

典型路径下台风移速调整对鳌江站增水的数值分析

梁连松, 张钊, 顾冬明, 张福星, 韩小燕

(国家海洋局 温州海洋环境监测中心站, 浙江 温州 325013)

摘要: 以藤田台风风场为驱动 ADCIRC 模型, 经实测数据验证, 较好地模拟了 1808 号台风“玛莉亚”风暴潮过程。基于 1808 号路径西行登陆闽北型台风, 设计了不同区段、不同移速下的敏感性实验, 分析了台风在闽北海域西行段(121.9°~119.9°E)的移速调整对于鳌江站增水的作用。结果表明: 台风于西行前段(121.9°~121.0°E)的高移速有利于鳌江站增水快速增大, 西行后段(121.0°~119.9°E)的低移速有利于增水维持高位, 从而与天文潮高潮位碰头, 二者互相配合导致鳌江站突破红色警戒潮位值。当台风以 20~50 km/h 匀速西行时, 台风移速越快, 鳌江站增水极值越大, 增水维持高位时间越短; 此外移速快还加剧了台风不对称性, 加入台风移行风场后, 最大增水值增加了 8%~25%。

关键词: 台风风暴潮; 鳌江站; “玛莉亚”; 台风移速; 登陆闽北型

中图分类号: P731.23 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2020)05-0059-08

1 引言

温州海域是我国受台风风暴潮影响最频繁且严重的地区之一^[1]。1990—2018 年间, 鳌江站实测高潮位共计有 18 次达到警戒潮位, 其中 8 次达到红色警戒潮位。在所有影响温州海域的台风中, 尤以浙南闽北登陆的台风对温州影响最大, 其中 1808 号台风“玛莉亚”较为典型, 其引发的风暴潮导致温州多个岸段达到红色警戒级别潮位。因此研究分析 1808 号台风风暴潮增水特征, 对于今后预测浙南闽北登陆型台风对温州海域的增水具有重要意义。

众多研究表明, 台风移动路径、中心气压、环流大小、最大风圈半径和当地潮差潮位等因素都会对风暴潮增水产生影响^[2-6]。然而台风移速对风暴增水影响的分析研究较少, 这些研究中或未考虑台风的不对称性^[7], 或多集中于北上型台风的影响^[1,8], 尚未有研究分析西行登陆浙南闽北型台风移速的调整对温州海域增水的影响。

本文基于有限元海洋模式(ADvanced CIRCula-

tion Model for Oceanic, Coastal and Estuarine Waters, ADCIRC), 利用实测水下地形数据, 结合非结构网格, 以藤田台风风场模型为驱动风场, 构建温州海域精细化风暴潮数值模型, 较好地模拟了 1808 号台风“玛莉亚”的风暴潮过程。在验证合理的基础上, 分析了 1808 号台风的移速特征; 并通过改变台风移速进行多个敏感性实验, 研究了台风移速对于鳌江站的最大增水值、高位增水时长等增水特征值的影响, 以及不同区段的移速调整在鳌江站增水过程中的作用。

2 水动力和风场模型

2.1 水动力模型

ADCIRC 二维模型在球坐标系下海水的连续方程为^[9]:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{1}{R \cos \phi} \frac{\partial UH}{\partial \lambda} + \frac{1}{R} \frac{\partial VH}{\partial \phi} - \frac{VH \tan \phi}{R} = 0 \quad (1)$$

收稿日期: 2019-07-21; 修回日期: 2019-10-06。

基金项目: 国家海洋局东海分局青年科技基金(201804)。

作者简介: 梁连松(1990-), 男, 工程师, 硕士, 主要从事海洋预报工作。E-mail: wysina2@163.com

在球坐标系下海水原始动量方程为:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{U}{R \cos \phi} \frac{\partial U}{\partial \lambda} + \frac{V}{R} \frac{\partial U}{\partial \phi} - \left(\frac{U \tan \phi}{R} + f \right) V = -\frac{1}{R \cos \phi} \frac{\partial}{\partial \lambda} \left[\frac{p_s}{\rho_0} + g(\zeta - \eta) \right] + \frac{\tau_{s\lambda} - \tau_{b\lambda}}{\rho_0 H} + D_\lambda \quad (2)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + \frac{U}{R \cos \phi} \frac{\partial V}{\partial \lambda} + \frac{V}{R} \frac{\partial V}{\partial \phi} + \left(\frac{U \tan \phi}{R} + f \right) U = -\frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial \phi} \left[\frac{p_s}{\rho_0} + g(\zeta - \eta) \right] + \frac{\tau_{s\phi} - \tau_{b\phi}}{\rho_0 H} + D_\phi \quad (3)$$

式(1)、(2)、(3)中: t 为时间; λ 、 ϕ 和 R 分别代表经度、纬度和地球半径; U 、 V 为深度平均的水平流速; ζ 、 H 分别为从平均海平面算起的自由表面高度和海水水柱总水深; $\tau_{s\lambda}$ 、 $\tau_{s\phi}$ 分别是海表应力在经向、纬向的分量; $\tau_{b\lambda}$ 、 $\tau_{b\phi}$ 分别是海表摩擦力在经向、纬向的分量; D_λ 、 D_ϕ 是动量方程的水平扩散项; η 是牛顿引潮势; f 是科氏参数; ρ_0 是海水密度; p_s 是海表气压。

初始时刻 $t = 0$ 时, $\zeta = u = v = 0$; 陆地边界条件:法向速度为0。

开边界条件:由 M_2 、 S_2 、 K_2 、 N_2 、 K_1 、 O_1 、 P_1 、 Q_1 共8个分潮驱动计算。

2.2 台风风场模型

台风气压场采用藤田气压分布式^[10]:

$$P = P_\infty - (P_\infty - P_0) \left[1 + 2 \left(\frac{r}{R_{\max}} \right)^2 \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (4)$$

式(4)中: P_0 为台风中心气压, P_∞ 取 1 010 hPa, r 是计算点到台风中心距离。

R_{\max} 为最大风速半径:

$$R_{\max} = 1\,000 \times 1\,119.0 \times (1\,010 - P_0/100)^{-0.805} \quad (5)$$

相应的梯度风和移行风场公式分别为:

$$\vec{W}_1 = \sqrt{\frac{f^2 r^2}{4} + \frac{r}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial r}} - \frac{fr}{2} \quad (6)$$

$$\vec{W}_2 = e^{-\pi r/500\,000} \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \end{bmatrix} \quad (7)$$

式(6)和(7)中: f 为科氏参数; ρ_0 为空气密度; v_x 、 v_y 分别是台风移速的东分量、北分量,移速由台风中心距离对时间的中心差分求得。

台风合成风场计算公式为:

$$\vec{W}_{\text{台风}} = c_1 \vec{W}_1 \begin{bmatrix} -\sin(\phi + \beta) \\ \cos(\phi + \beta) \end{bmatrix} + c_2 \vec{W}_2 \quad (8)$$

式(8)中: ϕ 是计算点与台风中心连线与正东方向的夹角; β 是梯度风与海面风的夹角,取 $10^\circ \sim 20^\circ$; c_1 、 c_2 是订正系数。

3 模型设置及验证

3.1 模型设置

模型区域包括渤海、黄海、东海和南海北部,东至 133°E ,南到巴士海峡,在温州海域进行局部加密。网格为非结构网格,网格数 98 401,网格点数 51 756(见图1)。计算时间为7月7—12日,时间步长取 1 s。瓯江、飞云江和鳌江海域分别采用 2010 年和 2016 年的高精度水下地形资料,浙南海域采用最新海图,其余水深来自于 ETOPO1 全球地形数据集。台风路径和中心气压来源于温州台风网(网址: <http://www.wztf121.com>)。

3.2 模型验证

为验证模型的准确性,取7月11日鳌江、瑞安、龙湾、江心、洞头、石砰各站的高潮位作为对比。各站高潮位计算绝对误差为 3~19 cm,其中瑞安、洞头站稍大,其余潮位站均不超过 10 cm。瑞安站计算潮位警戒级别为黄色,稍低于实测的橙色级别,其余潮位站警戒级别均与实测相符。

限于篇幅,本文仅列出受影响最严重的石砰和

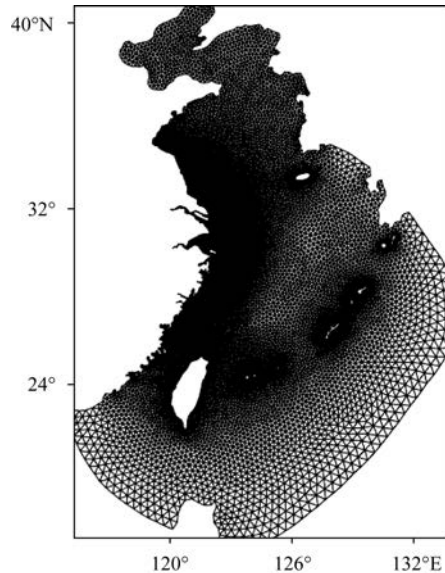


图1 模型网格

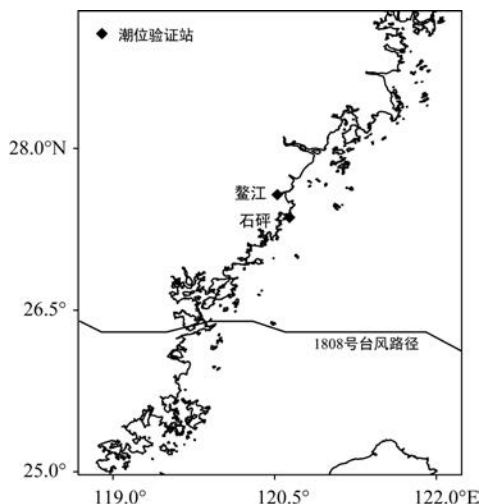


图2 验证站位及台风路径

鳌江两站的结果。两站站位及1808号台风路径见图2,两站潮位和增水对比过程线见图3和图4。石砰、鳌江两站高潮位绝对误差不超过12 cm,潮位过程的平均绝对误差为21 cm,增水极值绝对误差不超过18 cm,增水过程的平均绝对误差为25 cm。由此可见计算结果与实测吻合较好,模型能够较好地

模拟该海域的风暴潮过程。

4 案例实验

4.1 台风过程分析

经统计分析,1990—2018年间造成鳌江站潮位超过蓝色警戒潮位(385 cm,1985国家高程)的台风过程共计18次,其中15次过程为西北行路径,其余为近海转向或近海北上等(见图5)。西北行路径中浙南闽北登陆型占14次,同时所有达到红色警戒潮位的台风过程均为浙南闽北登陆的台风。从图5中可以看出,1808号台风“玛莉亚”处于所有浙南闽北登陆型路径的中部,较有代表性;且1808号台风期间温州近岸各岸段出现160~240 cm的风暴增水,平阳县和苍南县岸段潮位均达到红色警戒级别,鳌江站过程最大增水230 cm,高潮位增水198 cm。因此,无论从路径类型还是影响程度上看,1808号台风“玛莉亚”是影响鳌江站较为典型的台风路径。

台风移动速度:1808号台风“玛莉亚”在124°~119°E之间的台风中心移速变化可以分为3个阶段(见图6、7)。第一阶段:124°~121.9°E西北偏西加

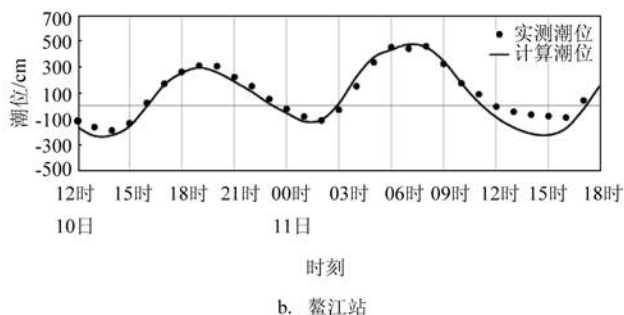
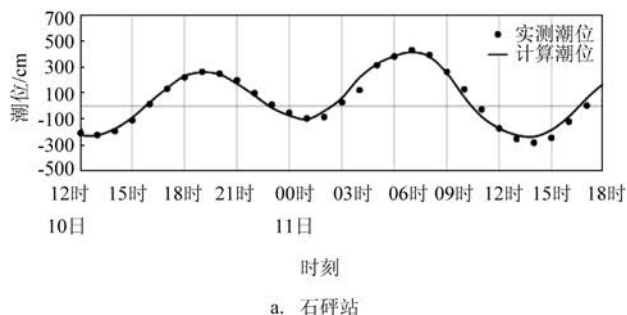


图3 石砰、鳌江潮位验证(北京时,下同)

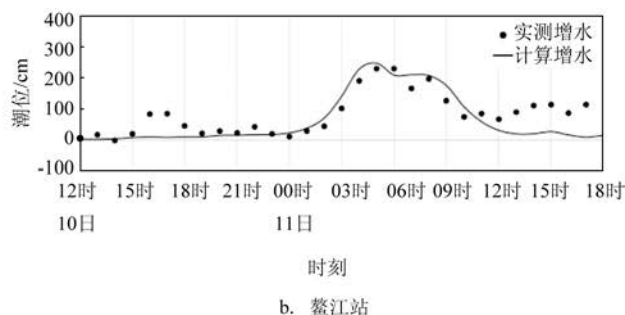
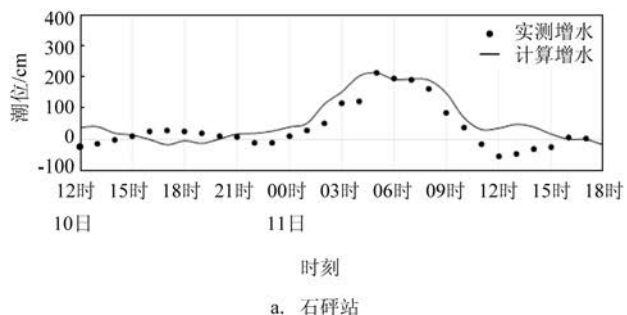


图4 石砰、鳌江增水验证

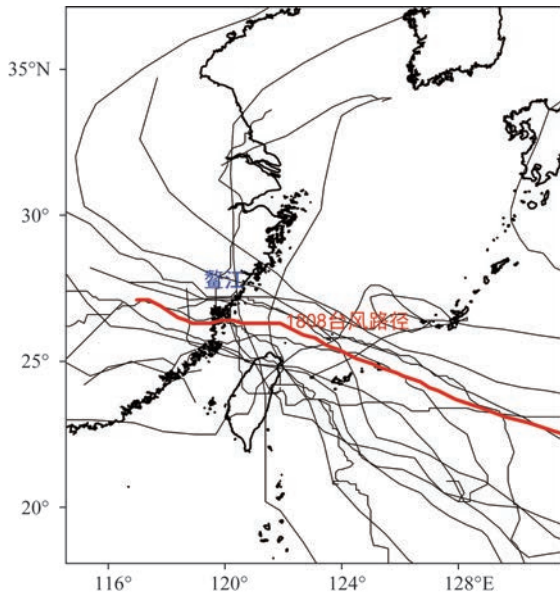


图5 1990—2018年鳌江站潮位超警路径

速段,即10日21时—11日03时从27 km/h加速到45 km/h,绕过台湾岛北侧。第二阶段:121.9°~121.0°E西行前段,即11日03—05时,台风移速较

大,介于40~50 km/h。第三阶段:121.0°~119.9°E西行后段,即11日05—09时,台风移速较小,介于20~38 km/h。

台风移动方向:加速段移动方向大致为WNW,11日03时起转为W向;台风中心维持在26.3°N,仅11日08时、09时北移0.1°。

台风中心强度:台风中心气压于加速段的10日23时加强到945 hPa;10日23时—台风登陆前的08时,中心气压均为945 hPa;台风登陆后迅速减小。

4.2 案例设置

为了体现西行段移速变化对鳌江站增水的影响,同时最大程度地反映1808号台风的实际增水过程,文中在1808号台风的基础上设计台风。选取对温州海域增水变化最大、最明显的时段即台风中心经度位于121.9°~119.9°E时(西行段)进行研究。设计台风中心到达西行段后纬度于26.3°N保持不变朝西移动,与实际路径相比仅在11日08时、09时南移0.1°;同时台风中心在西行段气压保持945 hPa,与实际相比,仅11日09时稍有降低。设计台风其

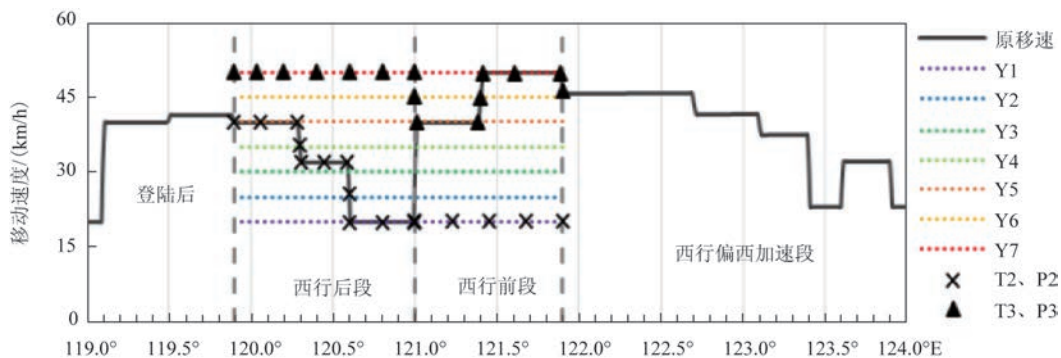


图6 台风移速与台风中心经度关系以及各案例移速

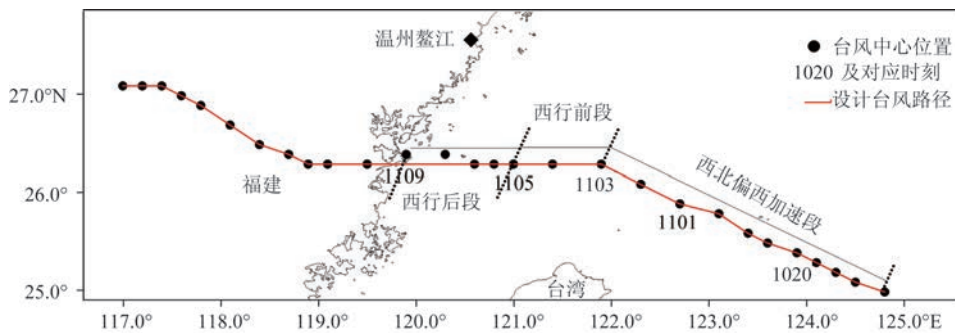


图7 1808号台风“玛莉亚”路径和设计台风路径

表1 案例设置(单位:km/h)

编号	移速	编号	移速	编号	移速	耦合天文潮	编号	移速	耦合天文潮
Y1	20	Y5	40	T1a	原速	否	T3a	前段原速, 后段50	否
Y2	25	Y6	45	T1b		是	T3b		是
Y3	30	Y7	50	T2a	前段20, 后段原速	否			
Y4	35			T2b		是			

余区段与1808号台风一致(见图7)。

在设计台风的基础上,设计匀速案例Y1—Y7,其台风中心运行到西行段时匀速运行,移动速度为20~50 km/h不等。变速案例则按前段、后段设置移速,T1(含T1a、T1b)移速与1808号台风实际移速一致。T2(含T2a、T2b)前段以20 km/h西行,后段与原移速一致。T3(含T3a、T3b)前段与原移速一致,后段以50 km/h西行。

Y1—Y7案例计算风暴增水时分别采用合成风场和梯度风场驱动水动力模型,变速案例仅用合成风场驱动。为比较移速对于增水的影响,Y1—Y7、T1a—T3a均不耦合天文潮。第5部分中的增水指不耦合天文潮增水(T1a—T3a),潮位为耦合天文潮后的潮位(T1b—T3b)。具体方案见表1和图6。

5 案例分析

5.1 匀速案例分析

5.1.1 移速与过程最大风速

图8a为Y1—Y7案例鳌江站梯度风、移行风和合成风的过程最大风速。图中可以看出,移速变化对于梯度风最大风速没有影响,移行风和合成风的最大风速则随着移速的增加而增加。由于梯度风场为圆对称风场,受中心气压和最大风速半径等参数控制,与台风移速无关。移行风和合成风则不同,当台风移速从20 km/h增加到50 km/h,台风不对称性变强,位于台风右侧的鳌江站移行风速和合成风速增大了2~3 m/s。

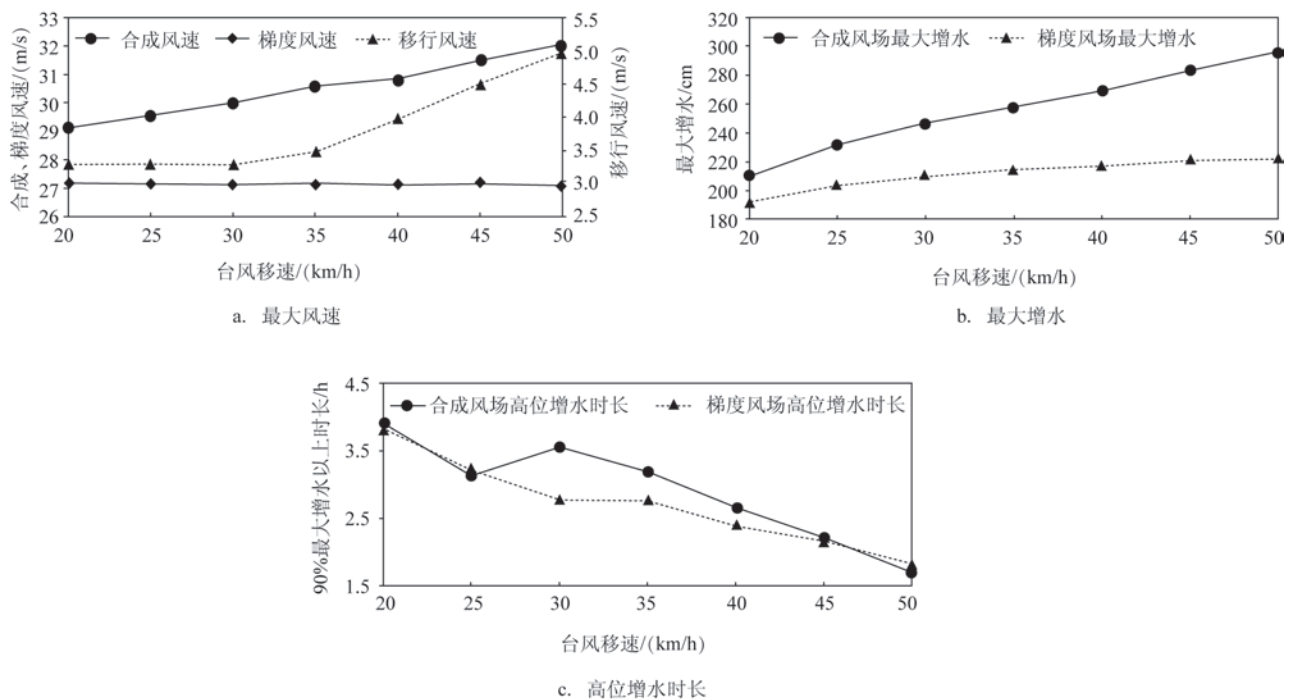


图8 Y1—Y7过程对比

5.1.2 移速与过程最大增水

图8b绘制了Y1—Y7下合成风场和梯度风场在鳌江站造成的过程最大增水。图中可以看出移速变化对最大增水值有显著影响。无论是梯度风场还是合成风场,最大增水值随着台风移速增加而变大。台风移速从20 km/h增加到50 km/h,合成风和梯度风作用下的鳌江站最大增水值增幅分别为86 cm和30 cm。

梯度风风场作用下,鳌江站的最大风速始终保持在27.2 m/s,然而台风移速为50 km/h时鳌江站最大增水值较20 km/h有30 cm的增幅,可见台风移速增加本身就对于鳌江站的增水有促进作用。这与刘凤树等^[7]指出的“当风暴移速小于长波速度时,风暴潮随风暴移速的增加而增加”的结论一致。

由于合成风场考虑了移行风场的作用,台风的不对称性加剧了台风路径右侧区域增水极值变大的程度,移速增加对合成风场最大增水值产生的增幅明显强于梯度风场。合成风场驱动下鳌江站最大增水值较梯度风场上升约18~74 cm,占合成风场最大增水值的8%~25%。综上,台风不对称性和高移速均对鳌江站的最大增水有明显促进作用。

5.1.3 移速与高位增水时长

图8c绘制了Y1—Y7下合成风场和梯度风场在鳌江站造成的增水达到90%增水最大值以上时长(以下简称“高位增水时长”)。在梯度风风场作用下,台风移速从20 km/h增大到50 km/h时,鳌江站高位增水时长由最初的3.8 h逐渐减小1.8 h;合成风场作用下则略有不同,30 km/h移速的高位时长反而大于25 km/h移速的高位时长,但总体上移速加大不利于高位增水的维持。由此可见,台风移速越慢,越有利于增水维持在极值附近的高位状态;反之台风移速过高导致风速变化过快,不利于增水在高位上的维持。

5.2 变速案例分析

5.2.1 前段高移速对增水的助长

T1和T2处于西行前段的时间分别是11日03—05时和03—08时。T1在前段的风速较T2大2.0~4.0 m/s(见图9a)。T1在前段以40~50 km/h的高速朝西运动,台风风场的不对称性较强,加大了台风移动方向右侧的风速。

前段高速西行有利于短时间内鳌江站的增水快

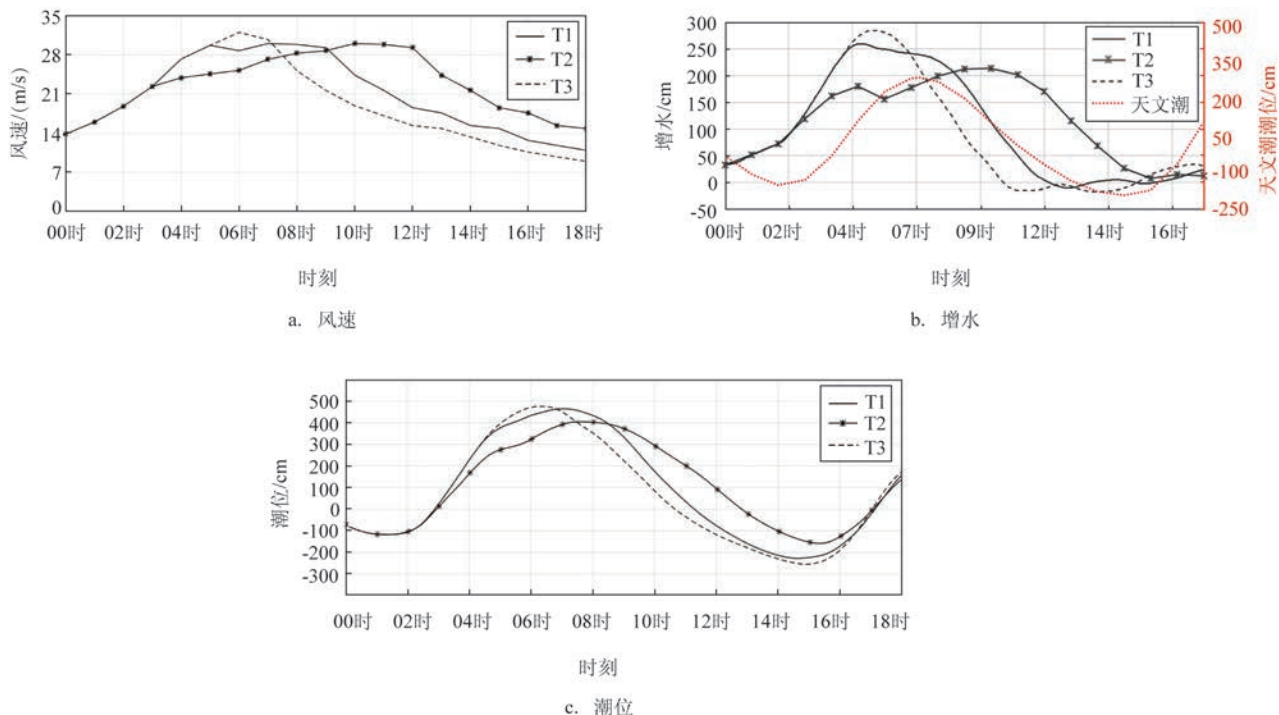


图9 T1—T3过程对比(7月11日)

速升高,进而加大了整个过程的最大增水值。当台风结束西行前段运行时,T1鳌江站增水达到258 cm(见图9b),较T2高出60 cm。整个过程最大增水T1为259 cm,较T2高出43 cm。当考虑天文潮强迫后,T1最高潮位为464 cm(见图9c),较T2高出51 cm。

5.2.2 后段移速与高位增水时长

T1和T3处于西行后段的时间分别是11日05—09时和05—07时。T1案例台风在后段的长期滞留(见图9b),导致鳌江站增水居高不下,有利于潮位突破或维持各级警戒潮位。这也同样反映在鳌江站各级警戒潮位时长上:T1维持在红、橙、黄、蓝色警戒潮位以上时长分别是1 h 10 min、2 h 44 min、2 h 50 min、3 h 24 min,与T3相比,仅红色警戒潮位时间少12 min,其余橙色、黄色、蓝色警戒潮位时间则多出54 min、32 min、42 min。

5.2.3 后段移速与高潮时的配合

从图9b、9c中可以看出,T1增水在11日05—08时保持在228~259 cm,与此同时天文潮位迅速上升,鳌江站潮位于11日06—07时突破红色警戒级别潮位450 cm。T1案例220 cm以上增水时长为4 h 4 min,较T3长40 min。延长的时段位于11日07—08时,该时段与天文潮高潮时7 h 19 min恰好碰头,促使鳌江站在07—08时维持了红色警戒级别潮位。T3增水值在11日05—08时则处于快速下落阶段,天文高潮位出现时其对应增水小于190 cm,可见T3案例的增水与高潮位配合稍差。

6 结论

本文以1808号台风风暴潮为例,采用藤田台风风场,驱动ADCIRC模型,建立了温州海域风暴潮数值模型。在闽北海域登陆前,台风风速经历了先高速后低速过程。文中基于该路径设计了不同区段、不同移速下的敏感性实验方案。同时以鳌江站

为例,分析了台风移速与最大增水、最大风速和高位增水时长的关系,探讨了台风移速调整对于增水的影响。结论如下:

(1)西行前段($121.9^{\circ}\sim 121.0^{\circ}\text{E}$)的高移速有利于鳌江站增水快速增大,后段($121.0^{\circ}\sim 119.9^{\circ}\text{E}$)的低速西行有利于增水长时间居高不下,从而与天文潮高潮位碰头,二者互相配合导致鳌江站突破红色警戒潮位。

(2)台风移速处于20~50 km/h时,台风移速越快,鳌江站的最大风速和最大增水值越大,增水维持高位时间越短。

(3)台风的高移速加剧了台风不对称性。考虑台风移行风场后,鳌江站最大增水值增加了8%~25%。

参考文献:

- [1] 顾冬明,李奶姜.一类能引起温州鳌江站风暴潮持续增水的台风路径分析与预报[J].海洋预报,2012,29(3):42-47.
- [2] 郭惠明,高清清.东海风暴潮数值预报模式参数的敏感性分析[J].华东师范大学学报(自然科学版),2014(6):81-89.
- [3] 韩树宗,潘嵩.杭州湾台风风暴潮增水过程的数值分析[J].中国海洋大学学报,2013,43(7):1-6.
- [4] 曹越男,张增海,原野,等.南海台风风暴潮数值模拟及其对气象强迫场的敏感性试验[J].热带气象学报,2014,30(6):1119-1126.
- [5] 张金善,钟中,胡轶佳.热带气旋风暴潮模拟中的海面风场特征对比研究[J].水动力学研究与进展,2008,23(6):687-693.
- [6] 王庆业,陈钰祥,郭玉臣,等.宁德海域风暴潮数值模拟研究[J].海洋预报,2013,30(5):31-36.
- [7] 刘凤树,张庆华.风暴潮某些特性的研究[J].海洋科学,1979(S1):104.
- [8] 刘凤树.8114号台风潮的基本特性及其变化规律的分析[J].海洋与湖沼,1984,15(6):568-580.
- [9] Ebersole B A, Westerink J J, Bunya S, et al. Development of storm surge which led to flooding in St. Bernard Polder during Hurricane Katrina[J]. Ocean Engineering, 2010, 37(1): 91-103.
- [10] Fujita T. Pressure distribution within typhoon[J]. Geophysical Magazine, 1952, 23(4): 437-451.

Numerical analysis of typhoon's moving speed adjustment influence on storm surge of Aojiang station under typical route

LIANG Lian-song, ZHANG Zhao, GU Dong-ming, ZHANG Fu-xing, HAN Xiao-yan

(Marine Environmental Monitoring Center Station, Wenzhou 325013 China)

Abstract: Storm surge processes are simulated based on the ADCIRC model with Fujita typhoon model and simulation result has a good agreement with measured data. In this paper, model results of Aojiang station are used to analysis moving speed's impact on storm surge in different segment of "Maria"(1808). We also compare the peak storm surge of Aojiang between different uniform speed experiments. Based on the route of "Maria"(1808), we designed different segment and different typhoon speed experiments and model results of Aojiang station are used to analysis moving speed's impact on storm surge under wester landing northern-Fujian route. It indicates that high moving speed of forepart ($121.9^{\circ} \sim 121.0^{\circ}\text{E}$) was beneficial to fast enhancement of storm surge in Aojiang station, the low moving speed of posterior segment ($121.0^{\circ} \sim 119.9^{\circ}\text{E}$) was beneficial to storm surge kept in a high level and met the high water level of astronomical tide, so the water level of Aojiang station break through the red warning water level eventually; When typhoon moving speed is faster, the peak storm surge is higher and the time-period of tide stays in high level is shorter; high speed also increase the asymmetry of typhoon. The peak surge of Aojiang station can increase $8\% \sim 25\%$ when shift wind field is considered.

Key words: storm surge; Aojiang station; "typhoon Maria"; typhoon's moving speed; wester landing northern-Fujian route