

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2013.04.012

# “桑美”超强台风风暴潮增水特征分析

杨波<sup>1,2</sup>, 林祥<sup>1,2</sup>, 刘青明<sup>1,2</sup>, 封勇<sup>1,2</sup>

(1. 河海大学海岸灾害及防护教育部重点实验室, 江苏 南京 210098;  
2. 河海大学港口海岸与近海工程学院, 江苏 南京 210098)

**摘要:** 为研究“桑美”台风风暴潮的增水特征, 基于 POM 海洋数值模式, 建立包含福建省、浙江省、江苏省在内的天文潮与风暴潮耦合数值预报模型, 并以此模型计算浙江省南部至福建省北部 9 个站点在台风登陆期间的增水过程。结果表明, 9 个站点的增水曲线表现出 3 种类型: 标准型、波动型、随机型。距台风登陆点最近的站点表现为标准型, 稍远为波动型, 台风边缘处表现为随机型; 鳌江站具有远超其他站点的最大增水, 而这一现象是台风登陆点位置、鳌江站的特殊地形、风暴潮与天文潮耦合作用等多种原因所致。

**关键词:** “桑美”台风; 风暴潮增水; 数值模拟; 增水特征分析

**中图分类号:** P731.23      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-1980(2013)04-0348-06

## Feature analysis of super storm surge due to Typhoon Saomai

YANG Bo<sup>1,2</sup>, LIN Xiang<sup>1,2</sup>, LIU Qingming<sup>1,2</sup>, FENG Yong<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Coastal Disaster and Defence, Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China;  
2. College of Harbor, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** A tide-surge coupling model based on the Princeton ocean model (POM) was established to study the features of a storm surge caused by Typhoon Saomai. The calculation area of the model contains Fujian, Zhejiang, and Jiangsu provinces. Processes of a storm surge at nine stations along the coast from southern Zhejiang Province to northern Fujian Province were calculated with this model. The results show that the storm surge variation curves at the nine stations can be classified as three types: the standard type, fluctuation type, and stochastic type. Standard curves generally occurred at stations that had the shortest distance from the typhoon landing site, fluctuation curves occurred at stations at a distance from the landing site, and stochastic curves occurred near the edge of the area affected by the typhoon. The Aojiang Station had the storm surge peak value, which was caused by various factors, such as the location of the typhoon landing point, the special topography of the station, and the coupling action between the storm surge and tide.

**Key words:** Typhoon Saomai; storm surge; numerical simulation; surge feature analysis

福建省沿海地区由于其特殊的地理位置与气候条件, 每年夏秋季经常遭受台风风暴潮侵袭。近年来随着全球变暖, 特大台风与超强台风生成的频率呈上升趋势。2006 年, “桑美”(200608 号) 台风正面袭击福建省与浙江省。据统计, 该台风是自 1949 年以来登陆中国的最大台风, 它给中国东部沿海地区尤其是浙江省苍南县与福建省福鼎市地区, 带来了毁灭性的灾害。“桑美”台风造成福建省与浙江省共 450 人死亡, 138 人失踪, 直接经济损失达 196.5 亿元人民币<sup>[1]</sup>。

“桑美”台风于 2006 年 8 月 5 日 20:00 在关岛附近洋面上生成, 7 日 8:00 加强为强热带风暴, 7 日 14:00

收稿日期: 2012-07-02  
基金项目: 国家自然科学基金(41006001); 中国科学院海洋研究所环流与波动重点实验室开放基金(KLOCAW1101); 中央高校基本科研业务费专项(2011B02414)  
作者简介: 杨波(1986—), 男, 湖北宜昌人, 硕士研究生, 主要从事河口海岸水动力研究。E-mail: Inthesky\_2007@126.com

加强为台风,9日11:00增强为强台风,9日18:00发展为超强台风,10日17:00在浙江省温州市苍南县登陆,登陆时中心气压为920 hPa,近中心最大风力为17级(60 m/s),登陆后继续向西北偏西方向移动,11日6:00进入江西境内<sup>[2]</sup>(图1)。

近年来,各种风暴潮计算数值模式呈现蓬勃发展之势<sup>[3-6]</sup>。笔者基于POM(princeton oceanic model)三维全动力海洋模式,建立高分辨率的风暴潮与天文潮耦合数值模型,计算了超强台风作用下东南沿海9个站点的增水过程,并以此为基础分析“桑美”台风风暴潮增水的特征及产生原因。

1 风暴潮与天文潮耦合数值模型简介

笔者建立的风暴潮与天文潮耦合数值模型,基于POM三维全动力海洋模式<sup>[7-10]</sup>与Takahashi风场模型<sup>[11]</sup>。

1.1 模型范围

耦合数值模型计算范围为东经119°~125°,北纬25°~33°,如图2所示。该模型南至台湾岛北部,北至韩国济州岛,包含沿海的福建省、浙江省、江苏省。模型采用经纬度网格,分辨率为1'×1',共计361×481个网格。

关于测站位置,需要特别指出的是:白洋站位于闽江内河段,距离闽江入海口23 km,受河流径流影响较大。由于地形精度的影响,该站点的计算结果精度有限。

1.2 边界条件

模型采用冷启动,t=0时刻全部参数设为0。海面上采用风应力边界条件。对于风速与风应力的关系,国内外已有不少学者进行了探讨<sup>[12-14]</sup>,本文选取的风应力计算公式为

$$\tau = -\rho C_d |V| V \tag{1}$$

式中:τ——风应力;ρ——空气密度;C<sub>d</sub>——拖拽系数;V——表面风速,常取距海平面10 m高的风速。

水边界上的强迫水位由8个分潮(M<sub>2</sub>,S<sub>2</sub>,N<sub>2</sub>,K<sub>2</sub>,K<sub>1</sub>,O<sub>1</sub>,P<sub>1</sub>,Q<sub>1</sub>)的调和常数计算给出,调和常数由中国科学院海洋研究所获取,水位计算公式为

$$\eta = \sum_{i=1}^8 f_i H_i \cos(\omega_i t + \nu_{0i} + u_i - g_i) \tag{2}$$

式中:η——水位;H<sub>i</sub>——第i个分潮的振幅;f<sub>i</sub>——第i个分潮的交点因子;ω<sub>i</sub>——第i个分潮的分潮沙角速度;ν<sub>0i</sub>——第i个分潮的初相角;u<sub>i</sub>——第i个分潮的交点订正角;g<sub>i</sub>——第i个分潮的迟角。本文计算时间比较短(6 d),f<sub>i</sub>和u<sub>i</sub>的变化很小,可以记为常数。

2 风暴潮增水验证

在正式进行风暴潮计算,即加入风场数据前,应首先进行天文潮的计算与验证,本文略过对天文潮计算结果的讨论过程,但其相关计算结果在第三节中有应用。

台风风场的计算参数从中国台风网上的西北太平洋热带气旋最佳路径数据集中获取。本文模型从2006年8月6日0:00开始运行,待天文潮稳定后再加入风场数据。风场数据从8日20:00计入,到11日8:00停止,共计61 h。图3为耦合模型计算风暴潮增水值与实测增水值对比。需注意的是,由于仪器故障,梅花站的增水实测值不具有参考性。

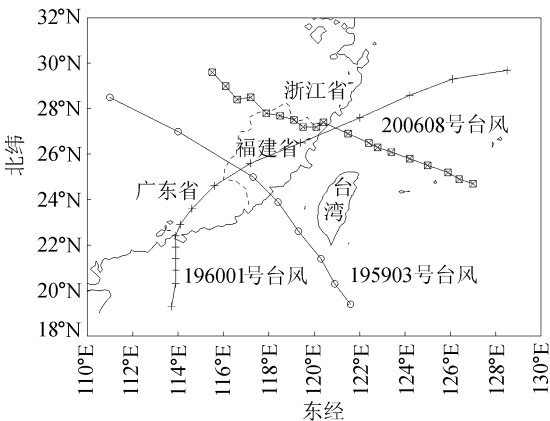


图1 福建典型台风路径  
Fig. 1 Typical paths of typhoon landing in Fujian Province

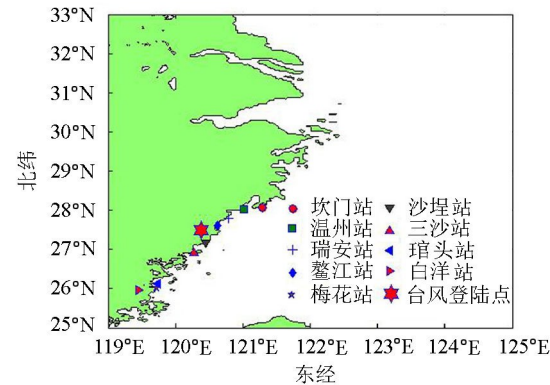


图2 模型计算范围与站点位置  
Fig. 2 Calculation area of model and locations of stations

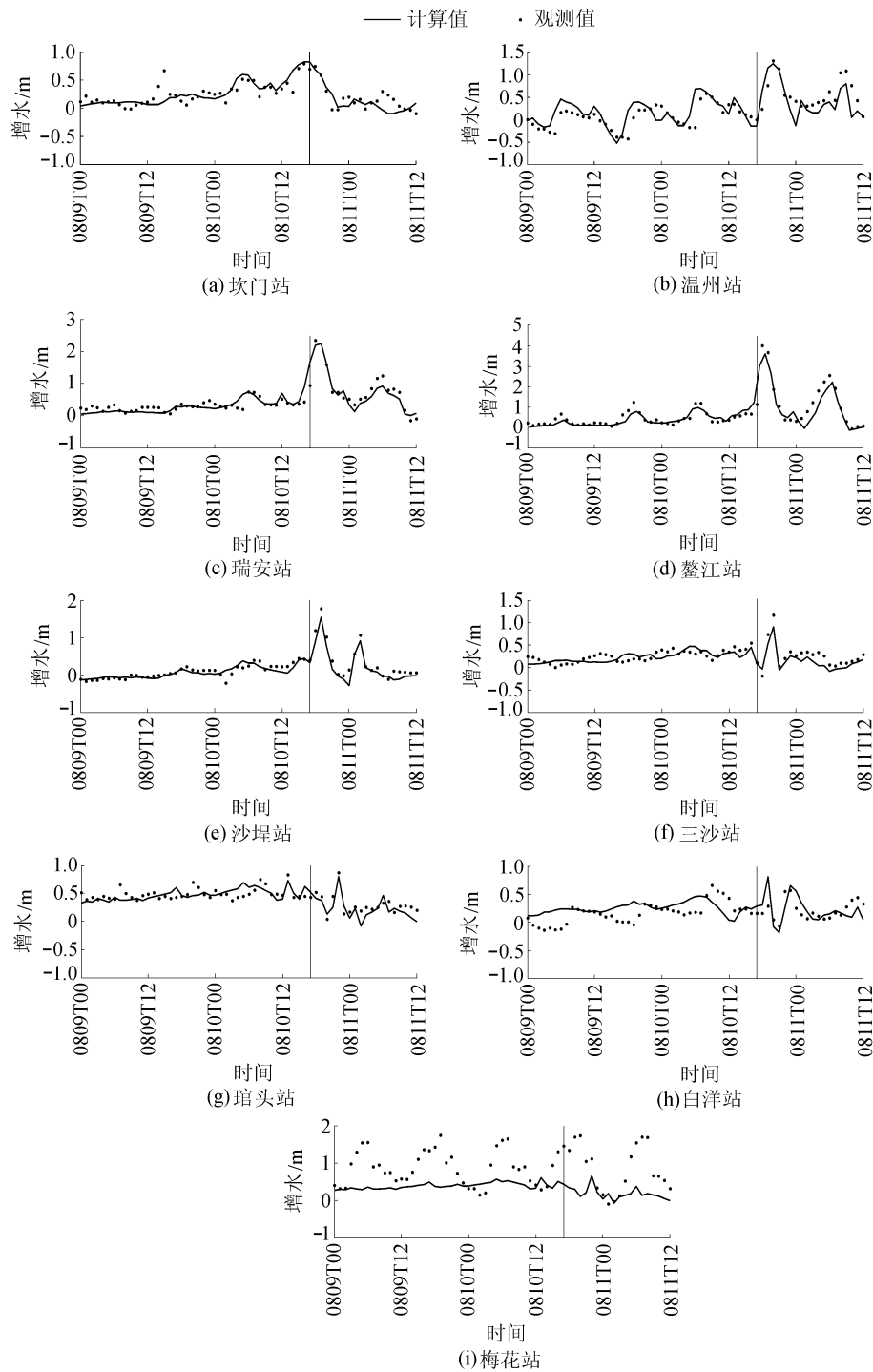


图 3 “桑美”台风风暴潮增水验证(垂直线代表台风登陆时刻)

Fig. 3 Verification of storm surge during Typhoon Saomai (vertical line indicates typhoon landing time)

由图 3 可知,除梅花站(仪器问题)外,其余站点增水过程模拟较好。对风暴过程中最大增水出现时刻与最大增水值的模拟精度较高,时间误差不超过 30 min,水位误差多数不超过 30 cm,水位最大误差为 60 cm(鳌江站)。增水过程的模拟精度与地形、风场、天文潮的模拟精度有很大关系,另外有的站点处于近海浅滩上,台风波浪破碎与波浪辐射应力作用也会造成水位上升,进而影响模拟精度。尽管如此,笔者建立的模型已具有足够的精度,可以用作下一步的增水特征分析。

3 风暴潮增水特征分析

3.1 风暴潮特征

从图 3 可以看出,9 个站点的增水曲线呈现出以下 3 种典型类型。

a. 标准型:增水曲线可以明确分为 3 个阶段,即初振、激振、余振。初振阶段,增水较小,并伴有周期性振动。激振阶段,曲线有明显的大幅度突起,形成尖峰状。激振阶段过后,一般会伴随有第 2 个较小的增水峰值,此为余振阶段。瑞安站、鳌江站、沙埭站、三沙站的增水过程为标准型。从地形上来看,这 4 个站点刚好是距离台风登陆点最近的 4 个站点,平均距离仅为 46 km。

b. 波动型:增水曲线的 3 个阶段区分不明显,整个曲线表现为周期性波动。虽然曲线上依然有峰值,但峰值高度并不足以形成尖峰状。坎门站、温州站的增水曲线为波动型。从地形上来看,这 2 个站点位于台风登陆点上方且距离登陆点较远,平均距离为 92 km。

c. 随机型:增水曲线无明显阶段区分,周期性也不显著,曲线波动带有较大的随机性且增水值较小。瑄头站、白洋站、梅花站的增水过程为随机型。3 个站点距离台风登陆点平均距离为 174 km,受风暴潮影响较小,水位波动不具有典型的风暴潮增水特征。

从风暴潮增水的沿岸分布看,处于开敞海区与海湾口的站点增水较弱,而位于海湾内或狭窄海峡内的站点增水较强。例如鳌江站和沙埭站,距台风登陆点的距离均在 30 km 以内,且天文潮的振幅与相位也相当接近,但鳌江站的最大增水为 4.01 m,约为沙埭站(1.74 m)的 2.3 倍。究其原因,鳌江站位于福建省平阳县西湾内。西湾东临东海,南临鳌江口,湾口处宽 7.23 km,至河口处仅为 1.2 km,而鳌江站正是设置在鳌江入湾口处,风暴潮发生时大量海水涌入湾内,受地形影响,海水易进难退,风暴潮波的能量比较容易聚集,最终出现高达 4.01 m 的增水值。沙埭站位于福建省福鼎市沙城湾入口处,位置接近外海,风暴潮的增水效应不能累积,故其增水值仅能体现外海风暴潮增水的特征。

3.2 增水过程分析

以风暴潮增水曲线最标准的瑞安站、鳌江站为例分析增水过程的特点。两站的增水曲线与天文潮位的相关性如图 4 所示。从图 4 可以看出,增水过程具有有以下特点:

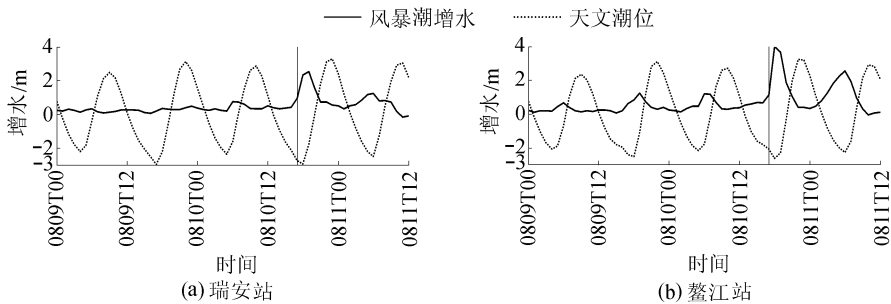


图 4 增水曲线与天文潮位相关关系(垂直线代表台风登陆时刻)

Fig. 4 Change of storm surge with tidal phase (vertical line indicates typhoon landing time)

a. 台风登陆前,即 2006 年 8 月 10 日 17:00 以前,风暴潮增水已经存在增幅较小的先兆波动,增幅一般在 50 cm 左右。鳌江站的先兆波动明显地表现出 12 h 左右的周期性,且先兆波的波峰一般位于天文潮的涨潮时段,而波谷一般位于天文潮的落潮时段。研究表明,风暴潮前期所存在的增水主要驱动因素是距离较远的强台风作用下所导致的海面起伏的长波效应<sup>[3]</sup>。

b. 台风登陆后的 2 h 内,风暴潮增水开始急剧增长,形成远超其他时刻增水的尖峰值。瑞安站的增水值在台风登陆时为 0.95 m,登陆 2 h 后达到 2.55 m;鳌江站增水值在台风登陆后 1 h 内由 1.14 m 剧增至 4.01 m,破浙江省沿海增水最大记录。大风直接作用下风暴潮的爆发式波动,主要原因在于强风直接作用下风暴潮与天文潮的非线性耦合作用。

c. 增水曲线达到峰值后,开始迅速下降。瑞安站在峰值过后的 2 h 内增水值下降至 0.73 m;鳌江站在 2 h 内下降至 0.88 m,且增水值的极小值刚好对应于天文潮的高潮时,而紧接着的天文潮低潮时又对应于余振阶段的增水极大值。余振阶段增水值上升的主要驱动力不是风力,而是来源于海面起伏的惯性震荡。

位于海湾内的站点,增水值在初振、激振、余振 3 个阶段的振幅均明显高于位于外海的站点增水值的振幅。例如鳌江站的增水高于沙埭站,温州站的增水高于坎门站,可见地形对于风暴潮增水效应具有极其重要的作用。



3.3 天文潮与风暴潮耦合作用分析

为进一步讨论天文潮与风暴潮的耦合作用,笔者从流的变化与增水的关系上来加以分析。图5为瑞安站与鳌江站天文潮流速与风速的过程矢量图,其中流速矢量图中的曲线段代表天文潮位的变化。在近海区域,风场所引起的水体输运方向大致与风向一致,故风速矢量图即代表纯风暴潮(不计天文潮效应)作用下的水流运动方向。

从图5(a)(b)可以看出,流向主要集中在2个方向:向岸方向和离岸方向,涨潮阶段水流涌向岸边,落潮阶段水流则流向外海,转流时刻发生在高低潮时,最大流速则发生在半潮时(高潮与低潮的中间时刻)。由上述特征可知,瑞安站与鳌江站的潮流为典型的驻波式往复潮流。

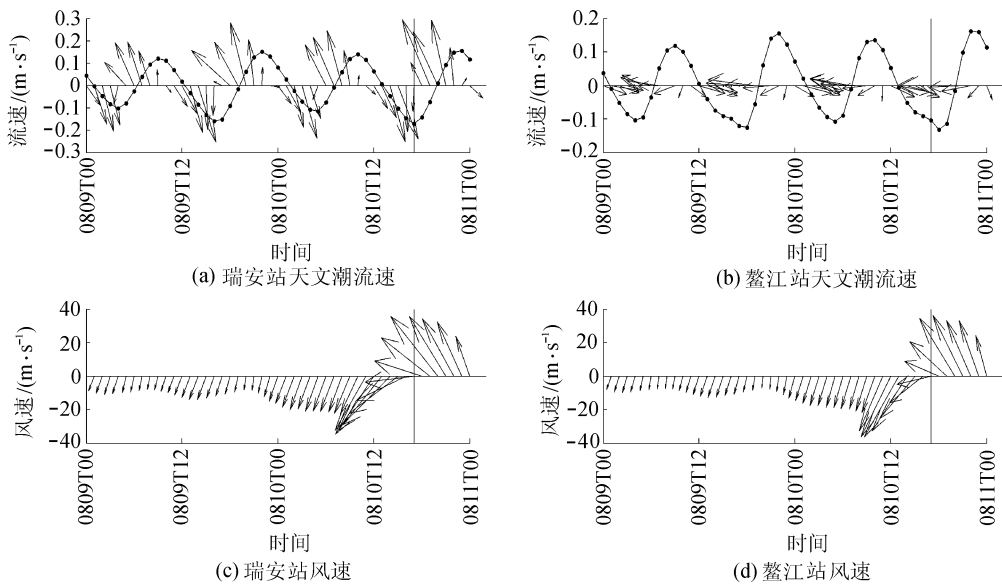


图5 天文潮流速与风速矢量图(垂直线代表台风登陆时刻)

Fig. 5 Velocity vector of tide and wind (vertical line indicates typhoon landing time)

瑞安站与鳌江站的直线距离仅 30 km,故两站的风速过程及其相似。在台风登陆前,两站的风速都较小(小于 12 m/s),且与天文潮涨潮流的夹角较大,由此可见,在台风登陆前当地风场的直接作用对增水的影响很有限,初振阶段的增水主要驱动因素还是外海强台风造成的海面起伏长波效应。

在台风登陆前的 2 h 内,风速激增且风向开始转变,两站的风速在台风登陆时已经超过了 35 m/s,为 12 级飓风。台风登陆时瑞安站与鳌江站刚好处于天文潮低潮时,此时的涨潮流速与当地风速的夹角均在 60°以内,在天文潮流与纯风暴潮流的耦合作用下,水流向岸流速得到极大增强,正好与随之而来的最大增水相对应。根据计算,在台风登陆期间,水流流速从纯天文潮作用下的小于 20 cm/s 剧增至耦合作用下的最大值(1 m/s),可见天文潮与风暴潮的耦合作用并不仅仅是线性叠加的过程,其内部机制值得进一步研究<sup>[15-16]</sup>。

另外从海水运动方程的角度可知,单位海水面积上所承受的风拖拽为

$$F_w = \frac{1}{\rho_1} \frac{\tau}{D} \tag{3}$$

式中: $\rho_1$ ——海水密度; $D$ ——水深。低潮时, $D$  最小, $F_w$  加强,风暴潮流速加大;高潮时, $D$  最大, $F_w$  减小,从而导致增水值减小。

综上可知,在风暴潮与天文潮的耦合作用下,天文潮所导致的水深及流速大小、方向的周期性变化,将引起海水向岸堆积的加强和减弱,是风暴潮发生潮周期振动的主要原因。但当增水极值发生过后, $F_w$  迅速减弱,梯度项与惯性项作用明显,故余振阶段的波动是多种运动的耦合结果。

4 结 语

以数值模拟的方式对“桑美”台风风暴潮进行增水特征分析,主要结论如下:

a. 9 个站点的增水曲线表现出 3 种类型:标准型、波动型、随机型。距台风登陆点最近的站点表现为标准型,稍远为波动型,台风边缘处表现为随机型。

- b. 标准型增水曲线可分为初振、激振、余振 3 个阶段。3 个阶段的主要驱动因素不同但均表现出潮周期波动的特征。
- c. 在天文潮与风暴潮的耦合作用下,天文潮所导致的水深、流速大小,以及方向的周期性变化,是风暴潮产生潮周期波动的主要原因。
- d. 鳌江站的增水极值破浙江沿海增水最大记录,是由台风登陆点位置、鳌江站的特殊地形以及风暴潮与天文潮的耦合作用等多种因素所致。

参考文献:

[ 1 ] 郭亚娜. 台风桑美的路径、强度分析[J]. 科技导报,2011,29(19): 70-73. (GUO Yana. Path and strength of Saomei typhoon [J]. Science & Technology Review, 2011, 29(19): 70-73. (in Chinese))

[ 2 ] 卢益炳,马林芳. 0608 号超强台风“桑美”的主要特点和风暴潮影响分析[J]. 海洋预报,2007, 24(4): 92-96. (LU Yibing,MA Linfang. The main character of super typhoon NO. 0608 (SAOMEI) and characteristic analysis of its storm surge affecting[J]. Marine Forecasts, 2007, 24(4): 92-96. (in Chinese))

[ 3 ] 张延廷,王以娇. 渤海风暴潮与天文潮耦合作用的数值模拟[J]. 海洋学报,1990,12(4):426-431. (ZHANG Yanting, WANG Yijiao. Numerical simulation of surge-tide interaction in Bohai[J]. Acta oceanologica sinica, 1990, 12(4): 426-431. (in Chinese))

[ 4 ] GUO Yakun, ZHANG Jisheng, ZHANG Lixiang, et al. Computational investigation of typhoon-induced storm surge Hangzhou Bay[J]. Estuarine Coastal and Shelf Science, 2009, 85(4): 530-536.

[ 5 ] 黄潘阳,叶银灿,韦雁机,等. “威马逊”台风风暴潮增水及水动力响应数值模拟[J]. 海洋预报,2012, 29(2):32-38. (HUANG Panyang, YE Yincan, WEN Yanji, et al. A numerical simulation of storm surge and hydrodynamic response caused by typhoon “Rammasun”[J]. Marine Forecasts, 2012, 29(2):32-38. (in Chinese))

[ 6 ] GOUR C P, AHMAD I M. Numerical modeling of storm surge with air bubble effects along the coast of Bangladesh[J]. Ocean Engineering, 2012, 42(3): 188-194.

[ 7 ] 曲大鹏. POM 海洋数值模式及对渤、黄、东海潮汐潮流模拟试验的初步分析[D]. 青岛:国家海洋局第一海洋研究所, 2008.

[ 8 ] XIE Lian, LIU Huiqing, PENG Machuan. The effect of wave-current interactions on the storm surge and inundation in Charleston Harbor during Hurricane Hugo 1989[J]. Ocean Modelling, 2008, 20(3): 252-269.

[ 9 ] BATTEN M L, MARTINHO A S, MILLER H A, et al. A process oriented modeling study of the Coastal Canary and Iberian Current system[J]. Ocean Modelling, 2007, 18(1): 1-36.

[10] GEORGE L MELLOR. Users guide for a three-dimensional, primitive equation, numerical ocean model[R]. Princeton: Princeton University, 2004.

[11] 徐福敏,黄云峰,宋志尧. 东中国海至长江口海域台风浪特征的数值模拟研究[J]. 水动力学研究与进展,2008,23(6): 604-611. (XU Fumin, HUANG Yunfeng, SONG Zhiyao. Numerical simulation of typhoon-driven-waves from East China Sea to Yangtze Estuary[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2008, 23(6): 604-611. (in Chinese))

[12] 罗蒋梅,潘静,杨支中. 海面风应力拖拽系数参数化方案对风暴潮数值模拟的影响[J]. 海洋预报, 2011,28(3): 15-19. (LUO Jiangmei, PAN Jin, YANG Zhizhong. Impact of the parameterization scheme about sea surface wind stress drag coefficients on numerical simulation of strom surge[J]. Marine Forecasts, 2011, 28(3): 15-19. (in Chinese))

[13] ZIJLEMA M, VAN V G P, HOLTHUIJSEN L H. Bottom friction and wind drag for wave models[J]. Coastal Engineering, 2012, 65(7): 19-26.

[14] ZWEERS N C, MAKIN V K, DEVRIS J W, et al. On the influence of changes in the drag relation on surface wind speeds and storm surge forecasts[J]. Natural Hazards, 2012, 62(2): 207-219.

[15] 张延廷,王以娇. 8114 台风风暴潮与天文潮非线性耦合作用的初步探讨[J]. 海洋学报,1986, 8(3):283-290. (ZHANG Yanting, WANG Yijiao. Primary discussion for nonlinear surge-tide interaction in typhoon 8114[J]. Aata Oceanologica Sinica, 1986, 8(3): 283-290. (in Chinese))

[16] ZHANG Wenzhou, HONG Huasheng, SHANG Shaoping, et al. A two-way nested coupled tide-surge model for the Taiwan Strait [J]. Continental Shelf Research, 2007, 27(6): 1548-1567.