

台风对珠江口风暴增水的影响分析

高娜¹, 赵明利¹, 马毅¹, 徐婉明¹, 詹海刚^{2,3}, 蔡树群^{2,3,4,5}

1. 国家海洋局南海规划与环境研究院, 广东 广州 510310;

2. 热带海洋环境国家重点实验室(中国科学院南海海洋研究所), 广东 广州 510301;

3. 南方海洋科学与工程广东省实验室(广州), 广东 广州 511458;

4. 中国科学院南海生态环境工程创新研究院, 广东 广州 510301;

5. 中国科学院大学, 北京 100049

摘要: 珠江口沿岸风暴潮灾害频发, 且受台风影响显著。本研究对珠江口赤湾站近 30 a(1990—2019)的极端增水进行了分析。结果显示: 近年来该区域年平均增水没有显著变化, 但极端风暴增水(99.9%分位数)强度显著增强($1.62\text{cm}\cdot\text{a}^{-1}$), 意味着极端风暴潮灾害强度不断变大; 在这 30a 里, 有 20a 的年最大增水发生于台风期间(占 66.7%), 2018 年超强台风“山竹”引起的增水峰值达 254cm, 为近 30a 最大的风暴潮灾害事件; 增水对台风的最大响应距离约为 500~800km。在台风影响范围内, 增水强度与台风强度呈近似的线性关系, 与距台风中心距离则呈指数关系。分别利用台风强度的不同指标(台风中心最低气压、最大风速和最大风速半径), 结合观测站距台风中心的距离, 对增水进行拟合, 发现风速与距离组合对风暴增水的刻画效果最好 [$S_w = 3.23e^{-0.0036D} \times (\Gamma_w - 3.90) + 4.48$, $R^2 = 0.78$, $\text{RMSE} = 9.69\text{cm}$]。这些研究结果可提升对珠江口风暴潮灾害的认识, 为台风风暴潮模拟提供验证资料, 并为风暴潮灾害风险评估与应对决策提供参考依据。

关键词: 台风; 风暴增水; 珠江口

中图分类号: P731.23 文献标识码: A 文章编号: 1009-5470(2023)01-0032-11

Effect of typhoon on storm surge in the Pearl River Estuary

GAO Na¹, ZHAO Mingli¹, MA Yi¹, XU Wanming¹, ZHAN Haigang^{2,3}, CAI Shuqun^{2,3,4,5}

1. South China Sea Institute of Planning and Environmental Research, State Oceanic Administration, Guangzhou 510310, China;

2. State Key Laboratory of Tropical Oceanography of the South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301, China;

3. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Guangzhou), Guangzhou 511458, China;

4. Institution of South China Sea Ecology and Environmental Engineering, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301, China;

5. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: Storm surge disasters occur frequently along the Pearl River Estuary and are significantly affected by typhoon. This study analyzed the extreme surge at the Chiwan Station in the Pearl River Estuary during the past 30 years (1990–2019). The results show that the average annual storm surge in this region has not changed significantly recent years, but the extreme storm surge (99.9 quantile) has increased greatly ($1.62\text{ cm}\cdot\text{a}^{-1}$), which means that the extreme storm surge disasters have continued to increase. In the past 30 years, the annual maximum storm surge in 20 years occurred during typhoons (accounting for 66.7%). In 2018, the maximum storm surge caused by super typhoon “mangkut” reached 254 cm, which was the largest storm surge disaster in the past 30 years.

收稿日期: 2021-10-27; 修订日期: 2022-03-15。姚衍桃编辑

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFC1405300); 国家自然科学基金(41890851); 南方海洋科学与工程广东省实验室(广州)人才团队引进重大专项(GML2019ZD0305)

作者简介: 高娜(1988—), 女, 山东省新泰市人, 博士研究生, 从事海洋防灾减灾研究。email: gaona12@mails.ucas.ac.cn

通信作者: 赵明利。email: zhaomingli@126.com

Received date: 2021-10-27; Revised date: 2022-03-15. Editor: YAO Yantao

Foundation item: National Key Research and Development Program of China (2017YFC1405300); National Natural Science Foundation of China (41890851); Key Special Project for Introduced Talents Team of Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Guangzhou) (GML2019ZD0305)

Corresponding author: ZHAO Mingli. email: zhaomingli@126.com

The maximum response distance of storm surge to typhoon is about 500~800 km. Within the influence range of typhoon, the storm surge has an approximate linear relationship with typhoon intensity, and an exponential relationship with the distance from typhoon center. Different indexes of typhoon intensity (minimum pressure, maximum wind speed and maximum wind speed radius of typhoon center) were used to fit the storm surge with the distance from the observation station to the typhoon center, and it was found that the combination of wind speed and distance had the best description effect on storm surge ($S_w=3.23e^{-0.0036D}\times I_w-3.90)+4.48$, $R^2=0.78$, RMSE=9.69 cm). These results can improve the understanding of local storm surge disaster, provide validation data for typhoon storm surge simulation and reference for storm surge disaster risk assessment and response decision.

Key words: typhoon; storm surge; Pear River Estuary

台风是一种产生于热带洋面上的强烈热带气旋, 台风的发生常引起极端大风、强降雨和近岸风暴潮等现象, 是一种破坏性很强的自然灾害。全世界约 50 多个国家近 5 亿人口直接或间接地受到台风的影响。尤其沿海地区聚集了大量人口, 是经济发展的重要地区和战略中心, 每年因台风灾害造成的直接经济损失达百亿元(牛海燕 等, 2011)。2005 年 8 月在美国新奥尔良登陆的“卡特里娜飓风”(发生于大西洋的台风称为“飓风”)造成的直接经济损失高达 840 亿美元, 并造成 1836 人死亡。而且, 最近有研究统计发现, 全球热带气旋正向海岸迁移(Wang et al, 2021), 因此沿海地区面临台风的威胁越来越严重。

我国位于北太平洋西岸, 海岸线全长约 18000km, 极易受到台风的影响(图 1)。尤其靠近热带海洋的珠江口地区, 是我国台风灾害较为严重的区域(王康发生等, 2011; 董剑希 等, 2014)。据统计, 在珠江口登陆的台风平均每年 1 次, 有些年份甚至达到 4~5 次。在珠江口登陆的台风容易引发风暴潮灾害, 特别是在天文大潮期间。当有台风经过或登陆时, 台风引起的风暴增水(以下简称“增水”)往往会造成严重的水位抬升, 导致漫滩漫堤(韩晶, 2019)。近年来, 进入南海的台风强度有加强的趋势, 而且随着我国城市化发展进程加快, 风暴潮灾害造成的损失有不断增加的趋势(于福江 等, 2015; 殷成团 等, 2019)。例如, 2017 年受 1713 号台风“天鸽”影响, 珠海、深圳、香港和澳门等地受风暴潮灾害严重, 造成 6 人死亡, 经济损失约 51.54 亿元(广东省海洋与渔业厅, 2017; 刘秋兴 等, 2018); 2018 年 1822 号台风“山竹”引起珠江河口增水 0.5~3.0m, “山竹”台风风暴潮导致广州、珠海、深圳、中山等多地受灾严重, 造成直接经济损失 23.7 亿元(广东省海洋与渔业厅, 2018; 刘士诚 等, 2021); 2019 年 1909 号台风“利奇马”风暴潮灾害造成我国直接经济损失 102.88 亿元(自然资源部 等, 2019)。因此, 针对台风引发风暴潮灾害的研究乃至预报, 对海洋防灾减灾具有重要的科学意义和应用价值。

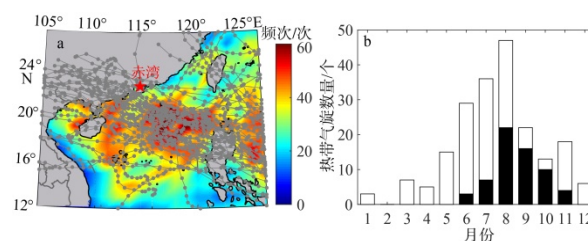


图 1 1990—2019 年进入南海北部的热带气旋累积观测频次与路径(a)和各月份达到台风强度及以上的热带气旋数量(b)

观测频次的计算是将经纬度以 1° 为单元进行划分, 计算每个单元网格内的热带气旋数量。图 b 中黑色部分是影响赤湾站的台风数量。图 a 基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为 GS(2016)1665 的标准地图制作, 底图无修改

Fig. 1 Observed frequency of all typhoons entered into the north South China Sea (colors) and the trajectories of all typhoons that may threaten the Chiwan station (gray line) (a). Number of tropical cyclones entered into the north South China Sea and reached typhoon intensity or above every month from 1990 to 2019, of which the black part is the number of typhoons affecting the Chiwan station (b). The observation frequency was calculated by dividing the latitude and longitude by 1° , and calculating the number of tropical cyclones in each cell grid

研究台风风暴潮的最直接、最准确的手段为现场观测。通过观测台风期间水位的变化, 可准确获得台风对增水的影响范围、强度以及持续时间等关键信息。然而, 由于台风发生时间、强度、大小、移动速度乃至路径各不相同, 台风引起的增水也会存在差异。需要针对目标区域长年多个台风进行观察和统计分析, 以获得台风影响增水的总体规律, 并进一步进行灾害风险评估与防灾减灾政策制定。但对于我国绵长的海岸线来说, 目前这样的观测手段与分析方法仍十分稀少。

数值模拟与预报的方法在一定程度上弥补了观测资料的不足。风暴潮数值模式的研究主要集中于近岸浪-风暴潮-潮汐和洪水的多向耦合数值预报研究、风暴潮漫滩漫堤风险预报研究, 以及应用这些模式进行

沿海重要区域和城市的风暴潮灾害风险评估和区划工作(尹尽勇等, 2012; Thiruvengatasamy et al, 2017)。自 20 世纪 50 年代, 国外开始建立风暴潮预警系统, 包括美国的 SLOSH 模式、英国的自动化温带风暴潮预报模式“海模式”(尹尽勇等, 2012)、荷兰的 Delft3D 模型(Thiruvengatasamy et al, 2017)、丹麦的 Mike 模型(Moon et al, 2006)等。我国也先后建立了风暴潮-天文潮耦合数值预报模式、高分辨率多重嵌套网格的风暴潮漫滩数值预报模式等(尹尽勇等, 2012)。

数值预报方法虽广泛应用于增水研究与业务化预报中(王培涛等, 2010), 但由于数值模型的准确性受制于参数化方案和初边界条件的准确度, 目前通过各种模式计算的增水与实际情况仍有一定差距。尤其是受地理位置与局地地形等环境因素的影响, 不同区域增水对台风的响应存在显著差异。这意味着数值模型需要根据当地现场观测结果, 调整参数化方案, 以验证和进一步提高模拟精度。

本研究将利用珠江口赤湾站近 30a(1990—2019 年)的水位观测数据, 分析该区域增水的时间变化特征, 并结合台风观测数据, 分析台风对该区域增水的影响特征与变化规律, 以期为该区域风暴潮灾害评估以及数值模拟与预报提供参考。

1 数据与方法

赤湾站的实时水位数据由国家海洋局南海信息中心提供, 该数据记录了观测站点 1990—2019 年间每小时的水位信息。热带气旋数据来自中国气象局(China Meteorological Administration, CMA)的热带气旋数据库(<https://tcdata.typhoon.org.cn>) (Ying et al, 2014; Lu et al, 2021), 该数据记录了 1949—2019 年间产生于全球海洋上的热带气旋信息。基本的台风路径信息可以在该数据库的 CMA 最佳路径数据集中找到。数据集包含我国对热带气旋的编号(4 字符)、路径点生成时的国际通用时间、热带气旋强度等级(0~6 和 9, 其中 0 代表弱于热带低压, 或等级未知; 1 代表热带低压; 2 代表热带风暴; 3 代表强热带风暴; 4 代表台风; 5 代表强台风; 6 代表超强台风; 9 代表变性)、生成位置(经度和纬度)、中心最低气压(P , 单位为 hPa)、2 分钟平均近中心最大风速($V_{\max}$, 单位为 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, 以下简称最大风速)等信息。需要注意的是, 该数据集没有台风最大风速半径($R_{\max}$)信息, 本研究采用如下经验公式进行计算(Atkinson et al, 1977):

$$R_{\max} = 51.6e^{-0.0223V_{\max}+0.0281|\theta|} \quad (1)$$

式中: $R_{\max}$ 为台风最大风速半径; $V_{\max}$ 为 2 分钟平均近中心最大风速; θ 为纬度。

相同时间的水位与天文潮位差即为增水。对于潮位的计算, 首先利用谐波分析法把每年实测水位记录中的八大分潮(M_2 、 S_2 、 K_1 、 O_1 、 N_2 、 P_1 、 K_2 、 Q_1)分离出来, 再通过调和与分析求出每一分潮的振幅和相位角, 经天文因素订正后, 得到分潮的调和常数, 最后利用调和常数计算目标时刻各分潮的潮高, 求和以得到潮汐信息(黄世昌等, 2008)。

对于增水的年际变化特征, 本文采用分位数回归的方法进行分析。分位数回归是估计一组回归变量与被解释变量的分位数之间线性关系的建模方法, 它通过加权的最小绝对离差和法进行估计, 是传统线性回归的一种拓展应用(Koenker et al, 2001; Gao et al, 2020)。对于线性回归, 因变量(y)与自变量(x)间的关系可表示为 $y=\alpha x+\beta$, 其中 α 是斜率, β 是截距。此时可通过最小残差平方和来估计参数 α 和 β :

$$\min \sum_{i=1}^n [y_i - (\alpha x_i + \beta)]^2 \quad (2)$$

对于分位数回归, 用因变量的分位数代替因变量的平均值, 即 $y_\tau = \alpha_\tau x + \beta_\tau$, 其中 τ 为分位数, α_τ 和 β_τ 分别为对应的斜率与截距(Fan, 2014)。对于从 0 到 1 的任意分位数, 通过最小化非对称加权绝对离差之和来估计这两个参数:

$$\min \sum_{i=1}^n \rho_\tau [y_i - (\alpha_\tau x_i + \beta_\tau)] \quad (3)$$

式中: n 为样本个数, ρ_τ 是分位数加权系数, 它为正残差和负残差赋予不同的权重(Koenker et al, 2001):

$$\rho_\tau = \begin{cases} \tau, & y_i \geq (\alpha_\tau x_i + \beta_\tau) \\ 1 - \tau, & y_i < (\alpha_\tau x_i + \beta_\tau) \end{cases} \quad (4)$$

2 结果与讨论

1990—2019 年间, 影响南海北部(121°E 以西, 12°N 以南)的台风总数达 201 个(图 1)。这些台风主要生成于夏秋两季(6—9 月)。其中, 发生于 8 月的台风数量最多, 占总数的 23%。台风路径最为集中的区域为菲律宾西北至珠江口—海南沿岸海域, 该区域台风观测频次是其他区域的 2 倍(图 1a)。这些台风主要生成于热带西太平洋, 经菲律宾进入南海, 并一路向西偏北移动, 最终在广东西南或海南登陆。台风强度整体上大于南海本地生成的台风, 登陆时对过境地区造成严重的破坏。因此, 珠江口至海南沿线是我国遭受台风灾害最为严重的地区之一。

对 1990—2019 年间珠江口赤湾站每天最大增水进

行统计,得到的增水变化范围为 $-26.9\sim 254.4\text{cm}$ (负值也称为“减水”),平均值为 12.2cm (图 2a)。在这 30a 里,增水均值和中值变化幅度不大($<0.05\text{cm}\cdot\text{a}^{-1}$)。0.1%分位数的极端低增水值没有显著变化($<0.03\text{cm}\cdot\text{a}^{-1}$),而 99.9%分位数的极端高增水值则存在显著的上升趋势($1.62\text{cm}\cdot\text{a}^{-1}$)。

赤湾站的年最大增水变化范围为 $39.2\sim 254.4\text{cm}$,平均值约为 92.7cm (图 2b)。最大增水(254.4cm)发生于 2018 年 9 月 16 日,恰逢超强台风“山竹”在广东台山海宴镇登陆。该台风引起广东沿岸各区域较高的增水,并发生漫滩漫堤,带来严重人员伤亡和经济损失(韩晶,

2019; 刘士诚 等, 2021), 是台风引发极端风暴潮灾害的典型事件。为进一步评估台风对该区域风暴潮灾害的影响,本文单独统计了每年台风发生期间及去除台风期间数据后的最大增水。结果显示,这 30a 中有 20a 的最大增水值发生于台风期间,表明该区域极端风暴潮增水事件主要由台风引起;且近年来台风引起的增水强度亦呈上升趋势,揭示了极端风暴潮灾害事件发生的强度越来越剧烈(图 2b)。台风引起增水增加的幅度每年不同,20 世纪 90 年代台风可引起增水增长 18%左右,近几年台风引起赤湾站的增水平均增长 68.7%(图 2c),说明台风对赤湾站增水的贡献越来越大。

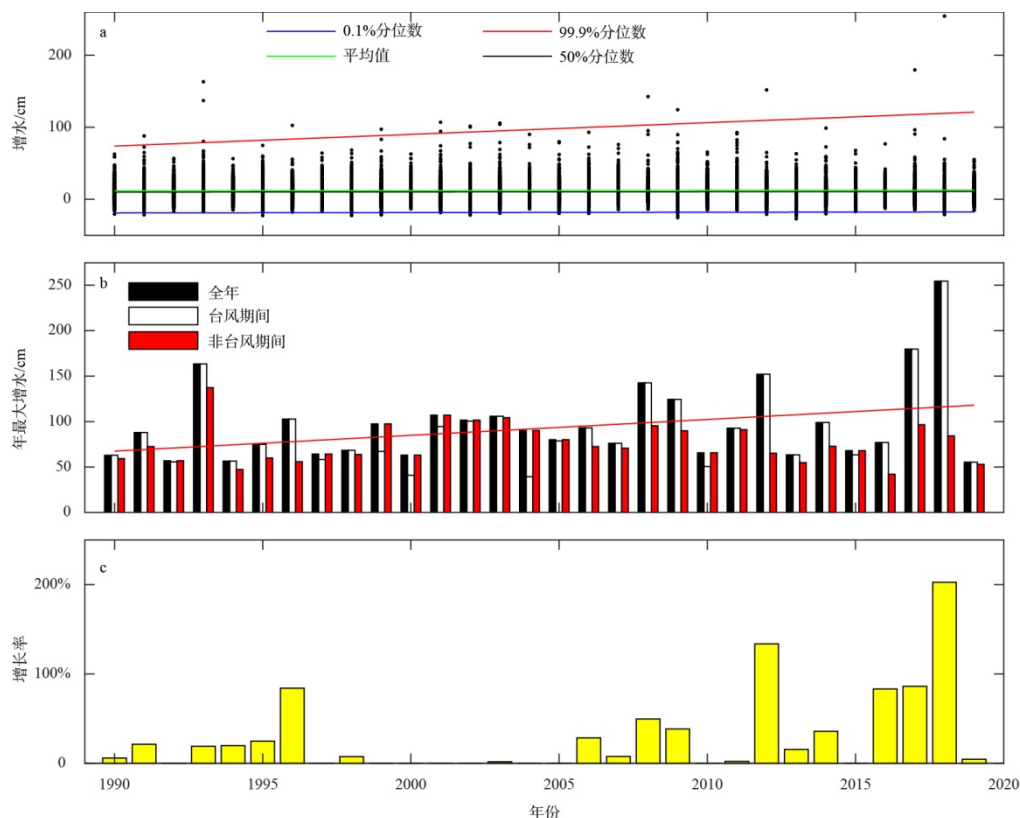


图 2 1990—2019 年间每年日最大增水散点分布(a)、年最大增水随时间的变化(b)和台风对非台风期间年最大增水的增长率(c)

图 b 中红色实线表示台风期间最大增水的线性回归趋势

Fig. 2 Scatter distribution of annual daily maximum storm surge (a), change of annual maximum storm surge (b) and increase rate of annual maximum storm surge during typhoon-free periods (c)

本研究以 1822 号台风“山竹”为例,详细展示台风登陆过程对赤湾站增水的影响。该台风胚胎于 2018 年 9 月 7 日 20 时在西北太平洋洋面上生成($167^{\circ}48'\text{E}$, $12^{\circ}06'\text{N}$),最初风速为 $13\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,中心最低气压为 1002hPa ,最大风速半径为 54.3km 。此后风速持续增加,气压和最大风速半径持续降低(图 3)。至 9 月 11 日,台风风速达到最大($65\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$),气压和最大风速半径达到最

低(分别为 910hPa 和 17.8km),此时台风发展为超强台风。台风强度于 9 月 15 日从菲律宾北部登陆之后开始降低。台风进入南海后继续向西北移动,至距离赤湾站 430km 时,该站增水开始明显增强。9 月 16 日 17 时,增水达到最大值(254.4cm),叠加潮位后,即时水位高达 544cm 。此时,台风在广东台山海宴镇登陆,登陆时中心附近最大风速为 $42\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,中心最低气压为 955hPa 。

增水达到峰值后迅速下降, 至 9 月 17 日 6 时恢复到原

来水平。期间, 台风引起的异常增水持续时间约 27h。

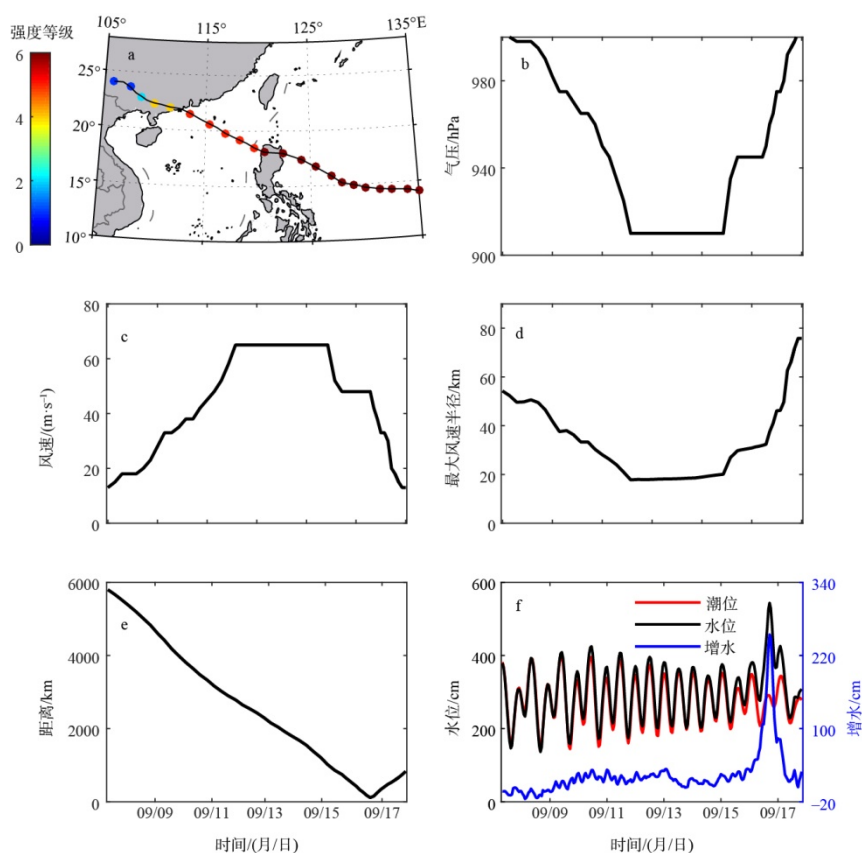


图 3 2018 年 9 月台风“山竹”的路径与强度(a)、台风中心最低气压(b)、最大风速(c)、最大风速半径(d)、台风中心与赤湾站间距离(e), 以及赤湾站观测到的水位变化(f)

图 a 基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为 GS(2016)1665 的标准地图制作, 底图无修改

Fig. 3 Trajectories and intensity of Typhoon Mangkhut in September 2018 (a), The minimum pressure in the center of the typhoon (b), maximum wind speed (c), radius of maximum wind speed (d), distance between the center of typhoon and the Chiwan Station (e), the water level changes observed at the Chiwan Station (f)

上述案例分析清晰地展示了台风引起沿海地区水位急剧升高的现象。该增水具有强度大、持续时间短等特点, 且只有当该台风靠近至距离观测站 500km 以内时才引起观测站点显著增水, 说明台风引发增水的范围可能为百公里量级。为进一步验证此推论, 本研究统计了所有台风在靠近观测站的过程中, 站点增水强度随两者间距离变化的关系。考虑到南海台风轨迹复杂, 很多台风未接近赤湾站, 且一般认为增水超过 50cm 时会对当地产生一定威胁(郭洪寿, 1991), 故这里只统计台风中心与赤湾站间最小距离小于 800km 且引发的最大增水超过 50cm 的台风。在本研究关注的时间范围内(1990—2019 年), 共得到 60 个符合上述条件的台风(图 1 灰色轨迹线), 意味着平均每年有 2 个台风会引起珠江口较大的增水。这些台风主要生成于 8—10 月, 其中发生于 8 月的台风数量最多, 占影响

赤湾站台风总数的 36.7%。

为便于分析, 进一步将上述台风按照路径分为三类: 第一种类型(I 类)为生成于西太平洋, 向西偏北移动进入南海并基本保持原有移动方向的台风, 该类台风登陆地点主要在赤湾站以南或赤湾站附近 100km 范围内, 共有 38 个(图 4a); 第二种类型(II 类)为生成于西太平洋, 向西北移动至靠近赤湾站后又北移的台风, 该类台风登陆地点主要在赤湾站北侧 100km 以外, 共 10 个(图 4d); 第三种类型(III 类)为生成于南海的台风, 共 12 个(图 4g)。I 类台风轨迹较为规整, 且进入南海后仍维持较大的强度, 引起珠江口较大的增水, 是研究台风风暴潮灾害致灾过程与机理较为理想的样本。图 4b 和图 4c 的统计结果亦显示, 随着台风的靠近(1000km 以内), 观测站点记录的增水强度急剧增加。相比之下, II 类台风在靠近赤湾站过程中, 由于路径北

移至较高纬度, 台风强度减小, 并未观测到增水强度显著增加的现象(图 4d—f)。Ⅲ类台风路径复杂且强度普遍弱于前两者, 尽管随着台风靠近赤湾站, 观测站点

记录的增水强度有所增加(图 4g—i), 但远不如 I 类台风显著。因此, 在下文的台风与增水关系的回归分析中, 本研究只考虑 I 类台风。

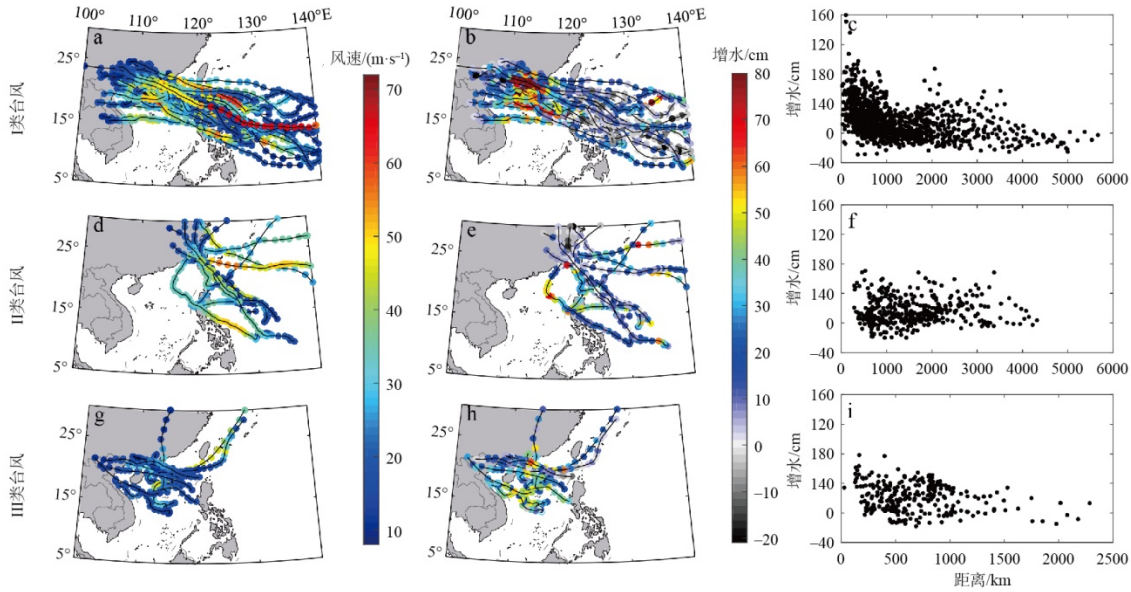


图 4 三类台风的路径(a、d、g)、引起赤湾站增水的强度(b、e、h), 以及赤湾站增水强度与其距台风中心距离间的散点图(c、f、i)

图 a、d、g 中填色为每次台风采样时刻观测到的台风最大风速, 图 b、e、h 中填色为对应时刻赤湾站实测的增水强度。该图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为 GS(2016)1665 的标准地图制作, 底图无修改

Fig. 4 The trajectories (a, d, g) of the three types of typhoons, the intensification of storm surge at the Chiwan Station (b, e, h), and the scatter plot between the intensification of storm surge at the Chiwan Station and its distance from the center of the typhoon (c, f, i). The colors in Figure a, d and g are the maximum typhoon wind speed observed at the sampling time of each typhoon, and the colors in (b), (e) and (h) are the measured storm surge intensity at the Chiwan Station at the corresponding time

考虑到台风对增水的影响范围为数百公里, 本文在上述 I 类台风与增水数据中剔除距赤湾站距离大于 3000km 以及各台风登陆后的增水数据, 同时剔除台风中心距赤湾站最近距离大于 450km 的台风及增水数据, 得到赤湾站增水随站点距台风中心距离(下文简称“距离”)变化关系的散点图(图 5)。以 100km 为间隔计算每个距离方格内增水的均值。结果显示, 当距离为 800km 时, 开始出现较为明显的增水($10.6\text{cm} \pm 2.5\text{cm}$); 距离小于 500km 时, 增水开始急剧增加; 小于 200km 时, 平均增水强度大于 50cm。整体上, 随着距离减小, 增水呈近似的指数增加趋势。以指数函数对增水均值进行拟合, 得到关系式为:

$$S = 76.48e^{-0.00252D} \quad (5)$$

式中: S 为增水; D 为距台风中心距离。拟合曲线与观测均值的相关系数达 0.97, 均方根误差为 3.33cm。鉴于极端增水危害性更大且广受关注, 本文对 95%分位

数的增水进行了拟合, 所得关系式为:

$$S_{95} = 258.75e^{-0.0048D} + 26.67 \quad (6)$$

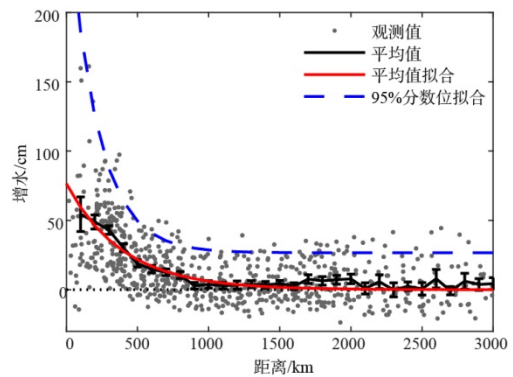


图 5 增水与观测站点距台风中心距离的关系图

Fig. 5 Storm surge as a function of distance between the Chiwan station and typhoon center

尽管上述拟合结果表明距离是决定台风风暴增水的重要因素, 但在任意距离统计方格上(如

500~600km 间), 不同台风引起的增水也存在很大差异(变化范围为-10~50cm)。该现象在台风靠近赤湾站 100km 以内时尤为显著, 说明还有其他因素对增水产生重要影响, 其中台风强度便是重要的因素之一(Jordan II et al, 2008)。衡量台风强度的物理量有最大风速、中心最低气压、最大风速半径等, 目前已有大量研究分析了这些变量与增水间的关系(魏晓宇 等, 2010; 吴海军 等, 2012; 韩树宗 等, 2013)。例如在琼州海峡, 台风中心气压每降低 10hPa, 增水极值增加 10%左右(杨玄阁 等, 2017)。为刻画台风强度对珠江口赤湾站增水的影响, 本研究分别绘制了台风中心最低气压、最大风速和最大风速半径与增水强度的关系散点图。同时, 为了尽量减小距离因素的影响, 并保持合适的样本数量, 将距离赤湾站 0~500km、

500~1000km、1000~2000km 和大于 2000km 的台风采样分开进行统计(图 6)。结果显示, 当距离大于 500km 时, 台风强度与增水间没有明显的相关关系, 即增水基本不受台风影响。而当距离小于 500km 时, 增水随着台风中心最低气压的降低而呈线性增强, 同时也随风速的增大以及最大风速半径的减小而增强。需要注意的是, 这里统计的是距离小于 500km 的所有台风采样时刻对应的增水。这意味着距离因素的影响并没有被完全剔除, 因为在理想状态下, 应统计与观测站点距离相同的不同强度台风引起的增水差异, 但目前积累的台风样本数并不足以支持该统计, 因而得到的台风强度与增水间的相关系数并不是很高($r=0.4$, $p<0.05$)。但从该分析中可以确定的是, 台风强度与增水之间近似地呈线性相关关系。

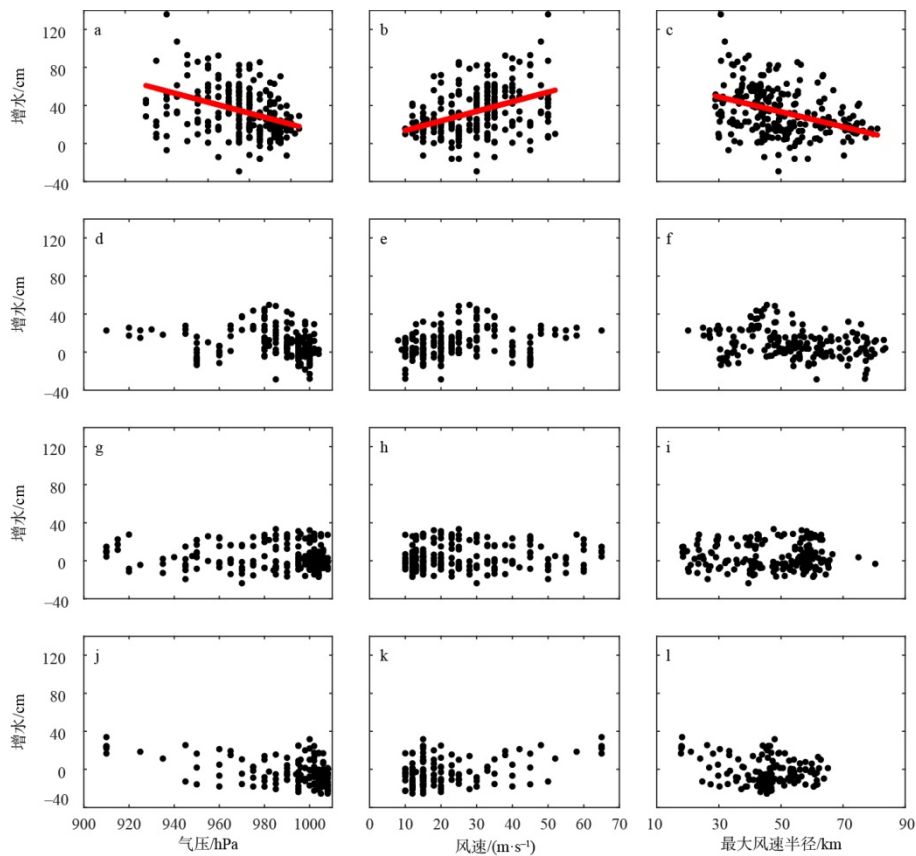


图 6 台风中心与赤湾站距离为 0~500km(a—c)、500~1000km(d—f)、1000~1500km(g—i)以及大于 2000km(j—l)时的增水与台风强度关系图

第一列图(a、d、g、j)为增水与台风中心最低气压的关系, 第二列图(b、e、h、k)为增水与最大风速的关系, 第三列图(c、f、i、l)为增水与最大风速半径的关系; 图 a—c 中的红色实线为线性拟合结果

Fig. 6 The relationship between storm surge and typhoon intensity when the distance between typhoon center and the Chiwan station is 0~500 km (a~c), 500~1000 km (d~f), 1000~1500 km (g~i) and greater than 2000 km (j~l). The first column shows the relationship between storm surge and the minimum pressure in the center of the typhoon, the second column shows the relationship between storm surge and the maximum wind speed, and the third column shows the relationship between storm surge and the radius of the maximum wind speed. The solid red lines in (a~c) show the linear fitting results

由前述分析结果可知, 台风风暴增水与台风距观测站点的距离呈指数关系, 而与台风强度呈线性相关

关系。利用这一关系, 可以构建同时考虑距离和台风强度这两个增水影响因素的经验关系模型:

$$S = ae^{bD} \times (\Gamma + c) + d \quad (7)$$

式中: S 为增水; D 为距台风中心距离; Γ 为台风强度; a 、 b 、 c 、 d 为拟合参数。刻画台风强度的参数包括最大风速、中心最低气压、最大风速半径等, 因此分别将这 3 个参数代入上述公式, 对增水进行最小二乘法拟合, 以确定最优拟合模型。拟合所得到的经验模型分别为:

$$S_w = 3.23e^{-0.0036D} \times (\Gamma_w - 3.90) + 4.48 \quad (8)$$

$$S_{Rw} = -3.59e^{-0.0035D} \times (\Gamma_{Rw} - 71.74) + 3.26 \quad (9)$$

$$S_p = -1.34e^{-0.0035D} \times (\Gamma_p - 1043.3) + 3.40 \quad (10)$$

式中: S_w 、 S_{Rw} 、 S_p 分别为用最大风速、最大风速半径、中心最低气压拟合的增水; Γ_w 、 Γ_{Rw} 、 Γ_p 分别为

最大风速、最大风速半径、中心最低气压的强度。

拟合结果显示, 上述 3 种模型组合均能成功地刻画出增水强度随台风强度增强及距离减小而增大的规律, 但各自效果亦存在一定差异(图 7)。其中, 以最大风速表征台风强度对增水进行拟合的方案效果最佳, 模拟所得的增水与实测增水间的决定系数(R^2)达 0.76, 均方根误差(RMSE)为 9.69cm。但需要注意的是, 该方案对极端高增水情况存在一定的低估现象(约 20%), 模拟值与观测值间的最小二乘法线性回归斜率为 0.78(图 7c)。相比之下, 采用最大风速半径表征台风强度的方案则整体上高估了高增水的强度(图 7e), 同时又低估了低增水的强度, 因而整体效果($R^2=0.61$, RMSE=14.04cm)不如前者(图 7f)。而以台风中心最低气压表征台风强度的方案, 其效果($R^2=0.31$, RMSE=19.66cm)要明显差于前两者(图 7i)。

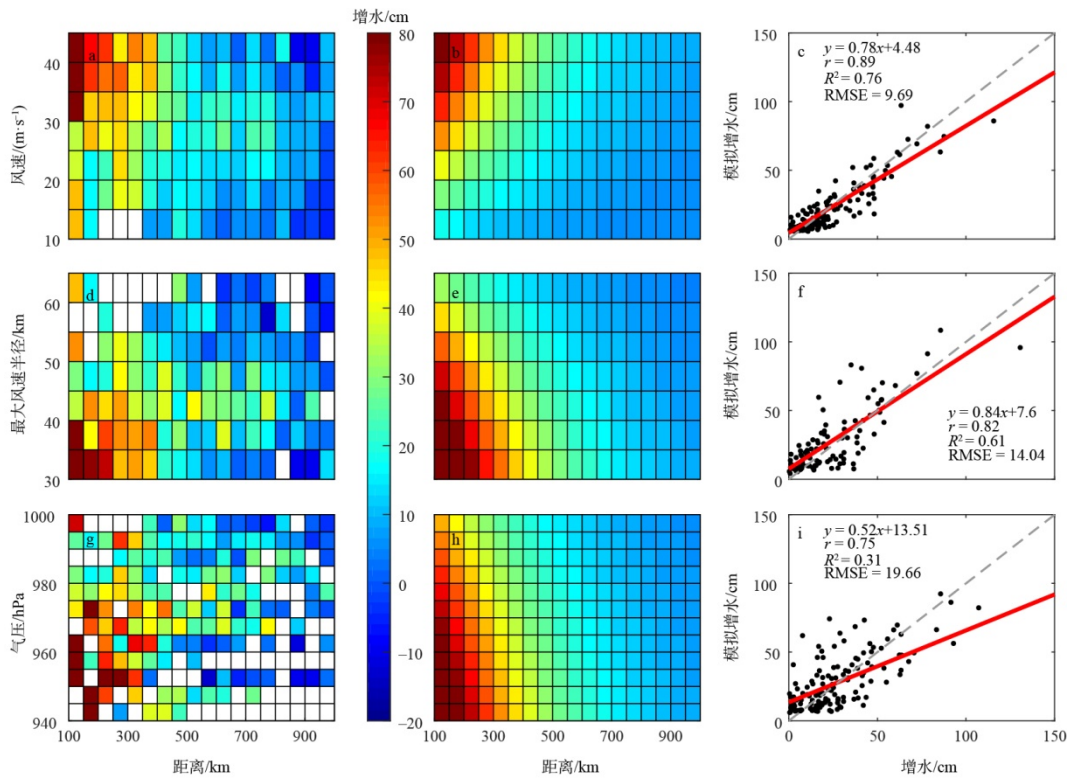


图 7 实际增水(a、d、g)和考虑台风强度(最大风速、最大风速半径和中心最低气压)与距台风中心距离的经验模型拟合增水(b、e、h)以及两者的对比(c、f、i)

图 c、f、i 中的红色实线为模拟增水与真实增水的线性拟合关系

Fig. 7 Actual storm surge (a, d, g), empirical model fitting storm surge (b, e, h) and their comparison (c, f, i) by considering typhoon intensity (maximum wind speed, maximum wind speed radius and central minimum pressure) and distance from typhoon center

虽然风速和距离共同模拟获得的模拟效果最好, 但是该拟合方式不能预测减水, 而且对极大增水值的

预测偏低约 20%, 并且存在一定的局限性。这可能与增水还受地形(谢亚力 等, 2007)、台风移动速度(韩树

宗等, 2013; 梁连松等, 2020)、台风路径和台风登陆位置(魏晓宇等, 2010; 潘明婕等, 2019; 张敏等, 2019; 王敏等, 2020)、沿岸径流、降雨、洪水(Benavente et al, 2006)、潮汐(尹宝树等, 2001; Yang et al, 2019)、海浪(Bertin et al, 2012)等多种因素的影响(陈波等, 2000, 2017)有关。其中, 很多因素的贡献存在较大的时空差异性, 需要结合有针对性的观测设计与数值模型进行具体问题具体分析。因此, 在今后研究中应该综合考虑更多因素, 以增强预报增水的准确性。此外, 一项新的指标“热带气旋丰满度”被用来衡量台风强度, 该指标综合考虑了热带气旋风场的整体特征, 克服了研究热带气旋强度与风场结构关系时单一尺寸参数的局限性, 采用该指标模拟增水可能会进一步提升模拟的准确性(Guo et al, 2017)。另外, 由于 1990—2019 年近距离登陆赤湾站的台风数量有限, 对拟合效果也有影响, 若今后该地登陆的台风数量增多后再重新统计, 也会进一步增加模拟的准确性。

3 总结

珠江口及其沿海城市群是我国社会和经济生产活动的核心区域之一。对该区域风暴潮灾害的研究与评估对我国海洋防灾减灾与资源开发有重要的科学意义和应用价值。本研究分析了近 30a(1990—2019 年)来

珠江口赤湾站的风暴增水数据, 发现该区域年平均增水强度没有明显变化, 但极端高(99.9%分位数)增水强度正逐渐上升($1.62\text{cm}\cdot\text{a}^{-1}$), 说明极端风暴潮灾害的强度不断变大。该区域增水受台风的影响极大, 其中最显著的特征为, 在本研究所关注的 30a 中有 20a 的年最大增水事件发生于台风期间(占 66.7%)。台风靠近至距观测站点 500~800km 时, 研究区域开始出现较为明显的增水。在该范围内, 增水强度与台风强度近似地呈线性关系, 与距台风中心距离呈指数关系。基于这些特征, 采用最大风速表征台风强度, 结合距离变量对增水进行拟合, 得到台风影响增水的经验关系模型为 $S_w = 3.23e^{-0.0036D} \times (\Gamma_w - 3.90) + 4.48$ 。该模型对增水的拟合效果($R^2=0.78$, $\text{RMSE}=9.69\text{cm}$)显著强于以台风最大风速半径或中心最低气压表征台风强度的方案。这些研究结果可为当地风暴潮灾害风险评估提供数据支持, 亦可为风暴潮数值模拟的验证与优化提供参考依据。

虽然本研究所分析的观测数据时间跨度达 30a, 但对于灾害风险评估中所关注的极端灾害事件的发生概率(如 50 年一遇或百年一遇)来说, 仍是不足的。要提升台风风暴潮灾害的风险评估与预报能力, 一方面是现场观测数据的持续积累必不可少, 另一方面是有待结合更多的观测资料来进一步优化数值模型。

参考文献 References

- 陈波, 邱绍芳, 2000. 广西沿海港湾风暴潮增水与台风路径和地形效应的关系[J]. 广西科学, 7(4): 282–285. CHEN BO, QIU SHAOFANG, 2000. Impacts of typhoon course and landform on water level fluctuation in the coastal bays in Guangxi[J]. Guangxi Sciences, 7(4): 282–285 (in Chinese with English abstract).
- 陈波, 董德信, 陈宪云, 等, 2017. 南海北部台风引起的广西近岸增水研究[J]. 海洋湖沼通报, (2): 1–11. CHEN BO, DONG DEXIN, CHEN XIANYUN, et al, 2017. A research on fluctuations of water level in Guangxi coast caused by typhoons in the northern South China Sea[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, (2): 1–11 (in Chinese with English abstract).
- 董剑希, 李涛, 侯京明, 等, 2014. 广东省风暴潮时空分布特征及重点城市风暴潮风险研究[J]. 海洋学报, 36(3): 83–93. DONG JIANXI, LI TAO, HOU JINGMING, et al, 2014. The characteristics of temporal and spatial distribution of storm surge in Guangdong Province and storm surge hazard study at Yangjiang City[J]. Acta Oceanologica Sinica, 36(3): 83–93 (in Chinese with English abstract).
- 广东省海洋与渔业厅, (2017-03-22). 广东省海洋灾害公报 2016[EB/OL]. http://nr.gd.gov.cn/zwgknew/tzgg/gg/content/post_3186916.html (in Chinese).
- 广东省海洋与渔业厅, (2018-04-23). 广东省海洋灾害公报 2017[EB/OL]. http://nr.gd.gov.cn/zwgknew/sjfb/tjsj/content/post_3186924.html (in Chinese).
- 郭洪寿, 1991. 我国潮灾度评估初探[J]. 南京大学学报, (5): 18–22 (in Chinese).
- 韩晶, 2019. 台风山竹和天鸽对珠海沿海风暴潮增水影响[J]. 吉林水利, (8): 47–49, 53. HAN JING, 2019. Effect of typhoon “Hato” and “Mangkhut” on rainfall of Storm Surge in Zhuhai coastal area-taking Sanzaohydrological station as an example[J]. Jilin Water Resources, (8): 47–49, 53 (in Chinese with English abstract).
- 韩树宗, 潘嵩, 2013. 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, 43(7): 1–6. HAN SHUZONG, PAN CHONG, 2013. Numerical simulation and analysis of storm surge in the Hangzhou bay[J]. Periodical of Ocean University of China, 43(7): 1–6 (in Chinese with English abstract).
- 黄世昌, 李玉成, 赵鑫, 等, 2008. 浙江沿海超强台风作用下风暴潮增水数值分析[J]. 海洋工程, 26(3): 58–64. HUANG SHICHANG, LI YUCHENG, ZHAO XIN, et al, 2008. Numerical analysis of storm surge due to a super typhoon in coastal region of Zhejiang province[J]. The Ocean Engineering, 26(3): 58–64 (in Chinese with English abstract).
- 梁连松, 张钊, 顾冬明, 等, 2020. 典型路径下台风移速调整对鳌

- 江站增水的数值分析[J]. 海洋预报, 37(5): 59–66. LIANG LIANSONG, ZHANG ZHAO, GU DONGMING, et al, 2020. Numerical analysis of typhoon's moving speed adjustment influence on storm surge of Aojiang station under typical route[J]. Marine Forecasts, 37(5): 59–66 (in Chinese with English abstract).
- 刘秋兴, 傅赐福, 李明杰, 等, 2018. “天鸽”台风风暴潮预报及数值研究[J]. 海洋预报, 35(1): 29–36. LIU QIUXING, FU CIFU, LI MINGJIE, et al, 2018. Storm surge forecast and numerical study of “Hato” Typhoon[J]. Marine Forecasts, 35(1): 29–36 (in Chinese with English abstract).
- 刘士诚, 陈永平, 谭亚, 等, 2021. 珠江河口 1822 号台风“山竹”期间风暴增水模拟及特性分析[J]. 海洋预报, 38(2): 12–20. LIU SHICHENG, CHEN YONGPING, TAN YA, et al, 2021. Storm surge simulation and characteristic analysis during typhoon “Mangkhut” 2018 in the Pearl River Estuary[J]. Marine Forecasts, 38(2): 12–20 (in Chinese with English abstract).
- 牛海燕, 刘敏, 陆敏, 等, 2011. 中国沿海地区台风致灾因子危险性评估[J]. 华东师范大学学报(自然科学版), (6): 20–25, 35. NIU HAIYAN, LIU MIN, LU MIN, et al, 2011. Risk assessment of typhoon hazard factors in China coastal areas[J]. Journal of East China Normal University (Natural Science), (6): 20–25, 35 (in Chinese with English abstract).
- 潘明婕, 孔俊, 杨芳, 等, 2019. 台风路径对磨刀门水道咸潮上溯动力过程的影响机制[J]. 热带海洋学报, 38(3): 53–67. PAN MINGJIE, KONG JUN, YANG FANG, et al, 2019. The particular influence caused by typhoon path on salt intrusion in the Modaomen Waterway, China[J]. Journal of Tropical Oceanography, 38(3): 53–67 (in Chinese with English abstract).
- 王康发生, 尹占娥, 殷杰, 2011. 海平面上升背景下中国沿海台风风暴潮脆弱性分析[J]. 热带海洋学报, 30(6): 31–36. WANG KANGFASHENG, YIN ZHAN'E, YIN JIE, 2011. Analysis on typhoon-induced storm surge vulnerability of China's coastal areas on rising sea level background[J]. Journal of Tropical Oceanography, 30(6): 31–36 (in Chinese with English abstract).
- 王敏, 尹义星, 陈晓阳, 等, 2020. 异常北折台风“洛坦”与异常西折台风“奥玛”路径的对比及预报[J]. 热带海洋学报, 39(1): 53–65. WANG MIN, YIN YIXING, CHEN XIAOYANG, et al, 2020. Comparison and prediction of unusual-turning tracks of typhoons Nock-ten and Orma[J]. Journal of Tropical Oceanography, 39(1): 53–65 (in Chinese with English abstract).
- 王培涛, 于福江, 刘秋兴, 等, 2010. 福建沿海精细化台风风暴潮集合数值预报技术研究及应用[J]. 海洋预报, 27(5): 7–15. WANG PEITAO, YU FUJIANG, LIU QIUXING, et al, 2010. Study of refined ensemble numerical typhoon surge forecast technology for Fujian coast[J]. Marine Forecasts, 27(5): 7–15 (in Chinese with English abstract).
- 魏晓宇, 刘雪峰, 2010. 闸坡站风暴潮增水与热带气旋登陆点及路径的关系[J]. 台湾海峡, 29(1): 122–127. WEI XIAOYU, LIU XUEFENG, 2010. Relation between storm surge and elements of landing location and path of tropical cyclone at Zhao station[J]. Journal of Oceanography in Taiwan Strait, 29(1): 122–127 (in Chinese with English abstract).
- 吴海军, 相海波, 谢巨伦, 2012. 永暑礁风暴潮增水极值预报初探[J]. 科技信息, (9): 41–42. WU HAIJUN, XIANG HAIBO, XIE JULUN, 2012. Pilot study of the prediction of the extremum water plus of Yongshu[J]. Science & Technology Information, (9): 41–42 (in Chinese with English abstract).
- 谢亚力, 黄世昌, 王瑞锋, 等, 2007. 钱塘江河口围涂对杭州湾风暴潮影响数值模拟[J]. 海洋工程, 25(3): 61–67. XIE YALI, HUANG SHICHANG, WANG RUIFENG, 2007. Numerical simulation of effects of reclamation in Qiantang Estuary on storm surge at Hangzhou Bay[J]. The Ocean Engineering, 25(3): 61–67 (in Chinese with English abstract).
- 杨玄阁, 朱良生, 2017. 琼州海峡台风风暴潮增水过程的数值分析[J]. 人民珠江, 38(1): 43–47. YANG XUANGE, ZHU LIANGSHENG, 2017. Numerical simulation and analysis of storm surge in the Qiongzhou Strait[J]. Pearl River, 38(1): 43–47 (in Chinese with English abstract).
- 尹宝树, 王涛, 侯一筠, 等, 2001. 渤海波浪和潮汐风暴潮相互作用对波浪影响的数值研究[J]. 海洋与湖沼, 32(1): 109–116. YIN BAOSHU, WANG TAO, HOU YIJUN et al, 2001. Numerical study of the influence of waves and tide-surge interaction on waves in Bohai Sea[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 32(1): 109–116 (in Chinese with English abstract).
- 殷成团, 张金善, 熊梦婕, 等, 2019. 我国南海沿海台风及风暴灾害趋势分析[J]. 热带海洋学报, 38(1): 35–42. YIN CHENG TUAN, ZHANG JINSHAN, XIONG MENGJIE, et al, 2019. Trend analysis of typhoon and storm surge disaster on the South China Sea coast of China[J]. Journal of Tropical Oceanography, 38(1): 35–42 (in Chinese with English abstract).
- 尹尽勇, 徐晶, 曹越男, 等, 2012. 我国海洋气象预报业务现状与发展[J]. 气象科技进展, 2(6): 17–26. YIN JINYONG, XU JING, CAO YUENAN, et al, 2012. The development and current status of marine weather forecasting operation in China[J]. Advances in Meteorological Science and Technology, 2(6): 17–26 (in Chinese with English abstract).
- 于福江, 董剑希, 叶琳, 2015. 中国风暴潮灾害史料集: 1949–2009[M]. 北京: 海洋出版社. YU FUJIANG, DONG JIANXI, YE LIN, 2015. Collection of storm surge disasters historical data in China 1949–2009[M]. Beijing: China Ocean Press (in Chinese with English abstract).
- 张敏, 罗军, 胡金磊, 等, 2019. 雷州市沿海风暴潮淹没危险性评估[J]. 热带海洋学报, 38(2): 1–12. ZHANG MIN, LUO JUN, HU JINLEI, et al, 2019. Inundation risk assessment of storm surge along Lei Zhou coastal areas[J]. Journal of Tropical Oceanography, 38(2): 1–12 (in Chinese with English abstract).
- 自然资源部, 海洋预警监测司, (2019-04-28). 中国海洋灾害公报 2018[EB/OL]. http://gi.mnr.gov.cn/201905/t20190510_2411197.html. Natural Resources Ministry, Marine Early

- Warning and Monitoring Division, (2019-04-28). Bulletin of China marine disaster 2018[EB/OL]
- ATKINSON G D, HOLLIDAY C R, 1977. Tropical cyclone minimum sea level pressure/maximum sustained wind relationship for the western North Pacific[J]. *Monthly Weather Review*, 105(4): 421–427.
- BENAVENTE J, DEL RÍO L, GRACIA F J, et al, 2006. Coastal flooding hazard related to storms and coastal evolution in Valdelagrana spit (Cadiz Bay Natural Park, SW Spain)[J]. *Continental Shelf Research*, 26(9): 1061–1076.
- BERTIN X, BRUNEAU N, BREILH J F, et al, 2012. Importance of wave age and resonance in storm surges: the case Xynthia, bay of Biscay[J]. *Ocean Modelling*, 42: 16–30.
- FAN LIJUN, 2014. Quantile trends in temperature extremes in China[J]. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 4(7): 304–308.
- GAO NA, MA YI, ZHAO MINGLI, et al, 2020. Quantile analysis of long-term trends of near-surface chlorophyll-*a* in the Pearl River Plume[J]. *Water*, 12(6): 1662.
- GUO XI, TAN ZHEMIN, 2017. Tropical cyclone fullness: a new concept for interpreting storm intensity[J]. *Geophysical Research Letters*, 44(9): 4324–4331.
- JORDAN II M R, CLAYSON C A, 2008. A new approach to using wind speed for prediction of tropical cyclone generated storm surge[J]. *Geophysical Research Letters*, 35(13): L13802.
- KOENKER R, HALLOCK K F, 2001. Quantile regression[J]. *Journal of Economic Perspectives*, 15(4): 143–156.
- LU XIAOQIN, YU HUI, YING MING, et al, 2021. Western north pacific tropical cyclone database created by the China meteorological administration[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 38(4): 690–699.
- MOON S R, PARK S J, KANG J W, et al, 2006. Numerical simulations of storm surge/coastal flooding at Mokpo coastal zone by MIKE21 model[J]. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 18(4): 348–359.
- THIRUVENKATASAMY K, MOHAMED R P, MAHESH K S, 2017. Estimation of extreme storm surge for the Chennai coast using Delft3D[J]. *TERI Information Digest on Energy and Environment*, 16(4): 391–400.
- WANG SHUAI, TOUMI R, 2021. Recent migration of tropical cyclones toward coasts[J]. *Science*, 371(6528): 514–517.
- YANG WANKANG, YIN BAOSHU, FENG XINGRU, et al, 2019. The effect of nonlinear factors on tide-surge interaction: a case study of Typhoon Rammasun in Tieshan Bay, China[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 219: 420–428.
- YING MING, ZHANG WEI, YU HUI, et al, 2014. An overview of the China meteorological administration tropical cyclone database[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 31(2): 287–301.