

台湾海峡台风浪动力特征和模型方法研究

陈金瑞

(福建省海洋预报台, 福建 福州 350003)

摘 要: 通过风速和波浪的同步浮标观测数据, 对3个台风过境期间台湾海峡内的台风浪动力机制和特征描述方法进行了分析研究。研究表明: 台湾海峡内的台风浪具有明显的风浪成长特征, 强烈的波波非线性相互作用引起的高低频能量交换是其主导机制。通过拟合方法给出了台风浪有效波高的模型关系, 对台风浪灾害的预警报分析具有实际应用价值。

关键词: 台湾海峡; 台风浪; 无因次; 能量

中图分类号: P731.22 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2019)04-0013-06

1 引言

台湾海峡位于我国东南大陆架海域, 是连接东海和南海之间的交通要道, 素有中国“海上走廊”之称。它处在亚热带气候区, 位于西北太平洋台风主要移动路径上, 台风活动频繁, 每年夏秋季节常受台风侵袭。由于台湾岛中央山脉海拔较高, 台风将会在其周边形成复杂的风场, 进而造成更加复杂的浪场。由台风过程引起的灾害性海浪给海峡两岸造成巨大的直接经济损失和人员伤亡。据统计, 2011—2017年期间由风暴潮和台风浪等海洋灾害共造成福建沿海直接经济损失达105.37亿元。

目前已有的研究主要基于定点浮标和卫星遥感等观测资料, 结合一定的数值分析手段, 对台风浪的动力形成机制和特征描述进行了一定的探讨。Young^[1-3]基于浮标观测分析了多个台风期间台风浪一维频谱和方向谱, 指出在8倍的台风最大风速半径范围内的台风浪频率谱具有单峰结构, 并且与由状态相同的风持续作用下生成的有限风区海浪谱具有相似性, 这是由于较强的波波非线性相互作用对海浪谱的调制导致的; Hwang^[4]通过遥感数据分析了飓风“Bonnie”作用下的台风浪特征, 也发现了台风浪的风浪特性, 并发现风区与方位角以及距离

台风中心距离的相关性特征, 给出了不同方位角下无因次量波浪能和频率关于台风中心距离的经验关系; Xu等^[5]基于南海浮标的观测数据分析讨论3次台风过程中的台风浪特征, 在台风中心5倍最大风速半径内的台风浪以风浪为主, 5倍最大风速半径外的台风浪以涌浪为主, 通过模拟实验表明, 非线性波-波相互作用项可以有效地将波浪能量从高频部分向低频部分转移从而阻止一维海浪谱生成双峰结构。Young等^[6]对目前已有的研究结果进行了综述, 重点讨论理想情况下台风浪的等价风区空间分布特征, 非线性相互作用下的海浪谱特征结构, 并提出台风浪谱的参数化方案。

上述观测研究主要是在较为开阔的海域开展的, 对于台湾海峡这种独特的陆地阻隔地形下的台风浪特征的研究相对较少, 目前已有的研究工作主要通过模型模拟对台风浪的影响要素进行了一定的探讨^[7-10], 指出台湾海峡的波浪主要受风场制约, 风浪传播方向和波高分布有着良好的相关性^[7], 同时由于福建近岸海域潮差较大, 在台湾海峡的波浪数值模拟中考虑潮汐和潮流的影响是非常必要的^[8-9], 在台风行进方向的右前方, 风暴潮使海浪波高减小, 在台风中心及其左后方, 风暴潮使海浪波高增大。考虑地形和潮汐潮流的影响, 风暴潮对台

收稿日期: 2018-11-07; 修回日期: 2018-12-25。

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC1407000); 福建省科技厅引导性重点项目(2017Y0005; 2018Y0001)。

作者简介: 陈金瑞(1985-), 男, 工程师, 硕士, 主要从事海洋预报。E-mail: chenjinrui0@163.com

风浪波高的影响有明显提高^[10]。

本文拟基于台湾海峡及周边海域的风速和波浪的同步浮标观测资料,分析“穿岛型”台风期间台湾海峡海域的台风浪特征,重点探讨台湾海峡内台风浪的动力形成机制及其定量描述模型方法。

2 数据和方法

2.1 数据介绍

本文采用的风浪同步观测资料来源于福建省海洋预报台、福建省气象局和国家海洋局布放在台湾海峡及周边海域业务化运行的6个浮标所观测的实时数据,浮标位置见图1,水深介于37~80 m。浮标均采用美国 Young 05106 型风速风向传感器测量距海面上方 10 m 高的风矢量,采样间隔为 10 min;采用 SBF1-1 型波浪传感器测量海表面波浪,采样间隔为 30 min,传感器主要技术指标详见表1。

为获取台风的路径和位置信息数据,本文采用中国气象局热带气旋资料中心(网址:<http://tcdata.typhoon.org.cn>)的最佳路径数据集^[11],该数据集是根据收集到的常规和非常规气象观测资料对当年的台风资料(每6 h的位置和强度)进行重新整编。为了便于分析计算,将台风资料插值为逐时数据,其中台风位置采用样条差值,台风强度数据采用线性差值。用于分析的台风包括1513号“苏迪罗”、1521

表1 传感器主要技术指标

测量要素	测量范围	测量准确度
风速	0~60 m/s	±0.3 m/s
风向	0~360°	±3°
波高	0.2~25 m	±(0.1+10%H), H为实测波高
波周期	2~30 s	±0.5 s
波向	0~360°	±10°

号“杜鹃”和1617号“鲇鱼”,台风路径及强度见图1。1513号“苏迪罗”于2015年7月30日在西北太平洋面(13.7°N,160.7°E)上生成,8月8日凌晨穿过台湾岛之后于8月8日夜间在福建登陆,而“杜鹃”和“鲇鱼”都分别在2015年和2016年的9月份生成,生成位置较“苏迪罗”偏西;3个台风移动路径均相对比较稳定,以西偏北方向移动;在台风登陆前48 h警戒线范围内,“杜鹃”台风中心较“苏迪罗”和“鲇鱼”更北;在移动过程中3个台风的强度均达到超强台风级别,并以最大风速14—15级的强台风在花莲附近穿过台湾,之后以最大风速12级左右的强度在福建莆田泉州一带登陆。

2.2 数据分析方法

参考前人的研究分析方法^[6],将地理坐标系统(经纬度坐标)转换成以台风中心为原点,垂直指向台风移动方向的右方为x轴,沿着台风移动方向为y轴的相对坐标系,逆时针方向旋转(见图2a),同时

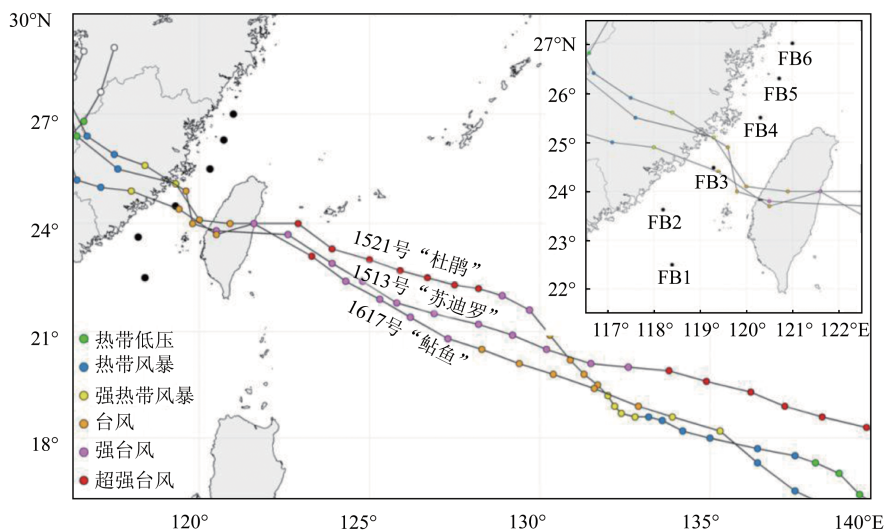


图1 台风路径及浮标位置图

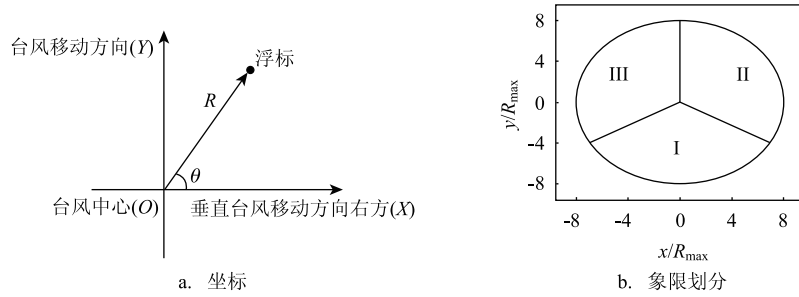


图2 坐标及象限划分示意图

将浮标距离台风中心距离 R 转换成台风最大风速半径的倍数。台风最大风速半径的计算选取 Silva 等^[12]的计算方法:

$$R_{\text{maw}} = 0.478 5 P_c - 413 \text{ (km)} \quad (1)$$

式中: P_c 是台风中心气压。

象限划分方法^[4]:将分析数据按照3个不同象限(见图2b)进行划分, I 象限($210^\circ \sim 330^\circ$)、II 象限($-30^\circ \sim 90^\circ$)和III象限($90^\circ \sim 210^\circ$)。

3 结果分析

3.1 台风浪空间分布特征

海面风速(U_{10})、有效波高(H_s)和谱峰周期(T_p)是台风浪研究的3个关键参数。将3次台风过程的浮标观测数据转换到相对坐标系下分布情况(见图3)。可以看出:海面风速、有效波高和谱峰周期均

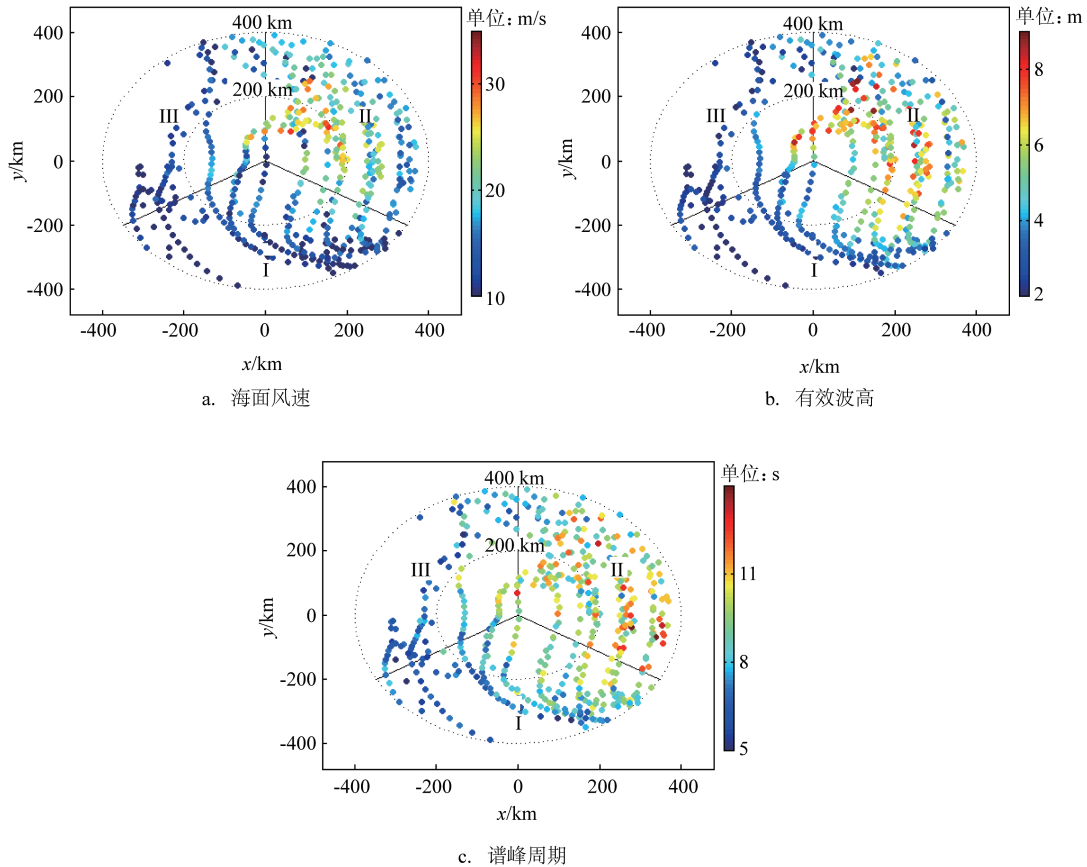


图3 台风浪关键参数分布图

有明显空间不对称性,其中Ⅱ象限的海面风速、有效波高和周期明显大于Ⅰ、Ⅲ象限,海面风速大值区主要集中在Ⅱ象限200 km处,有效波高大值区则较为分散的分布在Ⅱ象限100~300 km范围内,而谱峰周期的大值多分布在300~400 km的范围内,值得注意的是,台风浪特征值与风速大小并不存在明显的一一对应关系,这说明风能输入并非完全决定台风浪的强度,其它波作用过程也可以起到重要作用,后文中将进一步说明,波波非线性相互作用也不可忽视。

3.2 波特征参量关系

3.2.1 无因次波高和无因次频率

根据传统的有限风区理论,风浪的成长和风时、风区有密切关系,在风浪成长过程中,风浪随风时和风区的增大而增大,有效波高可以通过风速和波龄的参数化方案得到。在台风浪研究过程中,Donelan等^[13]提出一种无因次形式的风浪成长经验关系,即无因次能量 ε 和无因次频率 ν 的参数化关系(见式2),该关系在许多学者的研究^[11,2,5,14]中得到进一步的验证和讨论。

$$\varepsilon = 6.365 \times 10^{-6} \nu^{-3.3} \quad (2)$$

式中:无因次能量 $\varepsilon = g^2 E_{\text{Tot}} / U_{10}^4$,无因次频率 $\nu = f_p U_{10} / g$, g 为重力加速度,海浪谱的总能量与有效波高的关系: $E_{\text{Tot}} = \int F(f) df = (H_s/4)^2$, H_s 为有效波高, f_p 为最大频率。

本文给出了基于浮标观测的无因次能量和无因次频率的关系(见图4)。斜黑色实线代表风浪成长经验关系(见式2),红色虚线是根据本文的数据拟合出来的结果($\varepsilon = 5.482 \times 10^{-6} \nu^{-3.559}$),可以看到,拟合关系与风浪成长关系具有较高的匹配度,说明复杂地形下的台风浪主要呈现风浪成长特征,这与前人的研究结果一致。 $\nu = 0.13$ 处的竖线等价于 $U_{10}/c_p = 0.83$,这被认为是风浪成长的上限,而台风浪可以超越此界限,呈现一定程度的“超充分”成长情形。Young^[2]和Xu等^[5]给出了相关的解释,他们认为风浪成长关系是波波非线性相互作用的体现,台风作用下波浪存在显著的非线性作用,由局地风产生的风浪结构,可以与同步存在的低频区的波浪产生波波非线性相互作用,使得高频能量向低频进行传递,台风浪谱进而呈现单峰结构,而风浪的成

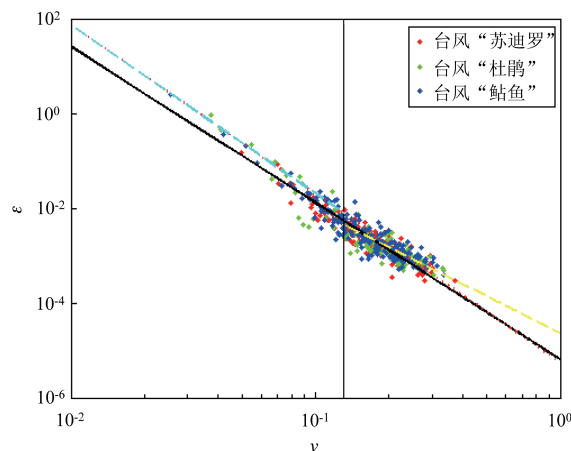


图4 无因次能量随无因次谱峰频率的变化

长频率也得以超越风速的限制。需要指出的是,Xu等的观测结果显示(文献[5]中图3),在 $\nu < 0.13$ 条件下,无因次关系存在明显偏离风浪成长关系的情形。一种可能的解释是,Xu等^[5]的观测位置是在南海较为开阔的海域,而本文的观测是在相对封闭的台湾海峡内,陆地对长波涌浪会产生的阻隔效应,因此波波非线性相互作用更为显著,因而台风浪更接近风浪成长特性。

本文将 $\nu = 0.13$ 两边的数据分别进行拟合,可得: $\nu < 0.13$ 时,无因次能量和无因次频率的关系为 $\varepsilon = 5.604 \times 10^{-6} \nu^{-3.553}$ (青虚线); $\nu > 0.13$ 时,无因次能量和无因次频率的关系为 $\varepsilon = 2.301 \times 10^{-5} \nu^{-2.587}$ (黄虚线)。可以看出,在“超充分”成长情形下($\nu < 0.13$),无因次关系的指数变化较未充分成长情形“ $\nu > 0.13$ ”更为显著,这表明两种情形下波浪的内在形成机制可能存在一定的差异。

3.2.2 无因次能量/频率与无因次距离的关系

台风浪呈现风浪成长特征,通过风区为参数的风浪成长关系描述台风浪有效波高是一种可行的方法。而在实际应用中,由于台风的气旋结构特征,风区难以准确给定。前人研究表明^[5],与台风中心距离和方向角变化可近似替代风区用于描述台风浪有效波高。

图5a给出了3个不同象限内无因次能量随无因次距离(R/R_{max} , R_{max} 为最大风速半径)的变化关系,可以看到,无因次能量整体随无因次距离的增大而增大,不同象限内的变化关系存在一定的差异,其

中第 I 象限的变化趋势更为明显,并且其无因次能量较其它两个象限整体偏大,第 II 象限无因次能量最小。通过线性拟合方法,可以给出各个象限内无因次能量随无因次距离的定量关系:

I 象限:

$$\log(\varepsilon) = 0.2682 \times R/R_{\max} - 7.0391 \quad (3)$$

II 象限:

$$\log(\varepsilon) = 0.1773 \times R/R_{\max} - 7.6113 \quad (4)$$

III 象限:

$$\log(\varepsilon) = 0.1086 \times R/R_{\max} - 6.8931 \quad (5)$$

对所有象限的结果进行统一拟合,拟合关系如下:

$$\log(\varepsilon) = 0.2021 \times R/R_{\max} - 7.2132 \quad (6)$$

值得注意的是,本文的拟合结果与 Hwang 的关系存在一定的差异,Hwang 的数据仅包含在较为开阔的海域,并且与台风中心距离小于 200 km 观测点;而本文的研究区域在台湾海峡,观测点距离台风中心多超过 200 km。

图 5b 给出了 3 个不同象限内无因次频率随无因次距离的变化关系,可以看到,无因次频率整体随无因次距离的增大而减小,不同象限内的变化关系也存在一定的差异,其中第 I 和第 II 象限的变化趋势基本一致且更为明显,第 II 象限较其它两个象限整体偏大,第 I 象限整体偏小。通过线性拟合方法,给出各个象限内无因次频率随无因次距离的定量关系:

I 象限:

$$\log(v) = -0.0874 \times R/R_{\max} - 1.4431 \quad (7)$$

II 象限:

$$\log(v) = -0.0820 \times R/R_{\max} - 1.1603 \quad (8)$$

III 象限:

$$\log(v) = -0.0478 \times R/R_{\max} - 1.5091 \quad (9)$$

对所有象限的结果进行统一拟合,拟合关系如下:

$$\log(v) = -0.0770 \times R/R_{\max} - 1.3528 \quad (10)$$

4 讨论和结论

本文通过风速和波浪的同步浮标观测数据,对“穿岛型”台风过境期间台湾海峡内的台风浪特征、动力机制和模型方法进行了分析研究。研究表明,台湾海峡内的台风浪相对于台风风速的空间分布存在一定的差异,然而台风浪仍然具有明显的风浪特征,这是由于在强风和台湾海峡的特殊地形约束条件下,强烈的波波非线性相互作用导致高低频波能量交换,使得风浪呈现超越波龄上限的成长特征。

研究分析了对台风浪特征产生影响的参量,结果表明,风速、台风中心距离和方位角是定量描述台风浪能量和周期要素的 3 个关键参量,本文通过经验拟合方法给出了相应的定量描述关系,可应用于台风浪的简易模型计算,对于海洋灾害预警报具有实际应用价值。

本文提出了通过台风中心距离描述台风浪有效波高的模型方法。值得注意的是,从台风浪有效波高与台风中心距离的变化关系来看,这一方法仍

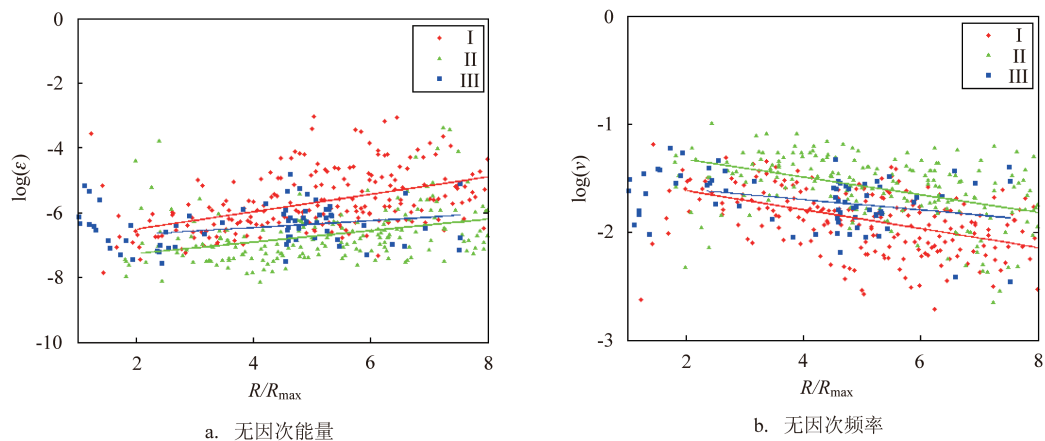


图 5 无因次能量/频率随无因次距离的变化关

存在一定的不确定性,其它因素,例如岸界的阻隔效应、水深等也可能影响台风浪的成长特性。除此之外,最大风速半径难以被准确给定,对无因次距离的准确计算也引入了一定的不确定性。相信如果可以获取高精度的台风最大风速半径数据,将有望能改善图5中的相关性关系。

致谢:中科院海洋研究所李水清副研究员在本文研究中提供方法协助,谨致谢忱!

参考文献:

- [1] Young I R. Observations of the spectra of hurricane generated waves[J]. *Ocean Engineering*, 1998, 25(4-5): 261-276.
- [2] Young I R. Directional spectra of hurricane wind waves[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2006, 111 (C8): C08020.
- [3] Young I R. A shallow water spectral wave model[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1988, 93(C5): 5113-5129.
- [4] Hwang P A. Fetch- and duration-limited nature of surface wave growth inside tropical cyclones: with applications to air-sea exchange and remote sensing[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2016, 46(1): 41-56.
- [5] Xu Y, He H L, Song J B, et al. Observations and modeling of typhoon waves in the South China sea[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2017, 47(6): 1307-1324.
- [6] Young I R, Young I R. A review of parametric descriptions of tropical cyclone wind-wave generation[J]. *Atmosphere*, 2017, 8 (10): 194.
- [7] 姬厚德, 潘伟然, 张国荣. 台湾海峡及厦门湾台风浪场数值模拟[J]. *海洋预报*, 2010, 27(1): 44-48.
- [8] 陈剑桥, 曾银东, 李雪丁. 1205号台风“泰利”影响下台湾海峡风浪特征分析[J]. *海洋预报*, 2015, 32(2): 31-36.
- [9] 郑祥靖. 潮汐和潮流作用下1323号台风“菲特”台风浪数值模拟[J]. *海洋预报*, 2015, 32(5): 8-13.
- [10] 赵昊辰, 尹宝树, 冯兴如, 等. 台湾附近海域超强台风南玛都期间风暴潮对海浪影响的数值研究[J]. *海洋科学*, 2015, 39(3): 127-134.
- [11] 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.
- [12] Silva R, Govaere G, Salles P, et al. Oceanographic vulnerability to hurricanes on the Mexican coast[C]//*Proceedings of the 28th International Conference on Coastal Engineering*. Cardiff, Wales: ASCE, 2003: 39-51.
- [13] Donelan M A, Hamilton J, Hui W H. Directional spectra of wind-generated ocean waves[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 1985, 315(1534): 509-562.
- [14] Hwang P A, Walsh E J. Azimuthal and radial variation of wind-generated surface waves inside tropical cyclones[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2016, 46(9): 2605-2621.

Dynamic characteristics and model method of typhoon waves in Taiwan Strait

CHEN Jin-rui

(Fujian Marine Forecasts, Fuzhou 350003 China)

Abstract: Buoy-based observations of surface winds and ocean waves during three typhoon events are used to study the dynamic mechanism and characteristics of typhoon waves in the Taiwan Strait. It is found that typhoon waves in the Taiwan Strait reveals significant characteristics of wind wave growth, and the high-low frequency energy exchange caused by strong nonlinear wave-wave interaction is the dominant mechanism. This paper proposes a model relationship of the significant wave height of typhoon waves using fitting method, which is of practical value to the early warning analysis of typhoon wave disaster.

Key words: Taiwan Strait; typhoon waves; non-dimensional; energy