

江苏海域台风浪波高时空分布特性研究

王一心¹, 潘毅^{1*}, 周凤妍¹, 于普兵², 潘锡山³, 韩雪³

(1. 河海大学 港口、海岸与近海工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 浙江省水利科学研究院, 浙江 杭州 310020; 3. 江苏省海涂研究中心, 江苏 南京 210036)

摘要: 基于浅水方程和第三代波浪模型构建江苏沿海的风暴潮-波浪耦合模型, 基于模型风场和再分析风场构建混合风场模型, 根据台风路径将江苏沿海典型台风分为4种类型并进行数值模拟。通过对影响江苏海域不同特征典型台风浪过程的复演, 重点研究了不同类型台风引起的台风浪波高的时空分布特征。研究表明: 从空间上看, “北部掠过型”台风、“沿江苏近岸北移型”台风分别会对江苏北部沿海和南部近海海域产生较大影响, “东侧掠过型”台风对江苏近海海域影响最广; 从持续时间上看, “北部掠过型”台风和“东侧掠过型”台风在江苏近海区域引起的大浪持续时间较长, “北部掠过型”台风和“沿江苏近岸北移型”台风分别在江苏沿岸和辐射沙脊区域造成持续的较大波高。

关键词: 江苏沿海; 台风浪; 波高; 时空分布

中图分类号: P731.22 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2023)05-0023-12

0 引言

台风浪是我国主要的海洋灾害之一, 多发于我国南海、东海、台湾海峡、台湾省以东等海域, 也出现于黄海和渤海海域, 给我国海岸防护工程、近岸海域船舶、海水养殖业带来很大程度的危害。江苏的地理位置决定了从福建、浙江等地登陆的台风在西风带的压迫及副热带高压环流的引导下, 从江苏沿海出海的概率很大; 且夏季江苏外海海温偏高, 沿海北上的台风能量损耗较少, 因此易在江苏沿海造成灾害性海浪, 而秋季副热带高压东退, 在近海转向的台风向北发展, 转向点北移, 也会对位置偏北的江苏海域造成影响^[1]。近年来, 气候变暖导致影响江苏的台风日益增多, 因此, 对台风在江苏造成的灾害性海浪的分布特征的深入研究日趋迫切。

为了研究台风造成的台风浪等海洋灾害, 学者大多利用数值模拟的方法来验证已发生的或预报、

预测将要发生的灾害性海浪过程。风场模拟主要选取美国国家环境预报中心(National Centers for Environmental Prediction, NCEP)提供的气候预报系统(Climat Forecast System Version 2, CFSV2)或欧洲中尺度天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)提供的第五代大气再分析全球气候数据(ECMWF Reanalysis v5, ERA-5)等再分析风场数据作为背景风场^[2-3], 再根据具体情况选取Jelesnianski等理论气压模型或Holland等经验模型叠加构成输入风场^[3]。波浪模型多采用MIKE21-SW波浪数学模型^[3-4]、第三代近海浅水海浪数值计算模式(Simulating Waves Nearshore, SWAN)^[5]、WaveWatch III海浪模型^[6]等。卞建云^[7]采用藤田台风模型模拟风场, 使用高级环流模型(Advanced Circulation Model, ADCIRC)作为风暴潮模型模拟了不同重现期下的风暴增水极值, 并比较了江苏沿海百年一遇台风引

收稿日期: 2022-08-08。

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51979098); 浙江省自然科学基金项目(LZ22E090003)。

作者简介: 王一心(1999-), 女, 硕士, 主要从事海岸防灾研究工作。E-mail: 419006788@qq.com

*通信作者: 潘毅(1985-), 男, 教授, 博士, 主要从事海岸防灾研究工作。E-mail: panyi@hhu.edu.cn

发风暴增水较大的区域。武海浪等^[8]采用Holland台风模型,使用三维河口近海水动力泥沙模型(Estuarine, Coastal Ocean Model with Sediment Transport, ECOMSED)和SWAN模型模拟了风暴潮水位并计算了苏澳港的台风浪,得出风暴潮位会对局部波高产生影响的结论。王金城^[9]则使用Holland台风模型、西北太平洋潮波模型和ADCIRC模型模拟了在假想不利台风作用下江苏沿岸的增水情况,得出了江苏沿岸可能的最大风暴潮增水与不利台风。

台风浪时空分布研究对于防灾减灾、渔业生产、海洋工程建设等有着重要的作用。为深入了解特定海域的台风浪时空分布特征,有学者进行了相关研究。王毅等^[10-11]针对1909号台风“利奇马”、1918号台风“米娜”引起的大浪过程开展研究,指出浙江沿海波浪的有效波高和风速在空间分布上相关性较高,有效波高越高,风浪占比越大,但最大有效波高不一定位于台风中心区域内。有学者根据路径把台湾海峡的常见台风进行分类并开展了数值研究,从整体的空间分布上看,台湾海域的台风浪更多是对东部海岸造成较为严重的影响,且“登台入闽”型台风是给福建沿海带来大范围台风浪灾害的一类^[12],该区域最大风速和有效波高的出现区域会受到台风中心位置的显著影响^[13]。由于江苏海域的台风浪时空分布特征的研究相对较少,为了给江苏海域的防灾减灾、海上生产、海洋工程等提供参考依据,有必要探讨研究影响江苏海域的台风浪的时空分布特征。为了直观地显示不同路径下的江苏沿海台风浪分布特征以及对江苏海域造成的影响,本文将对影响江苏海域的历史典型台风进行分类,并分别从空间分布和持续时间两个角度模拟历史典型台风造成的江苏海域台风浪波高分布特征。

1 模型与方法

根据路径将影响江苏海域的历史典型台风进行分类,建立数学模型并分别对这几种类型的台风进行模拟。风场模型采用模型风场与再分析风场构建的混合风场,风暴潮模型基于ADCIRC构建^[14],波浪模型基于SWAN构建^[15],二者通过交换水位、流速、辐射应力进行耦合,并通过对天文潮和风暴

潮过程的复演对模型进行验证。

1.1 台风分类

台风路径不同会导致生成的台风浪传播方向不同。由于影响江苏海域的台风数量众多,为掌握其整体情况,研究时可按路径将台风进行分类。根据1979—2021年的台风路径统计,造成江苏沿海风暴潮灾害的台风路径主要有4类:台风自西北太平洋洋面生成后,自江苏海域北部掠过西移;台风逼近江苏沿海后转向;台风在福建或浙江沿海登陆后从江苏或长江口出海;台风自西北太平洋洋面生成后,从江苏沿海北上。这里简单把上述4类台风路径记作“北部掠过型”、“东侧掠过型”、“穿过江苏北移型”、“沿江苏近岸北移型”。

为了方便研究,从影响江苏的4类历史典型台风中各选取3场作为代表进行数值模拟。“北部掠过型”典型台风过程选取台风“达维”(1210)、台风“爱丽”(9415)和台风“风神”(0209),该类型台风自西北太平洋洋面生成之后,西行进入江苏海域北部区域,过程中最大波高与台风中心路径密切相关,主要影响区域为江苏中部—北部地区;“东侧掠过型”典型台风过程选取台风“派比安”(0012)、台风“梅花”(1109)和台风“灿鸿”(1509),该类型台风在影响江苏沿海的台风中较为常见,此类台风生成后逼近江苏沿海,转向后向着背离江苏沿海的方向发展,最大波高多出现在台风中心移动路径的右侧;“穿过江苏北移型”典型台风过程选取台风“黑格比”(2004)、台风“杰夫”(8506)和台风“亚力士”(8707),此类型台风由于穿过江苏腹地,台风强度受到很大的削弱,风力大大减小,台风浪波高整体较低,影响范围偏小;“沿江苏近岸北移型”典型台风过程选取台风“安比”(1810)、台风“艾德”(8406)和台风“玛美”(8509),该类型台风大部分强度在移动至江苏北部时已衰减完毕,波高极值主要分布在浙江沿岸。以上所选取的台风中,“穿过江苏北移型”的3场台风由于在浙江登陆,强度受到削弱,因此在进入江苏后台风强度较低,其余3类台风强度比较相近。经验证,以上所选取的同种类型的台风造成的台风浪分布总体特征大致相似,基本可以代表其所属类型。绘制这4种类型共12场的台风路径示意图(见图1),其中台风路径数据使用中国气

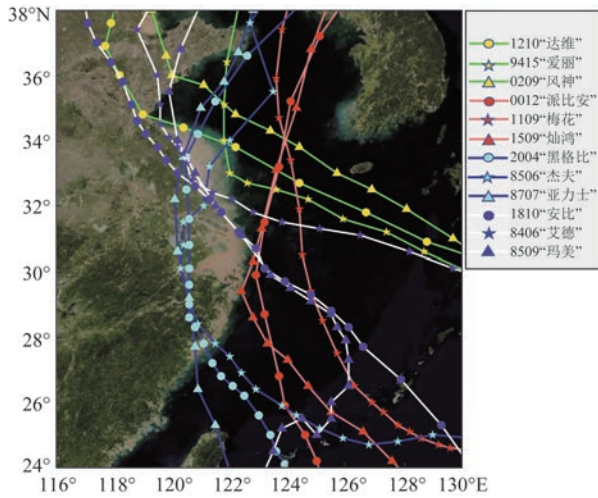


图1 代表性台风路径

Fig.1 The tracks of selected typhoons

象局热带气旋资料中心(来源:<https://tcdata.typhoon.org.cn/>)提供的最佳路径数据集^[16-17]。

1.2 模型建立

在模拟历史典型台风时需要建立台风风场模型、台风浪模型和风暴潮模型。台风风场模型采用模型风场与再分析风场构建的混合风场,波浪模型采用SWAN模型,风暴潮模型采用ADCIRC模型,并将二者耦合为风暴潮-波浪耦合模型来模拟典型台风作用下江苏省台风浪分布情况。

1.2.1 风场模型

风场模型采用混合风场构建模式,靠近台风中心附近采用模型风场,远离台风中心部分采用再分析风场。模型风场采用JELESNIANSKI^[18]于1965年提出的经验风场和气压场模型,即捷氏模型。模型中气压计算公式如下:

$$\begin{cases} p(r) = \frac{\rho_a}{3} \left(\frac{V_R}{r} \right)^2 \left(\frac{r}{R} \right)^3 + p_0 & 0 \leq r \leq R \\ p(r) = -\rho_a \left(\frac{V_R}{r} \right)^2 \frac{R}{r} + p_\infty & r > R \end{cases} \quad (1)$$

式中: $p(r)$ 为离台风中心直线距离为 r 处的气压值; ρ_a 为空气密度; p_∞ 为无穷远处的气压,本文中默认为大气压; p_0 为台风中心低压; r 为系数,表示表面风和热带气旋气压梯度风之间的倍数关系; V_R 为近中心的最大风速; R 为最大风速半径,本文中它的取值采

用KNAFF等^[19]于2007年提出的经验计算方法:

$$R = m_0 + m_1 V_{SR} + m_2 (\varphi - 25) \quad (2)$$

式中: m_0 、 m_1 和 m_2 为与台风所在海域有关的经验系数,在西太平洋分别取值为38.0、-0.116 7和-0.004; V_{SR} 为台风中心的移动速度; φ 为台风中心所在位置的纬度; γ 的计算公式为:

$$\gamma = 2V_R \sqrt{\frac{\rho_a}{3(p_\infty - p_0)}} \quad (3)$$

模型计算的风速包括两个部分:一是对称的梯度风速,其与最大风速和最大风速半径有关;二是移行风速,其与台风中心移动速度有关。风速计算公式如下:

$$\begin{cases} V(r) = V_R \left(\frac{r}{R} \right)^{\frac{3}{2}} + V_{SR} \frac{r}{R+r} & 0 \leq r \leq R \\ V(r) = V_R \left(\frac{R}{r} \right)^{\frac{1}{2}} + V_{SR} \frac{R}{R+r} & r \geq R \end{cases} \quad (4)$$

式中: $V(r)$ 为离台风中心直线距离为 r 处的风速值。模型风场中计算所采用的台风中心位置、最大风速以及中心低压均由最佳路径数据集提供^[16-17]。

再分析风场选用ECMWF的ERA-5资料,空间分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$,时间分辨率为1 h,高度为海面以上10 m。在使用ERA-5资料作为背景风场时,为了避免与模型风场组合的结果发生不连续的现象,首先应根据实测台风路径对ERA-5资料中的台风中心进行修正,再将台风模型与ERA-5背景风场进行组合。由于台风模型风场的精度由台风中心向外递减,再分析风场的精度由台风中心向外递增,因此应根据不同时刻背景风场和模型风场的计算精度动态选择最优半径,更好地适应不同时刻出现的不同强度的台风风场,最优半径所在位置的台风模型和背景风场应有相同精度。

组合风场时,在最优半径内使用模型风场计算值,最优半径外使用ECMWF资料,最优半径附近范围为过渡区。过渡区的内外边界 R_1 和 R_2 定义如下^[20]:

$$R_1 = R_{opt} - \beta R_l \quad (5)$$

$$R_2 = R_{opt} + (1 - \beta) R_l \quad (6)$$

式中: β 为经验系数,本文中取为0.3; R_l 为过渡区宽度,本文中取为1.2倍的最大风速半径; R_{opt} 为叠加半径,本文中取为3倍的最大风速半径。为保证平滑过渡,过渡区的风速为两套资料的组合,混合风场

的风速计算公式为:

$$v_{\text{blend}} = \begin{cases} v_{\text{mod}} & r < R_1 \\ (1 - \alpha)v_{\text{mod}} + \alpha v_{\text{rea}} & R_1 \leq r \leq R_2 \\ v_{\text{rea}} & r > R_2 \end{cases} \quad (7)$$

式中: v_{mod} 为参数化模型风场计算值; v_{rea} 为数值模拟风场值; α 为过渡系数, 计算公式为:

$$\alpha = \frac{r - R_1}{R_2 - R_1} \quad (8)$$

1.2.2 风暴潮-波浪耦合模型

风暴潮模型采用 ADCIRC 模型, 该模型利用有限元法求解雷诺平均的纳维-斯托克斯 (Reynolds-Averaged Navier-Stokes, RANS) 方程。波浪模型采用基于波作用平衡方程开发的 SWAN 模型。该模型由代尔夫特理工大学 (Technische Universiteit Delft, TU Delft) 开发, 能准确模拟复杂的潮流、地形、风场环境下的波浪场, 适用于各种范围水域的模拟。风暴潮-波浪耦合模型基于 ADCIRC+SWAN 水动力模型构建, 二者通过交换水位、流速和辐射应力进行耦合。该耦合模型已经在相关领域被用来进行台风浪风暴潮模拟且效果较好, 在世界范围得到广泛应用^[21-22]。

风暴潮-波浪耦合模型的计算区域覆盖渤海、黄海、东海 3 个海域, 范围为 $25^{\circ} \sim 41^{\circ} \text{N}$, $118^{\circ} \sim 129^{\circ} \text{E}$ 。模型采用非结构化三角网格, 工程区域网格进行加密处理, 开边界处网格分辨率约为 0.2° , 岸线区域分辨率较为精细, 可达 0.02° 。模型所使用地形资料来自于全球地形数据集 (The General Bathymetric Chart of the Oceans, GEBCO), 近岸区域采用海图水深数据进行地形修正后再插值到模型网格当中。ADCIRC 模式模拟区域计算网格划分见图 2, 水位基准面采用平均海平面。

模型开边界有北、东、南 3 条, 采用潮位作为开边界驱动力。开边界计算潮位所采用的潮汐模型包括 M_2 、 S_2 、 N_2 、 K_2 、 K_1 、 O_1 、 P_1 、 Q_1 、 MF 、 MM 10 个分潮。在本文选取的海域范围内, 这 10 个分潮可以充分准确地反映该区域的潮位变化, 潮流和波浪每隔 60 min 耦合计算一次。

1.3 模型验证

为了验证模型的准确性, 本文利用 3 场典型台风对响水测站、苏北浅滩测站的作用过程进行波浪

验证, 利用 3 个临时验潮站进行潮位验证, 利用苏北浅滩测站进行寒潮影响下的波浪验证。测站位置见图 2, 其中响水测站和苏北浅滩测站用星形表示, 临时验潮站 1#、2#、3# 用圆形表示。

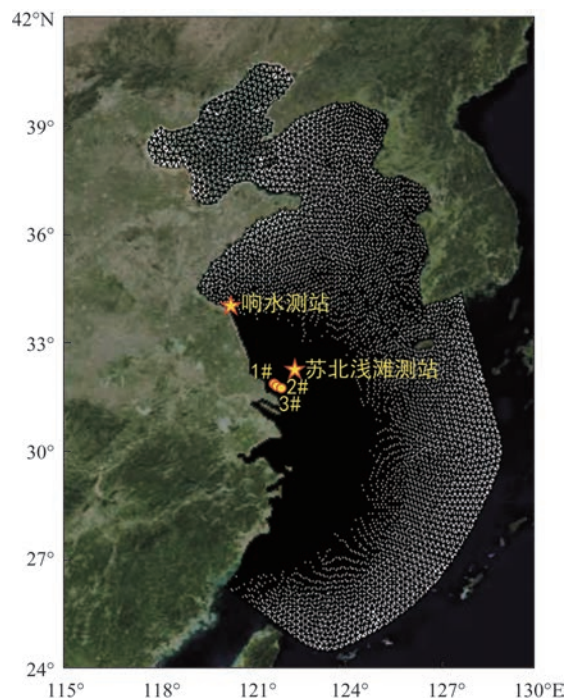


图2 模拟区域网格及测站位置

Fig.2 Grid of simulation area and locations of measurements stations

首先进行波浪验证。利用响水测站 (34.436°N , 120.101°E) 的台风浪实测数据对台风“达维”(1210) 波浪场进行对比验证, 利用苏北浅滩测站 (32.7°N , 122.4°E) 的台风浪实测数据对台风“烟花”(2106) 和台风“灿都”(2114) 的波浪场进行对比验证, 结果见图 3。这 3 场台风浪实测值和模拟值的平均绝对误差分别为 0.273、0.422、0.545, 均方根误差分别为 0.416、0.506、0.661, 平均相对误差分别为 37.75%、13.03%、17.99%。由于本文为了研究台风影响下江苏海域的最不利情况, 因此主要关注最大有效波高, 图 3 模拟得到的有效波高峰值与实测数据拟合较好, 能反映波高变化趋势, 因此模型能够满足本次研究的需求。

采用苏北浅滩测站获取的 2021 年 10 月 15—17 日和 12 月 24—25 日寒潮影响下的波浪数据进行对比验证, 结果见图 4, 因寒潮不涉及台风路径, 因此

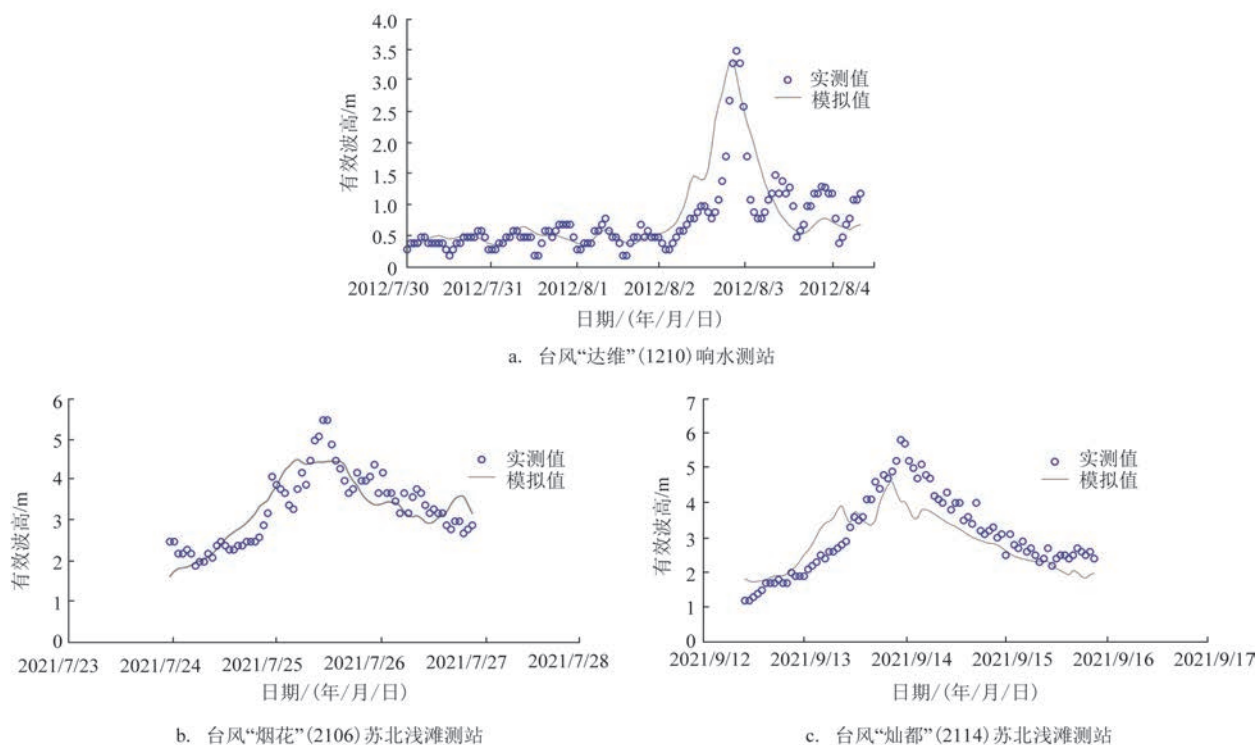


图3 3场典型台风对测站作用过程的波浪验证

Fig.3 Wave validation of the effect of three typical typhoons on measurement stations

直接采用ECMWF再分析风场进行驱动,图中时间均为北京时。结果表明,这两场寒潮波浪实测值和模拟值的平均绝对误差分别为0.248和0.353,均方根误差分别为0.305和0.420,平均相对误差分别为8.61%和19.17%。由图可见,模拟的寒潮影响下的有效波高和其随时间变化的过程与实测数据吻合较好。

采用2019年中交第三航务工程勘察设计院水

文技术室实地测验得到的各测点逐时潮位实测值进行潮位验证。模型选择了计算区域内3个代表性临时验潮站1#(121.84°N, 32.26°E)、2#(121.85°N, 32.24°E)、3#(121.85°N, 32.22°E),水位基准面均换算成为1985国家高程基准面。潮位验证时间范围为2019年2月15日—3月1日共15 d的连续水位时间序列,包含了大潮、中潮、小潮。由图5可知,在验证时段内,模型计算和实测的高低潮位及过程线相

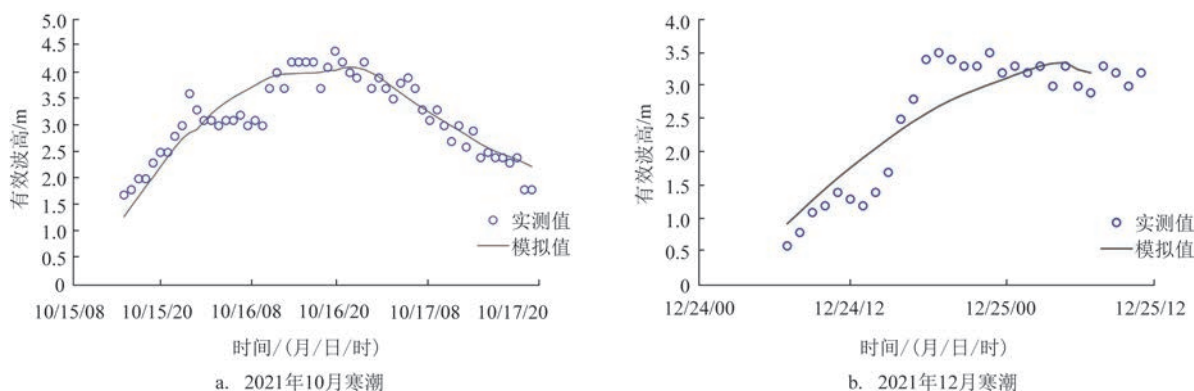


图4 苏北浅滩测站两场寒潮过程的波浪验证

Fig.4 Wave validation of the effect of two cold air processes on Northern Jiangsu Shoal Measurement Station

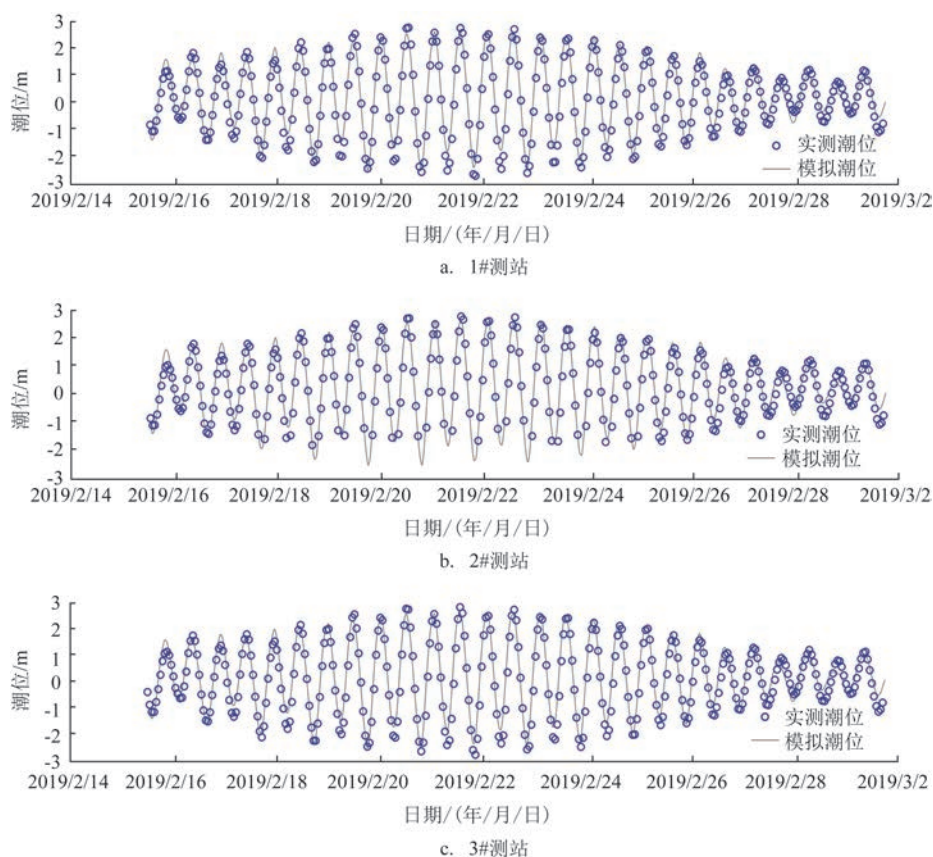


图5 2019年2月15日—3月1日各测点潮位过程线验证

Fig.5 Validation of tidal levels of the measurement points from February 15 to March 1, 2019

位吻合较好。

1.4 模拟方案

利用 ECMWF 的背景风场和 JELESNIANSKI 经验风场构造的混合风场作为 ADCIRC 模式的输入风场,并结合全球实测地形数据建立江苏沿海台风浪模型,利用该模型对江苏历年引起台风浪的台风进行模拟,得出有效波高数据,分析台风浪有效波高的空间分布和时间上的传播特征。

2 江苏海域台风浪有效波高时空分布特征

按照第1节对江苏沿海台风的分类方法,将影响江苏海域的典型台风分成4类并进行台风浪模拟,得到台风浪有效波高最大值在空间和持续时长上的分布特征,分析不同类型台风给江苏海域带来的影响。

2.1 江苏沿海台风浪波高空间分布特征

将选取的4种类型共12场的江苏海域典型台风过程进行台风浪模拟,计算出每场台风造成的台风浪全时段最大值,并将同一类型的3场台风浪高最大值合成为单类波高最大值,以此分别绘制4种类型台风引起的台风浪有效波高最大值分布,结果见图6。

由图6可见,“北部掠过型”台风的影响范围主要为江苏北部及山东地区,在江苏海域形成NW—SE分布的高波浪能区域。北边可以影响到山东半岛,沿岸地区最大波高可达2.0~4.0 m,近海波高可达4.0~6.0 m。对于江苏沿海北部的影响更为巨大,近岸波高可达6.0 m,沿岸波高也达到2.0~4.0 m。江苏南部近岸波高也达到4.0 m。

“东侧掠过型”台风最大波高均分布在江苏近海地区水深较大的海域,台风浪波高峰值与台风路径吻合度较高,在江苏近海及外海NE—S海域形成

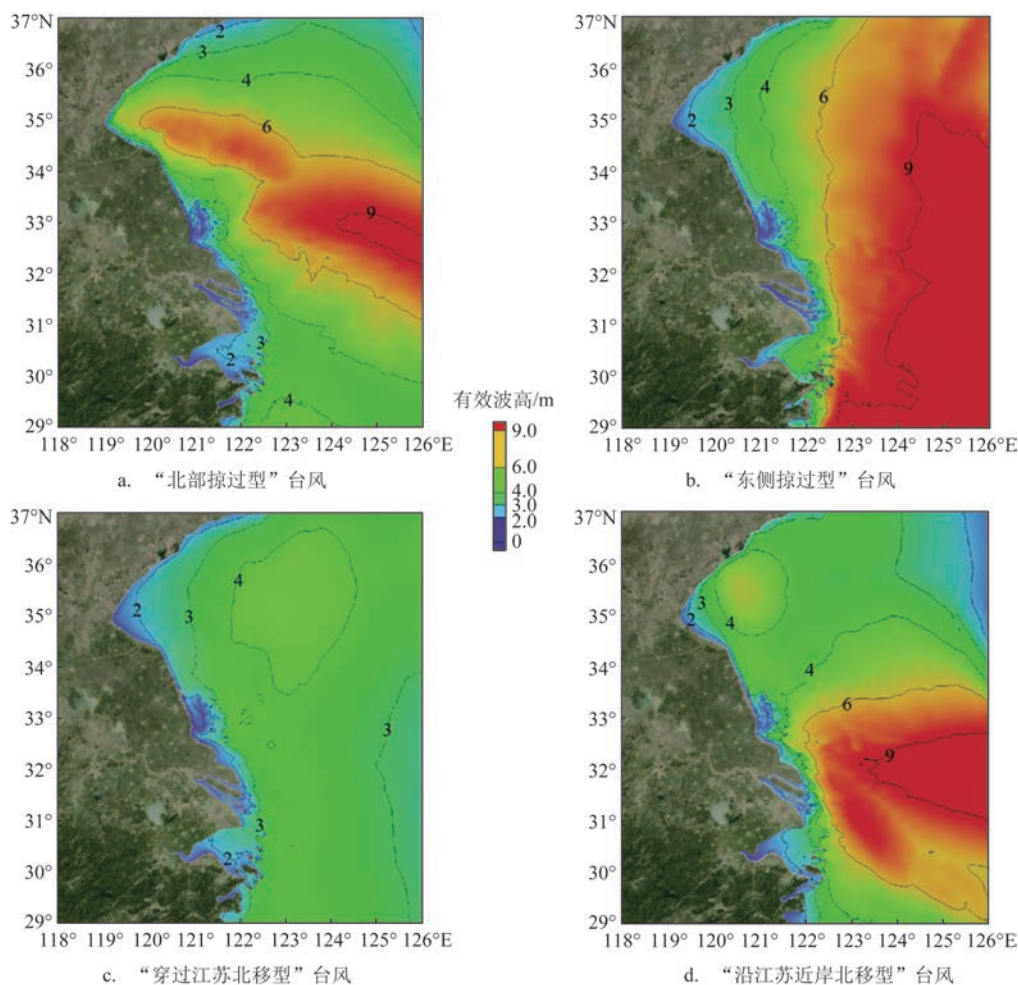


图6 4种类型台风引起的台风浪有效波高最大值分布

Fig.6 Distribution of significant wave height maxima of typhoon waves caused by four types of typhoons

高波浪能海域。与其他类型台风相比,该类型台风的台风浪影响区域对江苏北部及山东半岛地区的影响较为突出。山东半岛附近波高可达6.0 m,台风浪波高峰值沿台风路径向江苏沿岸地区递减,衰减层次明显,依次从9.0 m以上波高衰减为6.0 m,4.0 m,3.0 m,到达江苏沿岸时衰减为2.0 m。对于江苏南部的影响一直延伸到通州湾以南,通州湾地区的波高可达4.0 m。

“穿过江苏北移型”台风引起的台风浪高度比其他类型小,但影响范围没有变化,总体形成江苏近海海域NE—SW分布的中高波浪能区域,北至山东半岛,南至通州湾以南地区,江苏、浙江沿岸也受到台风浪影响,整体波高超过2.0 m。由于台风穿过江苏地区会造成风力衰减,因此未在江苏沿岸地区造成较大台风浪,只在穿出江苏进入黄海海域后台

风浪再次增大,波高为3.0~4.0 m。

“沿江苏近岸北移型”台风对江苏沿岸以及长江口、通州湾地区波高的影响不大,但在江苏近海南部海域会形成SE—S分布的超高波浪能区域。台风浪波高最大值分布在台风路径左右,且随着台风浪的传播逐步衰减。台风浪主要波及区域为江苏中部、近海地区及浙江沿岸和近海地区,波高可达2.0~4.0 m。江苏沿岸波高多为2.0~3.0 m。此类台风穿过江苏后进入渤海区域,风力有所增强,导致渤海地区以及山东青岛、山东半岛南部地区的台风浪波高再次增大,可达4.0 m。

进一步比较以上4种类型台风的有效波高最大值,得到的所有类型的有效波高最大值可代表江苏海域台风浪的可能最极端情况,结果见图7。从图中可以看出,江苏沿海海域最大波高可达4.0~6.0 m,

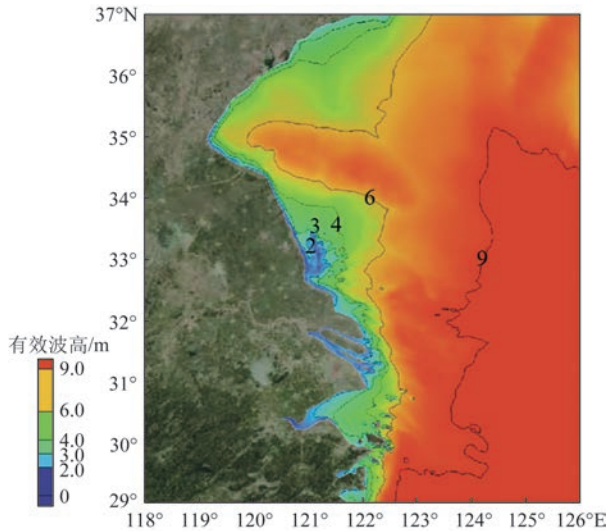


图7 江苏海域台风浪有效波高最大值分布

Fig.7 Distribution of significant wave height maxima of typhoon waves in Jiangsu coastal sea

其分布在江苏中北部近海海域,山东半岛南部地区波高也受江苏海域影响,可增加至4.0 m左右,此高度波浪对于沿岸地区的影响将会十分剧烈。此外,江苏中部和南部地区的有效波高最大值也达到3.0~4.0 m,辐射沙脊处北部和东北部有效波高最大值为3.0 m左右,而辐射沙脊南部地区最大可达4.0 m以上。

2.2 江苏沿海台风浪有效波高持续时长分布特征

为了直观地研究台风浪在江苏近海和沿岸传播的持续时长特征规律,在模型中根据位置不同选取3类测点分析传播过程。第一类测点位于江苏沿海北部,设置了1—3号测点;第二类测点位于江苏沿海辐射沙脊,设置了4—11号测点;第三类测点位于江苏近海海域,设置了12—15号测点。测点分布见图8。

定义 t_{Hx} 为每个测点有效波高超过 x m的持续时长(如 $t_{H2.5}$ 指有效波高超过2.5 m的持续时长),并取每个测点的 t_{H1} 、 $t_{H1.5}$ 、 $t_{H2.5}$ 、 $t_{H3.5}$ 、 t_{H5} ,针对每一类取平均值,针对不同 t_{Hx} 绘制12场台风作用下15个测点波高超过 x m的持续时间柱状图,结果见图9。

t_{H1} :“北部掠过型”台风中,除台风“风神”受路径和风力影响导致对波高影响减弱外,其余场次的台风都使得辐射沙脊和近海海域大于1.0 m的波高持

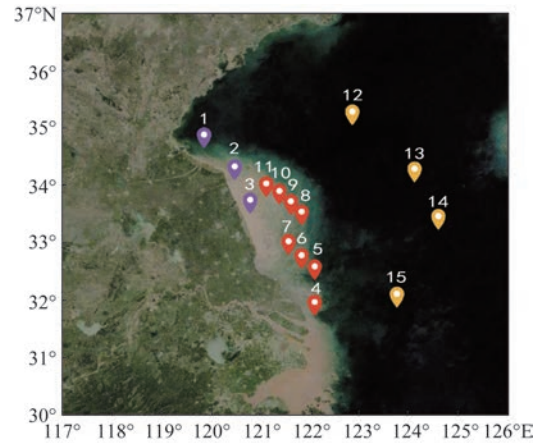


图8 测点分布

Fig.8 Distribution of measuring points

续了较长时间,尤其是1210号台风“达维”使得辐射沙脊范围大于1.0 m波高的持续时间超过3 d。“东侧掠过型”和“沿江苏近岸北移型”台风在江苏沿岸海域引起1.0 m以上波高的持续时间可超过1 d,辐射沙脊和近海海域处的持续时间最大可接近3 d。“穿过江苏北移型”台风影响较弱,江苏沿岸波高超过1.0 m的持续时间为1 d左右,辐射沙脊及近海海域的持续时间则均在2 d左右。

$t_{H1.5}$:“沿江苏近岸北移型”台风使得研究区域内波高超过1.5 m的波浪持续时间最长,江苏沿岸海域持续时间约达1 d,辐射沙脊海域则接近2 d。以台风“达维”为代表的“北部掠过型”极端台风类型在江苏沿岸海域造成超过1.5 m波高的持续时间可达接近1 d,辐射沙脊海域持续接近1.5 d。“东侧掠过型”和“穿过江苏北移型”引起江苏沿海范围波高超过1.5 m波浪的持续时间均有所减少,但辐射沙脊和近海海域处仍持续1.5 d左右。

$t_{H2.5}$:江苏沿岸海域波高超过2.5 m的波浪的持续时间均大幅减小,只有“北部掠过型”典型台风“达维”的持续时间仍然可超过5 h。“沿江苏近岸北移型”台风对于辐射沙脊处超过2.5 m的波浪影响最大,持续时间超过15 h。另外,“北部掠过型”和“东侧掠过型”台风仍然对近海海域波高超过2.5 m的波浪造成持续影响;4类台风中“穿过江苏北移型”台风给研究区域造成超过2.5 m波浪的持续时间最短。

$t_{H3.5}$:“穿过江苏北移型”台风对于江苏海域波高

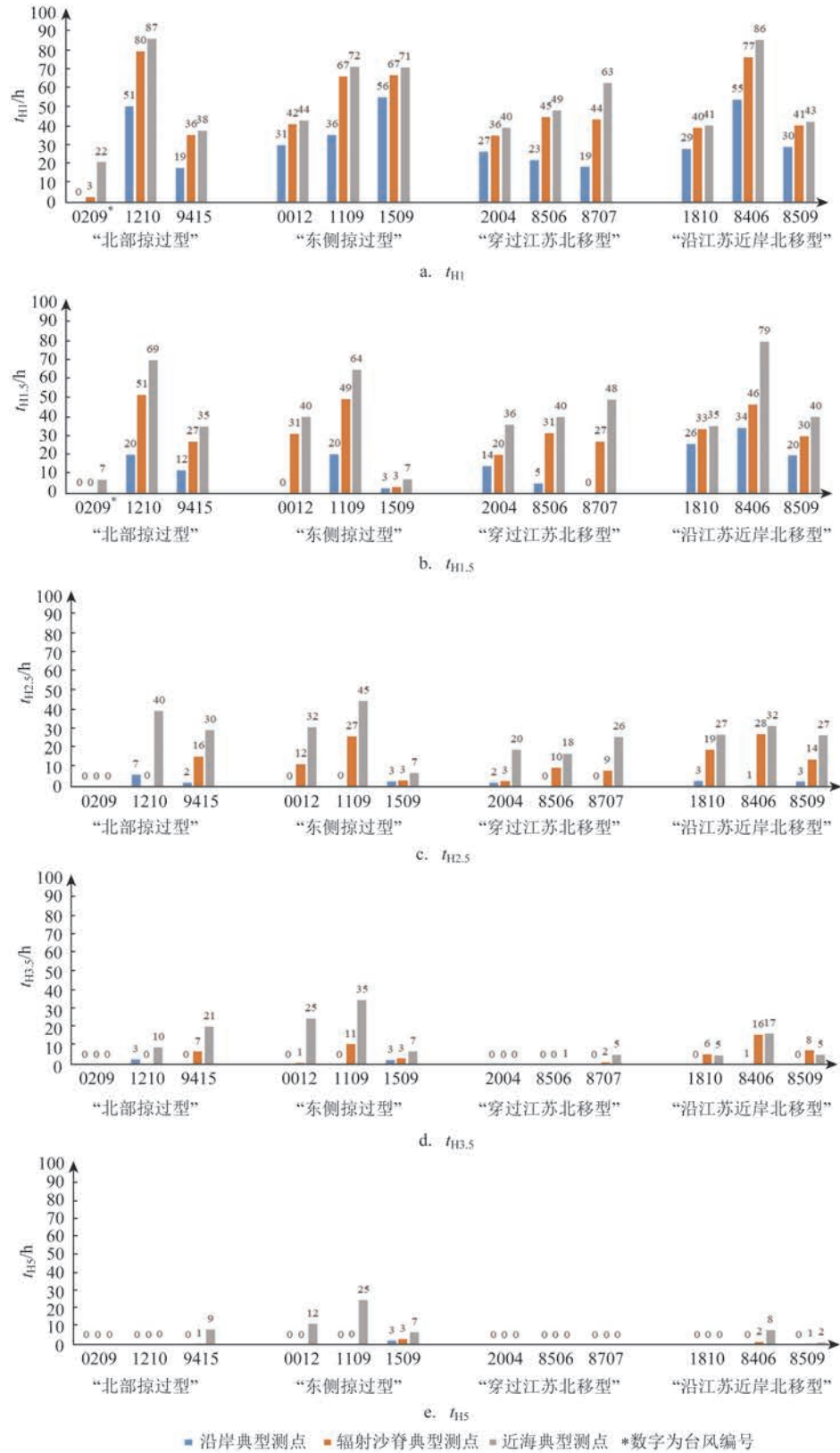


图9 3类典型测点平均有效波高持续时间柱状图

Fig.9 Histogram of average significant wave height duration for three types of typical measurement points

超过 3.5 m 的波浪的影响几乎消失,“东侧掠过型”台风在近海海域仍然可以造成超过 3.5 m 的波高,且持续时间是 4 类中最长的,最长可达 35 h。在“北部掠过型”台风影响下近海海域波高仍然可超过 3.5 m,但持续时间较“东侧掠过型”台风短,只有 20 h。4 类台风中,“沿江苏近岸北移型”台风在辐射沙脊造成的超过 3.5 m 波高的持续时间最长,可持续近 20 h。

t_{HS} : 研究区域波高超过 5.0 m 的波浪的持续时间更少,“穿过江苏北移型”台风已经不对研究区域 5.0 m 以上的波高产生影响,而“东侧掠过型”台风和“沿江苏近岸北移型”台风仍然会对辐射沙脊海域波高超过 5.0 m 的波浪产生影响,持续时间最大为 5 h。

综合来看,“北部掠过型”台风给江苏海域沿岸、近海区域造成了持续的较大波高;在“东侧掠过型”台风影响下,近海大浪持续时间较长;“沿江苏近岸北移型”台风对辐射沙脊海域影响较大,大浪持续时间较长;在“穿过江苏北移型”台风的影响下,近海海域的波浪持续时间比沿岸和辐射沙脊海域长,但与另外 3 种台风相比,各测点海域大浪的持续时间较短。

3 结论

本文基于风暴潮-波浪耦合模型和风场模型对江苏沿海的典型台风进行了模拟,重点研究了江苏沿海典型台风引起的台风浪波高的空间分布和持续时间特征。结论如下:

①从台风浪有效波高的空间分布来看,“北部掠过型”台风对江苏北部沿海波高影响显著;“东侧掠过型”台风对江苏近海海域影响范围最广;“穿过江苏北移型”台风影响范围较广,但对于波高的影响最小;“沿江苏近岸北移型”台风对江苏沿岸的波高影响比“穿过江苏北移型”台风略高,且对江苏近海南部海域的波高影响较大。

②从台风浪有效波高的持续时间来看,江苏北部沿岸海域、近海海域受“北部掠过型”台风影响,较大波高的波浪持续时间较长;“东侧掠过型”台风在近海海域造成持续较大的波高,波高超过 3.5 m 的波浪可持续 35 h;在“沿江苏近岸北移型”台风影响下,辐射沙脊海域大浪持续时间较长,波高超过

2.5 m 的波浪持续时间可达 15 h;“穿过江苏北移型”台风在各测点引起海域大浪的持续时间上比其他 3 类台风短。

需要说明的是,本文将影响江苏海域的台风按路径进行分类,每种类型选取强度较高的 3 场典型台风开展研究,但典型台风的强度并非完全一致,故得到的结论有趋势上的正确性,但结果在量级上可能存在偏差,本文的定量结论需谨慎使用。

参考文献:

- [1] 梁晓红, 彭模, 赵爱博, 等. 江苏海域台风风暴潮灾害特征及影响分析[J]. 江苏科技信息, 2016(17): 37-39.
LIANG X H, PENG M, ZHAO A B, et al. Analysis on characteristics and impacts of typhoons storm surge disasters of Jiangsu province[J]. Jiangsu Science & Technology Information, 2016(17): 37-39.
- [2] HSIAO S C, CHEN H, WU H L, et al. Numerical simulation of large wave heights from super typhoon Nepartak (2016) in the eastern waters of Taiwan[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2020, 8(3): 217.
- [3] 潘冬冬, 王俊, 周川. 基于“山竹”台风的波浪数值模拟[J]. 水道港口, 2021, 42(2): 194-199.
PAN D D, WANG J, ZHOU C. Numerical simulation of wave based on Typhoon Mangkhut[J]. Journal of Waterway and Harbor, 2021, 42(2): 194-199.
- [4] 宋晓波, 史剑, 李瑞杰, 等. 基于浪流耦合模型的台风浪数值模拟[J]. 海洋湖沼通报, 2015(1): 13-20.
SONG X B, SHI J, LI R J, et al. Numerical simulation of typhoon waves in china offshore based on wave-current coupling model[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2015(1): 13-20.
- [5] 何倩倩, 杨娟, 王卫远. 台风“达维”影响期间江苏海域台风浪研究[J]. 海洋通报, 2015, 34(5): 592-599.
HE Q Q, YANG J, WANG W Y. Study on the simulated typhoon waves off Jiangsu coast during Typhoon DAMREY[J]. Marine Science Bulletin, 2015, 34(5): 592-599.
- [6] 盛叶新. 基于卫星遥感和数值模拟的台风与台风浪研究[D]. 舟山: 浙江海洋大学, 2019.
SHENG Y X. Research on typhoon winds and waves based on satellite remote sensing and numerical simulation[D]. Zhoushan: Zhejiang Ocean University, 2019.
- [7] 卞建云. 江苏沿海台风风暴潮数值模拟与增水极值分析[D]. 扬州: 扬州大学, 2019.
BIAN J Y. Numerical simulation and statistical analysis of typhoon storm surge along Jiangsu Province[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2019.
- [8] 武海浪, 陈希, 陈徐均, 等. 近岸港口风暴潮与台风浪相互作用的数值模拟[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2015, 16(4):

- 360-367.
- WU H L, CHEN X, CHEN X J, et al. Numerical simulation of interaction of storm surge and typhoon wave on near shore harbor [J]. Journal of PLA University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2015, 16(4): 360-367.
- [9] 王金城. 江苏沿海可能最大台风风暴潮增水研究[J]. 中国水运, 2018, 18(5): 107-109.
- WANG J C. Study on the possible maximum typhoon storm surge in Jiangsu coastal area[J]. China Water Transport, 2018, 18(5): 107-109.
- [10] 王毅, 涂小萍, 蒋璐璐, 等. 台风“利奇马”影响期间浙江沿海海浪特征分析[J]. 气象科学, 2020, 40(1): 97-105.
- WANG Y, TU X P, JIANG L L, et al. Analysis of wave characteristics along Zhejiang coast during typhoon “Lekima” [J]. Journal of the Meteorological Sciences, 2020, 40(1): 97-105.
- [11] 蒋璐璐, 涂小萍, 王毅, 等. “米娜”(1918)台风浪特征及其与“利奇马”(1909)的差异[J]. 海洋预报, 2021, 38(4): 53-60.
- JIANG L L, TU X P, WANG Y, et al. Characteristics of typhoon-induced wave by Mitag(1918) and their differences with that induced by typhoon Lekima(1909)[J]. Marine Forecasts, 2021, 38(4): 53-60.
- [12] TIAN Z S Y, ZHANG Y. Numerical estimation of the typhoon-induced wind and wave fields in Taiwan Strait[J]. Ocean Engineering, 2021, 239: 109803.
- [13] 唐艳平, 冉晓俊, 李涵钊. “登台入闽”型台风波浪传播特性分析[J]. 水道港口, 2018, 39(6): 665-670.
- TANG Y P, RAN X J, LI H Z. Analysis of wave propagation characteristics of typhoon “boarding into Fujian Province after landing Taiwan Island” [J]. Journal of Waterway and Harbor, 2018, 39(6): 665-670.
- [14] WESTERINK J J, LUETTICH JR R A, BLAIN C A, et al. ADCIRC: an advanced three-dimensional circulation model for shelves, coasts, and estuaries. Report 2. User's manual for ADCIRC-2DDI[J]. Journal of Geology, 2006, 76(6): 721-723.
- [15] BOOIJ N, RIS R C, HOLTHUIJSEN L H. A third-generation wave model for coastal regions: 1. Model description and validation[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 1999, 104(C4): 7649-7666.
- [16] YING M, ZHANG W, YU H, et al. An overview of the China Meteorological Administration tropical cyclone database[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2014, 31(2): 287-301.
- [17] LU X Q, YU H, YING M, et al. Western North Pacific tropical cyclone database created by the China Meteorological Administration[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2021, 38(4): 690-699.
- [18] JELESNIANSKI C P. A numerical calculation of storm tides induced by a tropical storm impinging on a continental shelf[J]. Monthly Weather Review, 1965, 93(6): 343-358.
- [19] KNAFF J A, SAMPSON C R, DEMARIA M, et al. Statistical tropical cyclone wind radii prediction using climatology and persistence[J]. Weather and Forecasting, 2007, 22(4): 781-791.
- [20] PAN Y, CHEN Y P, LI J X, et al. Improvement of wind field hindcasts for tropical cyclones[J]. Water Science and Engineering, 2016, 9(1): 58-66.
- [21] 王宁, 侯一筠, 李水清, 等. 1979-2018年间山东半岛沿海台风浪危险性分布的数值模拟研究[J]. 海洋与湖沼, 2020, 51(4): 861-868.
- WANG N, HOU Y J, LI S Q, et al. Numerical simulation of the hazard distribution of typhoon waves in 1979-2018[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2020, 51(4): 861-868.
- [22] XIE D M, ZOU Q P, CANNON J W. Application of SWAN + ADCIRC to tide-surge and wave simulation in Gulf of Maine during Patriot's Day storm[J]. Water Science and Engineering, 2016, 9(1): 33-41.

Study on the spatial and temporal distribution characteristics of typhoon wave height in Jiangsu coastal sea

WANG Yixin¹, PAN Yi^{1*}, ZHOU Fengyan¹, YU Pubing², PAN Xishan³, HAN Xue¹

(1. College of Harbor, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Zhejiang Institute of Hydraulics and Estuary, Hangzhou 310020, China; 3. Tidal Flat Research Center of Jiangsu Province, Nanjing 210036, China)

Abstract: Based on the shallow water equation and the third-generation wave model, a coupled storm surge-wave model is constructed for the Jiangsu coastal sea. A hybrid wind field model is constructed with parametric model and reanalysis wind fields. Typical typhoons in the Jiangsu coastal sea are classified into four types according to typhoon paths. By simulating the typical typhoon wave processes with different characteristics affecting Jiangsu coastal sea, the spatial and temporal distribution characteristics of typhoon wave heights caused

by different types of typical typhoons in Jiangsu coastal sea are studied. The results show that, the "northern passing type" and "northward moving type along the coast of Jiangsu" typhoons have a greater impact on the northern and southern Jiangsu coastal areas, respectively, and the "eastern passing type" typhoons have the widest impact on the Jiangsu offshore areas. The "northern passing type" and "eastern passing type" typhoons cause longer duration of large waves in the Jiangsu offshore areas, in addition, the "northern passing type" and "north moving type along the coast of Jiangsu" typhoons cause continuous large wave heights in the coastal and radiative sand ridge areas of Jiangsu, respectively.

Key words: Jiangsu coast; typhoon waves; wave height; space-time distribution