

# 广东省徐闻沿海风暴潮数值模拟与淹没危险性分析

黄宝霞<sup>1,2</sup>, 胡金磊<sup>1,2</sup>, 郑淑贤<sup>1,2</sup>, 罗军<sup>1,2</sup>

(1. 国家海洋局南海预报中心, 广东 广州 510310; 2. 自然资源部 海洋环境探测技术与应用重点实验室, 广东 广州 510310)

**摘要:** 基于ADCIRC模型建立了徐闻高分辨率的风暴潮模型,并以1415号台风“海鸥”路径为基础,通过路径平移构建了一系列台风路径,模拟计算了徐闻沿海风暴增水。结果表明:徐闻东部沿岸的风暴增水最大,主要原因在于东部沿岸的独特地形特征以及该区域受到的有利台风路径影响。在上述工作的基础上,耦合海浪和天文潮的作用,计算10个不同等级下徐闻风暴潮淹没情况,计算结果显示,徐闻东部沿岸的风暴潮淹没灾害大于南部和西部沿岸。

**关键词:** ADCIRC模型; 风暴增水; 耦合; 淹没

**中图分类号:** P731.23 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2022)01-0039-09

## 1 引言

广东省徐闻位于中国大陆最南端,广东省西南部,雷州半岛南端,隶属于广东省湛江市。徐闻三面环海,东临南海,西濒北部湾,南隔琼州海峡与海南省相望,北接雷州市。徐闻沿岸常年遭受台风的袭击,根据黄锦觉<sup>[1]</sup>的统计,无论是正面袭击(雷州、徐闻和文昌登陆)徐闻,还是琼海以南登陆甚至是湛江以北登陆的台风,均能对徐闻造成不同程度的影响。1960—2019年间,影响徐闻海域的热带气旋(强度达到热带风暴级别,下同)达到176个,影响时间主要为7—9月,其中直接登陆徐闻的热带气旋为24个。直接登陆徐闻强度最强的台风是1409号台风“威马逊”,近中心风速达到17级以上(72 m/s),但造成风暴潮灾害最严重的是8007号台风“乔伊”和1415号台风“海鸥”。两者路径相似,强度相似,导致徐闻发生了严重的风暴潮灾害,大量海堤被冲垮,沿海地区发生海水倒灌和严重的风暴潮漫滩现象,严重威胁当地人民生活并造成严重的经济损失。

目前,国内外风暴潮数值模拟研究发展较快,如SLOSH (Sea, Lake, and Overland Surges from

Hurricanes model)模式经过演变和升级后,不仅在美国得到广泛应用,还受到世界其他地区的青睐;英国的海模式(Sea Model)、荷兰的DELFT3D模型和丹麦的MIKE12模型等也被国内外学者应用于风暴潮数值模拟研究中<sup>[2-5]</sup>。科技发展日新月异,国内学者将风暴潮数值模拟应用于风暴潮漫滩模式并大力推广到风暴潮淹没危险性研究层面上。何佩东等<sup>[6]</sup>采用ADCIRC (The ADvanced CIRCulation model)模式模拟并分析了不同等级台风对舟山市普陀区风暴潮淹没风险。郑国诞等<sup>[7]</sup>建立了台州市温岭市风暴潮模型和台风浪计算模型,利用越浪量进行海堤溃堤判断,并开展了不同等级台风影响下的风暴潮溃堤淹没情况计算。石先武等<sup>[8]</sup>对上海金山区进行不同等级台风风暴潮漫滩淹没计算并对其做了风暴潮灾害风险评估研究。张敏等<sup>[9]</sup>基于ADCIRC+SWAN (Simulating WAVes Nearshore)耦合模式对雷州市沿海开展了风暴潮淹没危险性研究工作,结果显示雷州市东岸的淹没灾害大于西岸。

国内外学者尚未系统性地针对徐闻沿海风暴潮特征展开研究,他们更多地是研究雷州半岛东侧海域或者琼州海峡东部海域在不同台风路径下的

收稿日期: 2020-12-17; 修回日期: 2021-04-06。

基金项目: 国家重点研发计划重点专项课题(2018YFC1407002); 国家海洋局南海分局海洋科学技术局长基金(180218)。

作者简介: 黄宝霞(1986-),女,工程师,硕士,从事海洋环境预报工作。E-mail: 28223092@qq.com

风暴潮特征<sup>[10-12]</sup>, 仅仅略微涉及徐闻东部沿海的风暴潮特征, 对徐闻西部或者南部沿海的研究较少。本文基于风暴潮漫滩模式对徐闻沿海风暴潮特征进行详细分析, 在此基础上考虑天文潮和海浪的相互作用, 开展徐闻风暴潮淹没危险性分析研究工作。本研究将为徐闻当地政府部门的海防减灾决策服务提供一定的参考, 希望能够对徐闻未来的城市规划和建设发展产生重要意义。

## 2 风暴潮漫滩模型简介和验证

### 2.1 台风模型

风暴潮的数值模拟精度受台风气压场和风场精度的影响, 选择合适的台风气压场和风场有助于风暴潮模型的计算精度。

本文选择藤田-高桥公式组合模型<sup>[13-14]</sup>作为台风气压场, 藤田模型能更好地刻画2倍的最大风速半径 $R$  (单位: m) 范围外的气压场, 而高桥模型则

能较准确地模拟台风中心 $\sim 2R$  范围内的气压变化。

藤田公式和高桥公式的气压场分布见式(1)和式(2):

$$P = P_{\infty} - (P_{\infty} - P_0) \left[ 1 + 2 \left( \frac{r}{R} \right)^2 \right]^{-0.5} \quad 0 < r \leq 2R \quad (1)$$

$$P = P_{\infty} - (P_{\infty} - P_0) \left[ 1 + \frac{r}{R} \right]^{-1} \quad r > 2R \quad (2)$$

式中,  $P_0$  表示台风中心气压;  $P_{\infty}$  表示台风外围气压;  $r$  为目标点到台风中心的距离;  $R$  为最大风速半径。

台风风场计算通常分为两个步骤: 首先选用气压场模式计算出气压梯度, 再根据台风梯度平衡方程计算台风中心的梯度风场, 继而叠加台风中心的移动风场, 从而推算出台风的实际风场。本文中, 台风风场采用改进的 Jelesnianski 公式<sup>[15]</sup>, 修正公式如下:

$$\bar{W} = \frac{r}{r+R} (u_i + v_j) + W_m \left( \frac{r}{R} \right)^{1.5} \frac{1}{r} (A_i + B_j) \quad r \leq R \quad (3)$$

$$\bar{W} = \frac{r}{r+R} (u_i + v_j) + \left[ W_{10} + \left( \frac{R_{10} - r}{R_{10} - R} \right)^{1.5} (W_m - W_{10}) \right] \frac{1}{r} (A_i + B_j) \quad R < r \leq R_{10} \quad (4)$$

$$\bar{W} = \frac{r}{r+R} (u_i + v_j) + \left[ W_7 + \left( \frac{R_7 - r}{R_7 - R_{10}} \right)^{1.25} (W_{10} - W_7) \right] \frac{1}{r} (A_i + B_j) \quad R_{10} < r \leq R_7 \quad (5)$$

$$\bar{W} = \frac{R}{r+R} (u_i + v_j) + (W_7 - \left( \frac{r - R_7}{R_7 - R_{10}} \right)^{0.75} (W_{10} - W_7)) \frac{1}{r} (A_i + B_j) \quad R_7 < r \quad (6)$$

$$A = -[(x - x_c) \sin \theta + (y - y_c) \cos \theta] \quad (7)$$

$$B = (x - x_c) \cos \theta - (y - y_c) \sin \theta \quad (8)$$

式中,  $\bar{W}$  为风速;  $u$  和  $v$  为台风移动速度在  $x$  和  $y$  方向的分量;  $i$  和  $j$  分别表示东分量和北分量;  $W_m$ 、 $W_7$  和  $W_{10}$  分别为台风中心风速、七级和十级风速;  $R_7$  和  $R_{10}$  分别为台风的七级和十级大风半径;  $(x_c, y_c)$  为台风中心坐标;  $\theta$  为流入角, 文中取值为  $20^\circ$ 。

### 2.2 风暴潮漫滩模型

ADCIRC 模式是由北卡罗来纳大学的 Luettich 博士和圣母大学的 Westerink 博士联合研发的水动力数值模式, 可对二维和三维的自由海表面流动和物质输运问题进行求解, 广泛应用于海洋、近岸与河口的水位和流场等模拟, 较适合于计算风暴潮、

潮汐和风生环流等情形。该模型采用无结构网格, 易于拟合复杂岸线和岛屿的边界, 并可局部加密, 适用于近岸高分辨率的数值模拟。

ADCIRC 模型控制方程由连续性方程和动量方程组成, 求解方式是在空间和时间上采用有限单元法和有限差分法相结合进行求解。在求解过程中, 为避免或者消除数值问题导致的振荡和不守恒等问题, ADCIRC 模型将对短波有阻尼作用的通用波动连续性方程 (Generalized Wave Continuity Equation, GWCE) 代替原有的连续方程<sup>[16]</sup>, 从而较准确地求解有限元差分下的水位和流速。

### 2.3 SWAN 模型

本文在计算风暴潮漫滩淹没时, 基于 ADCIRC+SWAN 耦合模式并叠加了天文潮的作用。

SWAN波浪模型是第三代海浪模式<sup>[17]</sup>,由荷兰Delft大学开发,采用引入源项的动谱平衡建立控制方程来模拟风浪生成及在近岸的传播过程,适用于海岸、河口及湖泊的风浪、涌浪以及混合浪的数值模拟。经过不断的改进和发展,目前SWAN模式可以模拟水底地形和流场变化引起的波浪折射和浅水变形、逆流时波浪反射和破碎、波浪遇到障碍物的透射和阻碍以及波浪辐射应力变化导致的增减水等物理现象。

SWAN模型采用全隐式有限差分格式求解,无条件稳定,这为下文计算风暴潮漫滩淹没提供了稳定条件。

## 2.4 模型网格和设置

本文采用非结构化三角形网格,计算范围涵盖西北太平洋部分海域、南海中部和北部、北部湾和琼州海峡等海区。在徐闻近海海域和10 m等高线以下的区域进行了加密,分辨率达到30~50 m。模式的海洋地形资料来源于EPOTOP数据和海军航海保证部的海图数据,陆地高程采用原国土资源部提供的2014年修订的5 m分辨率实测地形插值得到,并且在模型中精确刻画了海堤高程信息。模式中陆地范围的底摩擦系数参考全球30 m地表覆盖数据(GlobeLand30)设置,取值在0.012~0.049之间,海洋中底摩擦系数取值范围在0.002 5~0.005之间。外海开边界的调和常数采用OTIS数据的中国海海区天文潮模型结果,该数据由多个卫星数据及验潮站观测数据和船载声学多普勒流速剖面仪(Acoustic Doppler Current Profilers, ADCP)观测数据等数据同化而来。模式通过外海开边界加入M2、S2、N2、K2、K1、O1、P1和Q1 8个主要的全日及半日分潮,作为风暴潮淹没计算的天文潮背景。

## 2.5 典型台风风暴潮模拟验证和分析

本文选取了历史上影响徐闻海域的多场典型台风风暴潮过程进行模拟,篇幅所限,本文仅对1415号强台风“海鸥”风暴潮过程进行验证,分析徐闻海域附近站点包括海安站、海口站、湛江站和硃洲站的增水和潮位误差。

1415号台风“海鸥”在西北太平洋洋面上生成,强度持续加强,主要以西北偏西方向移动,并于

2014年9月15日02时(北京时,下同)经菲律宾进入南海海面,一路奔向华南沿岸,强度缓慢加强。台风“海鸥”于16日09时40分在海南省文昌市翁田镇沿海登陆,12时45分在广东省湛江市徐闻南部沿海再次登陆,两次登陆时均为台风级别(40 m/s),登陆湛江后强度减弱,进入北部湾海域,并于23时前后在越南登陆,并远离华南沿海(见图1)。

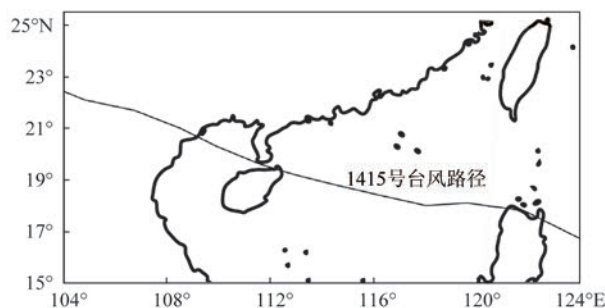


图1 1415号台风“海鸥”路径图

Fig.1 The track of typhoon "Kalmaegi" (1415)

图2是1415号台风“海鸥”海安站、海口站、硃洲站和湛江站的增水和潮位的验证对比曲线图。通过计算,徐闻海域附近站点的增水平均绝对误差除了硃洲站为30.7 cm,其他站均在30 cm以下;所有站点的最大增水相对误差均在20%以下,最大为海安站19.6%,其余各站均小于8%;最高潮位相对误差均小于5%(见表1)。这说明误差在合理范围内,本文建立的模型适用于徐闻海域的风暴潮模拟。

## 3 徐闻沿海风暴潮数值模拟分析

### 3.1 台风路径构造

根据风暴潮历史统计资料,徐闻沿海在1415号台风过程中出现历史最大风暴潮过程,海安站出现了170 cm的风暴增水,最高潮位为474 cm(当地)。本文以1415号台风过程为基础,按0.25倍 $R_{max}$ (1415号台风登陆前最大风速半径)的增幅将台风进行南北(东西)平移,使其覆盖整个徐闻岸段,共获得36条路径(见图3),分别编号t0—t35。

### 3.2 风暴潮数值模拟分析

基于上述构造的36条路径,模拟计算了徐闻沿海风暴增水,并在徐闻沿岸均匀选取14个代表点



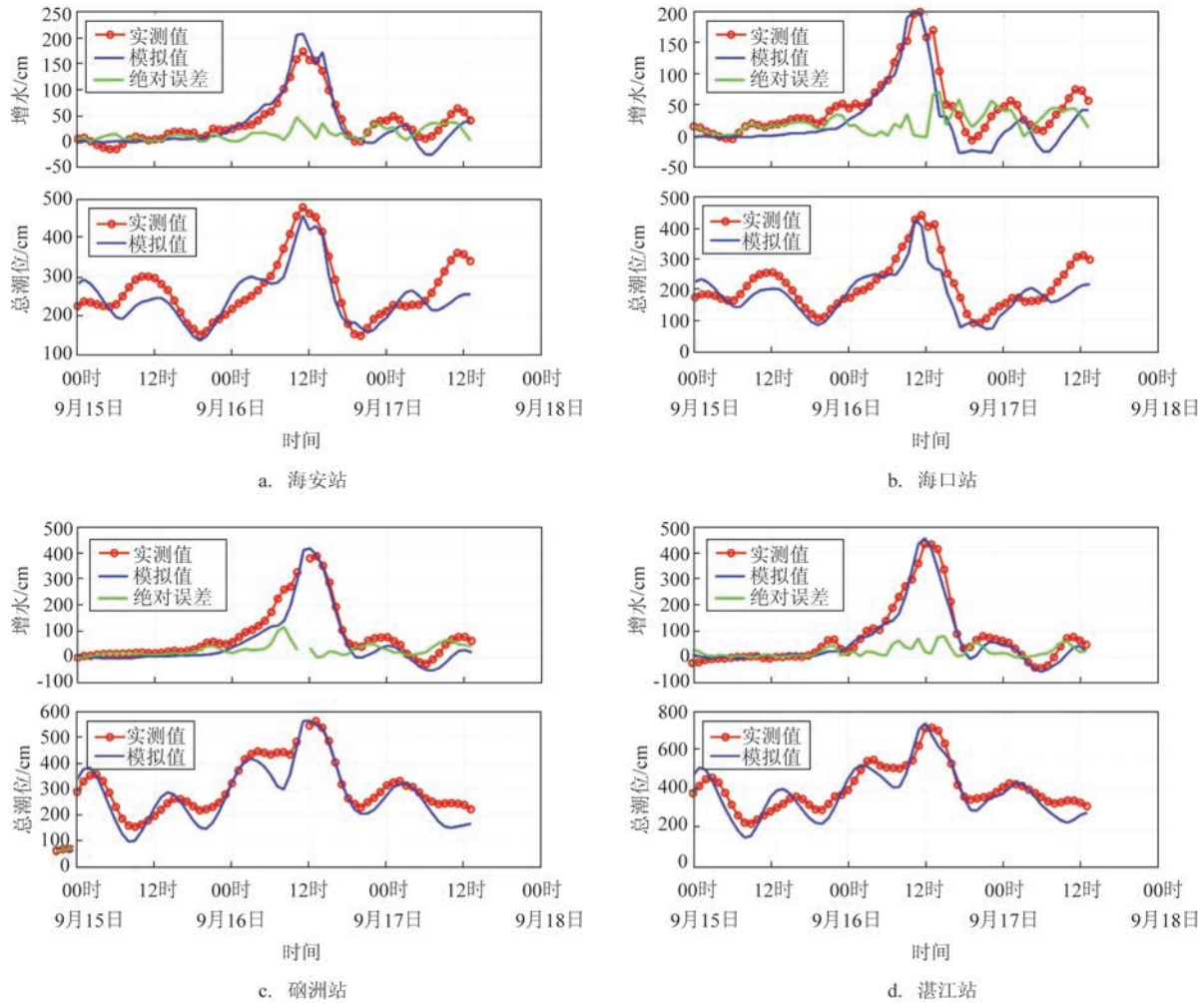


图2 1415号台风徐闻沿海附近验潮站增水和潮位验证图

Fig.2 Comparisons of simulated and observed storm surge and tide level correlation curves of tide gauge stations along the coast of Xuwen during typhoon "Kalmaegi" (No.1415)

表1 徐闻沿海附近验潮站增水和潮位误差统计表

Tab.1 Error statistics of storm surge and tide level of tide gauge stations along the coast of Xuwen

站点	实测最大 增水/cm	模拟最大 增水/cm	实测最高 潮位/cm	模拟最高 潮位/cm	最大增水相对 误差/%	最高潮位相对 误差/%	增水平均绝对 误差/%
海安站	173	207	474	454	19.6	4.2	14.8
海口站	199	199	437	423	0	3.2	23.6
硇洲站	388	418	561	564	7.7	0.5	30.7
湛江站	435	457	719	742	5.1	3.2	22.2

(见图4)分析徐闻沿海风暴增水变化特征。

图5是徐闻沿岸14个代表点不同路径下的最大增水曲线图。图中1—5号点代表徐闻西部沿

岸,6—9号点代表徐闻南部沿岸,10—14号点代表徐闻东部沿岸。总体来说,徐闻西部沿岸最大增水

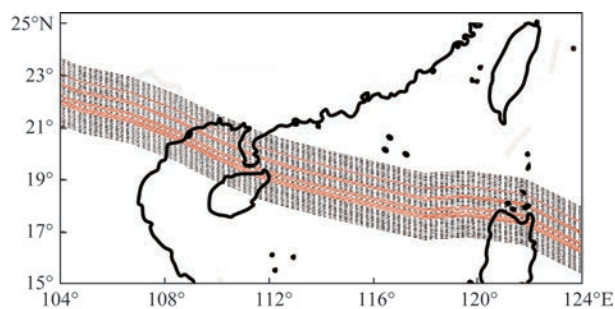


图3 1415号台风平移后路径集(红色线表示最不利路径)  
Fig.3 The tracks of typhoon "Kalmaegi" (1415) after translation  
(The red lines indicate the most serious tracks)

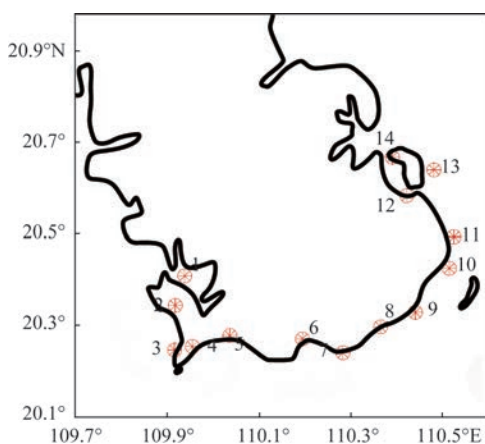


图4 代表点位置分布  
Fig.4 Location distribution of representative points

面向北部湾,以离岸风为主,不利于海水堆积,产生风暴增水仅为 174 cm,而东部沿岸位于雷州半岛东

岸,其岸线形状有利于增水,当雷州半岛东岸位于向岸风区时,东部沿岸出现大面积显著增水。

流沙湾位于徐闻西部和雷州市西南部交界处海域,此点作为徐闻西部沿岸的 1 号代表点。流沙湾是一个口小腹大呈葫芦形的半封闭海湾,因其地理位置和地形特殊,海水堆积有限,产生的最大增水为 174 cm,最大增水路径为 t28(见图 5a)。台风路径 t28 大致穿过雷州湾,随后在雷州市附城镇沿海登陆。徐闻西部沿岸的其余 4 个代表点,产生最大增水的路径为 t22 和 t23,最大增水为 130~201 cm。t22 和 t23 约以 90°于徐闻前山镇沿岸登陆。总的来说,以西北行为主的台风,从徐闻前山镇沿岸至雷州市附城镇沿岸登陆,最利于徐闻西部沿岸海水堆积,产生一般强度的风暴潮过程。

徐闻南部沿岸紧挨着琼州海峡,其产生最大增水的路径为 t12 和 t13(见图 5b)。徐闻南部沿岸均位于台风路径 t12 和 t13 的右半圆,在持续的向岸风作用下,产生最大风暴增水 365 cm。此类型台风以西北行为主,从海南文昌市沿岸登陆,穿过海南岛并进入北部湾,有利于海水大量堆积于徐闻南部沿岸,产生较强的风暴潮过程。

从图 5c 来看,徐闻东部沿岸模拟的最大增水为 606 cm,越靠近雷州市沿岸增水越大。徐闻东部沿岸产生最大增水的路径为 t14、t16 和 t17。这 3 条路径从海南文昌市东部沿海登陆,穿过海南岛东北部并经琼州海峡西边进入北部湾,使徐闻东部沿岸产生极大风暴增水,主要原因有两点:一是徐闻东部沿岸为向内凹陷地形,水深较浅并且水深变化平

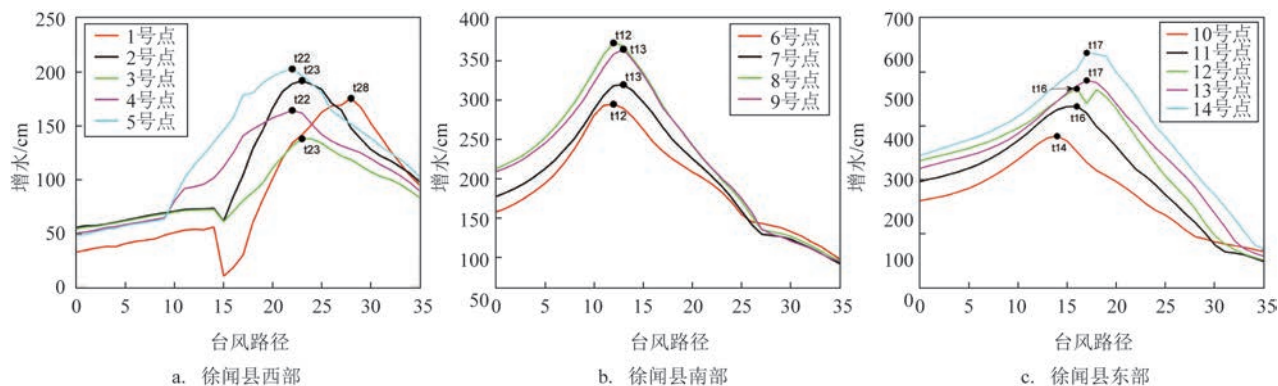


图5 代表点在不同路径下的最大增水曲线图

Fig.5 Curves of maximum storm surges of representative points by constructing typhoons

缓,海水雍积堆高影响显著;二是徐闻东部沿岸位于向岸风区,且在12级风圈半径内,风力强劲且持续时间长,增水效果显著,因此造成东部沿岸出现超强风暴潮过程,不可避免地遭受重大风暴潮灾害。

## 4 不同等级台风风暴潮危险性分析

### 4.1 最不利路径

根据图5,徐闻沿岸各代表点的最大增水路径由北至南分别是t12、t13、t14、t16、t17、t22、t23和t28,即图3红色线表示的台风路径,作为计算风暴潮漫滩淹没的最不利路径基础。

### 4.2 天文潮位的选取

建立不同等级台风风暴潮事件集,需考虑以较极端的天文潮高潮位为背景,叠加增水过程,确定极端的风暴潮高潮位。按照《风暴潮灾害风险评估和区划技术导则》的要求,选取海安站为徐闻沿岸的代表站点,通过潮汐预报等方式得到19 a连续月最高天文潮位数据,选取最大天文潮10%超越高潮位作为天文潮背景。计算结果显示海安站最大天文潮10%超越高潮位出现在2005年9月14日12时,潮位为333 cm(基面为当地水尺,见图6),该时刻徐闻岸段附近的天文潮高潮位处于历史较高水平。

### 4.3 热带气旋等级选取

根据《风暴潮灾害风险评估和区划技术导则》,不同等级台风强度划分采用影响评估区域的两百年一遇的台风中心气压作为最低中心气压,每隔10 hPa来构造不同等级。统计影响徐闻区域的67 a的台风强度,利用极值I型计算得到徐闻两百年一遇的台风中心最低气压为895 hPa,根据技术导则取>895 hPa的整数900 hPa作为最强I级台风的中心

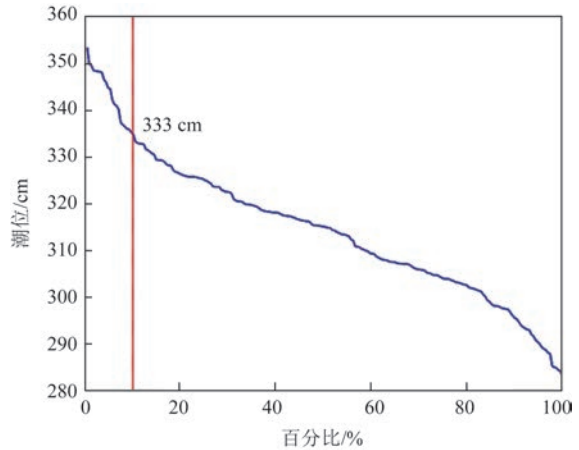


图6 海安站月最高潮位(基面:当地水尺)频率曲线图

Fig.6 The frequency curve of monthly highest tidal level of Haian station (under local elevation datum)

气压,因此构造的台风不同等级如表2。

本文以t12、t13、t14、t16、t17、t22、t23和t28这8条最不利路径为基础,分别进行10组不同强度等级的构造,共构造80个热带气旋进行风暴潮淹没计算。

### 4.4 不同等级台风风暴潮淹没范围及水深分析

基于上述80个热带气旋案例,模拟计算了不同等级的台风风暴潮淹没情况(见图7)。台风等级越高,徐闻的风暴潮淹没范围越广,淹没水深也越大。根据现有的资料统计,海安站和海口站历史上最高潮位分别为483 cm和487 cm(分钟级数据),950 hPa等级下海安站和海口站均已经超越了历史最高潮位(见表3)。

从图7来看,徐闻东部和西部的部分村庄因为大量的田地和滩涂,风暴潮淹没计算时大片的滩涂水深取值接近于0,在990 hPa等级下,出现了0~1 m的淹没水深;位于东部的新寮镇处于雷州半岛东海岸,更易遭受台风的袭击,出现了2~3 m的淹没水深。随着台风等级的提高,徐闻东部和西部的

表2 不同等级台风中心最低气压

Tab.2 The lowest air pressure at the center of typhoon with different level of intensity

等级	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X
最低气压/hPa	900	910	920	930	940	950	960	970	980	990



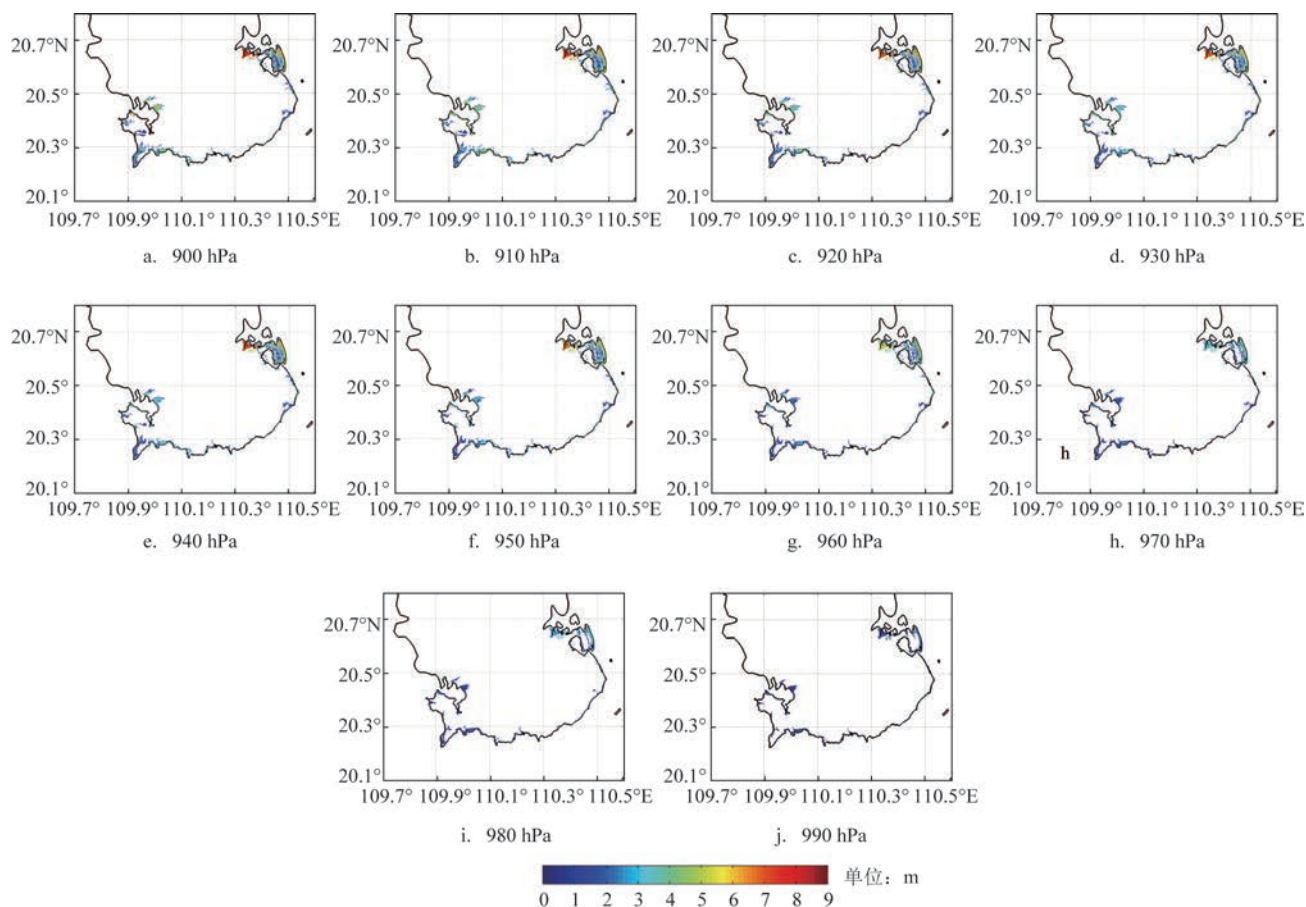


图7 各台风等级下徐闻风暴潮淹没范围及淹没水深

Fig.7 The storm surge inundation area and depth under each typhoon grade in Xuwen

淹没范围越来越广,淹没水深不断增加,越来越多的海水越过海堤,海堤的防护作用越来越弱,最后海水直接冲毁海堤,大片村庄发生了风暴潮漫滩淹没现象;在900 hPa等级时,极端风暴增水叠加天文潮高潮位产生极端风暴潮高潮位,徐闻东部的最大淹没水深达到8 m以上,西部的最大淹没水深达到4~5 m。徐闻东部沿岸的下洋镇,在900 hPa等级下,淹没情况比较轻,淹没水深在3 m以下,主要是因为下洋镇沿岸没有海湾和河道,加上地势较高,海水一直往北堆积,而在较低地势地区有下港海堤、姑村海堤和新车港海堤保护村庄。前文提到,徐闻西部沿岸最大增水远小于东部沿岸,西部沿岸涌入村庄的海水规模有限,因此在同个台风等级下,西部的淹没范围和最大淹没水深小于东部。徐闻南部沿岸紧挨着琼州海峡,水深变化剧烈,潮差相对较小,因此990~900 hPa等级,淹没范围都较小,淹没水深最大在3 m左右。

表3 徐闻沿海各代表站在各级台风下的最大增水和最高潮位(基面:当地水尺)

Tab.3 The maximum storm surge and tide level at each typical tide gauge stations along the coast of Xuwen under each grade (under local elevation datum)

台风等级	海安站	海口站	海安站	海口站
	最大增水/ cm	最大增水/ cm	过程最高 潮位/cm	过程最高 潮位/cm
I级(900 hPa)	342	410	594	598
II级(910 hPa)	323	383	562	574
III级(920 hPa)	297	348	522	548
IV级(930 hPa)	272	307	517	510
V级(940 hPa)	268	299	507	507
VI级(950 hPa)	242	283	497	505
VII级(960 hPa)	211	209	473	455
VIII级(970 hPa)	178	189	437	414
IX级(980 hPa)	142	138	399	364
X级(990 hPa)	72	74	331	296

## 5 分析与讨论

(1)本文以1415号台风“海鸥”路径为基础构造一系列台风路径,采用ADCIRC模式进行风暴潮数值模拟计算,结果显示徐闻东部沿岸产生最强的风暴潮过程,其次是南部沿岸,最弱的是西部沿岸。台风从徐闻前山镇沿岸至雷州市附城镇沿岸登陆,最利于徐闻西部沿岸海水堆积,产生一般强度的风暴潮过程;台风从海南文昌市沿岸登陆,穿过海南岛并进入北部湾,有利于海水大量堆积于徐闻南部沿岸,产生较强风暴潮过程;台风从海南文昌市东部沿海登陆,穿过海南岛东北部并经琼州海峡西边进入北部湾,徐闻东部沿岸海水雍积堆高影响显著,产生超强的风暴潮过程。

(2)根据最不利路径采用ADCIRC+SWAN耦合模式进行了风暴潮漫滩淹没计算,研究表明,徐闻东部沿岸的风暴潮淹没灾害大于南部和西部沿岸,主要是因为东部沿岸面朝开阔海域,热带气旋有良好的发展条件,较强的热带气旋一旦正面袭击徐闻,加上独特的岸线地形,东部沿岸不可避免遭受严重的风暴潮灾害;而西部沿岸面向北部湾,产生的最大增水不超过200 cm,地形又不利于海水堆积,因此风暴潮灾害相对东岸较小。另外,南部沿岸有其地形和潮汐特性,风暴潮灾害也小于东岸。

(3)华南沿岸风暴潮灾害有日益增强的趋势,特别是较严重风暴潮过程趋于频发。粤西作为风暴潮最频发的岸段,是风暴潮重灾区,特别是海岸地形呈特殊口袋状的雷州半岛东岸<sup>[18]</sup>,面对直接登陆湛江市的台风,徐闻东部沿岸时常遭受较严重的风暴潮灾害。因此,从海洋灾害角度看,本项研究成果不仅为徐闻当地政府部门的海防减灾决策服务提供了一定的参考,更有助于提升风暴潮预警能力,着重考虑徐闻东部沿岸的风暴潮灾害情况;从经济建设方面看,本项研究成果可为徐闻的涉海规划建设提供方向,譬如,防潮工程合理规划和建设,包括在东部沿岸对年代已久的海堤进行维护并适当增加海堤,在东部沿岸合理规划高位养殖池并建设高潮位堤坝,在沿海主干道增加用于防御海洋灾害的防护林等工程。

## 参考文献:

- [1] 黄锦觉. 影响徐闻的热带气旋与暴雨统计分析[J]. 广东气象, 2001(3): 38-39.  
Huang J J. Statistical analysis of tropical cyclones and rainstorms impacted Xuwen[J]. Guangdong Meteorology, 2001(3): 38-39.
- [2] 赵庆良, 许世远, 王军, 等. 沿海城市风暴潮灾害风险评估研究进展[J]. 地理科学进展, 2007, 26(5): 32-40.  
Zhao Q L, Xu S Y, Wang J, et al. A review of risk assessment of storm surge on coastal cities[J]. Progress in Geography, 2007, 26(5): 32-40.
- [3] 蒋昌波, 赵兵兵, 邓斌, 等. 北部湾台风风暴潮数值模拟及重点区域风险分析[J]. 海洋预报, 2017, 34(3): 32-40.  
Jiang C B, Zhao B B, Deng B, et al. Numerical simulation of typhoon storm surge in the Beibu Gulf and hazardous analysis at key areas[J]. Marine Forecasts, 2017, 34(3): 32-40.
- [4] Wang X K, Jin X L, Jia J J, et al. Simulation of water surge processes and analysis of water surge bearing capacity in Boao Bay, Hainan Island, China[J]. Ocean Engineering, 2016, 125: 51-59.
- [5] Quinn N, Atkinson P M, Wells N C. Modelling of tide and surge elevations in the Solent and surrounding waters: the importance of tide-surge interactions[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2012, 112: 162-172.
- [6] 何佩东, 左军成, 顾云碧, 等. 普陀沿海风暴潮淹没危险性评估[J]. 海洋湖沼通报, 2015(1): 1-8.  
He P D, Zuo J C, Gu Y B, et al. Inundation risk assessment of storm surge along Putuo coastal areas[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2015(1): 1-8.
- [7] 郑国诞, 谢亚力, 胡金春, 等. 台州温岭市风暴潮淹没危险性分析[J]. 海洋预报, 2016, 33(6): 40-50.  
Zheng G D, Xie Y L, Hu J C, et al. Inundation risk assessment of typhoon storm surge along Taizhou Wenling city[J]. Marine Forecasts, 2016, 33(6): 40-50.
- [8] Shi X W, Qiu J F, Chen B R, et al. Storm surge risk assessment method for a coastal county in China: case study of Jinshan District, Shanghai[J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2020, 34(5): 627-640.
- [9] 张敏, 罗军, 胡金磊, 等. 雷州市沿海风暴潮淹没危险性评估[J]. 热带海洋学报, 2019, 38(2): 1-12.  
Zhang M, Luo J, Hu J L, et al. Inundation risk assessment of storm surge along Lei Zhou coastal areas[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2019, 38(2): 1-12.
- [10] 黄山, 朱良生. 琼州海峡附近海域2014年强台风下潮位的数值模拟与特征分析[J]. 广东水利水电, 2015(11): 19-25.  
Huang S, Zhu L S. Numerical simulation and characteristics analysis of the water level near Qiongzhou Strait caused by 2014 strong typhoon[J]. Guangdong Water Resources and Hydropower,



- 2015(11): 19-25.
- [11] 马经广, 杨武志. 台风“海鸥”与“威马逊”风暴增水的差异分析[J]. 广东水利水电, 2015(3): 20-24.
- Ma J G, Yang W Z. Difference analysis of storm surge between typhoon Kalmaegi and Rammasun[J]. Guangdong Water Resources and Hydropower, 2015(3): 20-24.
- [12] 熊梦捷, 章卫胜, 张金善, 等. 1522号台风“彩虹”在雷州半岛东部海域的风暴潮研究[J]. 海洋预报, 2017, 34(6): 57-64.
- Xiong M J, Zhang W S, Zhang J S, et al. Study on storm surge of the Typhoon "Mujigae" (1522) in the East Leizhou Peninsula[J]. Marine Forecasts, 2017, 34(6): 57-64.
- [13] 王喜年, 尹庆江, 张保明. 中国海台风风暴潮预报模式的研究与应用[J]. 水科学进展, 1991, 2(1): 1-10.
- Wang X N, Yin Q J, Zhang B M. Research and applications of a forecasting model of typhoon surges in China Seas[J]. Advances in Water Science, 1991, 2(1): 1-10.
- [14] Fujita T. Pressure distribution within typhoon[J]. Geophysical Magazine, 1952, 23(4): 437-451.
- [15] 周水华, 李远芳, 冯伟忠, 等. “0601”号台风控制下的广东近岸浪特征[J]. 海洋通报, 2010, 29(2): 130-134.
- Zhou S H, Li Y F, Feng W Z, et al. Wave characteristics dominated by typhoon named ‘Pearl’ [J]. Marine Science Bulletin, 2010, 29(2): 130-134.
- [16] Blain C A, Massey T C. Application of a coupled discontinuous-continuous galerkin finite element shallow water model to coastal ocean dynamics[J]. Ocean Modelling, 2005, 10(3/4): 283-315.
- [17] Ris R C, Holthuijsen L H, Booij N. A third-generation wave model for coastal regions 2. Verification[J]. Journal of Geophysical Research, 1999, 104(C4): 7667-7681.
- [18] 张海燕. 南海区台风风暴潮时空分布特征[J]. 海洋预报, 2019, 36(6): 1-8.
- Zhang H Y. Spatio-temporal distribution of typhoon storm surge along the South China Sea coast[J]. Marine Forecasts, 2019, 36(6): 1-8.

## Numerical simulation and inundation risk assessment of storm surge along the coastal areas of Xuwen, Guangdong Province

HUANG Baoxia<sup>1,2</sup>, HU Jinlei<sup>1,2</sup>, ZHENG Shuxian<sup>1,2</sup>, LUO Jun<sup>1,2</sup>

(1. South China Sea Prediction Center, State Oceanic Administration, Guangzhou 510310 China; 2. Key Laboratory of Marine Environmental Survey Technology and Application, Ministry of Natural Resources, Guangzhou 510310 China)

**Abstract:** Based on ADCIRC model, a high-resolution model is established to simulate the coastal storm surge along the Xuwen using a series of typhoon tracks conducted through track translation of typhoon "Kalmaegi" (1415). The results show that the maximum storm surge is along the eastern coast of Xuwen, which is mainly due to the unique topography and the favorable typhoon tracks in the area. On the basis of the above work, the storm surge inundation conditions of Xuwen under 10 different levels of minimum air pressure are calculated by coupling the effect of ocean wave and astronomical tides, which reveals that the storm surge inundation disaster along the eastern coast of Xuwen is more serious than that along the southern and western coast.

**Key words:** ADCIRC model; storm surge; coupling; inundation