

陈升,甘敏,孙丽,等.上海沿海风暴潮历史特征分析[J].海洋学研究,2021,39(4):101-108. DOI:10.3969/j.issn.1001-909X.2021.04.010.

CHEN Sheng, GAN Min, SUN Li, et al. Historical characteristics of the storm surges along Shanghai coast[J]. Journal of Marine Sciences, 2021, 39(4): 101-108. DOI: 10.3969/j.issn.1001-909X.2021.04.010.

# 上海沿海风暴潮历史特征分析

陈 升<sup>1</sup>,甘 敏<sup>2</sup>,孙 丽<sup>1</sup>,谢冬梅<sup>2</sup>,陈永平<sup>\*2</sup>

(1.上海市水旱灾害防御技术中心,上海 200050;2.河海大学港口海岸与近海工程学院,江苏 南京 210098)

**摘 要:**基于中国气象局台风最佳路径数据集和欧洲中期天气预报中心(ECMWF)风场再分析资料,遴选出 1979—2019 年影响上海的 241 场历史台风事件。采用 ADCIRC 风暴潮模型对 241 场历史台风所引起的风暴潮过程进行了模拟,计算得到了上海沿海历史风暴增水数据集,由此对上海沿海代表站点的历史风暴增水进行了特征分析。结果表明,崇西闸、堡镇、吴淞口、高桥、芦潮港、金山嘴、洋山港站和绿华山等 8 个代表站历史最大增水在 1.38~2.58 m 之间,各站最大增水小于 1 m 的累积频率均超过 0.9。尽管各站最大增水时间序列未通过 Mann-Kendall 趋势性检验,但吴淞口站的年最高水位却呈现出显著的增加趋势,这可能与上游径流、天文潮、风暴潮和海平面变化等因素的综合影响有关。

**关键词:**上海沿海;台风;风暴增水;趋势性分析;Mann-Kendall 检验

**中图分类号:**P732

**文献标识码:**A

**文章编号:**1001-909X(2021)04-0101-08

**DOI:**10.3969/j.issn.1001-909X.2021.04.010

## 0 引言

西北太平洋是台风活动最频繁的海区之一,全球有近 1/3 的台风发生在西北太平洋<sup>[1]</sup>。中国是西北太平洋海岸线最长的国家,由台风引起的风暴潮灾害已成为影响我国沿海最主要的海洋灾害。上海地处长江入海口,其大陆海岸线长 172.3 km,是我国受风暴潮灾害最严重的省市之一。

国内外学者对风暴潮数值模拟进行了大量的研究,主要包括物理方程的简化、计算网格的优化、数值离散方式的改进等,由此衍生出了诸如 FVCOM<sup>[2]</sup>、ADCIRC<sup>[3]</sup>、DELFT3D<sup>[4]</sup>、TELEMAC<sup>[5]</sup> 和 MIKE 21<sup>[6]</sup>等多种可用于模拟风暴潮的数值软件。

事实上,风暴潮模拟精度与台风风场的准确性密

切相关,常用的台风风场模型有高桥(Takahashi)模式、藤田(Fujita)模式、梅尔斯(Meyers)模式和捷氏(Jelesnianski)模式等<sup>[7]</sup>,以上模式可以较好地刻画台风中心附近的风场结构,但对台风外围风场的描述并不准确。PAN et al<sup>[8]</sup>采用台风风场模型与再分析风场资料相结合的方法,较好地反映了台风行进过程中台风及其周围风场的变化过程,风暴潮模拟精度得到了较为明显的提升。

随着风暴潮模拟技术的不断提升,通过长时间序列风暴潮过程的模拟来开展风暴潮历史特征分析已成为可能,如张海燕<sup>[9]</sup>基于 1950—2011 年模拟结果对南海台风风暴潮的季节性、周期性和趋势性特征进行了研究。也有学者基于长时间序列的实测潮位资料来分析沿海的历史风暴潮特征,如褚芹芹等<sup>[10]</sup>对

收稿日期:2021-08-05

基金项目:国家重点研发计划(2017YFC0405401);中央高校基本科研业务费项目(B200204017)

作者简介:陈升(1964—),男,江苏省无锡市人,高级工程师,主要从事防汛风险分析等方面研究,E-mail:82866614@qq.com。

\* 通讯作者:陈永平(1976—),男,教授,主要从事风暴潮灾害预报预警与防控研究,E-mail:ypchen@hhu.edu.cn。

河北省沿海的历史风暴潮特征及其成因进行了分析;李程等<sup>[11]</sup>对福建沿海风暴潮的发生频次、影响范围和致灾特点等进行了评估。

目前有关上海沿海风暴潮的研究主要集中在模拟技术的改进<sup>[12]</sup>、风险评估的应用<sup>[13]</sup>和动力因素改变对风暴潮的影响<sup>[14-15]</sup>等方面,关于上海沿海风暴潮历史特征的研究成果未见有公开报道。本文采用数值模拟手段,对过去 41 年影响上海的风暴潮过程进行了复演,在此基础上对上海沿海风暴潮的历史特征进行了统计分析,研究成果可为上海沿海风暴潮的防灾减灾提供参考。

## 1 方法

### 1.1 ADCIRC 风暴潮模型

ADCIRC 风暴潮模型通过基于垂向平均的连续方程和动量方程来求解自由表面和垂向平均流速,其中连续方程和动量方程<sup>[3]</sup>可表达为

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial UH}{\partial x} + \frac{\partial VH}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

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

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

式中: $\zeta$ 表示从平均海平面起算的自由表面高度; $t$ 表示时间; $x$ 和 $y$ 分别表示东方向和北方向坐标分量; $U$ 和 $V$ 分别表示垂向平均流速沿 $x$ 和 $y$ 方向的分量; $H$ 表示总水深; $f$ 表示科氏力参数, $f=2\Omega\sin\varphi$ ,其中 $\Omega$ 和 $\varphi$ 分别表示地球自转角速度和当地纬度; $p_s$ 表示水面气压; $\rho_0$ 表示海水密度; $\alpha$ 表示地球有效弹性系数,取 0.69; $\eta$ 表示牛顿引潮势; $\tau_{sx}$ 和 $\tau_{sy}$ 分别表示表面风应力沿 $x$ 和 $y$ 方向的分量; $\tau_{bx}$ 和 $\tau_{by}$ 分别表示底部摩阻力沿 $x$ 和 $y$ 方向的分量; $g$ 表示重力加速度; $D_x$ 和 $D_y$ 分别表示动量方程中沿 $x$ 和 $y$ 方向的扩散项。

### 1.2 台风风场

#### 1.2.1 气压模式

本文采用高桥模式对台风气压场进行概化<sup>[16]</sup>:

$$P(r) = P_\infty - \frac{\Delta P}{1 + \frac{r}{R_0}} \quad (4)$$

式中: $P(r)$ 表示距台风中心距离为 $r$ 处的气压; $P_\infty$ 表示环境气压; $\Delta P$ 表示环境气压与台风中心气压之差

( $\Delta P = P_\infty - P_0$ ,  $P_0$ 为台风中心气压); $R_0$ 表示台风最大风速半径。

#### 1.2.2 风场模式

高桥模式中需要考虑流入角效应,将流入角设定为 $20^\circ$ <sup>[17]</sup>,则计算域内任意一点风速在 $x$ 和 $y$ 方向的分量可分别表示为

$$W_x = C_1 V_x \exp\left(-\frac{\pi r}{500}\right) - C_2 \frac{f}{2} \left[ \sqrt{1 + \frac{4}{1.293} \cdot \frac{Z^2 \Delta P \times 10^{-4}}{f^2 \cdot r \cdot R_0^2}} - 1 \right] \cdot (0.342x + 0.940y) \times 10^3 \quad (5)$$

$$W_y = C_1 V_y \exp\left(-\frac{\pi r}{500}\right) + C_2 \frac{f}{2} \left[ \sqrt{1 + \frac{4}{1.293} \cdot \frac{Z^2 \Delta P \times 10^{-4}}{f^2 \cdot r \cdot R_0^2}} - 1 \right] \cdot (0.940x - 0.342y) \times 10^3 \quad (6)$$

式中: $W_x$ 和 $W_y$ 分别表示台风中心移速沿 $x$ 和 $y$ 方向的分量; $Z = 1/\left(1 + \frac{r}{R_0}\right)$ ;  $V_x$ 和 $V_y$ 分别表示台风中心移速沿 $x$ 和 $y$ 方向的分量; $C_1$ 表示移速系数; $C_2$ 表示梯度风修正系数。

### 1.3 Mann-Kendall 趋势性检验

Mann-Kendall(MK)检验方法是时间序列趋势分析方法中最经典方法之一,由 Mann 和 Kendall 提出,被广泛用于分析降水、径流、气温和水质等要素时间序列的趋势变化。在 MK 检验中,原假设 $H_0$ 为时间序列数 $(X_1, X_2, \dots, X_n)$ ,是 $n$ 个独立同分布的随机变量;备择假设 $H_1$ 是双边检验,对于所有的 $k < j \leq n$ , $X_k$ 和 $X_j$ 的分布是不相同的,可构造差值序列 $(X_j - X_k)$ 。检验的统计量 $S$ 计算如下式<sup>[17]</sup>

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{Sgn}(X_j - X_k) \quad (7)$$

$$\text{Sgn}(X_j - X_k) = \begin{cases} +1 & (X_j - X_k) > 0 \\ 0 & (X_j - X_k) = 0 \\ -1 & (X_j - X_k) < 0 \end{cases} \quad (8)$$

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{V_{ar}(S)}} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{V_{ar}(S)}} & S < 0 \end{cases} \quad (9)$$

式中: $V_{ar}(S)$ 表示差值序列的方差。以 95% 置信界限为例,如果 MK 检验值(即 $Z$ )超过 1.960,则表明该序列具有显著的增加趋势;如果 $Z$ 小于 -1.960,则表明该序列具有显著的减小趋势;如果 $Z$ 介于两者之间,

则表明该序列没有显著的变化趋势。

## 2 研究区域与数据

### 2.1 研究区域特性

研究区域为上海及其附近沿海海域(图 1)。分析吴淞口验潮站 2014—2017 年潮位资料<sup>[18]</sup>,其潮汐系数  $F=0.22<0.25$ ,属于典型的半日潮<sup>[19]</sup>。除潮汐影响外,长江径流<sup>[18]</sup>和风暴潮<sup>[20]</sup>也会对长江口站点处的水位产生一定影响。

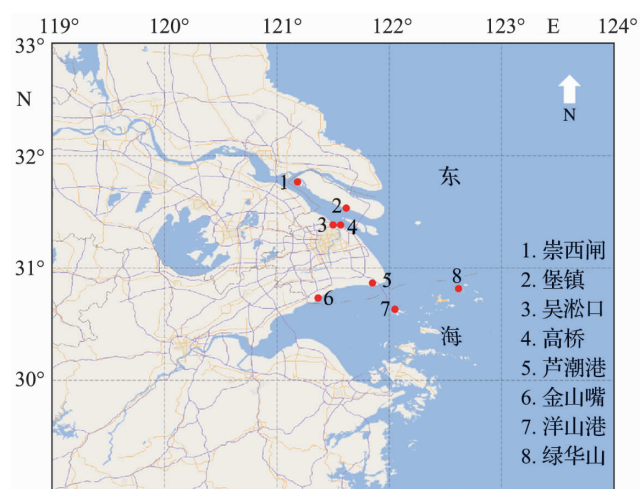


图 1 上海沿海水文站点分布

Fig. 1 The distribution of the hydrometric stations along Shanghai coast

### 2.2 数据说明

本文共收集到 2017—2019 年上海及附近沿海崇西闸、堡镇、吴淞口、高桥、芦潮港、金山嘴、洋山港和绿华山等 8 个代表站点(位置见图 1)的逐时水位数据,另外还收集到吴淞口站 1949—2019 年的年最高水位数据。所有水位数据均采用吴淞高程表示,时间为北京时间。

参考文献[7],采用 1979—2019 年欧洲中尺度天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts,简称 ECMWF)再分析风场资料 ERA5<sup>[21]</sup>和相应的台风风场模型来构建历史台风风场,以此驱动风暴潮模型,计算得到历史风暴增水数据。以导致吴淞口站点历史风暴增水超过 10 cm 的台风作为遴选标准,1979—2019 年影响上海的台风共有 241 场。

结合中国气象局台风最佳路径数据集<sup>[22-23]</sup>,绘制了前述 241 场台风在不同月份影响上海的台风次数及强度分布(图 2)。从图 2 可以看出,影响上海的台风集中于 6—10 月;6 月以台风为主,7 月以强热带风

暴、台风和超强台风为主,8 月以强热带风暴、台风、强台风和超强台风为主,9 月和 10 月都是以台风、强台风和超强台风为主。

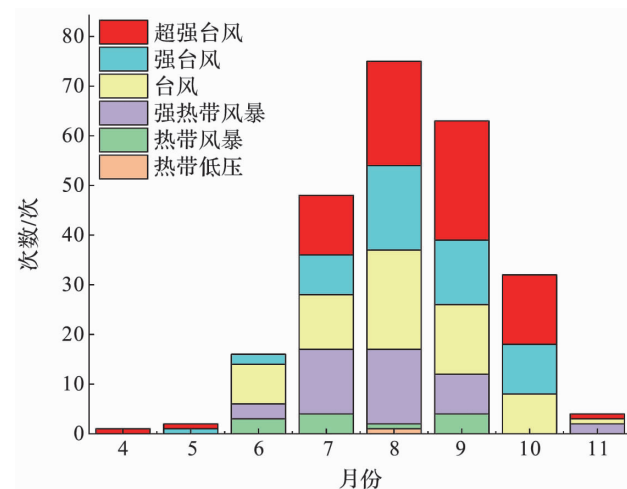


图 2 1979—2019 年影响上海的台风次数及强度月份分布

Fig. 2 The monthly distribution of the typhoon number and typhoon strength affecting Shanghai from 1979 to 2019

## 3 模型构建

### 3.1 模型设置

台风风暴潮模型既要反映台风大范围运移的特性,又要考虑上海海域局部地形的影响。计算范围如图 3 所示,模型的网格尺寸由外海向近岸递减:外海处网格尺寸最大为 141 km;在岸线和地形条件复杂的近岸区域,网格尺寸最小为 100 m。网格节点数为 125 975,网格单元数为 241 732。模型计算区域水深分布如图 4 所示,近岸区域水深地形来自实测水深资料和海图,远海区域水深地形来自全球海陆数据库(General Bathymetric Chart of the Oceans,简称 GEBCO)<sup>[24]</sup>。

### 3.2 模型验证

#### 3.2.1 天文潮验证

本文选取了 2017 年 10 月 16 日至 10 月 29 日时段对模型进行了天文潮验证。图 5 为模型在芦潮港、金山嘴、洋山港和绿华山站点的天文潮位验证过程。可以看出,无论是大潮期间还是小潮期间,模拟结果都与实测资料吻合良好,说明模型能够很好地模拟上海沿海的历史潮位过程。

#### 3.2.2 风暴增水验证

选取 1909 号“利奇马”超强台风期间对风暴增水过程进行验证。图 6 为模型计算的“利奇马”台风期间吴淞口、高桥和芦潮港站点风暴增水与实测增水的

对比图。可以看出,无论是相位还是量值,模型计算的风暴增水都与实测增水吻合良好,说明本文构建的

风暴潮预报模型能够很好地反演上海沿海的历史风暴增水过程。

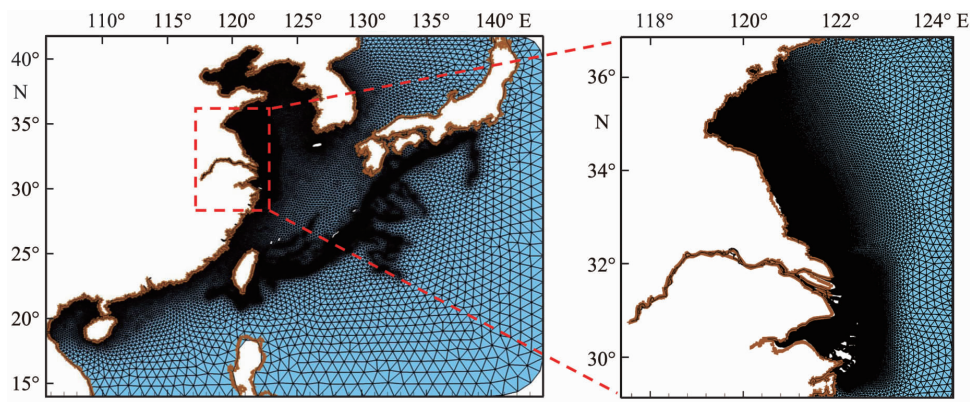


图 3 ADCIRC 模型网格布置

Fig. 3 The mesh of the ADCIRC model

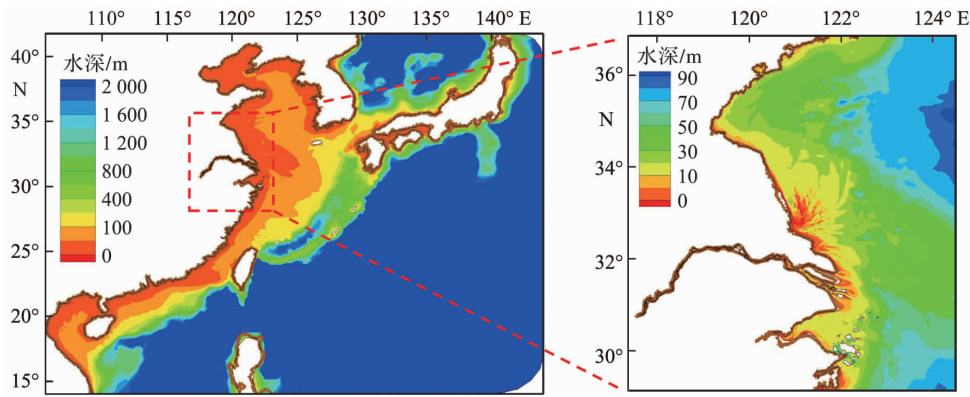


图 4 ADCIRC 模型计算域水深分布

Fig. 4 The water depth distribution of the ADCIRC model

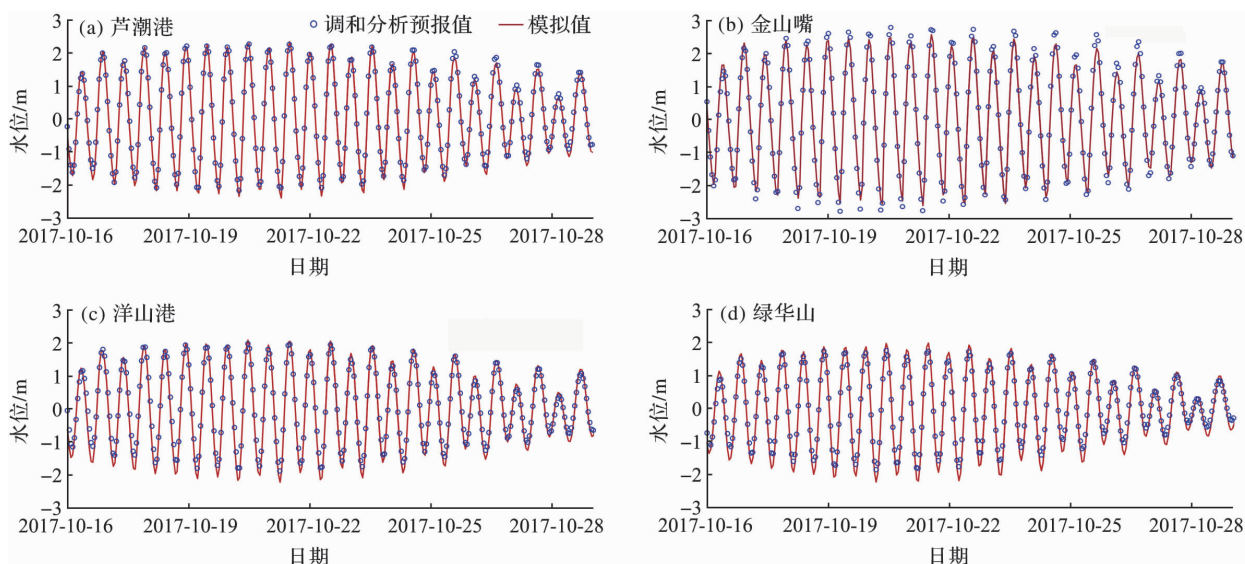


图 5 ADCIRC 模型天文潮验证结果

Fig. 5 Validation of the astronomic tides of the ADCIRC model



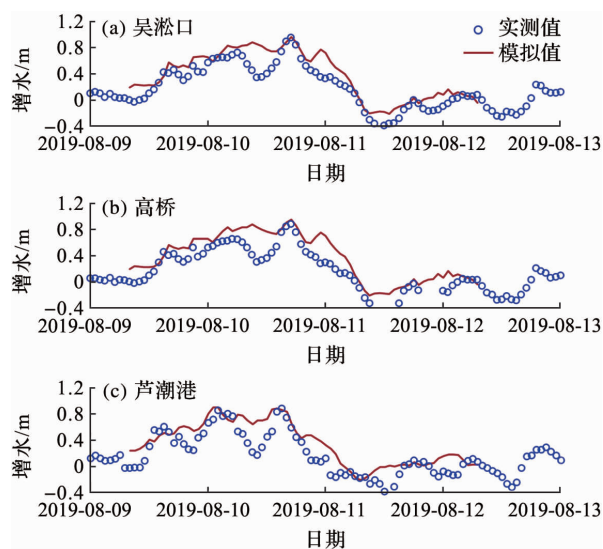


图6 ADCIRC模型1909号“利奇马”台风增水验证结果  
Fig. 6 Validation of the storm surge of the ADCIRC model during the 1909 Lekima Typhoon period

## 4 结果与讨论

### 4.1 风暴增水的分布规律

对1979—2019年影响上海的241场台风期间的风暴增水进行数值模拟,获得了上海沿海的历史风暴增水数据集。图7为上海沿海8个站点的241场台风最大增水频率分布直方图和累积频率曲线,241场台风期间这些站点最大增水值及其对应台风编号与名字见表1。从表1中可以看出:不同站点最大增水发生时对应了不同的台风,说明最大增水不仅与台风强度有关,也与站点地理位置有关。总体而言,上海沿海各站点的增水并不大,大部分站点的最大增水都集中1.0 m以下,各站点最大增水小于1.0 m的台风事件累积频率均超过了0.9。

以吴淞口站为例,图8为1979—2019年不同月份台风的强度分布及台风发生时吴淞口站对应的最

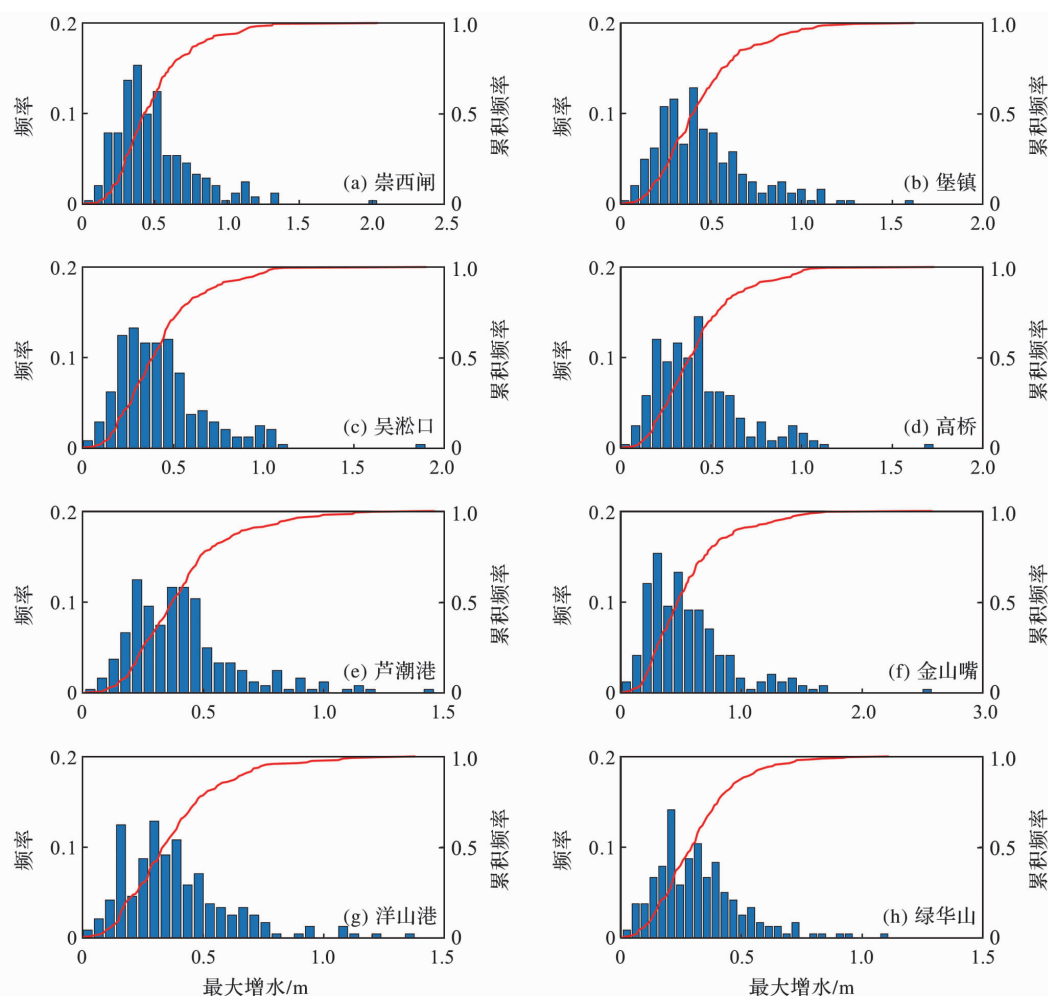


图7 上海沿海8个水文站点1979—2019年241场台风最大增水频率分布及其累积频率图  
Fig. 7 The frequency and cumulative frequency of the maximum storm surge at the 8 hydrometric stations around Shanghai coast during the 241 typhoon events from 1979 to 2019

大增水。与台风发生月份频率分布(图 2)一致,吴淞口站最大增水在 6—10 月较大,其中以 8—9 月最为显著。由图 8 也可看出,强度大的台风引起的最大增水也可能小于强度小的台风引起的最大增水。这说明最大增水除与台风强度有关外,还可能与台风路径和台风发生时遭遇的潮型等因素有关。

表 1 上海沿海 8 个水文站最大增水及其对应台风编号与名字  
Tab. 1 The maximum storm surge of the 8 hydrometric stations around Shanghai coast and the corresponding typhoon number and typhoon name

站点编号	站点名	最大增水/m	台风编号及名字
1	崇西闸	2.04	9711 号“芸妮”台风
2	堡镇	1.62	9711 号“芸妮”台风
3	吴淞口	1.90	9711 号“芸妮”台风
4	高桥	1.73	9711 号“芸妮”台风
5	芦潮港	1.46	9711 号“芸妮”台风
6	金山嘴	2.58	9711 号“芸妮”台风
7	洋山港	1.38	8310 号“福雷斯特”台风
8	绿华山	1.11	8310 号“福雷斯特”台风

表 2 上海沿海 8 个水文站 241 场台风事件最大增水极值序列 MK 趋势性检验  
Tab. 2 The MK test results of the maximum storm surge of the 8 hydrometric stations around Shanghai coast during the 241 typhoon events

变量	崇西闸	堡镇	吴淞口	高桥	芦潮港	金山嘴	洋山港	绿华山
MK 检验值	1.753	1.827	1.506	1.640	0.920	1.024	1.615	1.647
置信界限	+1.960	+1.960	+1.960	+1.960	+1.960	+1.960	+1.960	+1.960
趋势是否显著	否	否	否	否	否	否	否	否

所示,所有站点的趋势性变化都没有通过 95% 的置信度检验(MK 检验值小于 1.960),说明 1979—2019 年上海最大增水并不具有显著的增加趋势,但它们的年最高水位却可能呈现出显著增加的趋势。

4.3 吴淞口年最高水位趋势性分析

以吴淞口站年最高水位为例,揭示上海沿海地区年最高水位长期的变化趋势。MK 趋势性检验结果表明,吴淞口站年最高水位的 MK 检验值为 3.345,超过了 95% 置信界限值(1.960),表明吴淞口年最高水位有显著的增加趋势。

统计结果显示,吴淞口站年最高水位绝大部分出现在 6—10 月洪季的大潮期间。在 1949—2019 年间的 41 个年最高水位数据点中,有 23 个数据点与图 8 中的最大增水发生在同一天。这说明吴淞口站的年最高水位与上游径流、天文潮、风暴潮的大小及其时间等因素都有关系。

此外,海平面变化也是影响吴淞口年最高水位变

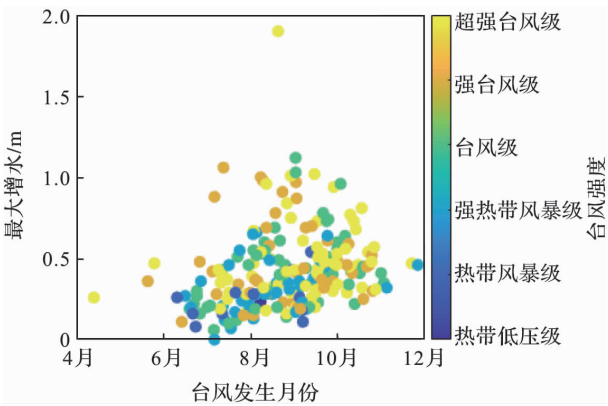


图 8 1979—2019 年台风发生月份和强度及其对应的吴淞口站最大增水

Fig. 8 The occurring month and the strength of the typhoon events from 1979 to 2019 with the corresponding maximum storm surge at Wusongkou Station

4.2 最大增水趋势性分析

采用 MK 趋势性检验方法对前述各站的 241 个最大增水序列进行了趋势性检验。检验结果如表 2

化的重要因素。据自然资源部海洋预警监测司发布的 2020 年《中国海平面公报》<sup>[25]</sup> 统计,中国 1980—2020 年沿海海平面上升速率为 3.4 mm/a。WANG et al<sup>[14]</sup> 的研究结果进一步表明,上海同时还受到由于新构造运动和人类因素导致的地面沉降影响,这会使得总海平面上升速率更快,预测从 1997 到 2050 年吴淞口站附近总海平面上升将达 192.5 mm。

引起上游径流、天文潮、风暴潮和海平面等因素的趋势性变化原因非常复杂,既有全球气候变化的影响<sup>[26]</sup>,也有人类工程活动的影响<sup>[27-29]</sup>,而且各个因素之间存在着较强的非线性关系。它们各自对年最高水位趋势性变化的具体贡献还有待进一步研究。

5 结论

本文以上海市为研究对象,基于 1979—2019 年欧洲中期天气预报中心(ECMWF)和中国气象局台风最佳路径数据集资料,遴选出 241 场对上海有影响

的台风事件。采用 ADCIRC 水动力模型构建了包含上海的东海台风风暴潮预报模型,计算了以上 241 场台风的风暴增水过程。计算结果表明,影响上海的台风主要集中在 6—10 月:其中 6 月以台风为主;7 月以强热带风暴、台风和超强台风为主;8 月以强热带风暴、台风、强台风和超强台风为主,属台风频率最集中月份;9 月和 10 月则是以台风、强台风和超强台风为主。沿海 8 个代表潮位站点的最大增水在 1.38~2.58 m 之间,各站最大增水不超过 1 m 的累积频率都大于 0.9。站点间最大增水对比结果表明,最大增水不仅与台风强度有关,还与站点地理位置和风暴潮期间潮型等因素相关。MK 趋势性检验结果表明,各站的最大增水并无显著的增加趋势,但吴淞口站的年最高水位却有显著的增加趋势,这可能与上游径流、天文潮、风暴潮和海平面等因素的综合影响有关。

#### 参考文献(References):

- [1] 高抒,贾建军,杨阳,等. 陆架海岸台风沉积记录及信息提取[J]. 海洋学报,2019,41(10):141-160.  
GAO Shu, JIA Jianjun, YANG Yang, et al. Obtaining typhoon information from sedimentary records in coastal-shelf waters[J]. Haiyang Xuebao, 2019, 41(10): 141-160.
- [2] CHEN Changsheng, LIU Hedong, BEARDSLEY R C. An unstructured grid, finite-volume, three-dimensional, primitive equations ocean model: Application to coastal ocean and estuaries[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2003, 20(1): 159-186.
- [3] LUETTICH R, WESTERINK J, SCHEFFNER N. ADCIRC: An advanced three-dimensional circulation model for shelves, coasts, and estuaries. report 1. theory and methodology of ADCIRC-2DDI and ADCIRC-3DL[R]. United States: Coastal Engineering Research Center (U. S. ), 1992.
- [4] ROELVINK J, BANNING G V. Design and development of DELFT3D and application to coastal morphodynamics[J]. Oceanographic Literature Review, 1995, 11(42): 925.
- [5] GALLAND J C, GOUTAL N, HERVOUET J M. TELEMAC: A new numerical model for solving shallow water equations[J]. Advances in Water Resources, 1991, 14(3): 138-148.
- [6] WARREN I R, BACH H K. MIKE 21: A modelling system for estuaries, coastal waters and seas[J]. Environmental Software, 1992, 7(4): 229-240.
- [7] 陈永平,等. 近岸风暴潮和台风浪集合化预报技术及应用[M]. 北京:科学出版社,2020.  
CHEN Yongping et al. Key Techniques for ensemble forecasting of nearshore storm surge and typhoon-induced waves and their applications[M]. Beijing: Science Press, 2020.
- [8] PAN Yi, CHEN Yongping, LI Jiangxia, et al. Improvement of wind field hindcasts for tropical cyclones[J]. Water Science and Engineering, 2016, 9(1): 58-66.
- [9] 张海燕. 南海区台风风暴潮时空分布特征[J]. 海洋预报,2019,36(6):1-8.  
ZHANG Haiyan. Spatio-temporal distribution of typhoon storm surge along the South China Sea coast[J]. Marine Forecasts, 2019, 36(6): 1-8.
- [10] 褚芹芹,张万磊,洪新,等. 河北省沿海风暴潮特征及成因分析[J]. 海洋预报,2020,37(1):18-27.  
CHU Qinqin, ZHANG Wanlei, HONG Xin, et al. Characteristic and affecting factors of storm surges along the coast of Hebei Province[J]. Marine Forecasts, 2020, 37(1): 18-27.
- [11] 李程,王慧,李响,等. 近 10 年福建省风暴潮灾害特征分析及社会经济影响[J]. 海洋经济,2019,9(1):43-46.  
LI Cheng, WANG Hui, LI Xiang, et al. Characteristics of storm surge disasters along Fujian coast in recent 10 years[J]. Marine Economy, 2019, 9(1): 43-46.
- [12] 丁骏,吕忻,姚雅倩,等. 上海邻近海域风暴潮数据同化与特征分析[J]. 海洋学报,2021,43(3):135-145.  
DING Jun, LÜ Xin, YAO Yaqian, et al. Research on data assimilation and features analysis of storm surge in the Shanghai offshore areas[J]. Haiyang Xuebao, 2021, 43(3): 135-145.
- [13] 郭豪爽,郭伟其,邱桔斐,等. 上海市金山区台风风暴潮灾害风险评估研究[J]. 海洋湖沼通报,2020(6):18-26.  
GUO Haoshuang, GUO Weiqi, QIU Jufei, et al. Risk assessment of typhoon storm surge disaster in Jinshan district, Shanghai[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2020(6): 18-26.
- [14] WANG Jun, GAO Wei, XU Shiyuan, et al. Evaluation of the combined risk of sea level rise, land subsidence, and storm surges on the coastal areas of Shanghai, China [J]. Climatic Change, 2012, 115(3-4): 537-558.
- [15] PAN Zhenhua, LIU Hua. Impact of human projects on storm surge in the Yangtze Estuary[J]. Ocean Engineering, 2020, 196: 106792. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2019.106792.
- [16] 李欢,周天逸,张丽芬. 基于 ADCIRC 模式的宁波沿海风暴潮预报[J]. 人民珠江,2020,41(2):98-103,123.  
LI Huan, ZHOU Tianyi, ZHANG Lifan. Forecasting of storm surge in Ningbo coastal waters based on ADCIRC mode[J]. Pearl River, 2020, 41(2): 98-103, 123.
- [17] HAMED K H. Trend detection in hydrologic data: The Mann-Kendall trend test under the scaling hypothesis[J]. Journal of Hydrology, 2008, 349(3-4): 350-363.
- [18] CHEN Yongping, GAN Min, PAN Shunqi, et al. Application of auto-regressive (AR) analysis to improve short-term prediction of water levels in the Yangtze Estuary[J]. Journal of Hydrology, 2020, 590: 125386.
- [19] FROTA F F, TRUCCOLO E C, SCHETTINI C A F. Tidal and sub-tidal sea level variability at the northern shelf of the Brazilian Northeast Region[J]. Anais da Academia Brasileira de Ciências, 2016, 88(3): 1371-1386.

- [20] 王军, 黄海雷, 张呈, 等. 浅谈上海应对风暴潮灾害的措施[J]. 海洋开发与管理, 2017, 34(1): 92-96.  
WANG Jun, HUANG Hailei, ZHANG Cheng, et al. The preventive measures to deal with the disaster of storm surge of Shanghai City[J]. Ocean Development and Management, 2017, 34(1): 92-96.
- [21] MOLTENI F, BUIZZA R, PALMER T N, et al. The ECMWF ensemble prediction system: Methodology and validation[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1996, 122(529): 73-119.
- [22] 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(2): 287-301.
- [23] LU Xiaoqin, YU Hui, YING Ming, et al. Western north Pacific tropical cyclone database created by the China meteorological administration[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2021, 38(4): 690-699.
- [24] KAPOOR D C. General bathymetric chart of the oceans (GEB-CO)[J]. Marine Geodesy, 2009, 5(1): 73-80.
- [25] 自然资源部. 2020 年中国海平面公报[R]. 北京: 自然资源部, 2021.  
Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China. 2020 Bulletins of China's National Sea Level[R]. Beijing: Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China, 2021.
- [26] MEI Wei, XIE Shangping, PRIMEAU F, et al. Northwestern Pacific typhoon intensity controlled by changes in ocean temperatures[J]. Science Advances, 2015, 1(4): e1500014.
- [27] YU Xiayan, ZHANG Wei, HOITINK A J F. Impact of river discharge seasonality change on tidal duration asymmetry in the Yangtze River Estuary[J]. Scientific Reports, 2020, 10: 6304.
- [28] LI Guofang, XIANG Xinyi, GUO Caixiu. Analysis of nonstationary change of annual maximum level records in the Yangtze River Estuary[J]. Advances in Meteorology, 2016, 2016: 7205723.
- [29] CHENG H Q, CHEN J Y, CHEN Z J, et al. Mapping sea level rise behavior in an estuarine delta system: A case study along the Shanghai coast[J]. Engineering, 2018, 4(1): 156-163.

## Historical characteristics of the storm surges along Shanghai coast

CHEN Sheng<sup>1</sup>, GAN Min<sup>2</sup>, SUN Li<sup>1</sup>, XIE Dongmei<sup>2</sup>, CHEN Yongping<sup>\*2</sup>

(1. *Shanghai Flood and Drought Disaster Prevention Technology Center, Shanghai 200050, China;*  
2. *College of Harbour, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China*)

**Abstract:** 241 typhoon events affecting Shanghai from 1979 to 2019 were filtered from the China Meteorological Administration tropical cyclone database and the reanalysis data of the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF). The storm surge model of the East China Sea was constructed based on the ADCIRC hydrodynamic model and was used to simulate the storm surges driven by the 241 typhoon events along Shanghai coast. The historical characteristics of storm surge were then analyzed based on the modelling data. The results show that the historical maximum storm surges of the 8 hydrometric stations (Chongxizha, Baozhen, Wusongkou, Gaoqiao, Luchaogang, Jinshanzui, Yangshangang, and Lühuashan) near Shanghai coast are in a range of 1.38-2.58 m. The cumulative frequency of the peak storm surge values no more than 1.0 m of all the eight stations are larger than 0.9. The Mann-Kendall trend test results show that there is no significant increase trend of the peak storm surge near Shanghai coast. However, the annual peak water levels of Wusongkou Station present a significant increasing trend, which is potentially due to the comprehensive influence of upstream river discharge, astronomic tides, storm surge, and sea level rise.

**Key words:** Shanghai coast; typhoon; storm surge; trend analysis; Mann-Kendall test