

文章编号:1005-9865(2022)03-0115-08

不同路径台风作用下长江下游沿线风暴增水分布研究

夏明嫣^{1,2}, 徐福敏¹, 闻云呈²

(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. 南京水利科学研究所, 江苏 南京 210029)

摘 要:长江口受台风影响严重, 台风风暴潮、上游洪峰及天文大潮相遇将致使长江下游至长江口水位暴涨, 对沿岸至河口的防汛安全构成严重威胁。基于 ADCIRC 模型构建东中国海至长江口风暴潮数学模型, 模拟 9711 号台风和 0012 号台风两场典型台风水位过程。以典型台风为基础构成多种台风路径, 分析不同登陆位置和走向对长江沿线风暴增水影响。研究大洪水、不同路径台风、天文大潮共同影响下长江下游沿线风暴增水分布规律。结果表明: 登陆位置处于长江口南侧情况下长江河道沿线增水大于正面登陆长江口和北侧登陆型台风; 平行于长江河道方向移动的台风造成沿线增水大于斜向穿越长江口的台风, 不同台风走向对于风暴增水影响程度小于登陆位置; 台风风暴潮、上游洪峰及天文大潮“三碰头”情形下长江沿线增水分布呈单峰型, 从大通至江阴不断增大, 江阴至中浚维持高位, 中浚至口外迅速减小。

关键词:长江口; ADCIRC; 台风; 风暴潮; 径流; 天文潮; 极端高水位

中图分类号:TV148 **文献标志码:**A **DOI:**10.16483/j.issn.1005-9865.2022.03.013

Study of storm surge distribution along the Yangtze River and Estuary under different typhoon tracks

XIA Mingyan^{1,2}, XU Fumin¹, WEN Yuncheng²

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Coastal Disaster and Protection, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: The Yangtze Estuary is among the areas most vulnerable to typhoon, the encounter of typhoon-induced storm surge, upstream runoff and astronomical high tide combine to cause extremely high water level along the Yangtze River, posing a big threat to the lower reaches of Yangtze River and Estuary in terms of flood prevention. Based on the advanced circulation (ADCIRC) model, a storm surge model from Datong station to the East China Sea is established. Typical hypothetical typhoons with different landing locations and moving directions are constructed, based on Typhoon 9711 and typhoon 0012, the influences of typhoon tracks on storm surge are studied. Distribution of storm surge under different typhoon tracks along the Yangtze River are analyzed, under the combinations of extreme typhoon storm surges, maximum runoff and high astronomical tides. The results show that typhoons landing on the southern end of Yangtze Estuary generate the larger surge than typhoons landing on the Yangtze estuary directly or on its northern side; typhoons moving westward after landing tend to generate larger surge than typhoons moving northward; the influence of moving direction is smaller than land location. The storm surge induced by the combined impact of runoff, offshore astronomical tides and storm surges are distributed in a hump-like way from Datong to the estuary area, increase from Datong to Jiangyin section, change a little between Jiangyin and Zhongjun, then decrease in below Zhongjun downwards.

Keywords: Yangtze Estuary; ADCIRC; typhoon; storm surge; runoff; astronomical tide; extreme water level

收稿日期:2022-03-10

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2021YFC3000100);国家自然科学基金项目(51920105013)

作者简介:夏明嫣(1996-),女,江苏南京人,硕士研究生,主要从事河口海岸水动力研究。E-mail:MY-xia@outlook.com

长江口是我国受台风影响的高风险区,平均每年遭受 2.8 个台风风暴袭击。台风期间,受较强向岸风的影响,潮位急剧增大,极易引发漫、溃堤灾害。同时,长江下游感潮河段是河流和海洋相互作用的集中交汇区,汛期常承接上游由暴雨形成的洪水,洪峰与台风风暴潮及天文大潮“三碰头”,致使长江下游水位暴涨,给沿线各地的防汛安全构成了严重威胁。

将风暴潮数学模型应用于长江口风暴增水的研究历来受到关注。端义宏和秦曾灏^[1]基于 ECOM 研究了天文潮与风暴潮之间的非线性作用对上海地区风暴增水的影响。张金善等^[2]分析了感潮河段增水特征,研究发现最大增水位置受上游洪水和天文潮共同影响。赵长进等^[3]基于 ADCIRC-SWAN 波流耦合模型建立了覆盖长江口与邻近海区的风暴潮预报系统,发现向岸东南向风风速和持续时间的准确性对提高长江口风暴潮模拟精度至关重要。刘秋兴和李铖^[4]基于 ADCIRC 分析了不同径流量条件下长江口地区高水位的变化。罗龙洪等^[5]利用大通至长江口二维水沙模型和外海风暴潮模型分析了新水情下河床冲淤变化、风暴增水、支流入汇及规划工程对长江江苏段洪潮设计水位的影响。已有学者开展不同台风路径对长江口门区域风暴增水影响。王军等^[6]采用 MIKE21 模拟比较了 32°和 75°的两种路径偏转角台风作用下上海地区的淹没情况,发现 75°路径台风可能引起较大淹没。白一冰等^[7]和周才扬等^[8]分别分析了登陆西向型台风“烟花”和登陆北向型台风“安比”在长江口地区的增水分布特征。Yin 等^[9]比较了直接登陆长江口和外海活动北上两种类型台风的增水特点。目前针对不同路径台风下增水研究重点集中在口门及南北支河段,但缺乏更深入探讨不同登陆位置、走向的台风风暴潮在河道内传播过程及造成增水量值和范围差异机理的研究。

尽管有关长江口风暴增水的研究历来是防汛部门和海洋工程设计单位研究的热点,但关注点聚焦在口门附近区域。因此,文中建立东中国海至长江口风暴潮数学模型,关注在大洪水、不同路径强台风、天文大潮共同影响下长江沿线的增水分布,可为防洪规划、河道治理及防灾减灾提供参考。

1 驱动风场

1.1 驱动风场构建方法

研究采用将背景风压场与台风梯度模型相结合的办法构建风压场。基于分辨率和精度的考虑,选用欧洲中尺度天气预报中心全球大气再分析数据 ERA-interim^[10]作为背景风压场资料。同时利用 Holland 经验性气旋模型^[11]加强台风内部风速。梯度风场的公式为:

$$V_g(r) = \left[(p_n - p_c) \frac{B}{\rho_a} \left(\frac{R_{\max}}{r} \right)^B \exp \left(- \frac{R_{\max}}{r} \right)^B + \left(\frac{rf}{2} \right) \right]^{1/2} - \frac{rf}{2} \quad (1)$$

$$B = \frac{V_{\max}^2 \rho_a e}{p_n - p_c} \quad (2)$$

$$R_{\max} = 28.52 \tanh [0.0873(\varphi - 28)] + 12.22 e^{\left(\frac{p_c - 1013.2}{33.06} \right)} + 0.2V + 33.72 \quad (3)$$

其中, V_g 表示梯度风速, r 为计算点距台风中心距离, B 是形状参数, p_n 和 p_c 分别是环境压力和气旋中央压力, R_{\max} 为最大风速半径, f 是科氏力参数, ρ_a 表示空气密度。式中形状系数 B 和最大风速半径 R_{\max} 分别通过经验公式(2)和公式(3)计算, φ 是纬度, V_{\max} 为最大风速, V 为台风移行风速,可通过台风路径信息获得。

研究采用陈孔沫^[12]提出的移行风场模型计算移行风速 V_t ,公式为:

$$V_t(r) = V_s \frac{3R_{\max}^{3/2} r^{3/2}}{R_{\max}^{3/2} + r^3 + R_{\max}^{3/2} r^{3/2}} \quad (4)$$

台风的模型风场由梯度风场和移行风场叠加获得:

$$V_M = c_1 V_g \begin{bmatrix} -\sin(\theta + \beta) \\ \cos(\theta + \beta) \end{bmatrix} + c_2 V_t \quad (5)$$

$$\beta = \begin{cases} 10r/R_{\max} & 0 \leq r \leq R_{\max} \\ 10 + 75(r/R_{\max} - 1) & R_{\max} < r \leq 1.2R_{\max} \\ 25 & r > 1.2R_{\max} \end{cases} \quad (6)$$

式中: V_g 为梯度风场; V_t 为移行风场; c_1 和 c_2 是订正系数; θ 是计算点到台风眼的连线和经度之间的夹角; β

代表流入角。

背景风场和台风模型采用式(7)合成:

$$V_c = V_M(1 - e) + eV_Q \quad (7)$$

式中: V_Q 为背景风场; V_M 为模型风场; e 为权重系数。

1.2 风场验证

9711 号台风“温妮”(以下简称 9711 号台风)是目前对长江下游沿线影响最大的台风,下游江阴、徐六泾、吴淞等站水位均为历史最高值。0012 号台风“派比安”(以下简称 0012 号台风)是近年来对长江口影响较大的外海活动型台风。分别选择 9711 号台风和 0012 号台风为登陆型和外海活动型典型台风进行模拟验证。研究所用台风路径和强度数据来自中国气象局热带气旋资料中心所提供的最佳路径数据集 (<http://tcdata.typhoon.org.cn/>)^[13]。首先利用 9711 号台风期间的吕四站实测风速、风向资料验证 1997 年 8 月 8 日至 8 月 21 日风场模型可靠性,台风路径及验证点见图 1。

如图 2 所示,8 月 8 日至 8 月 16 日台风尚未进入东中国海,ERA-interim 风场数据能够较为真实地反映实际风速及风向;8 月 17 日至 8 月 21 日 9711 号台风期间基于 ERA-interim 风场和 Holland 气旋模型的合成风场在吕四站风速、风向与实测值均吻合良好。

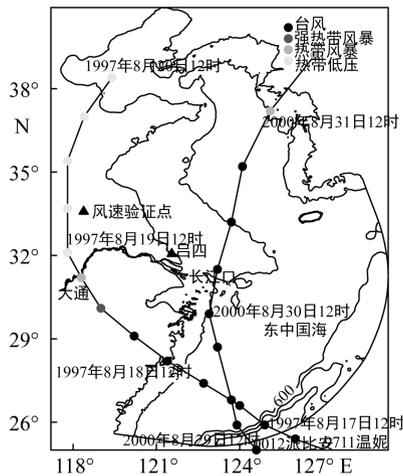


图 1 9711 号台风与 0012 号台风路径及验证点

Fig. 1 Track of Typhoon 9711 and Typhoon 0012 and observation stations

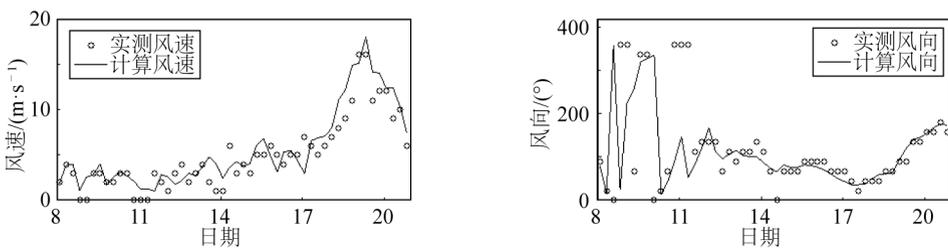


图 2 1997 年 8 月 8 日至 21 日吕四站风速、风向验证

Fig. 2 Validation of wind speed and direction from Aug. 8 to Aug. 21, 1997 at Lusi station

2 东中国海至长江口风暴潮数值模型

2.1 模型设置

研究区域为大通至长江口外,上游以大通为流量边界。ADCIRC 模型范围包括整个东中国海,共有三角网格结点 98 124 个,单元 184 573 个。模型采用 2012 年实测水下地形与全球海洋陆地高程数据 ETOPO1^[14] 拼接而成,局部区域利用海图修正,并将高程基面统一至 85 基面。模型的计算域和研究区域的网格及水深见图 3。外海天文潮由 TPX07.2 模型^[15] 计算。

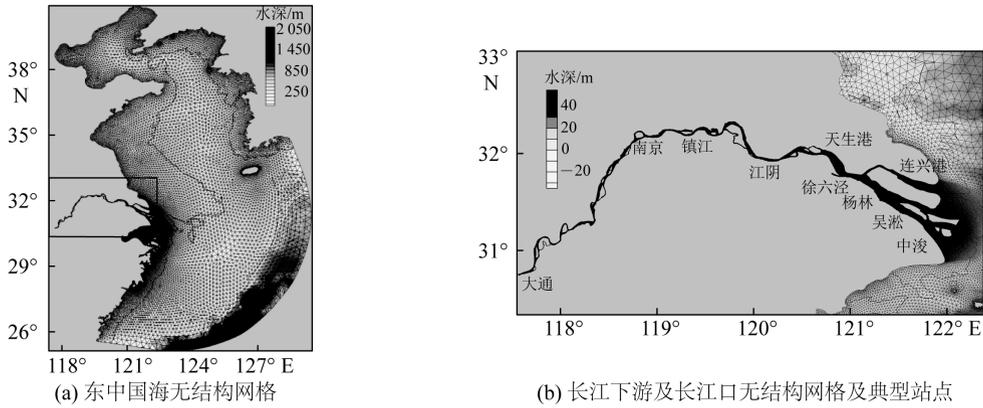


图3 东中国海和长江下游及长江口的计算网格及典型站点

Fig. 3 Unstructured grids of the ADCIRC simulation in the East China Sea, Yangtze River and Estuary together with typical stations along the Yangtze River

2.2 台风期间总水位验证

利用1997年8月18日至19日9711号台风、2000年8月28日至8月31日0012号台风期间长江沿线六站实测水位数据对台风期间总水位进行了验证(图4,验证点位置见图1和图3(b))。由图4可见模拟的台风期间水位过程与实测结果吻合良好,表明模型采用的边界条件、风场数据、模型设置及参数合理。

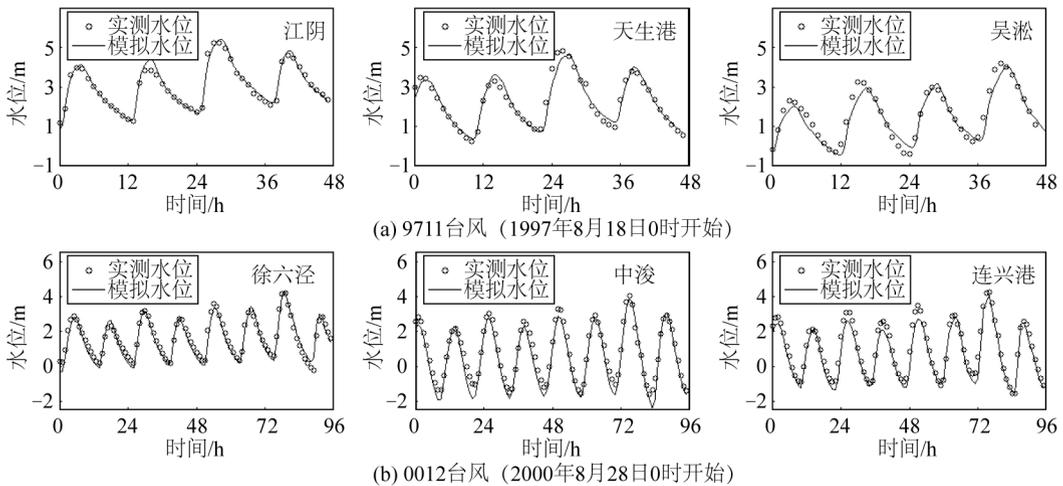


图4 9711台风和0012台风期间水位验证

Fig. 4 Validation of water levels during Typhoon 9711 and Typhoon 0012

3 大洪水与强台风相遇情境下长江下游风暴水位特性分析

风暴水位与台风路径、台风强度、上游径流大小、天文潮与风暴潮的遭遇时刻等多种因素有关。为探究极端情境下台风路径对风暴水位的直接影响,先不考虑天文潮,在上游大洪水与不同路径台风相遇情境下研究不同登陆位置和走向台风对长江下游沿线风暴水位影响,分析造成增水差异的原因。上游流量设置为二十年一遇洪峰流量 $82\ 630\ \text{m}^3/\text{s}$ 。

3.1 典型台风构建

9711号台风强度高、范围大、移速适中,且由于其平行长江口的移动方向易在长江沿线造成较大增水,故研究以9711号台风为基础设计登陆型台风路径。将9711台风路径登陆位置平移至长江口附近,构成路径A1~A7(以下简称登陆西向型),涵盖与长江口平行的走向在长江口南侧登陆(A1~A3)、长江口正面登陆(A4,A5)及北侧登陆(A6,A7)台风的情况。再将9711号台风路径旋转,使其以与1909号台风和2004号台风类似的走向斜向穿越长江口,构成一组与A1至A4登陆位置相同并北上斜向穿越长江口的路径B1至B4(以下简称登陆北向型)。

0012 号台风为典型的外海活动型台风,范围较大,造成长江沿线较大增水,研究选取 0012 号台风为基础设计外海活动型台风路径。将 0012 号台风路径平移,构成假想路径 C1 至 C6,使路径尽可能接近长江口,所有台风路径见图 5。

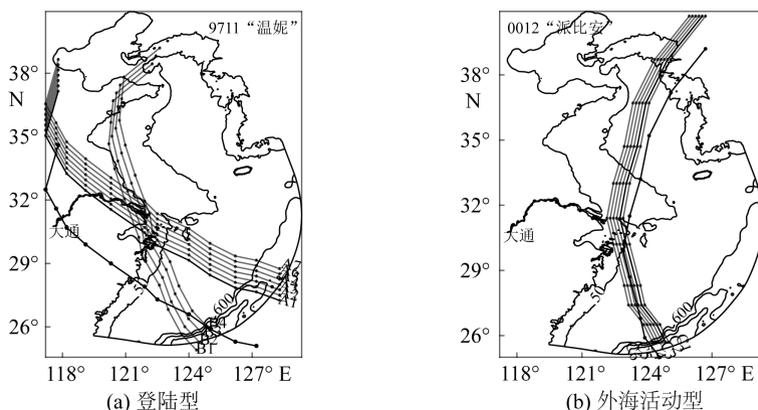


图 5 登陆型、外海活动型假想台风路径

Fig. 5 Designed tracks of the landing typhoons and the offshore northward typhoons

研究使用中心最低气压作为台风强度的基础。分别统计 1970—2020 年影响长江口海区的台风 24 h 警戒线内及接近长江口地区时刻的最低中心气压,并根据风压关系经验公式推算最大风速。选取 5 年一遇强度台风,进入 24 h 警戒线内的最低中心气压 945 hPa,最大风速 50 m/s,为强台风。距离长江口最近时刻中心气压 965 hPa,风速 37 m/s,台风强度与 9711 台风较为接近。

3.2 不同台风路径对长江下游沿线风暴水位影响

20 年一遇洪水与 5 年一遇强度不同路径台风相遇情境下长江沿线江阴、徐六泾及吴淞高水位见图 6。

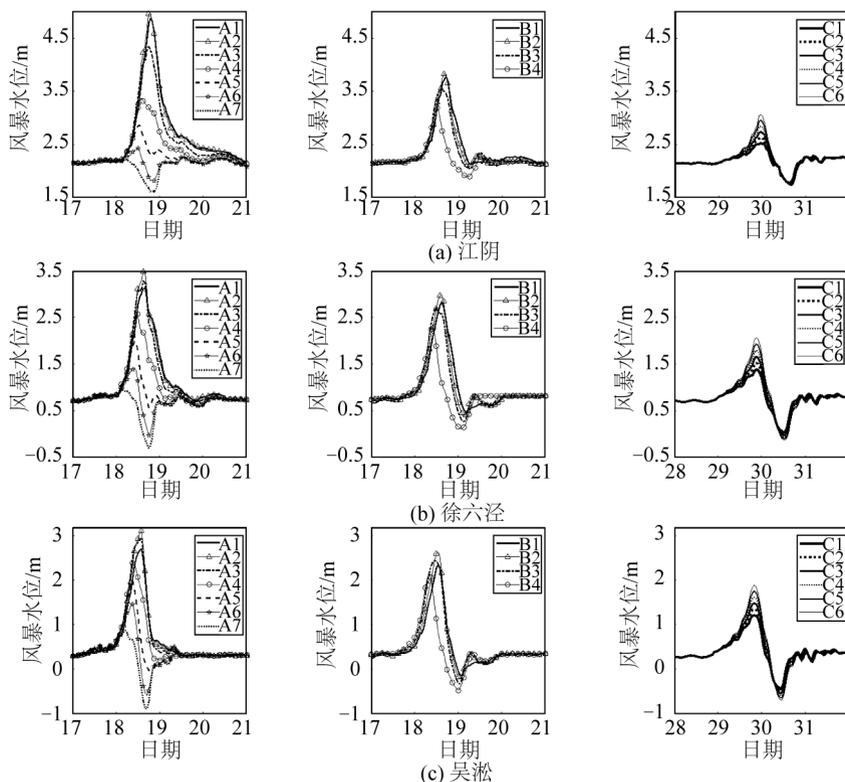


图 6 不同台风路径下长江下游江阴,徐六泾,吴淞风暴水位过程(A1~A7 为登陆西向型,B1~B4 为登陆北向型,C1~C6 为外海活动型)

Fig. 6 Time series of surge levels of typhoons with different paths at Jiangyin, Xuliujing and Wusong station (A1~A7 are the typhoons moving westward after landing, B1~B4 are the typhoons moving northward after landing, C1~C6 are the offshore northward typhoons)

在台风到来前水位仅受上游径流影响,为洪水位。由图 6 可见长江沿线洪水位沿程降低,洪水影响从上游至口门处不断减小。在台风到来后的水位增幅即为风暴增水。

由图 6 可见,对于登陆型台风,登陆位置会对长江沿线风暴增水造成较大影响。长江口南侧登陆型 A1~A3、B1~B3 路径台风造成长江河道沿线增水大于正面登陆长江口 A4~A5 和北侧登陆型 A6~A7 台风。在南侧登陆并平行长江口轴线方向移动的台风会在长江沿线造成较大的增水,北侧登陆型台风作用下长江口口门附近区域会出现明显减水。同时,对于登陆位置相同台风走向不同的情况,平行于长江河道方向西北向移动的 A1~A3 路径台风造成沿线增水大于北上穿越长江口路径 B1~B3 台风,在上游河道内的江阴差异更明显,但仍大于正面登陆和北侧登陆型情况下的增水,说明台风走向对长江下游的影响程度小于登陆位置。

对于在外海活动型台风 C1~C6,风暴增水大小与和长江口距离直接相关。台风路径距离长江口越近,长江沿线风暴增水越大,长江沿线风暴增水量值越接近正面登陆长江口情况。

3.3 不同台风路径下长江沿线增水差异原因分析

选取不同登陆位置、走向台风中造成最大增水的不利路径,统计长江沿线典型站点的风速和增水要素见表 1,分析不同路径下长江沿线增水差异的原因。

表 1 典型台风路径下长江沿线风速和增水特征分析
Tab. 1 Analysis of wind speed and surge along the Yangtze River under typical typhoon tracks

台风路径	江阴	天生港	徐六泾	吴淞	中浚	连兴港	
A2(南侧 登陆 西向型)	最大风速(有效值)/(m·s ⁻¹)	21(8)	25(10)	28(11)	30(19)	34(31)	27(26)
	超七级向岸风持续时间/h	14	22	23	24	25	22
	最大增水/m	2.83	2.87	2.71	2.77	2.65	1.93
	超 0.5 m 增水持续时间/h	23	21	21	17	16	16
B2(南侧 登陆 北向型)	最大风速(有效值)/(m·s ⁻¹)	21(7)	23(10)	26(11)	26(21)	30(29)	23(21)
	超七级向岸风持续时间/h	8	9	10	15	17	13
	最大增水/m	1.67	2.12	2.23	2.24	2.07	1.45
	超 0.5 m 增水持续时间/h	15	16	17	16	16	12
A4(正面 登陆 西向型)	最大风速(有效值)/(m·s ⁻¹)	20(6)	22(8)	23(10)	29(23)	28(21)	30(29)
	超七级向岸风持续时间/h	10	10	12	14	15	21
	最大增水/m	1.19	1.59	1.83	2.08	1.90	2.20
	超 0.5 m 增水持续时间/h	16	15	16	16	15	17
A6(北侧 登陆 西向型)	最大风速(有效值)/(m·s ⁻¹)	20(0)	23(0)	23(0)	25(0)	27(0)	28(15)
	超七级向岸风持续时间/h	—	—	—	—	—	13
	最大增水/m	0.02	0.07	0.3	0.4	0.42	1.32
	超 0.5 m 增水持续时间/h	—	—	—	—	—	12
C6(外海 活动型)	最大风速(有效值)/(m·s ⁻¹)	20(5)	22(7)	21(7)	22(12)	26(17)	28(24)
	超七级向岸风持续时间/h	8	10	10	13	14	17
	最大增水/m	0.89	1.01	1.35	1.59	1.61	1.89
	超 0.5 m 增水持续时间/h	9	10	12	16	17	16

长江口南北支的增水主要受到台风风圈直接影响,向岸有效风速越大增水越大。南支以上河段不同路径下有效风速差别很小,且河道较窄,增水不受风的直接作用,取决于口门附近海域有利于河道增水的涨潮向强风持续时间,持续时间越长,向上游积累和堆积的水量越多,上游增水量值越大。南侧登陆且平行长江口方向移动的 A2 路径台风作用下增水持续时间显著长于其他路径下的情况,造成长江河道沿线极大增水。北侧登陆 A6 台风影响下长江沿线处于路径左侧,持续离岸风影响下南支至上游河道沿线没有出现超过 0.5 m 增水,且会出现超过 1 m 减水。

4 大洪水、天文大潮和强风暴潮“三碰头”情境下长江沿线最大增水分布规律

为研究大洪水、不同路径强台风、天文大潮共同作用下大通至口门长江沿线的最大增水分布规律,选取造成较大增水的不同路径典型台风,上游径流仍选取 20 年一遇洪峰流 $82\ 630\ \text{m}^3/\text{s}$,外海天文潮型选取 9711 风暴潮同期的天文大潮,并以徐六泾为基点,将天文高潮时刻设置为每一种路径最大增水时刻,从而构成大洪水、不同路径强台风、天文大潮“三碰头”情境。典型路径 5 年一遇强度台风与 20 年一遇大洪水、9711 同期天文大潮三碰头条件下大通至口外沿线最大增水分布见图 7。这里增水为包含上游径流、天文潮和台风风暴潮的总水位减去天文潮和洪水作用下的水位,包含非线性的部分,是反映风暴潮对沿线水位影响程度的重要指标。

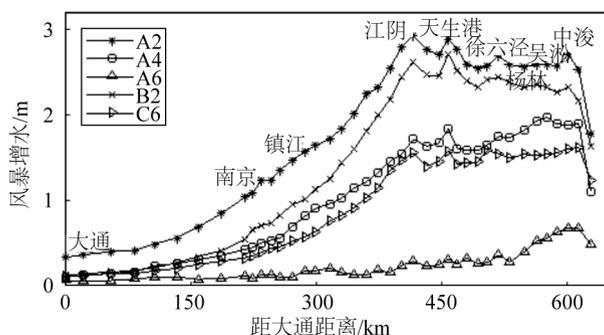


图 7 三种类型的典型路径台风作用下大通至口门最大增水沿程分布

Fig. 7 Maximum storm surge along Yangtze River under three types of typical typhoons

由图 7 可见在文中研究条件下大通至口门沿线增水都满足从口门至内迅速增大,中浚至江阴段维持高位,江阴至南京河段迅速减小,至上游缓慢减小的变化趋势。南侧登陆西向型路径 A2 台风在沿线造成最明显增水,南侧登陆北向型 B2 路径台风作用下增水小于 A2,且在江阴以上河段差异明显。路径最接近长江口的外海活动型 C6 路径台风作用下增水接近正面登陆型 A4,北侧登陆型 A6 路径台风影响下杨林以上河段几乎未见增水。

不同路径下增水峰值位置也有所差异,南侧登陆型台风作用下增水峰值在江阴至徐六泾段之间,这是由于从风暴潮和天文潮引起的涨潮流上溯,并对上游大径流下泄形成一定的阻滞、顶托作用,在江阴至徐六泾之间出现一个增水峰值。正面登陆型、长江口北侧登陆型及外海活动型路径台风的最大增水出现在口门处中浚附近,这是由于台风路径经过或接近中浚,使口门处受极大风圈的直接影响产生较大增水,增水峰值超过江阴至徐六泾河段。

5 结 语

研究采用将背景风压场与台风梯度模型相结合的办法构建风压场并进行验证,基于 9711 号台风“温妮”和 0012 号台风“派比安”构建典型危害性台风。建立东中国海至长江口风暴潮数学模型,研究模拟大洪水、不同路径强台风、天文大潮共同影响下长江沿线的增水分布特性。

1) 对于登陆型台风,登陆位置和路径走向都会对长江沿线风暴增水造成较大影响。登陆位置处于长江口南侧情况下长江河道沿线增水大于正面登陆长江口和北侧登陆型台风。平行于长江河道方向移动的路径台风造成沿线增水大于斜向穿越长江口路径台风,不同台风走向对于风暴增水影响程度小于登陆位置。在南侧登陆并平行长江口轴线方向移动的台风会在长江沿线造成较大的增水,北侧登陆型台风作用下长江口

口门附近区域会出现明显减水。对于在外海活动型台风,台风路径距离长江口越近,长江沿线风暴增水越大,长江沿线风暴增水量值越接近正面登陆长江口情况。

2) 研究不同路径下长江沿线增水差异的原因。南北支的增水主要受到台风风圈直接影响,向岸风速越大增水越大。上游河道内增水取决于口门附近海域有利于河道增水的涨潮向强风持续时间,持续时间越长,向上游积累和堆积的水量越多,增水量值越大。

3) 研究大洪水、天文大潮、强风暴潮“三碰头”情境下长江沿线最大增水分布规律。在文中研究条件下长江沿线增水从口门至内迅速增大,中浚至江阴段维持高位,江阴至南京河段迅速减小,至上游缓慢减小。南侧登陆型台风作用下增水峰值出现在江阴至徐六泾之间。受台风风圈直接影响,正面登陆型、北侧登陆型和外海活动型台风作用下最大增水出现在口门处中浚附近。

参考文献:

- [1] 端义宏,秦曾灏. 上海沿岸天文潮与风暴潮非线性相互作用的数值研究[J]. 海洋与湖沼, 1997, 28(1): 80-87. (DUAN Yihong, QIN Zenghao. Numerical study of nonlinear interactions between astronomical tides and storm surges along the coast of Shanghai[J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 1998, 28(1): 80-87. (in Chinese))
- [2] 张金善,孔俊,章卫胜,等. 长江河口动力与风暴潮相互作用研究[J]. 水利水运工程学报, 2008(4): 1-7. (ZHANG Jinshan, KONG Jun, ZHANG Weisheng, et al. Study of interaction between estuary dynamic and storm surge in the Yangtze River[J]. Hydro-Science and Engineering, 2008(4): 1-7. (in Chinese))
- [3] 赵长进,葛建忠,丁平兴. 长江口及其邻近海区无结构网格风暴潮预报系统的研制与分析[J]. 海洋科学进展, 2015, 33(2): 182-194. (ZHAO Changjin, GE Jianzhong, DING Pingxing. An unstructured numerical model for storm surge in the Changjiang estuary and its application[J]. Advances in Marine Science, 2015, 33(2): 182-194. (in Chinese))
- [4] 刘秋兴,李铖. 上游洪水对台风风暴潮过程期间长江口水位的影响研究[J]. 海洋通报, 2017, 36(2): 135-142. (LIU Qiuxing, LI Cheng. Study of flow's effects on the water level of the Yangtze Estuary area during the typhoon period[J]. Marine Science Bulletin, 2017, 36(2): 18-25. (in Chinese))
- [5] 罗龙洪,闻云呈,袁文秀,等. 江苏省长江干流沿程洪潮设计水位数值模拟研究[J]. 海洋工程, 2020, 38(3): 124-131. (LUO Longhong, WEN Yuncheng, YUAN Wenxiu, et al. Mathematical simulation of design water level of flood and tide along the main stream of the Yangtze River in Jiangsu Province[J]. The Ocean Engineering, 2020, 38(3): 124-131. (in Chinese))
- [6] WANG Jun, YI Si, LI Mengya, et al. Effects of sea level rise, land subsidence, bathymetric change and typhoon tracks on storm flooding in the coastal areas of Shanghai[J]. The Science of the Total Environment, 2018, 621: 228-234.
- [7] 白一冰,石景元,路川藤,等.“烟花”台风影响下长江南通以下河段的增水分布特征[J]. 水利水运工程学报, 2021(6): 25-33. (BAI Yibing, SHI Jingyuan, LU Chuanteng, et al. Spatio-temporal distribution characteristics of surge in the reach below Nantong of Yangtze Estuary under the influence of Typhoon In-Fa[J]. Hydro-Science and Engineering, 2021(6): 25-33. (in Chinese))
- [8] 周才扬,殷成团,章卫胜,等. 长江口登陆台风增水数值模拟——以“安比”为例[J]. 水利水运工程学报, 2021(1): 70-77. (ZHOU Caiyang, YIN Chengtuan, ZHANG Weisheng, et al. Numerical simulation on surge due to landfall of typhoon in the Yangtze Estuary: Ampil (No. 1810) as an example[J]. Hydro-Science and Engineering, 2021(1): 70-77. (in Chinese))
- [9] YIN Chengtuan, ZHANG Weisheng, XIONG Mengjie, et al. Storm surge responses to the representative tracks and storm timing in the Yangtze Estuary, China[J]. Ocean Engineering, 2021, 233: 109020.
- [10] DEE D P, UPPALA S M, SIMMONS A J, et al. The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2011, 137(656): 553-597.
- [11] HOLLAND G J. An analytic model of the wind and pressure profiles in hurricanes[J]. Monthly Weather Review, 1980, 108(8): 1212-1218.
- [12] 陈孔沫. 一种计算台风风场的方法[J]. 热带海洋, 1994, 12(2): 41-48. (CHEN Kongmo. A computational method for typhoon wind field[J]. Tropical Oceanology, 1994, 12(2): 41-48. (in Chinese))
- [13] YING Ming, ZHANG Wei, YU Hui, et al. An overview of the China meteorological administration tropical cyclone database[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2014, 31: 287-301.
- [14] AMANTE C, EAKINS B W. ETOPO1 1 Arc-minute global relief model: Procedures, data sources and analysis [J]. Psychologist, 2009, 16(3): 20-25.
- [15] EGBERT G D, EROFEEVA S Y. Efficient inverse modeling of barotropic ocean tides[J]. Journal of Atmospheric & Oceanic Technology, 2002, 19(2): 183-204.