

三种典型路径下的台湾海峡台风浪特征研究

陈剑桥

(福建省海洋预报台, 福建 福州 350003)

摘 要: 以 WRF 风场驱动 SWAN 波浪模式, 模拟分析了北路、中路、南路 3 种典型台风路径下, 台湾海峡及周边海域的台风浪的特征。结果发现: (1) 数值模拟与浮标实测情况基本一致, 并模拟出台风浪场右半圆大于左半圆、前进象限以涌浪为主、主波方向辐射向前传播、台风的正后方向的主波向混乱等特征; (2) 在中路和南路台风影响时, 台湾海峡较早出现 15 m/s 的风速等值线, 但是海峡内风场与台风风场被台湾岛地形分割致使海浪成长风区变短, 而且远海涌浪无法传播到海峡内部, 使得海峡内海浪没有达到远海同样风速区域的 6 m 左右的高度; (3) 中路台风影响下, 台湾海峡的浪场受台湾岛的影响出现异常明显的不对称性结构, 台湾海峡北部混合浪和涌浪高出海峡南部很多; (4) 台湾海峡海浪能量谱方向与局地风向之间角度较大, 在北路台风影响下北部有明显的自东向西的周期大于 15 s 的涌浪谱, 在南路台风西行时出现两股明显的成直角的风浪谱和涌浪谱。这些特征对船舶航行安全有潜在危险。

关键词: 台风浪; 台湾海峡; 台湾岛; 涌浪; 海浪谱; 主波向; 风向

中图分类号: P731.22 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2018)06-0001-12

1 引言

海浪是在风的作用下产生的小尺度表面重力波, 按成因可分为风浪和涌浪。风浪是指在风直接作用下产生的水面波动, 涌浪是指风浪离开风吹的区域后所形成的波浪。海浪通常以风浪和涌浪的混合形式存在。研究表明: 海上自然破坏力的 90% 来自海浪, 并且海上巨浪造成的海难占世界海难的 60%~80%^[1], 巨大的台风浪不仅会掀翻船只, 甚至会严重破坏海上石油和天然气生产设施^[2]。

台风浪是由台风引起的海浪。台风(热带风暴级及以上级别的热带气旋在西北太平洋称为台风, 在大西洋称为飓风)是一个强大而具有破坏力的气旋性漩涡, 它携带的强烈的大风和快速变化的风场, 在海面引起剧烈的和复杂的海浪场^[3]。虽然台风的风场结构具有较好的对称性, 可以用相对简单的平移涡旋模型来表达^[4], 但是台风浪场却具有明

显的非对称性, 因为台风的移动改变了海面的相对风速^[5]和海浪成长的风区^[6-7]。在风向和台风移动方向相同的区间, 海浪发展充分相对最大; 在风向与台风移动方向相反的区间, 因为大风持续时间短海浪最小^[6-8]。台风浪在前进方向的右半圆大于左半圆的特征, 在早期的船舶和浮标的观测中得到证实^[9]。

随着卫星搭载的合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)^[10]和飞机搭载的扫描雷达高度计(Scanning Radar Altimeter, SRA)的应用^[11], 进一步得到了台风域内海浪方向谱的特征。Walsh等^[11]对飓风海浪的观测表明, 主波传播方向与局地风成较大角度, 有时甚至完全相反, 前进方向的主波似乎来自于飓风的右后象限。Moon等^[12-13]利用 WAVEWATCHIII 模型评估了 SRA 观测到的浪高空间分布和方向谱特征, 证实在前进方向的左侧和右侧(也即前象限), 海浪主要来自飓风中心右边最大风速区域。但是 SAR 和 SRA 对海浪的高频部分观测是

收稿日期: 2018-07-25; 修回日期: 2018-08-27。

基金项目: 国家重点研发计划重点专项(2017YFC1404804, 2016YFC1401906); 福建省科技计划项目(2017Y0005, 2018Y0001)。

作者简介: 陈剑桥(1985-), 男, 工程师, 学士, 主要从事海洋预报工作。E-mail: xiguli520@163.com

有局限的,尤其是SAR。Hu等^[14-15]基于浮标波谱观测资料,利用SWAN(Simulating Waves Nearshore)进行了一系列数值实验,发现飓风海浪波谱几乎是涌浪主导的,除了飓风的右后象限由局地风控制。总体而言,后象限的波向总体是混乱的,特征并不如前象限那么明显^[9, 16-18]。

观测和数值模拟还表明,台风浪受地形影响明显。Chu等^[19]研究表明,影响台湾岛西南沿岸海域台风浪的主要因素是地形。Wang等^[20]对中国南海的台风浪的观测模拟表明,在同样的风速状况下,在南海的点位受台风的影响小于那些在远海的点位;由于菲律宾岛屿的阻挡,来自东部的涌浪基本上很难进入南海。作为前人研究的补充和基于预警防灾的业务需要,本文利用SWAN波浪模式对台湾海峡及周边海域台风浪进行数值后报模拟,分析台湾岛地形的影响,研究台湾海峡台风浪场和波浪谱的一些特征。

2 资料和处理方法

考虑台风路径的代表性,选取了从台湾岛以北海域西北行登陆福建北部的1323号台风“菲特”、横

穿台湾岛登陆福建中部的1617号台风“鲇鱼”和从台湾岛以南穿过巴士海峡西行登陆广东沿岸的1319号台风“天兔”,分别代表北路、中路、南路3种影响台湾海峡的台风。台风最佳路径数据来自中国气象局热带气旋资料中心(网址:<http://tcdata.typhoon.org.cn>)^[21]。台风影响期间的浮标实测数据来自福建省海洋环境观测网^[22-23]。台风的部分路径和浮标位置见图1。

台湾海峡是连通东海、南海的海峡,呈东北-西南走向的北窄南宽的喇叭形状。在台湾海峡的东侧是台湾岛,岛上地形复杂,岛的东部是平均海拔高达3 000多m的中央山脉。受台湾岛和台湾海峡地形影响,台风在经过这一区域附近时海面风场变形严重,理想的圆形风场模型无法刻画台风风场的特征^[24-26]。为了给海浪模式提供相对合理的风场,本文运用非静力中尺度气象模式WRF(The Weather Research and Forecasting Model)^[27],模拟台风的大气物理动力过程,包括海面风场涉及的边界层效应等。为了减少因为台风路径模拟的偏差造成台风浪模拟的偏差,运算时使用nudging方案^[28],使后报模拟结果逼近时间间隔为6 h的美国国家环境预报中心的全球业务化最终分析数据(NCEP FNL (Final)

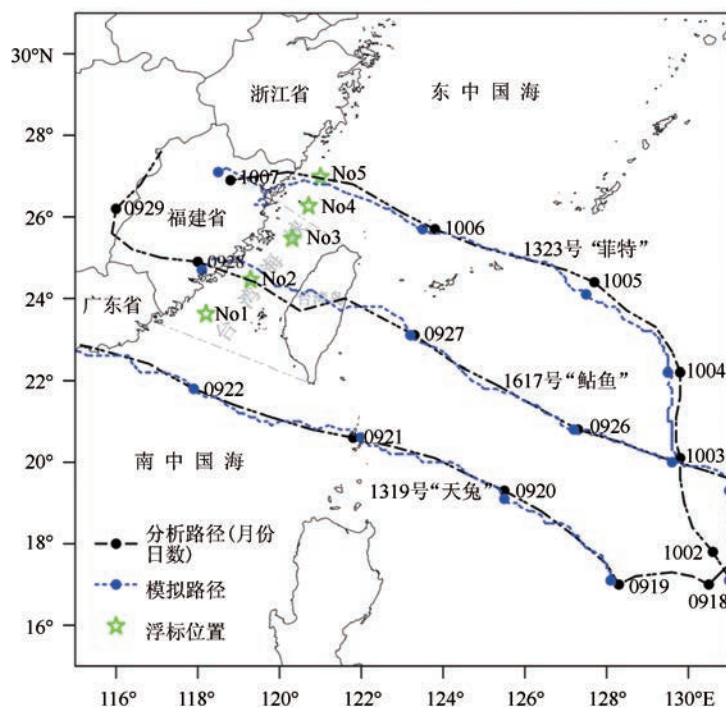


图1 观测浮标位置、3个台风的部分移动路径和部分模拟路径

Operational Global Analysis data)^[29]。从图1中计算得到的台风模拟路径与实况分析路径比较可知,WRF较好地后报模拟了台风的移动情况。WRF模拟台风过程有很多技术细节,但不是本文关注的重点故不多赘述。

SWAN模式最初是用于计算近岸浅水区海浪的数值模式^[15],近20 a经过不断地改进和扩充,考虑了许多物理过程和当今最新海浪研究成果,性能不断提高并成为适用于任何尺度的海浪数值模式^[30-32]。SWAN模式采用能量平衡方程来描述波浪的演化过程,充分考虑了风能输入、浅化、折射、白浪破碎、底摩擦耗散、水深变化引起的波浪耗散以及非线性

的波一波相互作用等物理过程。

在SWAN模式输出涌浪浪高时,统计的是波谱能量中的低频部分:

$$H_{s,swell} = 4 \sqrt{\int_0^{\omega_{swell}} \int_0^{2\pi} E(\omega, \theta) d\omega d\theta} \quad (1)$$

式中: $\omega_{swell} = 2\pi f_{swell}$, 并且默认情况下 $f_{swell} = 0.1\text{Hz}$, 也就是说选取周期大于10 s的海浪作为涌浪^[30]。一般认为,周期10 s是风浪和涌浪的分界^[33-34]。

3 模拟海浪检验情况

图2给出了在台风主要影响时段(72 h),SWAN

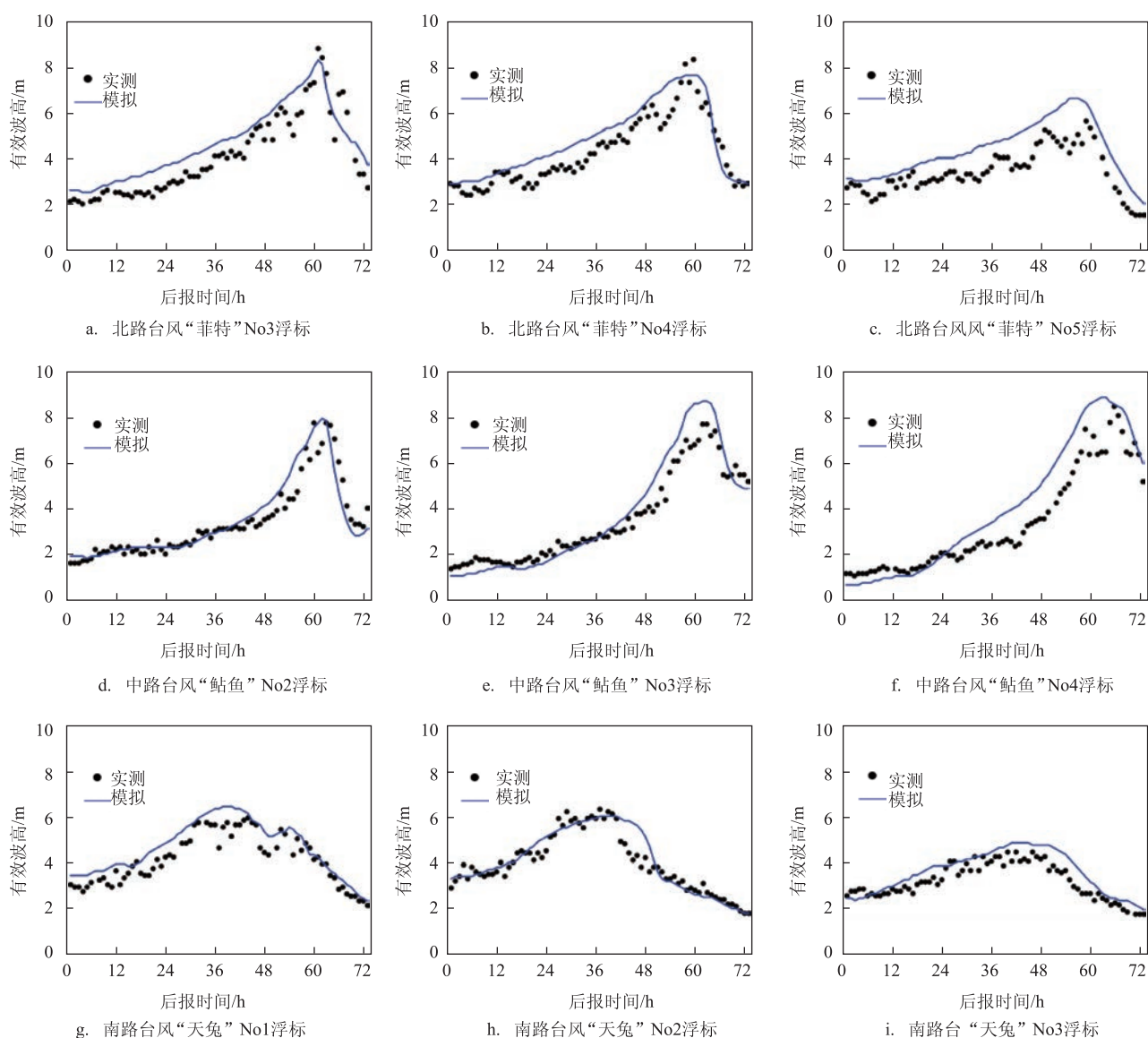


图2 代表性浮标站点有效波高实测(黑色圆点)与模拟(蓝色实线)的对比

表1 有效波高(>2 m)模拟检验统计

台风编号	相对误差/%					平均
	No1浮标	No2浮标	No3浮标	No4浮标	No5浮标	
1323	21.56	19.90	26.92	15.14	20.38	20.78
1617	18.42	10.65	14.06	30.48	37.16	22.15
1319	12.73	8.49	13.81	11.20	16.26	12.50

模式在代表性浮标位置模拟的有效波高与实测的对比情况。从图中可以看出,模拟的有效波高曲线与实测散点比较接近,曲线波动趋势与散点高低变化趋势基本一致。表1给出的5个浮标对模式的检验统计情况表明,当实测有效波高>2 m时,北路、中路和南路台风影响下模式模拟的有效波高的平均相对误差分别为20.78%、22.15%和12.50%。不难发现,中路台风模式模拟效果相对最差,受地形影响最明显。总体而言,本次运行的SWAN模式较好地模拟了台湾海峡及周边海域海浪的变化情况,模式模拟的结果可以作为分析该区域台风浪特征的依据。

4 结果与讨论

为了便于比较分析,按照台风中心距离海峡西岸大陆(福建省)海岸线的距离远近和海洋地形划分特点,大致选取台风中心分别位于台湾岛东面、台湾岛一带、大陆近岸,作为台风处于远海、近海、近岸的3个代表性位置(北路台风菲特的远海、近海和近岸代表性时刻为:20131005_18:00(世界时,下同)、20131006_09:00和20131006_05:00;中路台风鲑鱼的远海、近海和近岸代表性时刻为:20160926_19:00、20160927_08:00和20160927_18:00;南路台风天兔的远海、近海和近岸代表性时刻为:20130920_15:00、20130921_08:00和20130922_03:00)。

4.1 混合浪特征

当海浪达到一定高度时,它能掀翻船只,摧毁海上工程和海岸工程^[1];准确预测台风浪是监视海上航线和沿海环境潜在危险条件的最重要因素之一^[12]。图3中彩色填色为台风在处于3个代表性位置的混合浪场(有效波高)情况。从图中可以看出,当台风处于远海时,台风混合浪的高值区(见图3a、

d、g中橙色红色部分)基本处于台风中心以北,也即台风西行时的右半圆。如前文所述,这一特点已经是众所周知的。

随着台风向近海和近岸靠近,台风强度减弱伴随着水深变浅,台风浪的强度逐渐减弱,范围逐渐缩小。北路台风和南路台风引起的台风浪,在台风处于近海和近岸时分别主要影响台风中心附近的台湾海峡的北部和南部(见图3b—c、h—i)。中路台风处于近海和近岸时,台风浪主要影响台湾海峡的中部和北部,对南部的影响较小,与台风处于远海时相比,此时的台风浪结构具有异常明显的不对称性,右象限不受地形阻挡的海峡北部及台湾岛北角是大范围的黄色,而台湾海峡南部没有看到黄色(见图3e—f),这个异常明显不对称的特性将在后文进一步分析。

根据文献[24-26]的分析,受台湾岛的阻挡,台风海面风场会发生“绕流”和“分流”,当台风中心处于台湾岛东面和东南面时,台湾海峡会出现“提前大风”,台风中心处于海峡北部(南部)时,会在海峡南部(北部)出现“角流区”。为了分析“提前大风”和“角流”对海浪的影响,图3中绘制了风速为15m/s的等值线作对比分析。从图3d、g中可以看出,台风中心处于台湾岛东面和东南面时,等值线延伸到了台湾海峡西岸一带(见图3d、g中的A),确实出现了提前大风。但是图3d、g中的A所在海峡区域海浪只有3~4m,等值线上B所在远海区域的海浪处于6m(狂浪)左右,也就是说,“提前大风”影响并没有造成“提前狂浪”,分析认为,这可能是因为虽然海峡内风速增大了,但是台湾岛地形将海峡内的风场与台风风场分割,海峡内海浪成长的风区变短了。与“提前大风”的发现与预报应用类似,海浪没有较早达到狂浪也是海洋预报中值得注意的问题。另外,从图3b、i中的C区域可以看出,当台风处于台湾海峡的一端时,在海峡另一端出现了15m/s以上的风速高值区,也即出现“角流”情况,其所在区域海

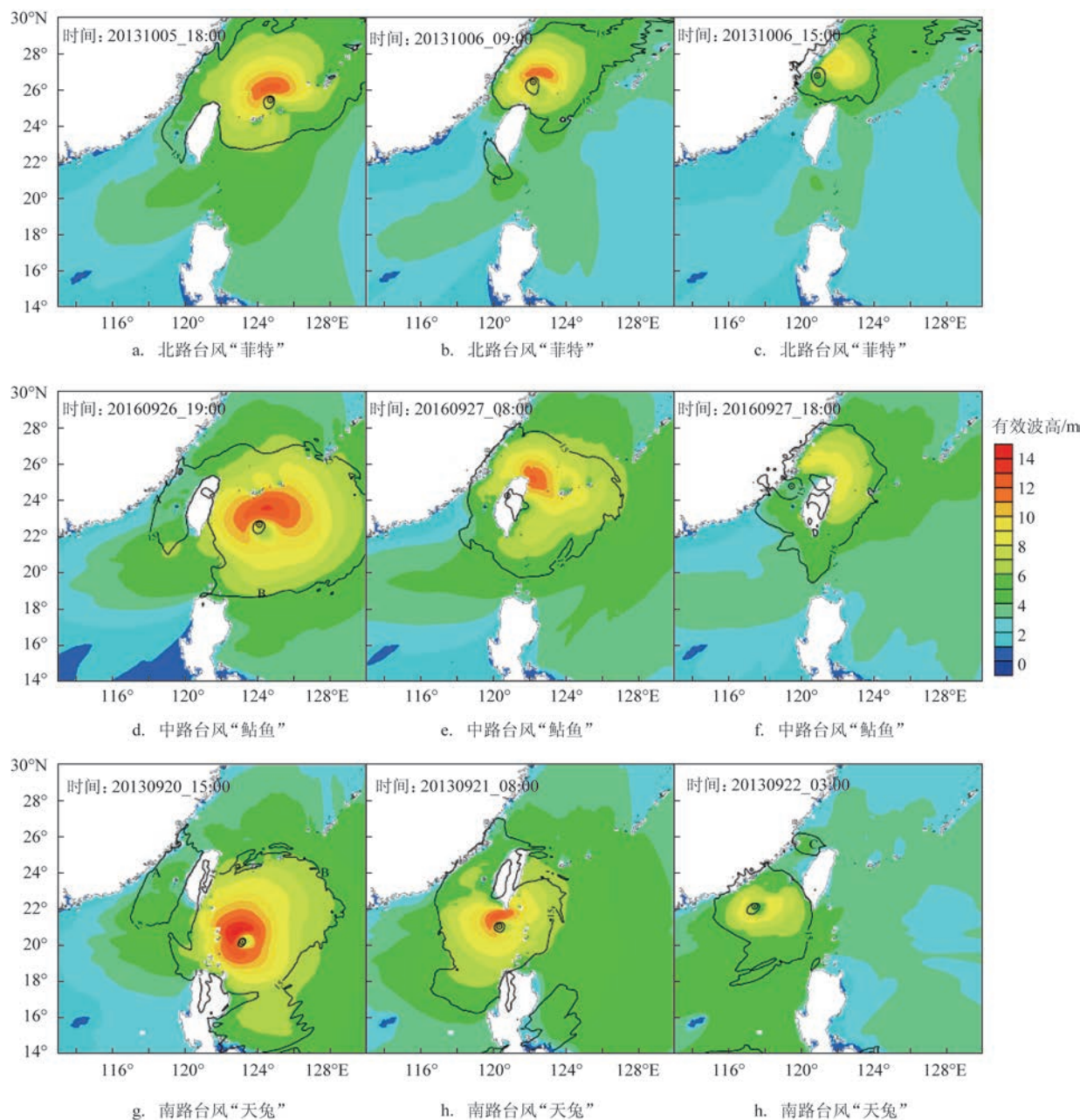


图3 3种路径代表性时刻的有效波高(填色)和海面风速15 m/s范围(等值线)的组图(圆圈为台风中心所在位置)

浪比毗邻区域略大。

4.2 台湾岛对涌浪的阻挡

很多研究表明,几乎风暴所有象限的主要海浪都是远处产生的涌浪,而且风向与浪向之间的夹角较大^[14, 16-18],而当风向和浪向不一致时,发生海难事故的概率升高^[35],所以,有必要分析台风浪中的主波向和涌浪情况。图4绘制了3个台风在3个代表性

位置时,波浪能量的谱峰周期和方向。从图中可以看出:(1)在台风影响期间,代表台风浪主波的能量谱峰,几乎在所有象限其周期都大于10 s(黄色和红色),也就是说主要都是涌浪。其中在台风的前进方向涌浪最明显,谱峰周期基本上都大于14 s(红色),正后方周期最短接近10 s;(2)当台风处于远海时,在台风行进的前象限,3个台风浪的主波(涌浪)方向比较一致,均从台风中心辐射向前传播;但是

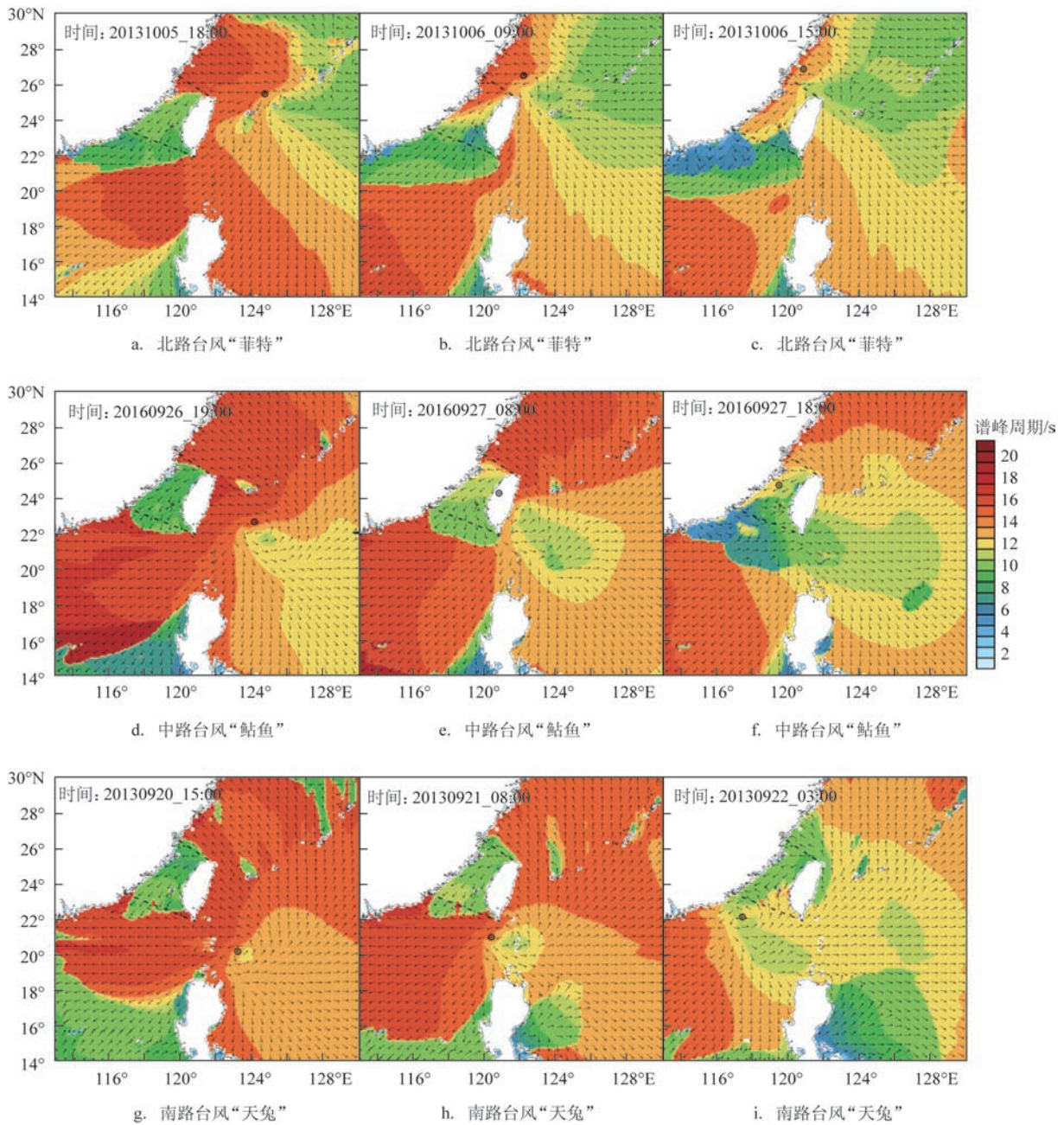


图4 3个台风代表性时刻波浪谱峰周期(填色)和方向(矢量)的分布情况(圆圈为台风中心所在位置)

在台风行进的后象限,尤其是在正后方,南路台风主波的波向辐射向外,中路台风主波的波向往台风中心偏转,北路台风主波的波向更是偏转至向前的方向(见图4a、d、g),也就是说主波向不尽相同。这两个特征与前人的研究相吻合;(3)当台风处于远海和近海时,台湾海峡能量谱峰的填色偏向黄绿色,与周边海域的深红色不连续(见图4a、d—e、g—

h),这说明海峡内部并不以这些从远海向西传播的长周期涌浪作为能量的谱峰。因为Munk等^[36]研究表明,涌浪主要沿着地球大圆弧传播,本文中涌浪传播距离小于500 n mile,可以近似假想为沿着直线传播。所以,当3个典型台风在西行时,台风涌浪主要方向为自东往西,处于台湾海峡东面的台湾岛阻挡了进入西侧的涌浪;(4)当台风处于近岸时,北路

和中路台风影响下,台湾海峡出现从北往南的涌浪主波(见图4c、f);南路台风影响下,海峡南部主波为来自台风后部的涌浪,比台风前部的涌浪周期更短(见图4i)。

图5绘制了3个台风在处于3个代表性位置的涌高分布情况(蓝色填色)和涌高3m的等值线。总体而言,涌高分布特征与混合浪高特征相似,在台风行进方向的右半圆(西行台风中心的北面)涌高

大于左半圆(西行台风中心的南面),这也台风浪主波主要是涌浪的一种表现。

当台风处于远海时,北路和中路台风影响下南海有明显广阔的3 m涌高线(见图5a、d—e),南路台风影响下在东海也有较明显的3 m涌高线,但受琉球群岛和东海大陆架影响不如南海响应明显(见图5g—h)。与南海涌浪明显情况相反,受台湾岛的阻挡,3 m涌高线没有或很少进入台湾海峡(见图5a、

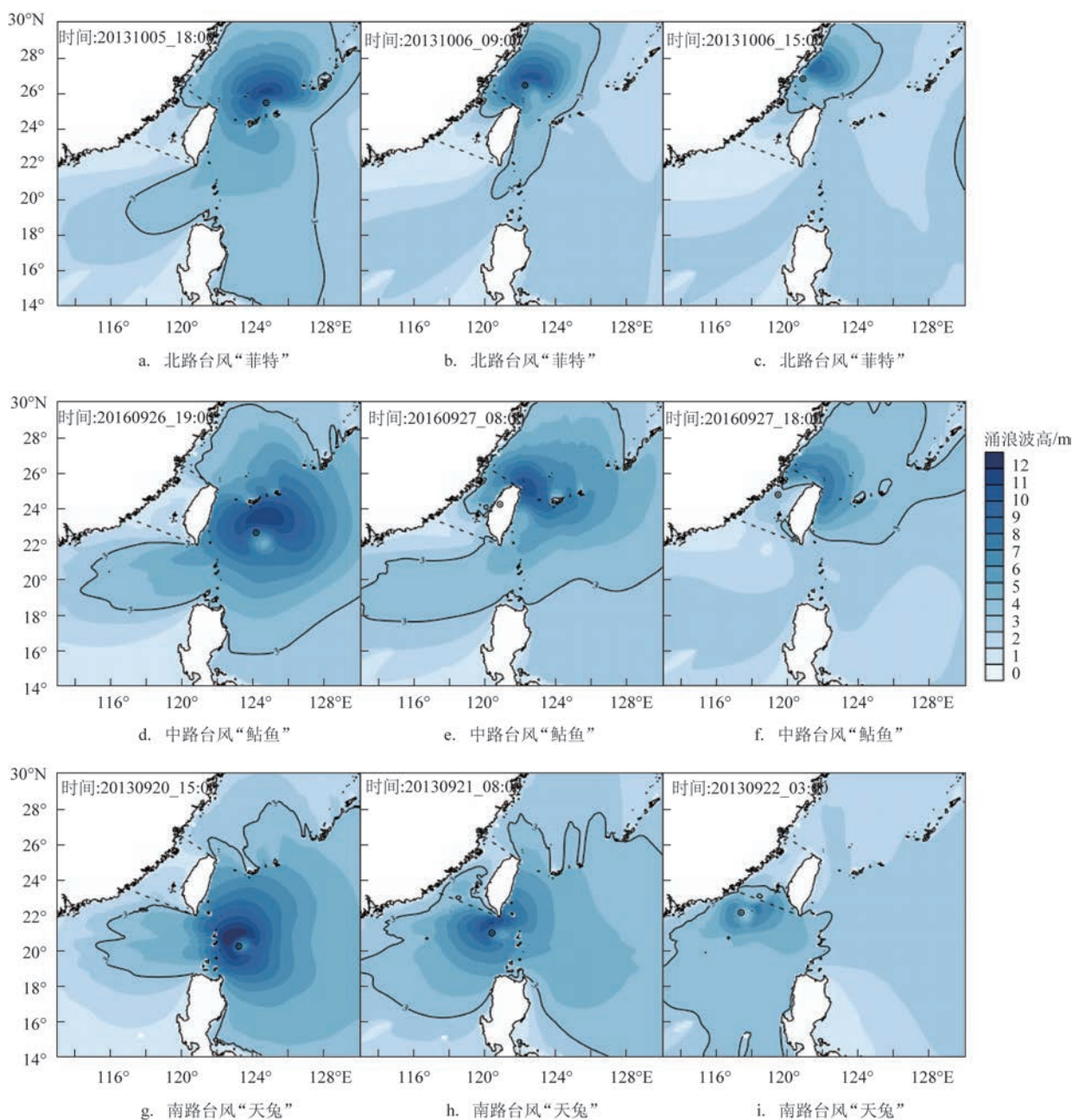


图5 3个台风代表性时刻的涌浪浪高(填色)和3 m范围(等值线)的组图(圆圈为台风中心所在位置)

d、g)。前节提到,台湾海峡出现“提前大风”却没有出现“提前狂浪”,分析认为,混合浪的重要组成部分——涌浪没有能够传播进入台湾海峡,也是海峡内有效波高无法达到远海相同风速位置的高度的原因之一。在台风登陆前,中路台风的涌浪相对中心也具有异常明显的不对称性,3 m涌高浪线覆盖了整个台风右半圆,却没有覆盖海峡南部,台湾岛对涌浪的阻挡是中路台风的海浪结构异常明显不对称的主要原因。

4.3 台湾海峡台风浪极值特征

为进一步分析台湾海峡内台风浪的影响情况,将5个浮标代表点的实测有效波高和模式模拟的涌浪时间序列绘制图6。5个浮标所处的地理位置基本在一条直线上,可以认为是台风的一个观测断面。从图6中可以看出:(1)台湾海峡浮标观测海浪的峰值的出现在台风中心处于近海代表性时刻至近岸代表性时刻之间,也就是台风中心越过台湾岛至登陆前后,由此可知,台风中心附近的最大风速区域是形成和影响台风浪的主要因素;(2)北

路台风中心从No4浮标和No5浮标之间穿过(见图1),过程中浮标观测到的有效波高极大值出现在处于台风右侧的No5浮标(见图6a蓝色曲线),这符合一般对于台风浪结构的认识;(3)中路台风从No2浮标和No3浮标之间穿过(见图1),No2浮标有效波高与No3浮标相当(见图6b中的紫色和黄色曲线),但是No4浮标在台风登陆前后达到浮标观测到的有效波高过程极大值(图6b中的绿色曲线);分析图5f中的涌浪分布和图6e中No4浮标绿色涌浪曲线可知,No4浮标虽然比No3浮标更远离台风中心,但是有更开阔的地势和更高的涌浪;(4)南路台风中心从No1浮标南部经过(见图1),No1浮标模拟出现5个浮标中的涌浪的极大值(见图6f中红色曲线),但是过程浮标观测有效波高极大值出现在更北的No2浮标(见图6c中紫色曲线),因为No2浮标受地形“狭管效应”影响有更大的风速和更高的风浪。相比本文作者之前基于浮标的观测分析,通过对台风浪的后报模拟,尤其是涌浪的模拟分析,提高了对台湾海峡台风浪结构的认识^[37]。

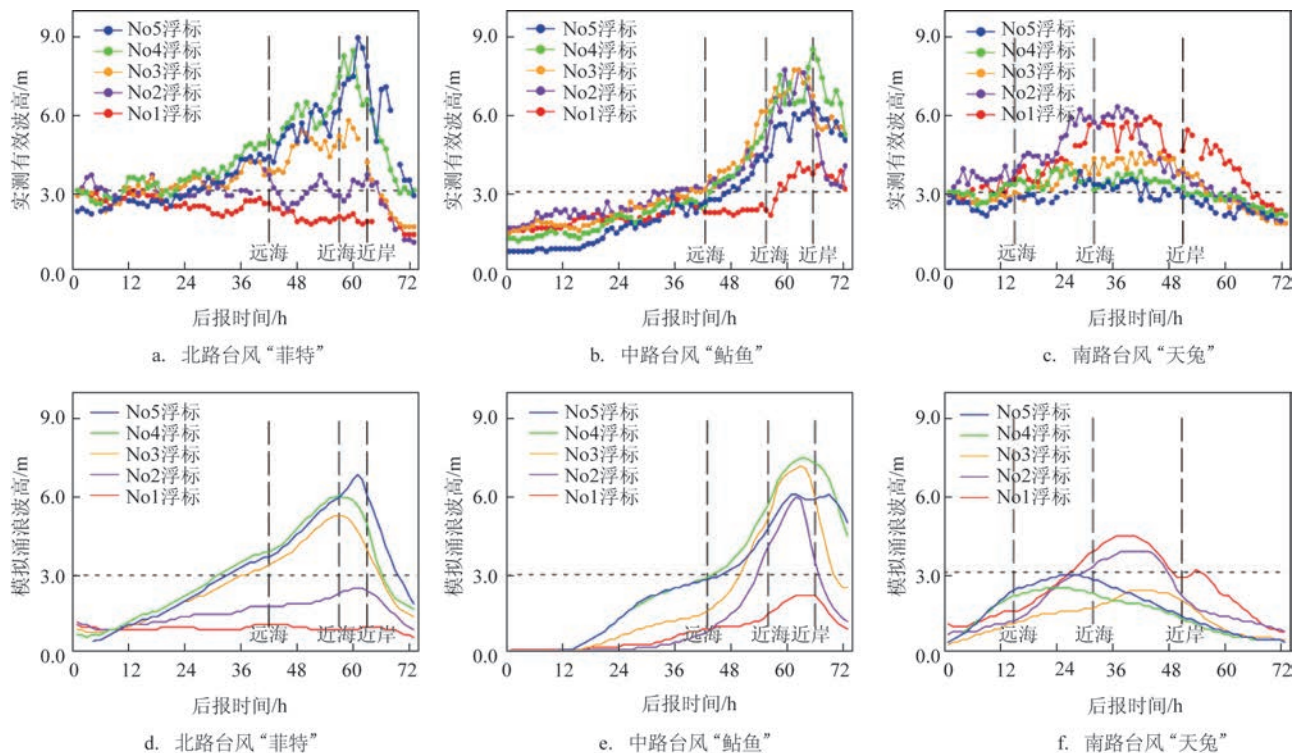


图6 浮标实测有效波高和模拟涌浪时间序列图

4.4 台湾海峡台风海浪方向谱特征

从能量的角度看,单点的波浪可以被看作是不同频率各个方向的能量的合成,分析二维海浪方向谱,有助于了解台风浪的形成与传播^[38]。为分析不

同台风移动路径影响下台湾海峡内海浪能量的构成,在结合前文的分析基础上,图7选择性地组合了北路台风影响下的No3浮标、中路台风影响下的No2浮标和南路台风影响下的No1浮标,在代表性时刻的二维海浪方向谱情况。为了便于比较分析,

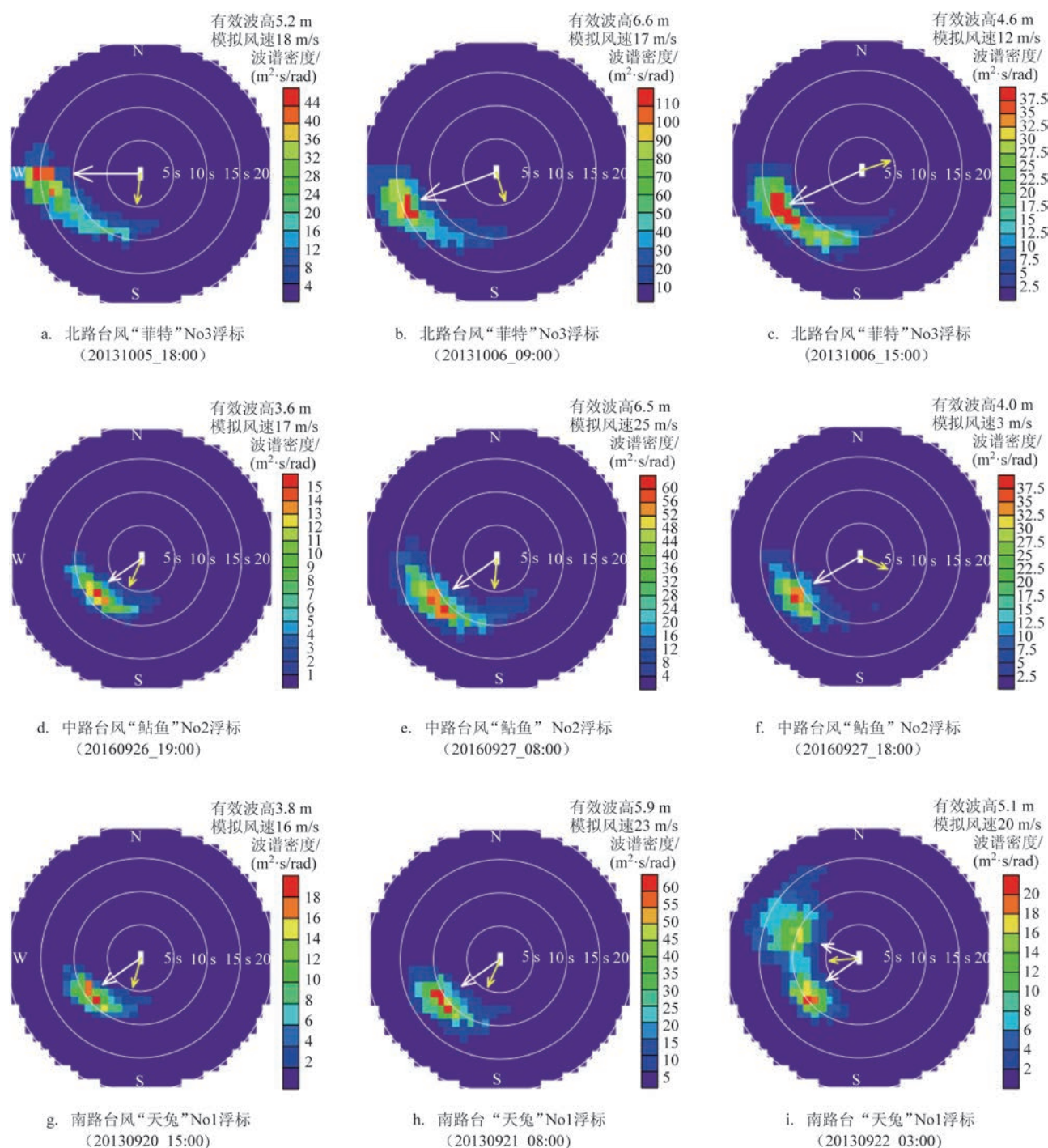


图7 代表点位的二维波浪能量谱(填色为波谱密度,黄色箭头为风向,白色箭头为海浪谱峰,白色线圈为周期,并在右上角标注了当时有效波高和风速大小)

将风的来向转换成了风的去向,用黄色箭头表示;将频率转换成了周期并分别绘制了5 s、10 s、15 s和20 s的周期辅助等值线;能量方向谱峰的白色指示箭头是经人工判别后添加的,右上角还添加了模拟有效波高和风速大小。

(1)在北路台风处于远海时,No3浮标位于台风的正西方,局地风向接近偏北,能量谱有从北往南方向的周期小于10 s的风浪,但是主要的能量是由东往西传播15 s周期的涌浪,伴随着散布整个西南象限的较宽的能量谱,大都是远海过来的涌浪(见图7a)。随着台风向近海靠近,3号浮标因为与台风中心的相对位置发生变化,有效波高增大的同时,风向和能量谱逆时针调整(见图7b)。随着台风临近登陆中心越过浮标位置,风向偏转成西南风,但是海浪能量谱变化滞后,仍维持着前面时次的分布(见图7c);

(2)在中路台风处于远海时,No2浮标处于台风的西面,局地风向北偏东,能量频谱此时以风浪为主(见图7d),能量谱比北路台风的No3浮标更窄(见图7a)。随着台风靠近近海,海峡内部风向偏北分量加大,东北往西南方向的风浪周期增大成为涌浪的同时,有不少正北往正南的风浪频谱,使得整个能量方向谱变宽(见图7e)。随着台风靠近浮标,局地风速急速降低,伴随正南方向的风浪谱的消失,能量方向谱变窄(见图7f)。整个过程中,虽然风向有变化,但是能量谱一直以东北往西南方向为主(见图7d—f),分析认为这与台湾海峡东北西南的地形走向有关;

(3)在南路台风处于远海和近海时,No1浮标能量谱特征和No2浮标受中路台风影响时的情况类似(见图7g—h)。随着台风向西行进经过浮标后,局地风向偏东风并有由东往西的风浪谱,但是能量谱可以明显看到两股更强的能量谱,一股是东北往西南方向的风浪,这主要是台湾海峡从北往南的海浪传播过来的,另一个是东南往西北方向的涌浪,这主要是台风后部的涌浪,此时风浪与涌浪方向几乎成直角关系(见图7i);

从这3个台风影响情况看,台风过程局地风向随着台风的相对位置不断地变化而变化,但是台湾海峡能量谱变化不大或者缓慢,经常与风向之间有较大角度,这会提升海难事故的概率^[35];台湾海峡两

端(No31浮标和No1浮标)海浪方向谱相对较宽,在南路台风西行时出现两股明显的成直角的风浪谱和涌浪谱,不利于船头找到合适的指向方位,是危险的海况特征^[11],加上台风浪普遍较高能量大,所以说台风浪是极其危险而具有破坏性的。虽然Moon等^[12]的研究同样也表明在飓风前进的左方的海浪方向谱较宽,但是海峡地形效应和风向对海浪谱的影响还需要实测数据作进一步验证。

5 小结

本文利用WRF计算的风场,驱动SWAN波浪模式,对台湾海峡及周边海域台风浪进行数值后报模拟,研究分析了台风混合浪场的特征、台湾岛对台风浪中涌浪传播的阻挡、台湾海峡海浪极值情况和波浪谱的情况,得出主要结论如下:

(1)WRF风场驱动的SWAN波浪模拟结果,与浮标实测情况基本一致。后报模拟的台风浪场右半圆大于左半圆,前进象限以涌浪为主,主波方向辐射向前传播,台风的正后方向的主波向3个台风各不相同,这些基本特征与前人研究结论相吻合;

(2)受台湾岛的地形影响,在中路和南路台风影响时,台湾海峡较早出现15 m/s的风速等值线(“提前大风”),但是海峡内风场与台风风场被台湾岛地形分割致使海浪成长风区变短,而且远海涌浪无法传播到海峡内部,使得海峡内海浪没有达到远海同样风速区域的6 m左右的高度(没有“提前狂浪”);

(3)受台湾岛的影响,中路台风影响下,台湾海峡的浪场出现异常明显的不对称性结构,海浪高值区在有远海涌浪影响的台湾海峡北部,海峡南部涌浪小于3 m,海峡南部浪场没有大范围6 m区域,5个浮标的观测极值没有出现在右半圆离台风中心更近的No3浮标,出现在台湾海峡北部的No4浮标;

(4)台风过程局地风向随着台风的相对位置不断地变化而变化,但是台湾海峡能量谱变化不大或者缓慢,经常与风向之间有较大角度;在北路台风影响下北部有明显的自东向西的周期大于15 s的涌浪谱;在南路台风西行时出现两股明显的成直角的风浪谱和涌浪谱。这些特征对船舶航行安全有潜在危险。

参考文献

- [1] 许富祥. 中国近海及其邻近海域灾害性海浪的时空分布[J]. 海洋学报, 1996, 18(2): 26-37.
- [2] Wang D P, Oey L Y. Hindcast of waves and currents in hurricane Katrina[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2008, 89(4): 487-496.
- [3] Barber N F, Ursell F. The generation and propagation of ocean waves and swell. I. Wave periods and velocities[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 1948, 240(824): 527-560.
- [4] Holland G J. An analytic model of the wind and pressure profiles in hurricanes[J]. Monthly Weather Review, 1980, 108(8): 1212-1218.
- [5] Shea D J, Gray W M. The hurricane's inner core region. I. Symmetric and asymmetric structure[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 1973, 30(8): 1544-1564.
- [6] King D B, Shemdin O H. Radar observation of hurricane wave directions[C]//Proceedings of the 16th International Conference on Coastal Engineering. Hamburg, Germany: ASCE, 1978: 209-226.
- [7] Bowyer P J, MacAfee A W. The theory of trapped-fetch waves with tropical cyclones—an operational perspective[J]. Weather and Forecasting, 2005, 20(3): 229-244.
- [8] 许富祥. 海浪预报知识讲座-第七讲 海浪的地理分布与季节变化(III)——中国近海及邻近海域灾害性海浪时空分布[J]. 海洋预报, 2002, 19(4): 78-81.
- [9] Young I R. A review of the sea state generated by hurricanes[J]. Marine Structures, 2003, 16(3): 201-218.
- [10] Beal R C, Gerling T W, Irvine D E, et al. Spatial variations of ocean wave directional spectra from the Seasat synthetic aperture radar [J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 1986, 91(C2): 2433-2449.
- [11] Walsh E J, Wright C W, Vandemark D C, et al. Hurricane directional wave spectrum spatial variation in open ocean and at landfall[C]//IGARSS 2000. IEEE 2000 International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Taking the Pulse of the Planet: The Role of Remote Sensing in Managing the Environment. Proceedings (Cat. No.00CH37120). Honolulu, HI, USA: IEEE, 2000: 2750-2752.
- [12] Moon I J, Ginis I, Hara T, et al. Numerical simulation of sea surface directional wave spectra under hurricane wind forcing[J]. Journal of Physical Oceanography, 2003, 33(8): 1680-1706.
- [13] Tolman H L, Chalikov D. Source terms in a third-generation wind wave model[J]. Journal of Physical Oceanography, 1996, 26(11): 2497-2518.
- [14] Hu K L, Chen Q. Directional spectra of hurricane-generated waves in the Gulf of Mexico[J]. Geophysical Research Letters, 2011, 38(19): L19608.
- [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] Young I R. Directional spectra of hurricane wind waves[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2006, 111(C8): C08020.
- [17] Holthuijsen L H, Powell M D, Pietrzak J D. Wind and waves in extreme hurricanes[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2012, 117(C9): C09003.
- [18] Liu Q X, Babanin A, Fan Y L, et al. Numerical simulations of ocean surface waves under hurricane conditions: assessment of existing model performance[J]. Ocean Modelling, 2017, 118: 73-93.
- [19] Chu P C, Cheng K F. South China Sea wave characteristics during typhoon Muifa passage in winter 2004[J]. Journal of Oceanography, 2008, 64(1): 1-21.
- [20] Wang J C, Zhang J, Yang J G. Numerical simulation and preliminary analysis on ocean waves during Typhoon Nesat in South China Sea and adjacent areas[J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2014, 32(3): 665-680.
- [21] 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.
- [22] 曾银东. 海上实时监测系统在台风“凤凰”监测预报和防御中的应用[J]. 海洋预报, 2010, 27(1): 19-23.
- [23] 张友权. 福建海洋观测示范网建设与应用[J]. 海洋技术, 2012, 31(1): 111-114.
- [24] 王时鼎, 谢信良, 郑明典, 等. 侵台台风因台湾地形引起两类边界层现象分析及其预报问题讨论[C]//天气分析与预报研讨会论文集汇编. 台北, 中国: 台湾“交通部中央气象局”, 2003: 223-267.
- [25] 陈德文. 台湾岛周边海域台风海面风场及其模型化研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2006.
- [26] 高珊. 西太平洋台风影响福建近海海区的风场分布特点及数值研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2006.
- [27] Skamarock W C, Klemp J B, Dudhia J, et al. A description of the advanced research WRF version 3[R]. Boulder, Colorado, USA: National Center for Atmospheric Research, 2008: 113.
- [28] Deng A J, Stauffer D R. On improving 4-km mesoscale model simulations[J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2006, 45(3): 361-381.
- [29] 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.
- [30] The SWAN Team. SWAN Cycle III version 41.20A[Z]. Delft University of Technology, 2018.
- [31] Rogers W E, Kaihatu J M, Petit H A H, et al. Diffusion reduction in an arbitrary scale third generation wind wave model[J]. Ocean Engineering, 2002, 29(11): 1357-1390.
- [32] 梁小力, 王毅. 基于SWAN模式的全球有效波高数值预报结果之初步验证[J]. 海洋预报, 2015, 32(6): 1-9.

- [33] Kinsman B. Wind Waves, their generation and propagation on the ocean surface[M]. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1965: 676.
- [34] Chen G, Chapron B, Ezraty R, et al. A global view of swell and wind sea climate in the ocean by satellite altimeter and scatterometer[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2002, 19(11): 1849-1859.
- [35] 魏永亮, 高志一, 唐泽艳, 等. 基于 SAR 波模式数据的沉船事故海浪要素分析[J]. 上海海洋大学学报, 2017, 26(6): 946-952.
- [36] Munk W H, Miller G R, Snodgrass F E, et al. Directional recording of swell from distant storms[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of Series A: Mathematical and Physical Sciences, 1963, 255(1062): 505-584.
- [37] 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.
- [38] 陈晓斌, 周林, 史文丽, 等. 台风“梅花”风浪场和涌浪场特征分析[J]. 海洋科学进展, 2013, 31(1): 22-30.

Study on the characteristics of typhoon waves under three typical paths in Taiwan Strait

CHEN Jian-qiao

(Fujian Marine Forecasts, Fuzhou 350003 China)

Abstract: The SWAN wave mode driven by the WRF wind field is used to simulate the characteristics of typhoon waves in the Taiwan Strait and surrounding sea areas under the three typical paths of the North Path, the Middle Path and the South Path. The results show that: (1) The numerical simulation is basically consistent with the actual measurement of the buoy. The right semicircle of the typhoon wave field is larger than the left semicircle. The forward quadrant is dominated by swells, and the main wave direction radiates forward, and the main wave direction of the typhoon in the rear is chaotic. (2) Under the influence of the typhoon by the Middle Path and the South Path, the wind speed contour of 15m/s appears earlier in the Taiwan Strait, but the wind field in the strait and the typhoon wind field are divided by the topography of Taiwan Island, which shortened the wind fetch for the waves grew. The swell of the open sea cannot spread to the interior of the strait, so that the waves in the strait do not reach the height of about 6m in the same wind speed area in the open sea. (3) Under the influence of the typhoon by the Middle Path, the waves in the Taiwan Strait are obviously asymmetrical which mainly affected by the island of Taiwan. The mixed waves and swells in the northern part of the Taiwan Strait are much higher than the southern part of the strait. (4) The angle between the wave energy spectrum of the Taiwan Strait and the local wind direction is relatively large. Under the influence of the typhoon by the North Path, there is a clear swell spectrum from the east to the west with a period longer than 15s. Two remarkable spectrums of wind-wave and swell are at right angles, which appears when the typhoon moving west by the South Path. These characteristics are potentially dangerous to the safety of the ship.

Key words: typhoon wave; Taiwan Strait; Taiwan Island; swell; wave spectrum; dominant wave direction; wind direction