由台风的特征参数决定的。台风“威马逊”进入北部湾海域时,其路径在涠洲岛以北,最低中心气压为940 hPa,最大风速达到了52 m/s,达到

强台风级别,最大风速半径为 15 km;台风“威马逊”进入北部湾海域时,其路径在涠洲岛以南,最低中心气压为 960 hPa,最大风速为 40 m/s,达到台风级别,最大风速半径为 20 km。从总体上来看,台风“威马逊”最大风速大,最大风速位置距离铁山湾海域更近,并且台风移动速度慢,对铁山湾海域作用时间更长,因此在铁山湾海域引发的风暴增水要强于台风“海鸥”。

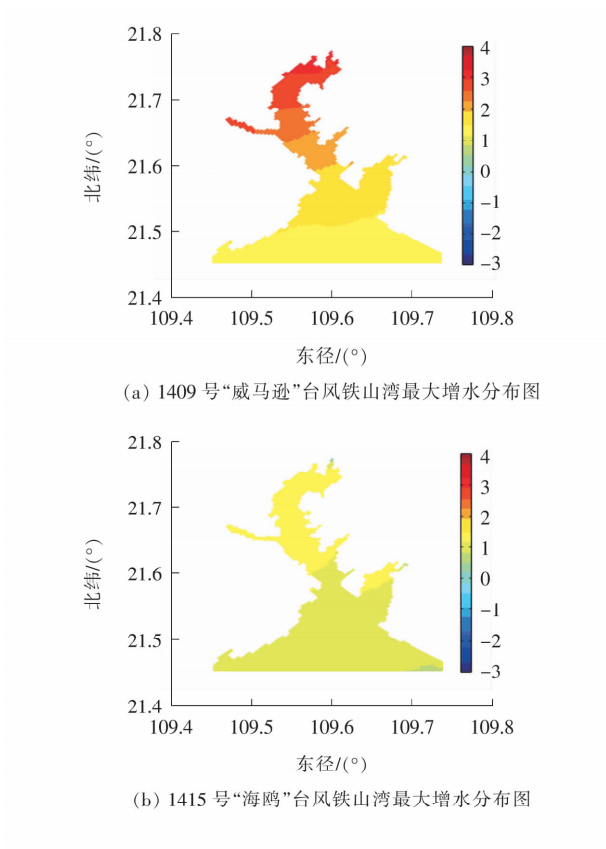


图 5 两场台风期间铁山湾海域最大增水分布图

Fig. 5 Distribution of the maximum set-up in Tieshan Bay during the two typhoons

从图 4 还可以看出,铁山湾各位置在产生增水前,均会产生一个较大的减水,并且最大减水值相差不大。这是因为铁山湾位于台风路径的上方,并且北半球的台风呈逆时针旋转。

图 6 为“威马逊”台风期间铁山湾海域的风场与增减水分布图,其中黑色箭头为风向。从图 6 可以看出,在台风经过前,铁山湾位于台风的左半圆区域,强大的离岸风带走了港湾内的海水;而当台风穿越铁山湾后,铁山湾位于台风的右半圆区域,向岸风又将大量的海水带回港湾内,因此引发了先减水后增水的现象。

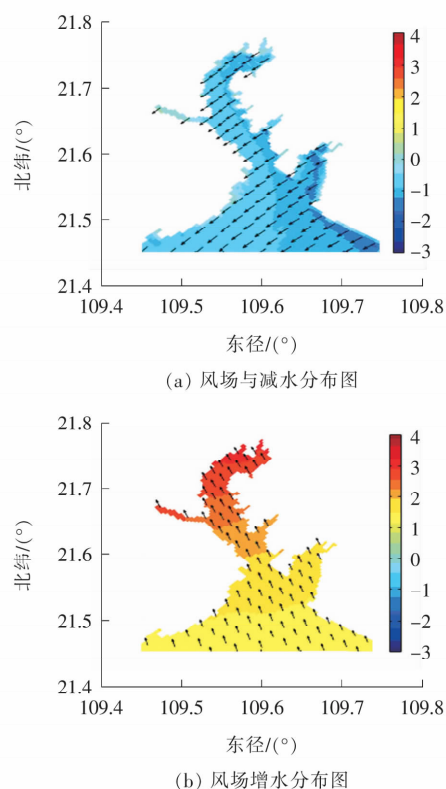


图 6 1409 号“威马逊”台风铁山湾海域风场与增减水分布图

Fig. 6 Distribution of wind and set-up in Tieshan Bay during the typhoon 1409

## 4 结论

作者通过对 1409 号台风“威马逊”与 1415 号台风“海鸥”在铁山湾海域引起的风暴潮进行模拟,得到以下结论。

1) 基于 Delft 3D 水动力模型和 Holland 台风模型建立的二维风暴潮数值模型,可以较好地反应铁山湾海域的风暴潮情况。

2) 由于铁山湾独特的地理形状,港湾内部的增水要大于港湾外侧,“威马逊”台风引发铁山湾内侧最大值达到了 3.5 m,因此要做好港湾内侧的防灾减灾工作。

3) 台风的特征是影响风暴增水过程和最大增水值至关重要的因素,因此在制定风暴潮防灾减灾措施时,要综合考虑台风的特征。

## 〔参考文献〕

[1] 蒋昌波,伍志元,陈杰,等.风暴潮作用下泥沙运动和

- 岸滩演变研究综述[J].长沙理工大学学报:自然科学版,2014,11(1):1-9.
- JIANG Chang-bo, WU Zhi-yuan, CHEN Jie, et al. Review of sediment transport and beach profile changes under storm surge[J]. Journal of Changsha University of Science and Technology: Natural Science, 2014, 11(1): 1-9.
- [2] 夏波, 吴相忠, 张庆河. 渤海湾西南海域潮汐风暴潮数值模拟[J]. 长沙理工大学学报: 自然科学版, 2008, 5(3): 64-70.
- XIA Bo, WU Xiang-zhong, ZHANG Qing-he. Modeling of tide and storm surge in the southwest coast of the Bohai Bay[J]. Journal of Changsha University of Science and Technology: Natural Science, 2008, 5(3): 64-70.
- [3] 李勇, 田立柱, 裴艳东, 等. 渤海湾西部风暴潮漫滩数值模拟[J]. 地质通报, 2016(10): 1638-1645.
- LI Yong, TIAN Li-zhu, PEI Yan-dong, et al. Numerical simulation of storm surge inundation in the west zone of Bohai Bay[J]. Geological Bulletin of China, 2016(10): 1638-1645.
- [4] 李明杰, 吴少华, 刘秋兴, 等. 风暴潮、大潮对广西涠洲岛西南沙滩侵蚀的影响分析[J]. 海洋学报, 2015(9): 126-137.
- LI Ming-jie, WU Shao-hua, LIU Qiu-xing, et al. Impacts of storm surge and spring tide on the beach erosion of southwestern Weizhou Island, Guangxi Province[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2015(9): 126-137.
- [5] 陈波. 北部湾台风风暴潮研究现状与展望[J]. 广西科学, 2014(4): 325-330.
- CHEN Bo. Research status and prospect of storm surge in Beibu Gulf[J]. Guangxi Sciences, 2014(4): 325-330.
- [6] 钱学生, 陈永平, 张长宽. 带丁坝型半封闭矩形海湾中M2分潮潮波和潮流特性分析[J]. 海洋学报, 2014, 36(9): 37-44.
- QIAN Xue-sheng, CHEN Yong-ping, ZHANG Chang-kuan. Tidal wave and tidal current characteristics of the M2 constituent in a semi-enclosed rectangular basin with a coastal barrier[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2014, 36(9): 37-44.
- [7] Broekema Y B, Giardino A, Werf J J V D, et al. Observations and modelling of nearshore sediment sorting processes along a barred beach profile[J]. Coastal Engineering, 2016, 118(118): 50-62.
- [8] Apotsos A, Gelfenbaum G, Jaffe B. Time-dependent onshore tsunami response[J]. Coastal Engineering, 2012, 64(2): 73-86.
- [9] 王秀芹, 钱成春, 王伟. 风应力拖曳系数选取对风暴潮数值模拟的影响[J]. 中国海洋大学学报: 自然科学版, 2001, 31(5): 640-646.
- WANG Xiu-qin, QIAN Cheng-chun, WANG wei. Test of influence of wind drag coefficient on typhoon storm surge simulations[J]. Journal of Ocean University of China: Natural Science, 2001, 31(5): 640-646.
- [10] 王秀芹, 钱成春, 王伟. 计算域的选取对风暴潮数值模拟的影响[J]. 中国海洋大学学报: 自然科学版, 2001, 31(3): 319-324.
- WANG Xiu-qin, QIAN Cheng-chun, WANG wei. The influence of selected calculation field on the simulation of storm surges[J]. Journal of Ocean University of China: Natural Science, 2001, 31(5): 319-324.