

台风“米娜”影响下的杭州湾风暴潮特征及对咸潮的影响

左常圣¹, 黄清泽^{2*}, 潘嵩¹, 任兴元¹

(1. 国家海洋信息中心, 天津 300171; 2. 自然资源部宁德海洋中心, 福建 宁德 352000)

摘要: 基于2019年台风“米娜”风暴潮期间的实测资料,应用ADCIRC海洋模型,开展杭州湾周边海域台风风暴潮数值模拟,刻画台风期间杭州湾海域风暴增水过程及其时空分布,并分析杭州湾风暴增水特征以及对钱塘江咸潮入侵的影响。结果显示:芦潮港、滩浒、岱山和沈家门这4个验潮站模拟天文潮位的平均绝对误差分别为22 cm、19 cm、10 cm和14 cm,最大风暴增水的绝对误差分别为6 cm、1 cm、6 cm和7 cm,模型模拟结果良好。台风影响期间,杭州湾(湾底)的风暴增水明显大于(湾口)岛屿,滩浒站最大增水为111 cm,沈家门站最大增水为74 cm;舟山外海—杭州湾的天文潮—风暴潮的非线性作用逐渐增大,在风暴增水达到最大的过程中,各站天文潮—风暴潮的非线性作用分别为24 cm、26 cm、14 cm和4 cm;钱塘江咸潮入侵程度主要取决于径流和潮汐强度,风暴增水会在一定程度上加剧咸潮入侵灾害,在台风“米娜”风暴增水期间,钱塘江发生咸潮入侵,造成南星水厂氯度值超标41 h,因此在台风影响期间需要提前预判风暴潮对咸潮入侵的影响,做好科学应对。

关键词: 杭州湾; 风暴潮; 1918号台风“米娜”; 非线性作用; 咸潮

中图分类号: P731.23 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2023)06-0012-09

0 引言

风暴潮灾害在我国海洋灾害中影响最大,导致的直接经济损失也最为严重^[1-2],已成为我国海洋防灾减灾面临的重大挑战之一^[3]。台风风暴潮是浙江沿海地区主要的海洋灾害之一^[4],风暴增水会造成杭州湾海域持续高水位,枯水期则会加剧咸潮入侵,影响钱塘江取水安全^[5]。

风暴潮的研究方法包括理论方法、统计预报方法和数值模拟方法^[6]。20世纪80年代以来我国风暴潮数值模拟取得了长足发展,在各个海区的应用中都取得了良好的效果^[7-8]。在强潮海区,风暴潮和天文潮的非线性相互作用是影响台风风暴增水特征的重要因素之一,特别是在浅海区域,两者的非线性相互作用更为明显^[9-10],近年来国内外学者对此做了许多探讨,结果表明考虑了天文潮—风暴潮非线性耦合作用的数值模拟结果可以更好地反应

研究海域的风暴增水特征^[11-12]。径流与潮汐是河口咸潮入侵的主要因素,而海平面上升和风暴增水等因素会加剧河口的咸潮入侵灾害^[5]。随着全球气候变暖,袭击我国沿海的热带气旋的频次与强度都有所增加^[13-14]。钱塘江河口是典型的强潮河口,咸潮入侵是影响河口段用水水质安全的重要制约因素,是咸潮入侵研究的重点关注区,认识风暴潮期间钱塘江咸潮入侵的特点具有重要的意义。2019年9月30日—10月2日,台风“米娜”影响福建、浙江和江苏沿海,期间沿海最大风暴增水超过110 cm,风暴增水加剧了钱塘江口咸潮入侵。

为了能够较好地模拟风暴潮在近岸曲折岸线、复杂地形中的传播过程,本文应用基于无结构三角网格的ADCIRC (An Advanced Circulation Model For Oceanic, Coastal and Estuarine Waters)模型,同时充分考虑天文潮—风暴潮之间的相互作用,开展了杭州湾海域的风暴潮数值模拟,分析研究了风暴

收稿日期: 2022-06-13。

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFA0604902)。

作者简介: 左常圣(1989-),男,工程师,硕士,主要从事气候变化和影响及潮波动力学研究。E-mail: changshengzuo@126.com

*通信作者: 黄清泽(1993-),男,工程师,硕士,主要从事海洋环境预报工作。E-mail: 1562097720@qq.com

增减水过程及其对钱塘江咸潮入侵的影响,为杭州湾海域的海洋防灾减灾工作提供技术参考。

1 数据简介

1918号台风“米娜”特征数据来自中央气象台台风官网(网址: <http://typhoon.nmc.cn/web.html>)。台风“米娜”于2019年10月1日20时30分(北京时,下同)在浙江省舟山市普陀区沈家门沿海以台风级别登陆,登陆时中心气压为980 hPa,中心最大风力为9级。

潮位数据来源于自然资源部以及地方海洋站的观测数据,包括芦潮港、滩浒、岱山和沈家门4个潮位站,数据的时间范围为2019年9月28日—10月5日,各潮位站位置见图1,其中,岱山站和沈家门站

距离台风“米娜”的移动路径较近,芦潮港站和滩浒站位于台风移动路径西侧。天文潮数据来源于国家海洋信息中心潮汐预报结果。钱塘江河口的咸潮入侵数据来源于中国沿海海平面变化影响调查业务化成果。

2 风暴潮模型设置与验证

2.1 ADCIRC模型

为了能够较好地模拟风暴潮在近岸曲折岸线、复杂地形中的传播过程,本文应用ADCIRC模型开展了杭州湾附近海域的风暴潮数值模拟。ADCIRC采用广义波动连续方程GWCE(Generalized Wave Continuity Equation)求解水位。在笛卡尔坐标系下连续方程和运动方程如下:

$$\frac{\partial^2 \zeta}{\partial t^2} + \tau_0 \frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial A_x}{\partial t} + \frac{\partial A_y}{\partial t} - UH \frac{\partial \tau_0}{\partial x} - VH \frac{\partial \tau_0}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

其中:

$$A_x = U \frac{\partial H}{\partial t} + H \left\{ -U \frac{\partial U}{\partial x} - V \frac{\partial U}{\partial y} + fV - \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{P_s}{\rho_0} + g\zeta - g(\eta + \gamma) \right] + \frac{\tau_{sx} - \tau_{bx}}{\rho_0 H} + D_x - B_x + \tau_0 U \right\} \quad (2)$$

$$A_y = V \frac{\partial H}{\partial t} + H \left\{ -U \frac{\partial V}{\partial x} - V \frac{\partial V}{\partial y} + fU - \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{P_s}{\rho_0} + g\zeta - g(\eta + \gamma) \right] + \frac{\tau_{sy} - \tau_{by}}{\rho_0 H} + D_y - B_y + \tau_0 V \right\} \quad (3)$$

垂向积分二维动量方程如下:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} - fV = -\frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{P_s}{\rho_0} + g\zeta - g(\eta + \gamma) \right] + \frac{\tau_{sx} - \tau_{bx}}{\rho_0 H} + D_x - B_x \quad (4)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + fU = -\frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{P_s}{\rho_0} + g\zeta - g(\eta + \gamma) \right] + \frac{\tau_{sy} - \tau_{by}}{\rho_0 H} + D_y - B_y \quad (5)$$

式中: ζ 为水位; U 、 V 分别为 x 、 y 方向垂向平均流速; H 为总水深; f 为科氏力参数; P_s 为气压; ρ_0 为水密度; $\eta + \gamma$ 为地潮及潜潮等引起的水位; τ_{sx} 、 τ_{sy} 、 τ_{bx} 、 τ_{by} 为海表面切应力和底切应力; D_x 、 D_y 、 B_x 、 B_y 分别为侧向应力梯度和动量耗散项。

2.2 台风风场模型

本文在进行台风风暴潮数值模拟过程中,采用高桥公式^[15]计算台风的气压场:

$$P(r) = P_\infty - \frac{P_\infty - P_0}{1 + r/R} \quad (6)$$

台风风场采用梯度风和移行风叠加而成:

$$\vec{V} = c_1 V_1 \begin{bmatrix} -\sin(\theta + \beta) \\ \cos(\theta + \beta) \end{bmatrix} + c_2 \vec{V}_2 \quad (7)$$

梯度风风速由气压场通过梯度风关系得到:

$$V_1 = \sqrt{\frac{f^2 r^2}{4} + \frac{r}{\rho} \frac{\partial P}{\partial r} - \frac{fr}{2}} \quad (8)$$

台风移行风场采用宫崎正卫公式^[16]计算:

$$\vec{V}_2 = e^{-\frac{\pi r}{50000}} \begin{bmatrix} V_x \\ V_y \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中: r 为计算点到台风中心的距离; R 为台风最大风速半径; P_∞ 为外围气压; P_0 为台风中心气压; f 为科氏参数; θ 为计算点到台风中心的连线与正东方

向的夹角; β 为梯度风和海面风的夹角; V_x, V_y 分别为台风中心移速在正东和正北方向的分量; c_1, c_2 为订正系数。此外,在台风外围考虑背景风场,台风中心附近仍使用台风模型风场,构造出合成的台风风场。合成方法为:

$$\vec{V}_h = \begin{cases} \vec{V}_t & r < R_1 \\ (1-c)\vec{V}_t + c\vec{V}_b & R_2 \geq r \geq R_1 \\ \vec{V}_b & r \geq R_2 \end{cases} \quad (10)$$

式中: \vec{V}_h 为合成风场; \vec{V}_t 为台风模型风场; \vec{V}_b 为背景风场; $c=(r-R_1)/(R_2-R_1)$, R_1, R_2 取值为常数,分别为200 km和400 km。

文中使用 CCMP (Cross Calibrated Multi-Platform)海面风场数据作为背景风场,该数据同化了 QuickSCAT、ASCAT、Windsat 等多种海洋被动微波和散射计遥感平台采集的海面风场数据,空间分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$,时间分辨率为6 h。

2.3 模型设置

研究区域为舟山群岛附近海域,该海域岛屿众多,岸线曲折,海底地形复杂。为充分考虑大范围水体传播和大尺度天气过程的影响,提高风暴潮模拟的准确度,模型计算范围涵盖渤海、黄海以及东海的大部分区域(见图1)。模型网格在外海开边界附近空间分辨率最低为62 km,在舟山附近海域进行局部加密,最高空间分辨率为120 m,模型网格三

角形个数为110 454,节点数为58 400。模型水深采用 GEBCO (General Bathymetric Chart of Oceans)地形数据插值得到,该数据由政府间海洋学委员会(Intergovernmental Oceanographic Commission)和国际水道测量组织(International Hydrographic Organization)提供,在近岸地区采用海图水深进行订正。模型采用冷启动,即初始时刻流速和水位均设为0。在开边界处利用日本国家天文台建立的 NAO99 中的8个主要分潮($M_2, S_2, N_2, K_2, K_1, O_1, P_1$ 和 Q_1)进行驱动,表面的风场和气压场由2.2节建立的台风场模型计算得到。模式中时间步长为3 s,模拟时间为2019年9月25日—10月5日。

2.4 模型验证

2.4.1 潮位验证

对模型模拟的潮位结果进行验证,选取舟山附近海域的芦潮港、滩浒、岱山和沈家门4个验潮站的逐时潮位和模拟结果进行对比,对比时间为9月28日—10月5日。各验潮站对比结果见图2,图中黑色实线为潮位实测值,红色实线为模拟值。从图中可以看出各验潮站潮位的实测值和模拟值结果吻合良好,变化趋势基本一致。经过误差统计,芦潮港、滩浒、岱山和沈家门这4个验潮站模拟逐时潮位的平均绝对误差分别为22 cm、19 cm、10 cm和14 cm。

2.4.2 风暴增水验证

在风暴增水过程中,天文潮-风暴潮之间的非

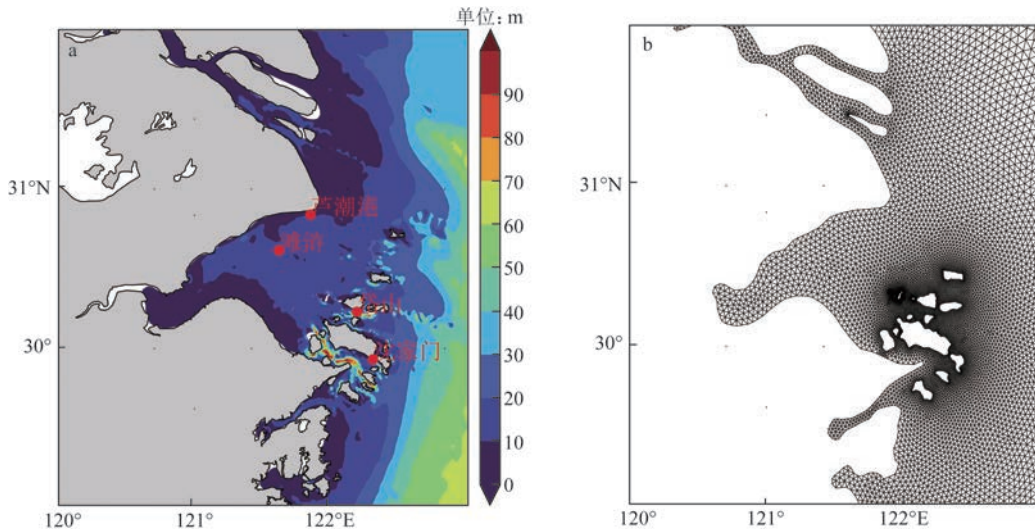


图1 舟山附近海域水深(a)及计算网格(b)

Fig.1 Depth and grid around Zhoushan sea area

线性相互作用也是不可忽略的重要影响因子。为了分析台风“米娜”影响期间,舟山附近海域天文潮-风暴潮之间的非线性作用,利用建立的风暴潮模型进行两组数值试验,其中,控制试验中模型由气象强迫和潮强迫共同驱动,得到的水位为 η_{T+S} ,

无潮试验中模型仅由气象强迫进行驱动,得到的水位为 η_s 。天文潮-风暴潮的非线性作用 $\eta_i = \eta_{T+S} - \eta_T - \eta_s$,式中 η_T 为天文潮模拟结果得到的水位。

图3为1918号台风“米娜”影响期间,舟山附近海域4个验潮站风暴增水的实测值和模拟值,图中

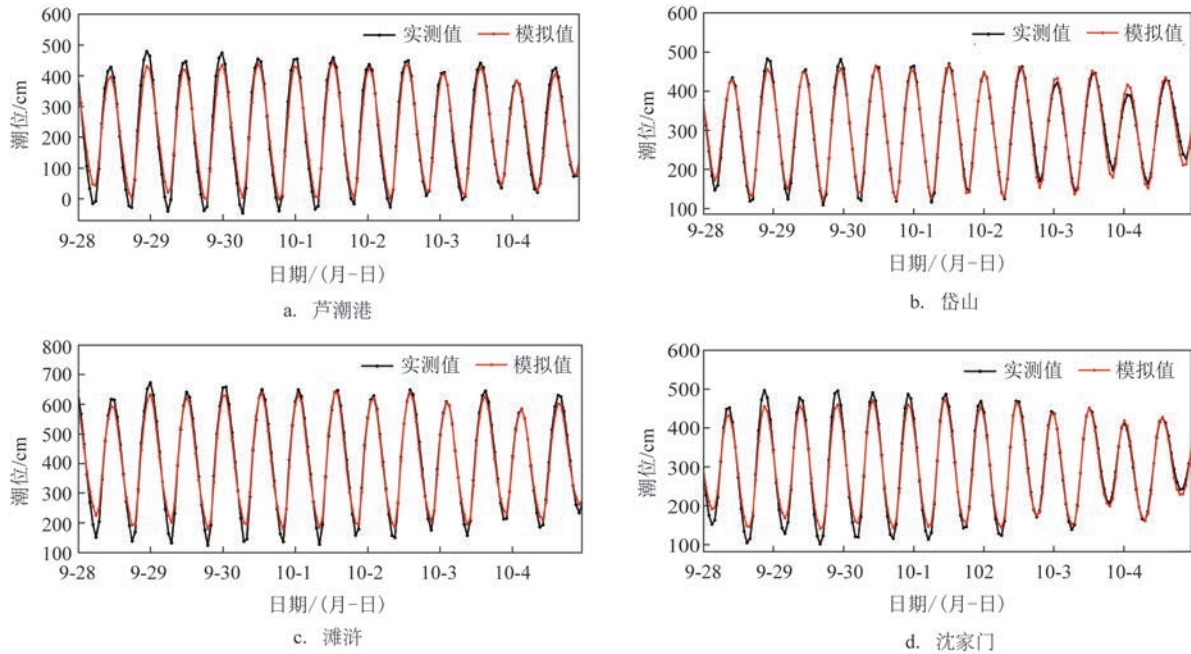


图2 潮位实测和模拟对比

Fig.2 Comparison of measured and simulated astronomical tides

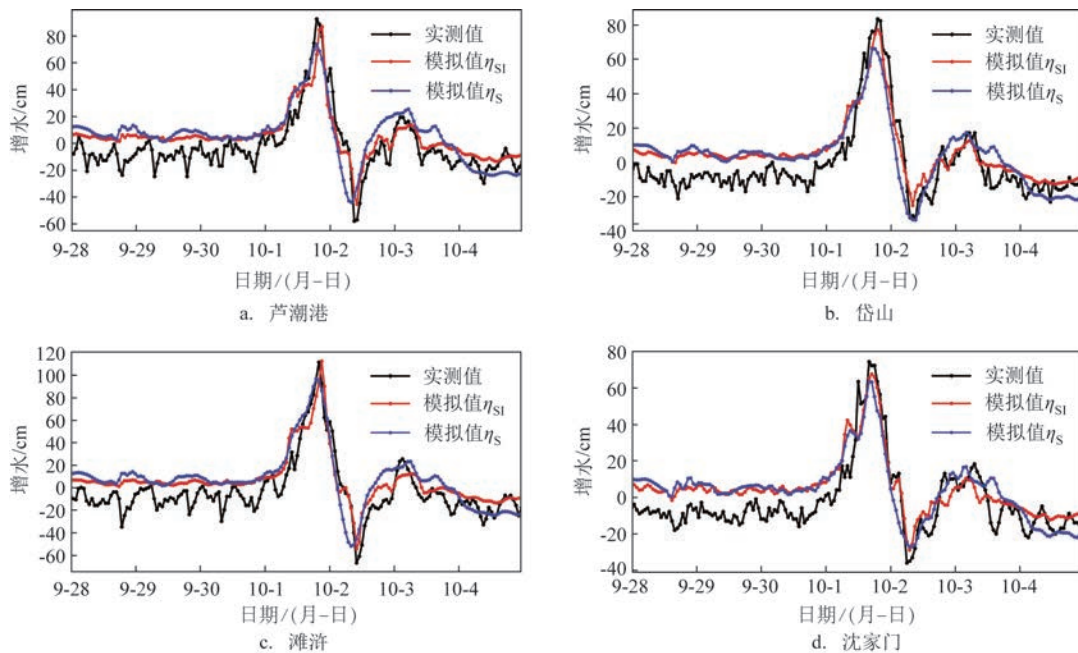


图3 风暴增水实测和模拟值对比

Fig.3 Comparison of measured and simulated storm surge

表1 台风“米娜”期间最大增水情况

Tab.1 The maximum storm surge during Typhoon "Mitag"

站位	实测最大 增水/cm	模拟最大增水/cm				实测最大 增水时刻	模拟最大增水时刻			
		η_{st}	误差	η_s	误差		η_{st}	误差/h	η_s	误差/h
芦潮港	92	86	6	73	19	1日19时	1日21时	2	1日19时	0
滩浒	111	112	1	96	15	1日20时	1日21时	1	1日19时	1
岱山	83	77	6	66	17	1日19时	1日19时	0	1日18时	1
沈家门	74	67	7	63	11	1日16时	1日17时	1	1日16时	0

黑色实线为实测值,红色实线为控制试验模拟值 η_{st} ,蓝色实线为无潮试验模拟值 η_s 。表1为台风“米娜”过程各站实测和模拟最大增水和最大增水时间。如图3所示,考虑天文潮作用的控制试验得到的风暴增水与实测的风暴增水吻合得更好,芦潮港、滩浒、岱山和沈家门站控制试验得到的最大风暴增水和实测最大风暴增水的绝对误差分别为6 cm、1 cm、6 cm和7 cm。仅考虑气象强迫的无潮试验则低估了最大风暴增水,其得到的各站最大风暴增水与实测最大增水的绝对误差超过10 cm。在对台风“米娜”风暴增水进行模拟时,天文潮-风暴潮之间的非线性作用是不可忽略的,本文建立的风暴潮模型能够较准确地模拟台风“米娜”引起的风暴增水过程。

3 结果与分析

3.1 风暴增水特征分析

图4为台风“米娜”影响期间各站实测逐时风速、风向和风暴增水变化曲线,红色垂线代表台风登陆时间。9月30日—10月1日,各站风速开始缓慢增大,风向开始转变,沈家门站的风速从最开始的1.9 m/s增大到11.0 m/s,风向从东向转换为北向;各站的风暴增水呈现振幅较小的波动,随着台风“米娜”逐渐靠近舟山群岛,各站的风速开始迅速增大,均出现明显的风暴增水过程。岱山站的风速存在两个峰值,在1日14时达到第一个峰值(风速为24.0 m/s),在1日20时达到第二个峰值(风速为22.0 m/s),与其他各站风速达到峰值的时间较为接近,均发生在台风“米娜”登陆前后的2 h内。台风登陆前,芦潮港站、岱山站和滩浒站的风暴增水均呈上升趋势,风暴增水最大值分别为92 cm、83 cm和111 cm,最大风暴增水的出现时间较为接近,均发生在

台风登陆前后1 h内,而沈家门站距离台风中心较近,在台风登陆前风速略有减小,风向转变,其增水在1日16时就达到了最大值74 cm。台风在登陆后开始逐渐远离杭州湾海域,各站风向转变、风速减小、风暴增水逐渐减小,甚至开始出现负增水。

3.2 天文潮-风暴潮非线性作用

图5为台风“米娜”期间各站天文潮、风暴增水、纯风暴增水和天文潮-风暴潮的非线性作用增水的变化曲线。台风“米娜”期间,天文潮-风暴潮的非线性作用在涨潮、落潮阶段达到最大值,且在落潮阶段的最值大于涨潮阶段,芦潮港、滩浒、岱山和沈家门这4个站的天文潮-风暴潮非线性作用增水的最大值分别为35 cm、41 cm、21 cm和24 cm,这个值明显大于纯风暴增水。台风“米娜”引起的最大风暴增水发生在低潮附近,在风暴增水达到最大值的过程中,各站的天文潮-风暴潮非线性作用增水分别为24 cm、26 cm、14 cm和4 cm,使得风暴增水也有所增加。

4 台风“米娜”对钱塘江咸潮入侵的影响

4.1 钱塘江咸潮入侵特点

图6为钱塘江咸潮入侵月际变化示意图,从中可以看出,影响钱塘江咸潮入侵程度的因素有径流、潮汐、海平面等。钱塘江的径流在每年6、7月达到最大,8—12月径流量相对较小,同时由于8—11月钱塘江沿海处于季节性高海平面期,在叠加钱塘江大潮的影响下,8—11月钱塘江易发生咸潮入侵,其中9—10月最为严重。8—10月也是台风风暴潮

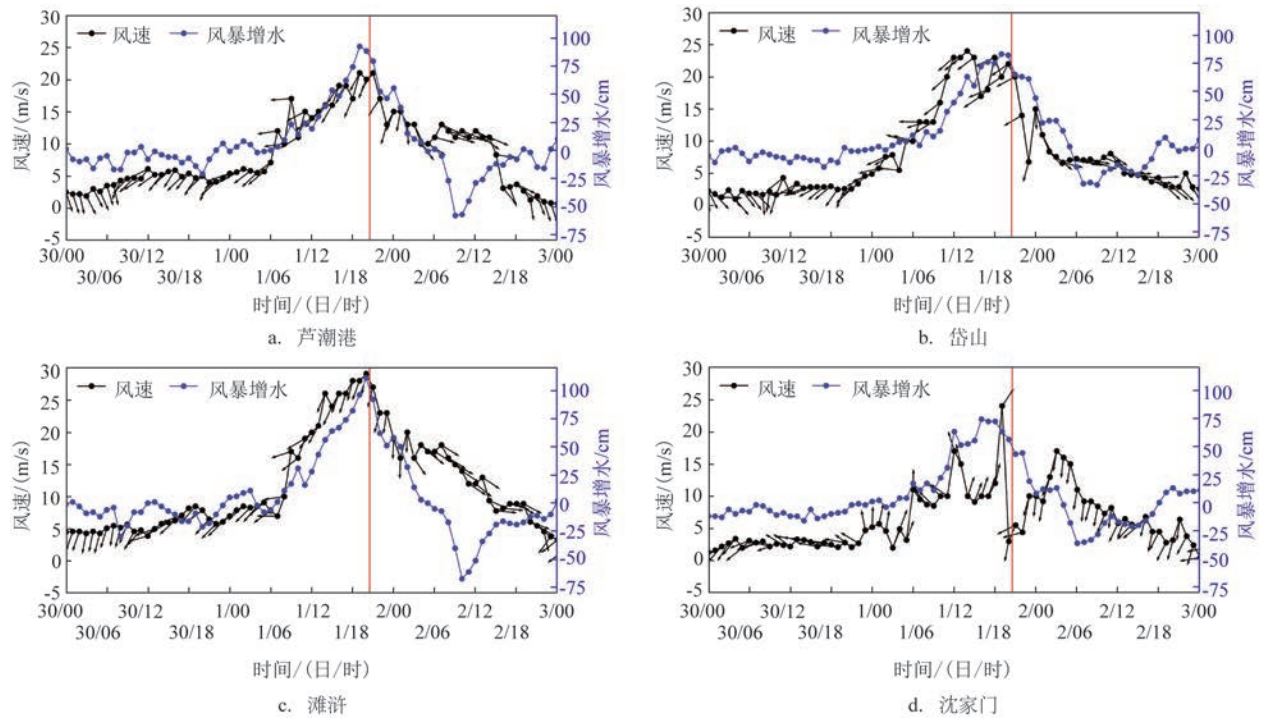


图4 风速、风向和风暴增水变化曲线

Fig.4 Time series of wind speed, wind direction and storm surge

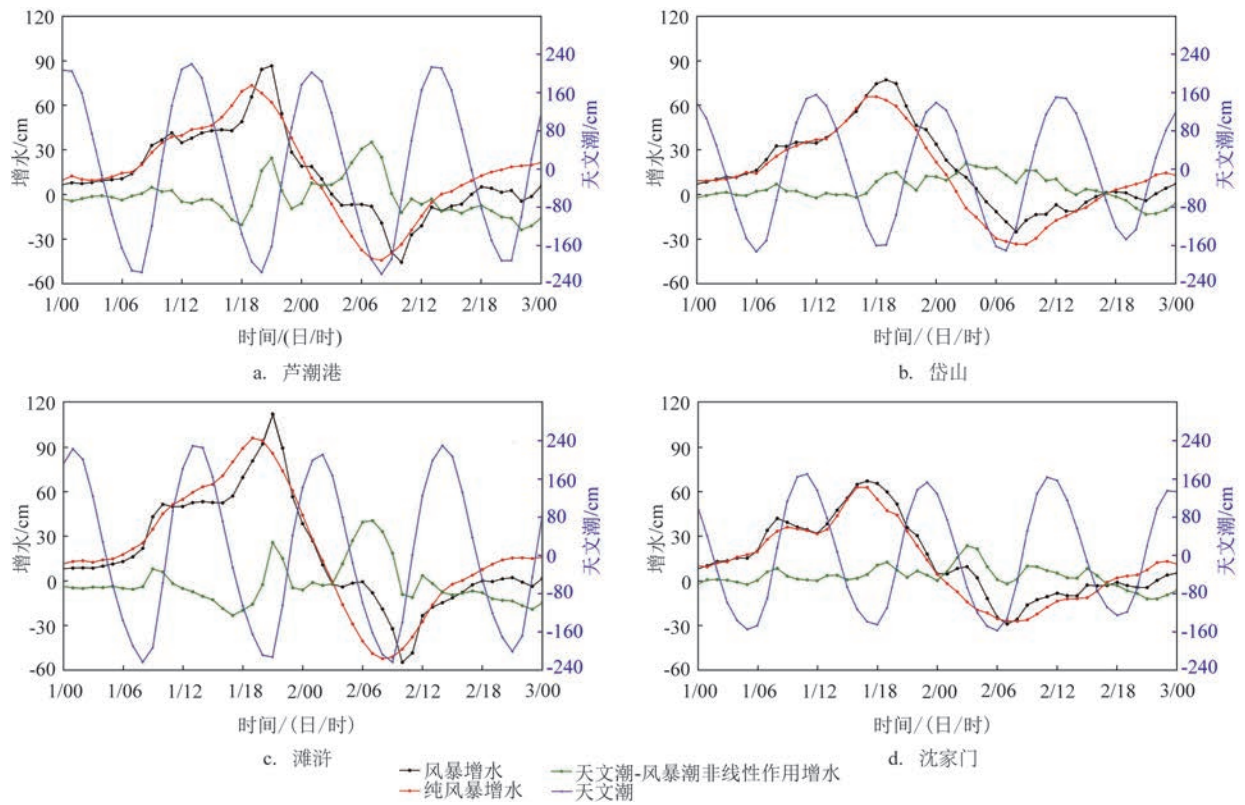


图5 天文潮-风暴潮变化曲线

Fig.5 Time series of astronomical tide-storm surge

灾害的高发期,风暴增水抬升了水位,增大向陆斜压力,会加剧咸潮入侵。

表2为2019年钱塘江咸潮入侵情况。2019年9—12月钱塘江发生了6次较明显的咸潮入侵过程,均发生在天文大潮期,6次咸潮入侵期间的富春江平均下泄流量为225 m³/s,最严重的一次发生在11月25日—12月1日,期间富春江平均下泄量为170 m³/s,南星水厂最大氯度值为2 670 mg/L。9月

28日—10月2日富春江平均下泄量为452 m³/s,期间恰逢台风“米娜”影响,钱塘江发生较明显的咸潮入侵,在台风“米娜”作用期间,南星水厂取水口超标41 h,最大氯度值达到776 mg/L。

4.2 “米娜”台风期间钱塘江咸潮入侵特点

图7为风暴增水空间分布图。通过刻画风暴潮期间典型时刻的增减水的空间分布,分析台风“米娜”影响期间杭州湾附近海域风暴增水的特点以及对钱塘江咸潮入侵的影响。10月1日,台风“米娜”位于舟山群岛南部海域,此时在杭州湾附近海域出现一个明显增水过程。

表3为台风期间钱塘江咸潮入侵和水位情况。对台风“米娜”期间的钱塘江监测站点的日最大氯度值与滩浒站日最大水位变化的时间序列进行相关性分析,相关系数约为0.88,入侵程度变化过程与风暴增水过程基本一致。如图7所示,在台风登陆前0.5 h左右(1日20时),杭州湾—舟山群岛附近海域均出现明显的风暴增水,且由于受海底地形、水

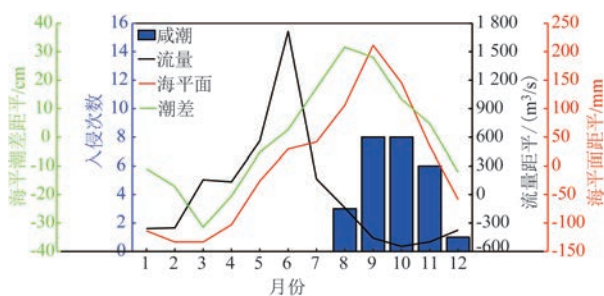


图6 2012—2019年钱塘江咸潮入侵月际变化示意图

Fig.6 Inter-monthly variation of salt-tide intrusion of Qiantang River during 2012 to 2019

表2 2019年钱塘江咸潮入侵情况

Tab.2 Salt-tide intrusion of Qiantang River in 2019

序号	时间段	超标时间/h	最高氯度值/(mg/L)	富春江流量/(m ³ /s)	天文大潮期	风暴潮影响
1	9月28日—10月2日	41	776	452	是	台风“米娜”
2	10月13日—10月20日	146	1 020	180	是	无
3	10月27日—11月3日	140	1 168	183	是	无
4	11月12日—11月17日	83	1 100	150	是	无
5	11月25日—12月1日	133	2 670	170	是	无
6	12月14日—12月15日	14.5	342	216	是	无

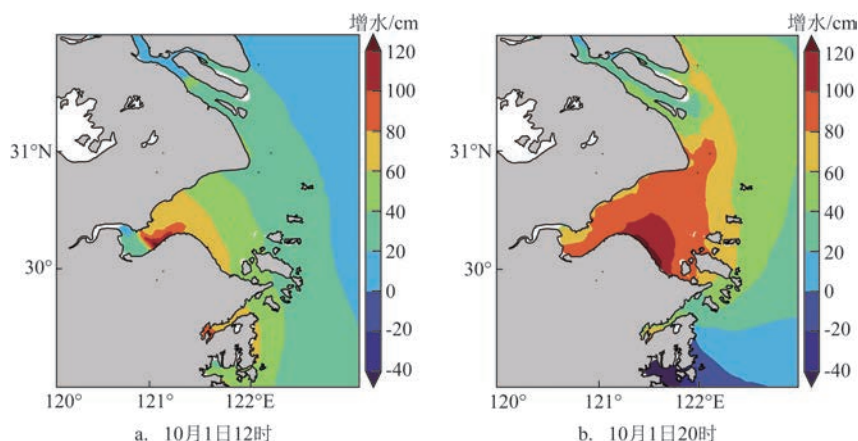


图7 杭州湾风暴增水空间分布

Fig.7 Spatial distribution of storm surge in Hangzhou Bay

深条件和地理位置条件影响,杭州湾内部海域的海水辐聚作用明显,增水明显高于外部岛屿附近海域的增水,最大增水幅度超过 100 cm,当日南星水厂最大氯度值为 776 mg/L,为本次影响过程的最高值。

表3 台风期间钱塘江氯度值和水位情况

Tab.3 Chlorine value and water level of Qiantang River during typhoon

日期	南星水厂 最大氯度值/ (mg/L)	滩浒站 日最大水位 距平/cm	台风期间 富春江流量/ (m ³ /s)
9月28日	296	-27.4	452
9月29日	572	-0.4	452
9月30日	520	-7.4	452
10月1日	776	36.6	452
10月2日	340	-1.4	452

5 结论

利用海洋数值模型 ADCIRC 建立杭州湾水动力模型,经验证模型能够较为真实地模拟杭州湾及附近海域的水动力环境及风暴增减水特征,在此基础上分析了台风“米娜”影响期间杭州湾风暴增减水的时空分布特征及对钱塘江咸潮入侵的影响。主要结论如下:

①台风“米娜”期间,杭州湾最大风暴增水发生在台风登陆前后 1 h 内,芦潮港站、滩浒站、岱山站和沈家门站的最大风暴增水分别为 92 cm、111 cm、83 cm 和 74 cm,台风登陆后,随着风向的转变,杭州湾附近海域增水逐渐减小,并出现减水现象。

②在对台风“米娜”风暴增水进行模拟时,考虑天文潮作用的控制试验得到的风暴增水与实测吻合得更好,在各站控制试验得到的最大风暴增水与实测的绝对误差分别为 6 cm、1 cm、6 cm 和 7 cm。而仅考虑气象强迫的无潮试验低估了最大风暴增水,其得到的各站最大风暴增水与实测的绝对误差超过 10 cm。天文潮-风暴潮之间的非线性作用对台风“米娜”风暴增水的影响明显,台风“米娜”引起的最大风暴增水发生在低潮附近,在风暴增水达到最大值的过程中,各站天文潮-风暴潮非线性作用增水分别为 24 cm、26 cm、14 cm 和 4 cm。

③钱塘江咸潮入侵程度主要取决于径流和潮汐强度,风暴增水会在一定程度上加剧咸潮入侵灾害,台风“米娜”期间 10 月 1 日滩浒站最大增水为 111 cm,同日南星水厂最大氯度值达到 776 mg/L,影响取水安全。因此在台风期间需加强监测,提前做好相关预报,采取增大淡水流量和关闭取水口等措施进行科学应对。

钱塘江河口风暴潮期间咸淡水混合动力过程复杂,台风期间的降雨、风浪等因素都会影响咸潮入侵的特征,本文主要基于台风“米娜”期间杭州湾周边海域风暴增水的数值模拟结果以及实测资料,论述了台风对咸潮入侵的影响。下一步需收集更多相关资料,通过耦合数值分析等手段探讨台风期间钱塘江咸潮入侵的动力机制。

参考文献:

- [1] 赵昕, 王晓霞, 李莉. 风暴潮灾害经济损失评估分析——以山东省为例[J]. 中国渔业经济, 2011, 29(3): 91-97.
- [2] ZHAO X, WANG X X, LI L. Assessment and analysis of storm surge disaster economic losses—a case of Shandong Province [J]. Chinese Fisheries Economics, 2011, 29(3): 91-97.
- [3] 王晓玲. 我国风暴潮灾害经济风险区划[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2010.
- [4] WANG X L. Regionalization of economic risk on storm surge disaster in China[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2010.
- [5] 马志刚, 郭小勇, 王玉红, 等. 风暴潮灾害及防灾减灾策略[J]. 海洋技术, 2011, 30(2): 131-133.
- [6] MA Z G, GUO X Y, WANG Y H, et al. Disaster of storm surge and its prevention and mitigation countermeasures[J]. Ocean Technology, 2011, 30(2): 131-133.
- [7] 朱军政, 徐有成. 浙江沿海超强台风风暴潮灾害的影响及其对策[J]. 海洋学研究, 2009, 27(2): 104-110.
- [8] ZHU J Z, XU Y C. Study on the calamity and counter-measure of the super typhoon storm surge along the Zhejiang coastal area[J]. Journal of Marine Sciences, 2009, 27(2): 104-110.
- [9] 左常圣, 王慧, 李文善, 等. 海平面变化背景下三大河口咸潮入侵特征及变化浅析[J]. 海洋通报, 2021, 40(1): 37-43.
- [10] ZUO C S, WANG H, LI W S, et al. Characteristics and changes of salt-tide intrusion in three estuaries under the background of sea level change[J]. Marine Science Bulletin, 2021, 40(1): 37-43.
- [11] 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.
- [12] CHEN B. Research status and prospect of storm surge in Beibu gulf [J]. Guangxi Sciences, 2014(4): 325-330.
- [13] 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特征分析[J]. 海洋预报, 2007, 24(4): 92-96.
- [14] LU Y B, MA L F. The main character of super typhoon No. 0608

- (SAOMAI) and characteristics analysis of its storm surge affecting [J]. *Marine Forecasts*, 2007, 24(4): 92-96.
- [8] 端义宏, 朱建荣, 秦曾灏, 等. 一个高分辨率的长江口台风风暴潮数值预报模式及其应用[J]. *海洋学报*, 2005, 27(3): 11-19.
- DUAN Y H, ZHU J R, QIN Z H, et al. A high-resolution numerical storm surge model in the Changjiang River Estuary and its application[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2005, 27(3): 11-19.
- [9] 邓兆青, 袁方超. 0908 号台风“莫拉克”风暴潮影响分析[J]. *海洋预报*, 2011, 28(1): 48-52.
- DENG Z Q, YUAN F C. Analysis of the storm surge due to 0908 typhoon "MORAKOT" [J]. *Marine Forecasts*, 2011, 28(1): 48-52.
- [10] 姜兆敏, 王如云, 黄金城. 风暴潮与天文潮非线性相互作用的理论分析[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2004, 32(4): 447-450.
- JIANG Z M, WANG R Y, HUANG J C. Nonlinear interaction between storm surges and astronomical tides[J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2004, 32(4): 447-450.
- [11] 赵永良, 张延廷, 陈则实. 黄海风暴潮和天文潮非线性耦合作用的数值研究[J]. *海洋学报*, 1992, 14(3): 37-46.
- ZHAO Y L, ZHANG Y T, CHEN Z S. Numerical study of non linear interaction between storm surges and astronomical tides in the Yellow Sea[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 1992, 14(3): 37-46.
- [12] 周旭波, 孙文心. 长江口以外海域风暴潮与天文潮的非线性相互作用[J]. *青岛海洋大学学报*, 2000, 30(2): 201-206.
- ZHOU X B, SUN W X. The Non-linear interaction between storm surges and astronomical tides in the sea area off River Changjiang's Mouth[J]. *Journal of Ocean University of Qingdao*, 2000, 30(2): 201-206.
- [13] 隋意, 石洪源, 钟超, 等. 我国台风风暴潮灾害研究[J]. *海洋湖沼通报*, 2020(3): 39-44.
- SUI Y, SHI H Y, ZHONG C, et al. Research on typhoon storm surge disaster in china[J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2020(3): 39-44.
- [14] 齐庆华, 蔡榕硕, 颜秀花. 气候变化与我国海洋灾害风险治理探讨[J]. *海洋通报*, 2019, 38(4): 361-367.
- QI Q H, CAI R S, YAN X H. Discussion on climate change and marine disaster risk governance in the coastal China seas[J]. *Marine Science Bulletin*, 2019, 38(4): 361-367.
- [15] FUJITA T. Pressure distribution in typhoon[J]. *Geophysical Magazine*, 1952, 23:437.
- [16] MIYAZAKI M, UENO T, UNOKI S. Theoretical investigations of typhoon surges along the Japanese coast (II) [J]. *Oceanographical Magazine*, 1962, 13(2): 103-117.

The characteristics of storm surge under the influence of Typhoon "Mitag" and its effect on salt-tide intrusion in Hangzhou Bay

ZUO Changsheng¹, HUANG Qingze^{2*}, PAN Song¹, REN Xingyuan¹

(1. National Marine Data and Information Service, Tianjin 300171, China; 2. Ningde Ocean center, Ministry of Natural Resources, Ningde 352000, China)

Abstract: Based on the observations during Typhoon "Mitag" in 2019, numerical simulation of typhoon storm surge around Hangzhou Bay has been carried out by using the ADCIRC model, to analyze the storm surge process and its characteristics in Hangzhou Bay, as well as its influence on the salt-tide intrusion of the Qiantang River. The results show that: The mean absolute errors of the simulated astronomical tide at Luchao Port, Tanxu, Daishan and Shenjiamen tide stations are 22 cm, 19 cm, 10 cm and 14 cm, respectively. The absolute errors of maximum storm surge are 6 cm, 1 cm, 6 cm and 7 cm, respectively. The storm surge in Hangzhou Bay is stronger than that of the outside islands during the typhoon. The maximum storm surge at Tanxu station is 111 cm, and that at Shenjiamen station is 74 cm. The non-linear interaction between astronomical tide and storm surge increases gradually from Zhoushan offshore to Hangzhou Bay. When the storm surge reaches its maximum, the non-linear interaction at each station are 24 cm, 26 cm, 14 cm and 4 cm, respectively. The salt-tide intrusion of Qiantang River mainly depends on runoff and tidal intensity, storm surge aggravates the salt-tide intrusion, and the salt-tide intrude the Qiantang River during Typhoon "Mitag", causing the chlorinity exceeding the limit of 41 hours at the Nanxing Water Plant. It is necessary to predict the influence of storm surge on salt-tide intrusion during typhoon and to make scientific countermeasures.

Key words: Hangzhou Bay; storm surge; Typhoon "Mitag" (1918); non-linear interaction; salt-tide intrusion