

魏国振, 任明磊, 孙琳, 夏志昌, 陈智洋, 尤再进. 2024. 台风风暴潮与上游洪水耦合作用下温州飞云江感潮河段潮水位模拟研究. 热带地理, 44 (6): 1016-1024.

Wei Guozhen, Ren Minglei, Sun Lin, Xia Zhichang, Chen Zhiyang, and You Zaijin. 2024. Simulation Study of Tidal Water Levels in Tidal Reach of the Wenzhou's Feiyun River under Coupled Influence of Typhoon Storm Surges and Upstream Floods. Tropical Geography, 44 (6): 1016-1024.

台风风暴潮与上游洪水耦合作用下温州飞云江 感潮河段潮水位模拟研究

魏国振^{1,2}, 任明磊^{1,3}, 孙琳¹, 夏志昌⁴, 陈智洋⁴, 尤再进²

(1. 中国水利水电科学研究院, 水利部防洪抗旱减灾工程技术研究中心, 北京 100038; 2. 大连海事大学, 港口与航运协同创新中心, 辽宁 大连 116026; 3. 水利部京津冀水安全保障重点实验室, 北京 100038; 4. 温州市水旱灾害防御中心, 浙江 温州 325000)

摘要: 在全球气候急剧变化的背景下, 沿海地区风暴潮发生的频率与受灾程度逐渐增加, 特别是受风暴潮与上游流域洪水共同影响下的河口感潮河段区域。尽管现有风暴潮模型也引入多种不同的边界设置, 但提供的边界条件有限, 且无法满足当前国内复杂水工程的概化需求。为此, 文章以飞云江流域为研究对象, 通过耦合上游流域水动力模型 IFMS 与海洋风暴潮模型 ADCIRC 模式, 充分发挥二者各自的优势, 构建河口感潮河段洪水演进模型, 实现飞云江感潮河段潮水位时空模拟。该模型不仅有效地考虑了河口海洋处风暴潮上溯对感潮河段区域洪水演进的影响, 也考虑了流域上游洪水对该区域的影响。首先, 采用2016年台风“鲇鱼”对模型进行验证, 模拟结果与实测系列吻合度较高, 误差满足基本要求。然后, 对台风“杜苏芮”和“卡奴”影响下的瑞安、马屿、碧山六桥及洞头4个潮位站的洪水过程进行模拟, 结果显示4个站点的洪峰误差值均低于0.30 m, 纳什系数大于0.80, 表明该模型能较好地反映高低潮位变化, 可应用于河口感潮河段防灾减灾中。最后, 还分析了上、下游边界的驱动作用对感潮河段3个站点(瑞安、马屿、碧山六桥)潮水位预测的影响, 证明了下边界对3个站点的潮水位预报影响比上边界的影响大。研究成果不仅为河口感潮河段洪水模拟提供了一种新方法, 而且通过分析给出提升模型模拟精度的方向。

关键词: 感潮河段; 水动力模型; 风暴潮模型; 上游洪水; 潮水位模拟

中图分类号: P731.23

文献标志码: A

文章编号: 1001-5221(2024)06-1016-09

DOI: 10.13284/j.cnki.rddl.20230994

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



随着全球气候发生变化和人类活动的影响, 海平面不断上升, 台风发生的频率不断加剧, 造成的洪水淹没灾害越来越严重(王晓玲等, 2011; 戚蓝等, 2016; Moftakhari et al., 2017; 王甜甜等, 2018)。在此背景下, 如何准确预测并应对洪水淹没灾害, 已成为全球面临的重大挑战。特别是在沿海地区, 台风风暴潮与上游洪水的耦合作用可能导致该区域洪涝灾害更为严重(卢美, 2013)。以温州飞云江为例, 该河流是中国东海沿岸的重要河流之一, 其下游是一个典型的感潮河段。在台风季

节, 飞云江上游可能出现洪水, 同时下游可能受到台风风暴潮的影响, 两者的叠加效应可能导致河流水位急剧上升, 威胁沿岸的人民生活 and 财产安全(许辉, 2021)。因此, 针对河口感潮河段在台风风暴潮与上游洪水耦合作用下的潮水位进行模拟研究, 对实现该地区的防灾减灾具有重要现实意义。

现阶段, 国内学者对受风暴潮、天文潮、径流作用下的河口感潮河段的研究主要集中在珠江口地区、长江口和浙江省沿海河口等(梁连松等, 2020; 刘士诚等, 2021; 罗志发等, 2022; 夏明

收稿日期: 2023-12-20; 修回日期: 2024-04-10

基金项目: 中国博士后科学基金面上项目“风暴潮与河流洪水耦合作用下海岸河口淹没灾害防控机制研究”(2023M740469)

作者简介: 魏国振(1990—), 男, 湖北仙桃市人, 博士, 讲师, 主要研究方向为防灾减灾及河口风暴潮, (E-mail) eriwg2020@163.com;

通信作者: 任明磊(1983—), 女, 河北平泉市人, 博士, 高级工程师, 主要研究方向, (E-mail) renml@iwhr.com。

嫣等, 2022)。大多研究主要利用水动力模型, 对潮汐在河口区的传播、变形以及其与河流径流的复杂交互作用进行深入研究。如, 罗志发等 (2022) 以台风“山竹”为例, 基于 SCHISM 模式, 揭示了在珠江河口地区感潮河段中, 以径流动力为主的区域, 当径流增加时, 沿河道上溯的风暴增水逐渐减小; 而以天文潮动力为主的区域, 沿河道上溯的风暴增水随径流的增大而增大。夏明嫣等 (2022) 基于 ADCIRC 模型构建了长江口风暴潮数值模型, 并基于典型台风的基础构建了多种台风路径, 探明了不同台风登陆位置与走向对长江沿线风暴增水影响, 结果表明“三碰头”情况下, 长江沿线增水分布呈单峰, 由大通至江阴呈现增大的趋势、江阴至中浚维持在高水位, 中浚至口外呈减小趋势。刘士诚等 (2021) 以“山竹”台风为例, 利用 ADCIRC 对珠江口河网进行模拟, 并分析了河口河网的风暴增水分布特征, 发现台风风向与水道口门方向的相对夹角、上游径流对河口地区河网风暴增水影响较大。

尽管感潮河段潮水位模拟的方法较多, 且每种方法都有其完整的理论基础, 但鉴于河流水流特征的复杂多变, 涉及的物理过程复杂, 特别是在河口区域的感潮河段, 由于水流受到上游洪水和下游潮汐的双重影响, 导致感潮河段水位预测更加复杂 (芮孝芳, 1990; Tsai and Lee, 1999; 祝中昊, 2000; 黄国如等, 2003; 丁峰等, 2005)。通常, 针对感潮河段的水位模拟模型主要分为 2 个子模块——河道水动力模型和河口风暴潮 (潮汐) 模拟模型。2 个子模块之间不断交互进而实现对河口感潮河段水动力的精准模拟。现阶段关于河道水动力模拟模块的相关研究较多, 如 MIKE 11、MIKE 21、Delft3D、ADCIRC、IFMS 和 HEC-RAS 等 (Bacopoulos et al., 2017; Hoch et al., 2017; Bush et al., 2022; Li et al., 2023; Ye et al., 2023)。其中, IFMS[Integrated Flood Modeling System (1D+2D)] 模型 (喻海军等, 2018) 是由中国水利水电科学研究院联合多家单位共同研发的洪水分析软件, 能有效地对国内河道复杂工程进行概化构建, 其实用性、可靠性已在国内风险图编制及沿海城市洪涝模拟等多个工程研究领域得到有效验证。关于河口风暴潮 (潮汐) 模拟模型也较多, 如 SCHISM、ADCIRC、Delft3D、

FVCOM 等模型, 其中 ADCIRC (The Advanced Circulation Model) 模型由北卡罗来纳大学 Luettich 教授和 Westerink 教授联合研制 (Pringle et al., 2021), 该模型是目前沿海风暴潮模拟最广泛使用的模型。尽管上述风暴潮模型也引入了多种不同的边界设置, 但提供的边界条件有限, 且无法满足当前国内复杂水工程的概化需求。

因此, 本文综合考虑 IFMS 模型在模拟复杂河段的水动力情况的优势以及 ADCIRC 在河口风暴潮灾害模拟方面的优势, 创新性地把 IFMS 与 ADCIRC 相耦合, 充分发挥二者各自的优势实现对感潮河段的水动力模拟, 并以温州飞云江河口区域风暴潮灾害事件为例, 模拟实测暴雨影响下的感潮河段水位变化过程。以期为沿海城市河流管理和防洪工作提供一种河口感潮河段洪水模拟新模型。

1 研究区域概况

飞云江发源于浙江省景宁畲族自治县洞宫山白云尖, 自西向东流经泰顺县、文成县, 在瑞安市城关镇东南上望镇新村入东海, 是温州市第二大河。干流河长约 198 km, 落差 1 200 m, 平均坡降 5.7‰, 流域面积 3 712 km² (图 1)。其干流中上游坡降较大, 滩多水急, 属强潮流区, 最大潮差 6.39 m, 潮流挟带海域水力资源丰富。下游流经冲积平原, 左岸温瑞塘河 (瑞安部分) 和右岸瑞平塘河的雨洪亦排入飞云江。由于地处东亚季风区, 汛期又是台风突发、多发季节, 下游天文大潮与风暴潮并发, 易患潮灾。据统计, 近 20 年来, 飞云江流域共发生过程流域性风暴潮灾害 6 次, 频率为 3 a 一遇, 造成的经济损失超百亿元。鉴于此, 本研究拟结合飞云江的河道特性和水文特征, 对其感潮河段潮水

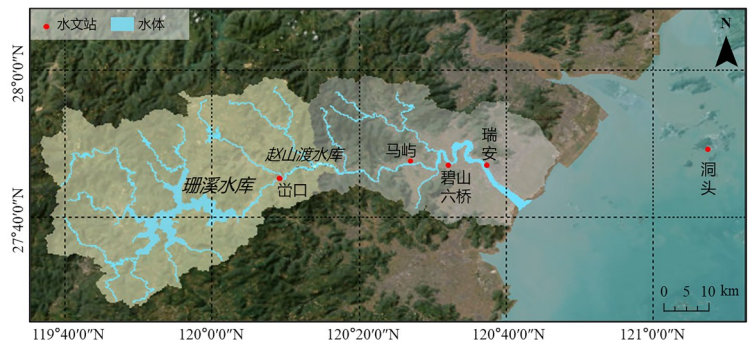


图 1 温州飞云江流域

Fig.1 The Feiyun River Basin of Wenzhou

位进行模拟。

2 感潮河段洪水预报模型构建

感潮河段的水位在台风期间受到上游洪水和天文潮的相互作用,需同时考虑河流水位变化和潮汐涨落。因此,首先通过 IFMS 一、二维水动力模型模拟入海口以上感潮河段的洪水传播以及城市淹没过程,在此基础上,耦合海洋模型 ADCIRC 以驱动感潮河段下边界,实现对感潮河段的实时模拟,同时满足浅水且河道较窄区域的精细化处理。

2.1 IFMS 模型

IFMS 模型整合了复杂水利工程调度模拟的一维河网计算引擎、二维洪水分析计算引擎和快速非结构网格剖分工具,集成了国内外广泛使用的 SWMM 雨洪模型,并实现了一二维耦合以及管网与二维模型的耦合,可实现河道、湖泊、近海岸的水流分析及复杂水利工程调度模拟(喻海军等, 2018)。其主要的控制方程为:

$$\begin{cases} B \frac{\partial Z}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \\ \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\alpha Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial Z}{\partial x} + gA \frac{|Q|Q}{K^2} = qV_x \end{cases} \quad (1)$$

式中: q 为旁侧入流; Q 、 A 、 B 、 Z 分别为河道断面流量、过水面积、河宽和水位; V_x 为旁侧入流流速在水流方向上的分量,一般可近似为 0; K 为流量模数,反映河道的实际过流能力; α 为动量校正系数,是反映河道断面流速分布均匀性的系数;当河道只有一个主槽时, $\alpha=1.0$,当河道有若干个主槽和滩地时,在主槽和滩地摩阻比降相等的假定下,可知:

$$\alpha = \frac{A}{K^2} \sum_{i=1}^n \left(\frac{K_i^2}{A_i} \right) \quad (2)$$

式中: n 为主槽和滩地的分块个数; A_i 、 K_i 为第 i 分块的过水面积与流量模数; A 、 K 为断面总的过水面积与流量模数,所以 α 是断面位置及水位的函数, α 值也像河道断面资料(河宽、过水面积一样),可先整理成 $\alpha=\alpha(x, z)$ 作为基本原始资料。

水深计算采用二维浅水方程,即为:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hu}{\partial x} + \frac{\partial hv}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial hu}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(hu^2 + \frac{1}{2} gh^2 \right) + \frac{\partial huv}{\partial y} = s_x \quad (4)$$

$$\frac{\partial hv}{\partial t} + \frac{\partial huv}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \left(hv^2 + \frac{1}{2} gh^2 \right) = s_y \quad (5)$$

式中: h 为水深; u 为 x 方向的流速; v 为 y 方向的流速; g 为重力加速度; s_x 、 s_y 为源项,表达式为:

$$s_x = -\frac{h}{\rho} \frac{\partial p_a}{\partial x} - gh \frac{\partial z_b}{\partial x} + \frac{\tau_{ax} - \tau_{bx}}{h} + c_x \quad (6)$$

$$s_y = -\frac{h}{\rho} \frac{\partial p_a}{\partial y} - gh \frac{\partial z_b}{\partial y} + \frac{\tau_{ay} - \tau_{by}}{h} + c_y \quad (7)$$

式中: p_a 为水面大气压力; z_b 为床面底高程; τ_{ax} 、 τ_{ay} 为风载的作用力; c_x 、 c_y 为地转科氏力; τ_{bx} 、 τ_{by} 为河底阻力; ρ 为水体密度。

一二维模型水流交换均通过从源项中加入或扣除对应的交换水量实现。由于采用源项交换的方式,二维模型在交换边界上的网格边均设为固边界,即不过水边界,一维模型在此处无需作任何处理(喻海军等, 2018)。假设某时刻河道与二维区域通过侧向交换的流量为 Q_l ,采用堰流公式近似计算交换流量的方法为:

$$Q_l = \begin{cases} 0.35b_e h_{\max} \sqrt{2gh_{\max}} & \text{if } \frac{h_{\min}}{h_{\max}} \leq \frac{2}{3} \\ 0.91b_e h_{\min} \sqrt{2g(h_{\max} - h_{\min})} & \text{if } \frac{2}{3} < \frac{h_{\min}}{h_{\max}} \leq 1 \end{cases} \quad (8)$$

$h_{\max}$ 和 $h_{\min}$ 计算公式分别为:

$$h_{\max} = \max(Z_r, Z_c) - Z_e \quad (9)$$

$$h_{\min} = \min(Z_r, Z_c) - Z_e \quad (10)$$

式中: Z_r 和 Z_c 为堰上下游水位,分别取河道和二维网格单元的水位值; Z_e 为堰的高程,一般取河堤岸的高程; b_e 为堰的宽度,一般取单元格与河道相连边的边长。

2.2 ADCIRC 模型

ADCIRC 模型(The Advanced Circulation Model)是海洋、海岸、河口跨尺度区域的水动力计算的数学模型,主要基于有限元的浅水环流模型,能解决二维和三维随时间变化的自由地表环流和运输问题,目前被广泛应用于模拟潮汐和风驱动的循环、模拟风暴潮和洪水以及相关领域的近岸海上作业。二维 ADCIRC 模式主要是在笛卡尔直角坐标系下,采用沿水深积分的时均连续方程和运行方程进行水动力模拟。其中,水位由二维平均连续方程求解获得。ADCIRC 模式空间上采用有限元方法进行求解,计算网格采用三角形网格,易于拟合岸界;时间上采用有限差分方法。同时,为避免 Galerkin 有限元方法所带来的数值振荡、不守恒性等问题,ADCIRC 模式采用通用波动连续性方程 GWCE (Generalized Wave Continuity Equation) 代替原有

的连续性方程。采用该波动连续方程，在没有对流加速度的情况下，可对波长相当于2倍空间步长的短波产生阻尼作用，使得对长波的计算更精确；而且其对水位和速度的求解是自然解耦的，可顺次求解方程，即先解出水位，然后再求解流速。本文使用ADCIRC模型模拟风暴潮，包括数值稳定网格的建立，网格的可视化、Bathymetric数据的收集，参数的设置、以及ADCIRC模型的后处理。

3 结果分析

3.1 计算区域网格划分

针对入海口以上流域及河道，本文基于IFMS模型，首先采用飞云江河道255个实测横断面为基准（表1），构建一维河网模型（图2-b）。然后，利用IFMS网格剖分模块对河道外围风险区进行网格剖分（二维）。构建范围覆盖温州平原、瑞平平原、河道沿河重点城镇及防洪保护区。风险区域内部以高速公路、铁路和河流作为内部约束边界，网格平均尺寸控制在70 m左右，重点道路和地形起伏大的区域进行加密处理，局部最小网格尺寸30 m，共剖分了13.6万（珊溪水库—甬口段4.2万、赵山渡水库9.4万）个非结构四边形网格。此外，利用收集到的8 m地形数据进行网格高程插值，同时将堤防、高速公路、铁路设置成线形阻水建筑物在网格边元上予以考虑，以测量的实际高程作为阻水建筑物的高度，采用堰流公式计算（式8）建筑物两侧的过流量。

在沿海风暴潮模拟中，本文以距离温州海岸线500 km左右为计算边界，采用ADCIRC模型自带的方法对模拟区域进行预处理，随后通过自动插值将计算区域划分为分辨率由外海的9 km逐渐过渡到温州重点区域的100 m以内的非结构网格（图2-a），共计145 373网格。ADCIRC模型开边界上采用M2、S2、K1、O1、N2、S2、P1和Q1共8个分潮的调和常数预报的水位作为驱动。

3.2 风暴潮模型验证

针对2016年台风“鲇鱼”进行模型模拟，对比了感潮河段瑞安和近岸洞头2个潮位站点处的实测数据与模型的模拟结果。由图3可知，模拟潮位振幅和位相基本吻合，表示模

表1 飞云江河道实测横断面分布信息

Table 1 Actual cross-sectional distribution information of

Feiyun River channel				
流域	区段	河道长度/km	断面数/个	断面间距/m
飞云江	珊溪水库坝址至甬口	16.2	54	300
	文成花园桥至泗溪飞云江交汇口	11.9	43	300
	赵山渡水库坝址至入海口	67.1	79	1 000
	冯岙至金潮港飞云江交汇口	18.9	67	300
	林溪水库坝址—林溪金潮港交汇口	3.5	12	300

拟潮位变化过程与实测序列趋势基本一致。2个潮位站点处的洪峰最大误差均较小（表2），分别为0.24和0.03 m， <0.30 m。相应的纳什系数都 >0.80 ，即为0.88和0.89。综上，本文构建的模型能较好地反映高低潮位变化，且模拟结果和实测结果的偏差均在可接受范围内，能在此基础上进一步构建风暴潮模拟模型。然而，相较瑞安站潮水位模拟，洞头站点处模拟效果更准确，产生这种现象的主要原因是洞头位于宽阔海域不受上游河道来水影响，使得其水动力机理相对较为简单，而瑞安位于河口处，其不仅受到上游河道来水的影响，而且受下游风暴潮上溯的影响，其水动力机理更复杂。

3.3 2023年模型实时模拟结果

3.3.1 台风“杜苏芮”模拟结果 强台风杜苏芮（Doksuri）是2023年太平洋台风季第5个被命名的风暴，于2023-07-27携狂风暴雨以强台风级别登陆福建晋江沿海，主要影响福建和浙江2省，其中，浙江台州、温州地区出现大暴雨（100~200 mm），降雨持续到29号。为验证本文构建的模型在实时运行中能否有效地模拟受相互影响的感潮河段的洪水演进过程，分别对瑞安站、马屿站、碧山六桥、洞头的洪水模拟过程与实测过程进行对比。由图4可

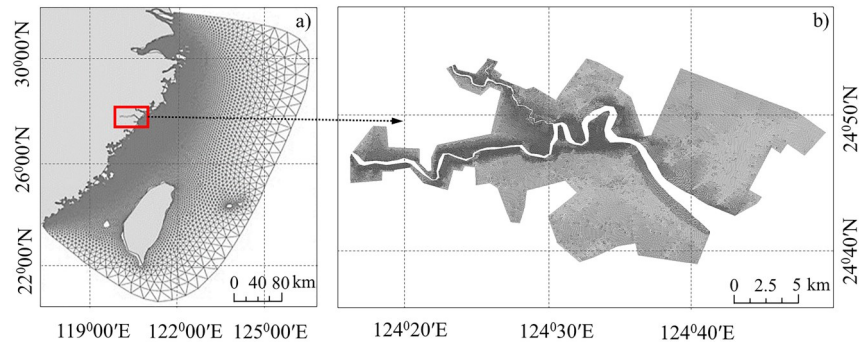


图2 飞云江网格地形图（a）及周边海域网格划分示意（b）

Fig.2 Grid topographic map of the Feiyun River (a) and grid division in surrounding sea areas (b)

知,该模型对于4个潮位点洪峰特征拟合度由高到低依次为瑞安、洞头、马屿站、碧山六桥,其纳什系数分别为0.98、0.97、0.87和0.83。相应的,洪峰最大误差分别为0.01、0.03和0.21和0.23 m,表示潮位部分模拟结果与实测值吻合度较高,其误差满足基本要求,验证结果具有可靠性。整个模型由上下游边界驱动而实现整个感潮河段的潮水位模拟。马屿靠近上边界,相较于碧山六桥,其受到上边界的影响较大,这亦可从二者的曲线波动中获知;然而,相较于瑞安站,碧山六桥处于上游,导致瑞安受到下游影响大于上游。综上可知,碧山六桥站点处受上游和下游相互作用较为复杂,导致碧山六桥的预报结果最差。

3.3.2 台风“卡努”模拟结果 超强台风卡努(Khanun)为2023年太平洋台风季第6个被命名的风暴,并于2023-08-01 T 17:00在距离浙江台州市东偏南方向约790 km的洋面上登陆,中心附近最大风力16级(52 m/s),维持超强台风级。气象部门预计,“卡努”将以10~15 km/h的速度向西偏北方向移动,强度维持或略有增强,于8月2日上午进入东海东南部海域,位于浙江省玉环市东偏南方向约610 km的东海海面上,中心附近最大风力有16级(52 m/s),中心最低气压为935 hPa,其中温州鹿城江心屿最高水位4.52 m,超过警戒水位0.50 m;灵昆最高水位4.31 m,超过警戒水位0.36 m;瑞安最高水位4.22 m,超过警戒水位0.37 m;平阳鳌江最高水位4.24 m,超过警戒水位0.39 m。

对瑞安、马屿、碧山六桥及洞头4个潮位站的洪水模拟过程与实测过程进行对比(图5),相应的模拟特性值见表3。对比模拟结果与实测系列可知,4个潮位站点处的洪峰最大误差分别为0.07、0.27和0.25和0.15 m,洪峰系列偏差均低于0.30,拟合匹配度较高,对应的纳什系数均高于0.90,分别为0.99、0.96、0.98和0.93,这也说明所构建的风暴潮模型在飞云江4个潮位站的模拟精度较

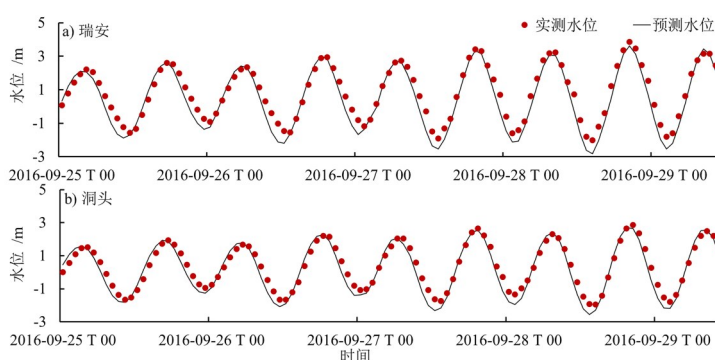


图3 2016-09-25—29瑞安站(a)、洞头站(b)
实时模拟和观测潮位对比

Fig.3 Real time simulation and observation of tidal levels at Ruian Station(a) and Dongtou Station (b) from September 25th-29th, 2016

表2 水位实测值与模拟值对比

Table 2 Comparison table between measured and simulated water level values

流域	河道断面	模拟参数	鲎鱼台风
飞云江	瑞安	洪峰最大误差/m	0.24
		纳什系数	0.88
	洞头	洪峰最大误差/m	0.03
		纳什系数	0.89

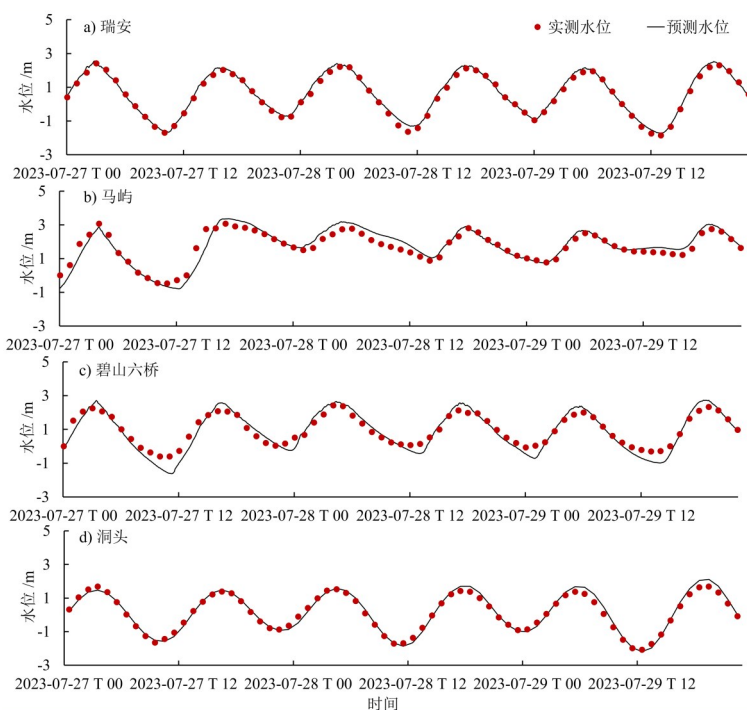


图4 2023年台风“杜苏芮”作用下4个潮位点模型
模拟值与观测值对比

Fig.4 Comparison between simulated and measured values of four tidal-level stations under the action of Typhoon Dussuri in 2023

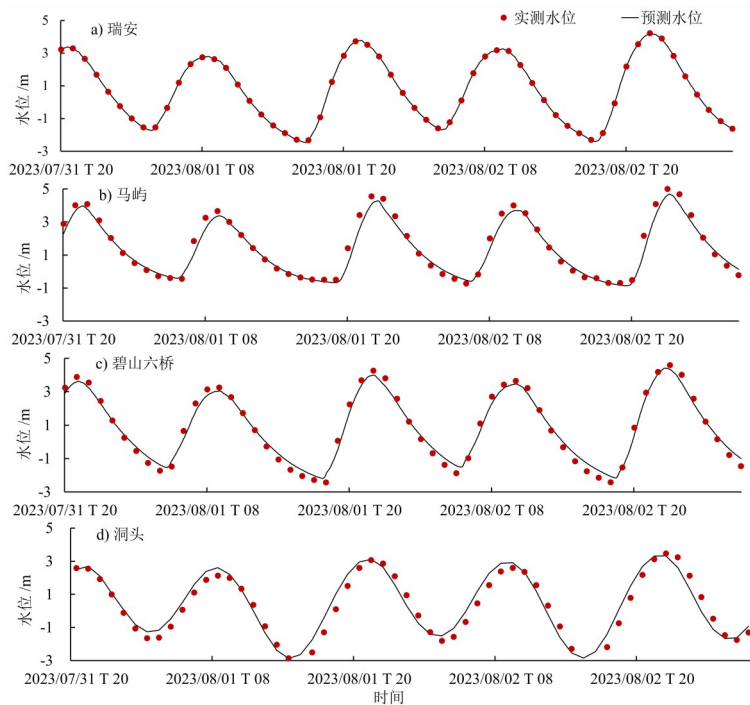


图5 2023年台风“卡努”作用下4个潮位点模型模拟值与观测值对比

Fig.5 Comparison between simulated and measured values of four tidal-level stations under the influence of Typhoon Kanu in 2023

高,能在其基础上对该地区进行洪水过程模拟。

由表3可知,“卡努”台风下的瑞安、马屿、碧山六桥3个站点潮水位预报效果(0.99、0.96、0.98)明显高于对“杜苏芮”的预报效果(0.98、0.87、0.83),而在洞头的预报效果相反。产生上述现象的主要原因有:相比“杜苏芮”(图6),“卡努”主要是影响感潮河段下边界及飞云江入海口周边海域,而“杜苏芮”则主要造成飞云江上游流域出现100~200 mm降雨,说明上边界的作用对感潮河段的影响比下边界的强,且相较于马屿站、碧山六桥站,瑞安站受上边界的影响明显较低,致使其

在两场台风的模拟效果都较好,分别为0.98和0.99。

4 讨论

综上可知,上、下游边界的驱动作用直接影响感潮河段3个站点(瑞安、马屿、碧山六桥)的潮水位。为进一步分析上、下游边界对感潮河段各个站点潮位的影响,分别设计了12个方案(表4)。

以卡努台风为基础,利用本文耦合的感潮河段水力模型分别对上述12个方案进行模拟,可得相应的模拟结果(图7)。结果显示,上边界的变化对3个站的影响程度从大到小分别为马屿、碧山六桥、瑞安。主要表现为低潮位变化较大,高潮位变化相对较小。特别是在马屿站,当上边界在 $[-30\%, 30\%]$ 波动时,最大低潮位变幅可达0.60 m,而高潮位的变幅整体保持在0.15 m。相比马屿站和碧山六桥站,上边界对瑞安的影响基本可忽视,说明在“卡努”作用

下,上边界误差对瑞安的预报误差可忽略不计。下边界的变化对3个站的影响程度从大到小分别为瑞安、碧山六桥、马屿。与上边界变化相比,下边界对3个站的影响整体较大,如图8所示,如果下边界偏大,会导致低潮位偏小,高潮位偏大;反之亦然。此外,当下边界变化相同幅度时,低潮位的变化幅度,呈现下游往上游降低的趋势,而高潮位的变化幅度三者之间虽然有相同的趋势,但三者之间的差距不明显。综上可知,相比上边界,下边界对3个站点的潮水位预报影响较大。因此,在对模型进行修正提升预报精度的过程中,需考虑如何有效地提升下边界模型的精度。

5 结论

本文通过耦合IFMS模型和ADCIRC模型,构建了感潮河段洪水演进模型,实现了复合洪水灾害情况下,飞云江河口处感潮河段水位的模拟。得到以下主要结论:

1) 针对2016年台风“鲇鱼”风暴潮,模拟了瑞安、灵昆和近岸洞头3个潮位站点处的洪水演进过程。通过潮水位变化过程进行验证,表明模型能较好地反映高低潮位变化,其误差满足基本要求,

表3 水位实测值与模拟值对比

Table 3 Comparison table between measured and simulated water

		level values	
流域	河道断面	模拟参数	杜苏芮台风卡努台风
飞云江	瑞安	洪峰最大误差/m	0.01 0.07
		纳什系数	0.98 0.99
	马屿	洪峰最大误差/m	0.23 0.27
		纳什系数	0.87 0.96
	碧山六桥	洪峰最大误差/m	0.21 0.25
		纳什系数	0.83 0.95
	洞头	洪峰最大误差/m	0.03 0.15
		纳什系数	0.97 0.93

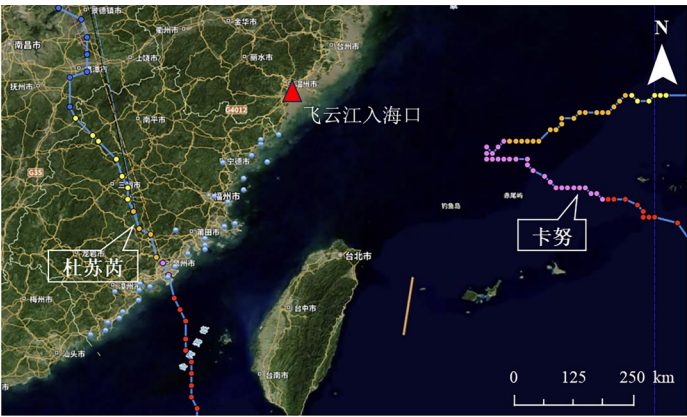


图6 “杜苏芮”与“卡努”台风路径
Fig.6 Track of Typhoon Dussuri and Typhoon Kanu

表4 方案设置

Table 4 Scenario configuration

方案ID	方案设置
T1	上边界降低 30%,下边界不变
T2	上边界降低 20%,下边界不变
T3	上边界降低 10%,下边界不变
T4	上边界增加 10%,下边界不变
T5	上边界增加 20%,下边界不变
T6	上边界增加 30%,下边界不变
T7	上边界不变,下边界降低 30%
T8	上边界不变,下边界降低 20%
T9	上边界不变,下边界降低 10%
T10	上边界不变,下边界增加 10%
T11	上边界不变,下边界增加 20%
T12	上边界不变,下边界增加 30%

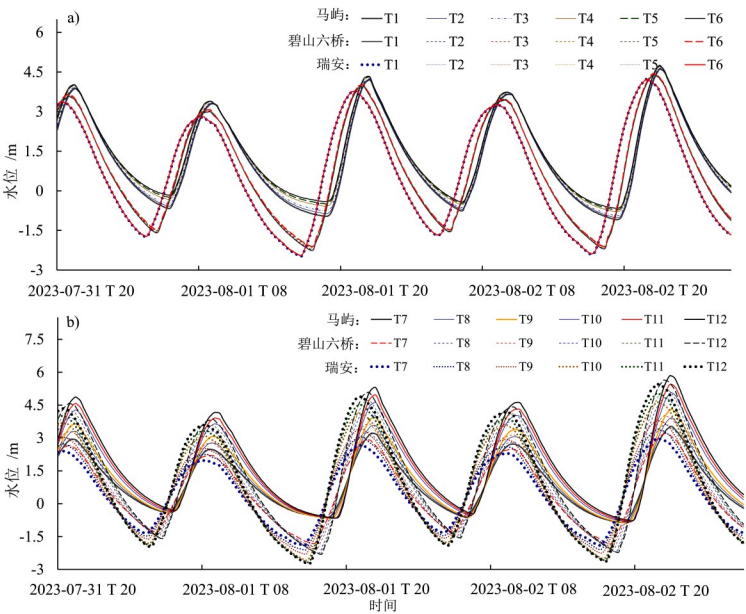


图7 方案集结果 (a. 上边界波动, 下边界不变;
b. 上边界不变, 下边界波动)

Fig.7 Display of Simulation Results for the Scenario Set with Fluctuating
Upper Boundary and Constant Lower Boundary

能在其基础上对该地区进行洪水过程模拟。

2) 分别对台风“杜苏芮”和“卡努”影响下的瑞安、马屿、碧山六桥及洞头4个潮位站的洪水过程进行模拟。4个站点的洪峰误差值均低于0.30 m, 纳什系数大于0.80。表明模型模拟结果与实测系列吻合度较高, 具有一定可靠性, 可为沿海城市化地区感潮河段洪水模拟提供一种新方法。

3) 相比于上边界, 下边界对3个站点的潮水位预报影响较大。当下边界变化相同幅度时, 低潮位的变化幅度, 呈现下游往上游降低的趋势, 而高潮位的变化幅度三者之间虽然有相同的趋势, 但三者之间的差距不明显。因此, 在对模型进行修正提升预报精度的过程中, 需考虑如何有效地提升下边界模型的精度。

本文提供了一个针对温州飞云江感潮河段的台风风暴潮与上游洪水耦合作用的洪水模拟模型, 模型预报精度得到验证, 可帮助当地政府和相关部门评估河口潮汐和洪水带来的潜在风险, 为防灾减灾提供科学依据。然而, 本文未从机理的角度对该感潮河段淹没进行多角度分析, 无法直接有效地服务于上游水库的防洪优化调度中。因此, 如何结合该模型, 探究感潮河段洪水淹没机理, 实现上游水库与下游感潮河段有效结合是未来研究的重点。

参考文献 (References):

Bacopoulos Peter, Tang Yin, Wang Dingbao, and Hagen Scott C. 2017. Integrated Hydrologic-Hydrodynamic Modeling of Estuarine-Riverine Flooding: 2008 Tropical Storm Fay. *Journal of Hydrologic Engineering*, 22(8): 04017022. DOI: 10.1061/(asce)he.1943-5584.0001539.

Bush Ssmuel T, Dresback Kendra M, Szpilka Christine M, and Kolar Randall L. 2022. Use of 1D Unsteady HEC-RAS in a Coupled System for Compound Flood Modeling: North Carolina Case Study. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(3): 306. DOI: 10.3390/jmse10030306.

丁峰, 胡凤彬, 周建林, 张金伦, 李国芳. 2005. 径流的河口潮位预报方法研究. *现代交通技术*, 3 (2): 74-77. [Ding Feng, Hu Fengbin, Zhou Jianlin, Zhang Jinlun, and Li Guofang. 2005. Research on Estuary Tidal Level Prediction Method for Runoff. *Modern*

- Transportation Technology*, 3(2): 74-77.]
- Hoch Jannis M, Haag Arjen V, van Dam Arthur, Winsemius Hessel C, van Beek Ludovic P H, and Bierkens Marc F P. 2017. Assessing the Impact of Hydrodynamics on Large-Scale Flood Wave Propagation—a Case Study for the Amazon Basin. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(1): 117-132. DOI: 10. 5194/hess-21-117-2017.
- 黄国如, 芮孝芳. 2003. 河道洪水演算的径向基函数神经网络模型. 河海大学学报 (自然科学版), 31 (6): 621-625. [Huang Guoru and Rui Xiaofang. 2003. Radial Basis Function Neural Network Model for River Flood Routing. *Journal of Hohai University (Natural Science Edition)*, 31(6): 621-625.]
- Li Xianghu, Ye Xuchun, Yuan Canyu, and Xu Chengyu. 2023. Can Water Release from Local Reservoirs Cope With the Droughts of Downstream Lake in a Large River-Lake System? *Journal of Hydrology*, 625: 1:20. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2023.130172.
- 梁连松, 张钊, 顾冬明, 张福星, 韩小燕. 2020. 典型路径下台风移速调整对鳌江站增水的数值分析. 海洋预报, 37 (5): 59-66. [Liang Liansong, Zhang Zhao, Gu Dongming, Zhang Fuxing, and Han Xiaoyan. 2020. Numerical Analysis of Typhoon's Moving Speed Adjustment Influence on Storm Surge of Aojiang Station under Typical Route. *Marine Forecasts*, 37(5): 59-66.]
- 刘士诚, 陈永平, 谭亚, 于茜倩, 马经广. 2021. 珠江河网 1822 号台风“山竹”期间风暴增水模拟及特性分析. 海洋预报, 38 (2): 12-20. [Liu Shicheng, Chen Yongping, Tan Ya, Yu Qianqian, and Ma Jingguang. 2021. Storm Surge Simulation and Characteristic Analysis during Typhoon "Mangkhu" 2018 in the Pearl River Estuary. *Marine Forecasts*, 38(2): 12-20.]
- 卢美. 2013. 浙江海岸台风风暴潮漫堤风险评估研究. 杭州: 浙江大学. [Lu Mei. 2013. Research on Risk Assessment of Typhoon Storm Surge Overflow on Zhejiang Coast. Hangzhou: Zhejiang University.]
- 罗志发, 谭超, 黄本胜, 邱静, 黄广灵. 2022. 珠江河口风暴潮对径流的敏感性研究: 以台风“山竹”为例. 热带气象学报, 38 (4): 521-528. [Luo Zhifa, Tan Chao, Huang Bensheng, Qiu Jing, and Huang Guangling. 2022. Effect of Runoff on Storm Surge in Pearl River Estuary. *Journal of Tropical Meteorology*, 38(4): 521-528. DOI: 10.16032/j.issn.1004-4965.2022.047.]
- Moftakhari Hamed R, Salvadori Gianfausto, AghaKouchak Amir, Sanders Brett F, and Matthew Richard A. 2017. Compounding Effects of Sea Level Rise and Fluvial Flooding. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 114(37): 9785-9790.
- Pringle William J, Wirasat Damrongsak, Roberts Keith J, and Westerink Joannes J. 2021. Global Storm Tide Modeling with ADCIRC v55: Unstructured Mesh Design and Performance. *Geoscientific Model Development*, 14: 1125 - 1145.
- 戚蓝, 杨龙晏, 苑希民, 田福昌. 2016. 三亚市雨、洪、潮多元耦合精细化洪涝分析数值模型. 水资源与水工程学报, 27(5): 123-129. [Qi Lan, Yang Longyan, Yuan Ximin, and Tian Fuchang. 2016. A Numerical Model for Fine Coupled Flood and Waterlogging Analysis of Rain, Flood, and Tide in Sanya City. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 27(5): 123-129.]
- 芮孝芳. 1990. 感潮河段洪水演算方法的探讨. 水利水电技术, (11): 18-24. [Rui Xiaofang. 1990. Discussion on Flood Routing Methods for Tidal River Sections. *Water Conservancy and Hydropower Technology*, (11): 18-24.]
- Tsai C and Lee T L. 1990. Back-Propagation Neural Network in Tidal-Level Forecasting. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 125(4): 195-202.
- 王甜甜, 刘强. 2018. 基于 BAS-BP 模型的风暴潮灾害损失预测. 海洋环境科学, 37 (3): 457-463. [Wang tiantian and Liu Qiang. 2018. Prediction of Storm Surge Disaster Losses Based on BAS-BP Model. *Marine Environmental Science*, 37(3): 457-463.]
- 王晓玲, 孙宜超, 陈华鸿, 杨丽美, 孙蕊蕊. 2011. 基于 VOF 法的风暴潮洪水演进三维数值模拟. 中国工程科学, 13 (12): 56-62. [Wang Xiaoling, Sun Yichao, Chen Huahong, Yang Limei, and Sun Ruirui. 2011. Three Dimensional Numerical Simulation of Storm Surge Flood Evolution Based on VOF Method. *Chinese Engineering Science*, 13(12): 56-62.]
- 夏明嫣, 徐福敏, 闻云呈. 2022. 不同路径台风作用下长江下游沿线风暴增水分布研究. 海洋工程, 40 (3): 115-122. [Xia Mingyan, Xu Fumin, and Wen Yuncheng. 2022. Study of Storm Surge Distribution along the Yangtze River and Estuary under Different Typhoon Tracks. *The Ocean Engineering*, 40(3): 115-122. DOI: 10.16483/j.issn.1005-9865.2022.03.013.]
- 许辉. 2021. 温州三江口围垦对周边海域水动力环境影响的数值模拟分析. 大连: 大连理工大学. [Xu Hui. 2021. Numerical Study on the Impact of Sanjiangkou Reclamation in Wenzhou on Coastal Hydrodynamics. Dalian: Dalian University of Technology. DOI: 10.26991/d.cnki.gdllu.2020.002488.]
- Ye Yong, Zhang Jilin, Liu Huimin, and Zhu Weikun. 2023. Predictive Simulation Study on the Effect of Small and Medium River Basin Outfall Treatment Measures on Water Quality Improvement. *Water*, 15(13): 2359. DOI: 10.3390/w15132359.
- 喻海军, 马建明, 张大伟, 穆杰. 2018. IFMS Urban 软件在城市洪水风险图编制中的应用. 中国防汛抗旱, 28 (7): 13-17. [Yu Haijun, Ma Jianming, Zhang Dawei, and Mu Jie. 2018. Application of IFMS Urban Software in Urban Flood Risk Mapping. *China Flood & Drought Management*, 28(7): 13-17.]
- 祝中昊. 2000. 长江镇扬河段潮位预报相应水位法的改进. 水文, (S1): 32-35. [Zhu Zhonghao. 2000. Improvement of the Corresponding Water Level Method for Tidal Level Prediction in the Yangtze River Zhenyang Section. *Hydrology*, (S1): 32-35.]

作者贡献声明:

魏国振: 论文撰写、案例调研、模型设计与构建;

任明磊: 论文设计、经费支持;

孙琳: 部分模型构建、数据整理;

夏昌志: 经费支持、数据收集;

陈智洋: 数据整理、核对校稿;

尤再进: 论文初始设计、论文修改。

Simulation Study of Tidal Water Levels in Tidal Reach of the Wenzhou's Feiyun River under Coupled Influence of Typhoon Storm Surges and Upstream Floods

Wei Guozhen^{1,2}, Ren Minglei^{1,3}, Sun Lin¹, Xia Zhichang⁴, Chen Zhiyang⁴, and You Zaijin²

(1. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Research Center on Flood and Drought Disaster Prevention and Reduction of the Ministry of Water Resources, Beijing 100038, China; 2. Center for Ports and Maritime Safety, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China;

3. Key Laboratory of Water Security Guarantee in the Beijing-Tianjin-Hebei Region, Ministry of Water Resources, Beijing 100038, China;

4. Wenzhou Water and Drought Disaster Prevention Center, Wenzhou 325000, China)

Abstract: Against the backdrop of rapid global climate change, the frequency and severity of storm surges in coastal areas are increasing, particularly in tidal river segments that are affected by storm surges and upstream river flooding. Although existing storm surge models have introduced a variety of different boundary settings, the boundary conditions provided are limited and cannot meet the current generalization needs of complex hydraulic engineering projects in China. This study considered the Feiyun River Basin as the research subject and coupled the upstream hydrodynamic model IFMS with the oceanic storm surge model ADCIRC. By utilizing the strengths of both models, a flood evolution model for the estuarine tidal river segment was established, enabling the spatiotemporal simulation of tidal levels in the Feiyun River tidal segment. The model not only effectively considers the impact of storm surge propagation at the estuary on flood evolution in the tidal river segment, but also the effect of upstream river flooding on the area. The study first validated the model with Typhoon Meranti in 2016, where the simulation results showed a high degree of agreement with the observed data series and errors were within acceptable limits. Flood processes at the Ruian, Mayu, Bishan Liqiao, and Dongtou tidal stations during Typhoons Doksuri and Khanun were simulated. The results show that the peak flood errors at all four stations were below 0.30 m, with Nash coefficients >0.80 , indicating the model's capability to accurately reflect tidal level fluctuations and effectively contribute to disaster prevention and mitigation efforts in estuarine tidal segments. Finally, the study analyzed the impact of the driving forces of the upstream and downstream boundaries on tidal level predictions at three stations (Ruian, Mayu, and Bishan Liqiao). It was concluded that, compared to Mayu and Bishan Liqiao stations, the influence of the upstream boundary on Ruian can essentially be ignored, suggesting that the error from the upstream boundary under the influence of Typhoon Khanun is negligible for predicting errors at Ruian. The degree of the impact of the downstream boundary fluctuations on the three stations, from largest to smallest, was Ruian, Bishan Liqiao, and Mayu. Compared to the changes in the upstream boundary, the downstream boundary had a greater overall impact on all three stations. Additionally, when the downstream boundary changed by the same magnitude, the variation in low tide levels showed a decreasing trend from downstream to upstream, whereas the variation in high tide levels, although following the same trend, did not show a significant difference between the three. In summary, compared to the upstream boundary, the downstream boundary had a greater impact on tidal-level predictions at the three stations. The result shows that the lower boundary has a greater impact on the tidal level forecasts at three stations compared to the upper boundary. The study not only provides a new method for tidal river flood simulation in coastal urbanized areas but also offers directions for improving model simulation accuracy through analysis.

Keywords: tidal river; hydrodynamic model; storm surge model; upstream river flooding; tidal level simulation