

强台风“卡努”过境期间的风和海浪特征分析*

邓 丹^{1,2} 周 泉³ 马 磊^{1,2} 李锐祥^{1,2}

(1. 自然资源部南海调查中心 广东广州 510300; 2. 自然资源部海洋环境探测技术与应用重点实验室 广东广州 510300;
3. 生态环境部华南环境科学研究所 广东广州 510530)

摘要 南海北部海域夏季台风活动频繁, 对海上生产活动和人民生命财产安全造成极大威胁, 由于台风路径的不确定性, 其中心附近区域的风浪观测资料十分稀少。中国气象局(China Meteorological Administration, CMA)热带气旋最佳路径数据显示 2017 年 10 月强台风“卡努”中心经过南海北部陆坡的 SF301 浮标, 该浮标完整记录了台风过境的风浪数据。利用浮标观测资料, 分析了强台风“卡努”过境期间的风和海浪特征。观测结果表明, “卡努”经过浮标时, 中心气压为 959.9 hPa, 风速随时间呈双峰分布, 前、后眼壁区的 10 min 平均风速分别为 30.2 m/s 和 24.9 m/s, 1 s 极大风速分别为 44.2 和 38.6 m/s。海浪以风浪为主, 观测有效波高和最大波高最大值分别为 10.8 和 14.3 m, 滞后最大风速 30 min, 波向和风向变化趋势一致。台风过境期间, 有效波高与海面 10 m 风速接近线性关系, 非台风期间二者呈二次多项式关系。海浪无因次波高和周期呈幂指数关系, 无论是台风期间还是非台风期间二者关系十分接近 Toba 提出的 $3/2$ 指数律。

关键词 南海; 浮标; 台风; 卡努; 风; 海浪

中图分类号 P731 **doi**: 10.11693/hyhz20230300061

我国濒临西太平洋, 是受台风影响最严重的国家之一, 平均每年有 9.3 个台风袭击我国(陈大可等, 2013), 台风引起的海浪、风暴潮、强降水等给我国沿海地区造成了巨大的财产损失和人员伤亡(雷小途等, 2009), 对沿海和海上生产活动带来了严重的威胁。随着我国经济高速发展, 台风造成的直接经济损失呈上升趋势(Zhang *et al*, 2009; 卢莹等, 2021)。因此掌握台风期间的风和海浪特征及变化规律对台风预报预警和海洋防灾减灾等工作具有较为重要的意义。

台风经过海洋时, 海面气压呈漏斗状结构(郎喜白, 2011; 王蓉等, 2013), 风速呈“M”形双峰分布, 台风眼壁区风速最大, 前眼壁区风速通常略大于后眼壁区, 台风眼区气压和风速最小(苏志等, 2020; 黄浩辉等, 2021)。台风在海面引起的海浪最大波高可达 10 余米(王蓉等, 2013; 王毅等, 2020), 波高随风速增大而增大, 周期随波高增大而增大, 波高最大值一般滞

后风速最大值 40 min 至 4 h (苏志等, 2020; 庄红波等, 2013), 台风前眼壁区域有效波高最大, 后眼壁区次之(夏璐一等, 2014)。台风浪的波高与风速呈二次多项式关系(王小丹等, 2019; Hao *et al*, 2020; 李朝等, 2021; Niu *et al*, 2021), 无因次波高和无因次周期呈幂指数关系(Hsu *et al*, 2017; 李朝等, 2021; Niu *et al*, 2021)。台风前进方向的右侧由于风向和台风移动速度相同, 通常情况下海浪发展更迅速, 波高增大的更快(姚圣康, 2006; 赵凯等, 2011), 右侧的有效波高比左侧的有效波高大, 其增幅可达 29%~48% (夏璐一等, 2014)。在台风影响下, 海浪波型一般会经历混合浪-风浪-混合浪的变化(孙璐等, 2014; 王毅等, 2020), 台风过程中所产生的大浪主要为风浪, 涌浪基本分布在远离台风中心的外围海域(韩晓伟等, 2011; Xu *et al*, 2017)。

受限于台风期间恶劣的天气和海况, 海面的风、浪观测主要依赖于沿岸的海洋站(郎喜白, 2011; 王蓉

* 广东省平台基地及科技基础条件建设项目, 2021B1212050025 号; 中央级公益性科研院所基本科研业务专项, PM-zx703-202104-074 号; 自然资源部南海局科技发展基金, 202205 号。邓 丹, 工程师, E-mail: 80162181@qq.com

通信作者: 李锐祥, 高级工程师, E-mail: liruixiang@smst.gz.cn

收稿日期: 2023-03-15, 收修改稿日期: 2023-05-11

等, 2013; 孙璐等, 2014; 黄浩辉等, 2021)、海上浮标(姚圣康, 2006; Hsu *et al.*, 2017; 苏志等, 2020)或者油气平台(庄红波等, 2013)。目前南海的浮标和平台大多分布在近岸海域, 深水区分布较少, 由于台风路径的不确定性, 台风期间的风浪观测就更加稀缺, 然而深水区观测数据对预报台风的路径和强度至关重要。中国气象局(China Meteorological Administration, CMA)热带气旋最佳路径数据显示 2017 年 20 号台风“卡努”的中心恰好经过南海陆坡区的 SF301 浮标, 该浮标获取了台风期间完整的海面水文和气象资料, 本文将基于浮标观测资料, 分析强台风“卡努”影响下风和海浪特征, 以期对台风研究和海洋防灾减灾提供参考。

1 台风“卡努”与数据介绍

台风路径数据来源于中国气象局上海台风研究所发布的 CMA 热带气旋最佳路径数据集(tcdata.typhoon.org.cn), 该数据时间分辨率为 6 h, 登陆前 24 h 时间频次加密为 3 h 一次, 包含台风位置、中心气压、2 min 平均风速以及热带气旋等级等(Ying *et al.*, 2014; Lu *et al.*, 2021)。

强台风“卡努”为 2017 年的第 20 号台风, 于 2017 年 10 月 11 日(北京时间, 下同)在菲律宾吕宋岛以东洋面生成, 形成时的级别为热带低压, 在向西移动过程中强度不断增加, 10 月 12 日升级为热带风暴, 10 月

13 日穿过吕宋岛进入南海, 10 月 14 日升级为强热带风暴, 其移动方向迅速发生改变, 向西北偏北方向移动, 10 月 14 日 22 时发展为台风, 10 月 15 日 12 时进一步升级为强台风, 其最大风速达 42 m/s, 16 日凌晨在广东湛江徐闻附近登陆。登陆后, “卡努”继续向西偏南方向移动, 强度迅速减弱, 移入北部湾后逐渐减弱消失。台风“卡努”的移动路径如图 1 所示。

本文采用的浮标数据来源于自然资源部南海局运行和管理的南海业务化海洋观测网中的 SF301 浮标(图 1)。该浮标站位于南海陆坡区, 浮标直径 6 m, 所在海域水深约为 1 500 m, 观测内容包括 10 min 平均风速和风向, 1 s 极大风速和风向, 气温, 气压, 最大、十分之一、有效、平均波高和周期, 波向, 表层水温等, 数据时间间隔为 1 h, 台风期间采样间隔加密为 30 min。强台风“卡努”中心经过浮标站的时间为 2017 年 10 月 15 日上午 04:30~06:30, 浮标完整记录了台风前后海面水文气象数据。

2 结果与分析

2.1 海面气压和气温

在“卡努”进入南海前, 浮标观测的海面气压一直维持在 1 000 hPa 以上, 随着台风逼近, 海面气压缓慢下降, 10 月 15 日 01:30 气压开始快速下降, 此时台风距离浮标站大约 135 km, 10 月 15 日 05:30 台风中

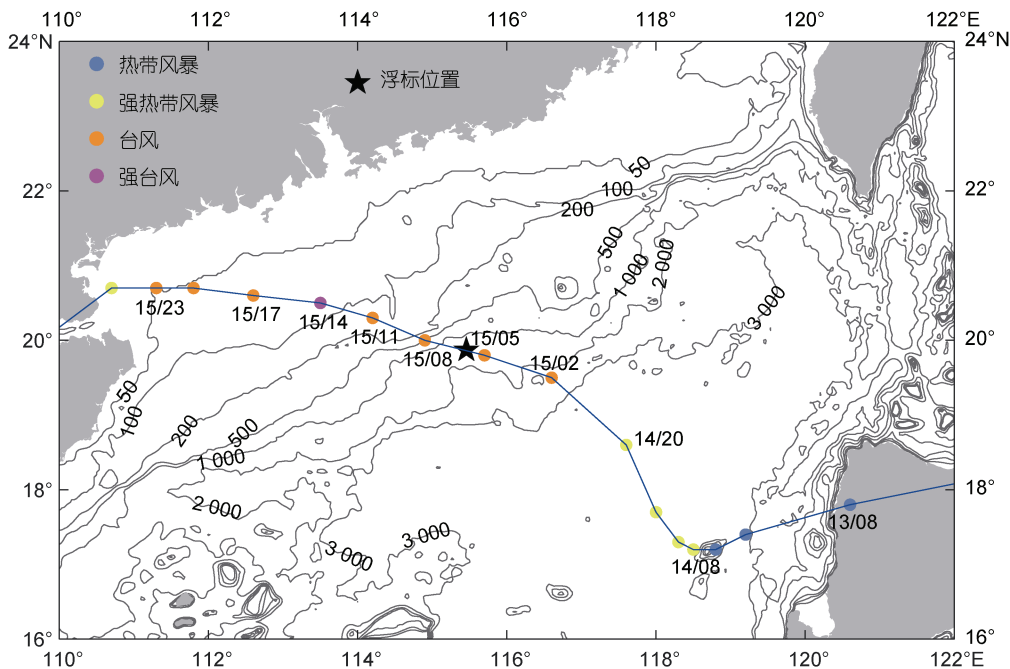


图 1 强台风“卡努”移动路径

Fig. 1 The track of severe typhoon Khanun

注: 等值线表示水深(单位: m); 台风路径上的数字格式为“日/时”

心经过浮标站时,海面气压降为 959.9 hPa,台风中心离开以后气压迅速上升,气压随时间呈漏斗状变化(图 2a)。浮标观测最低气压比同时刻 CMA 数据集气压

低 5.1 hPa,比美国 JTWC (Joint Typhoon Warning Center) 数据集低 3.5 hPa,与日本 JMA (Japan Meteorological Agency) 数据集最接近,仅低 0.5 hPa。

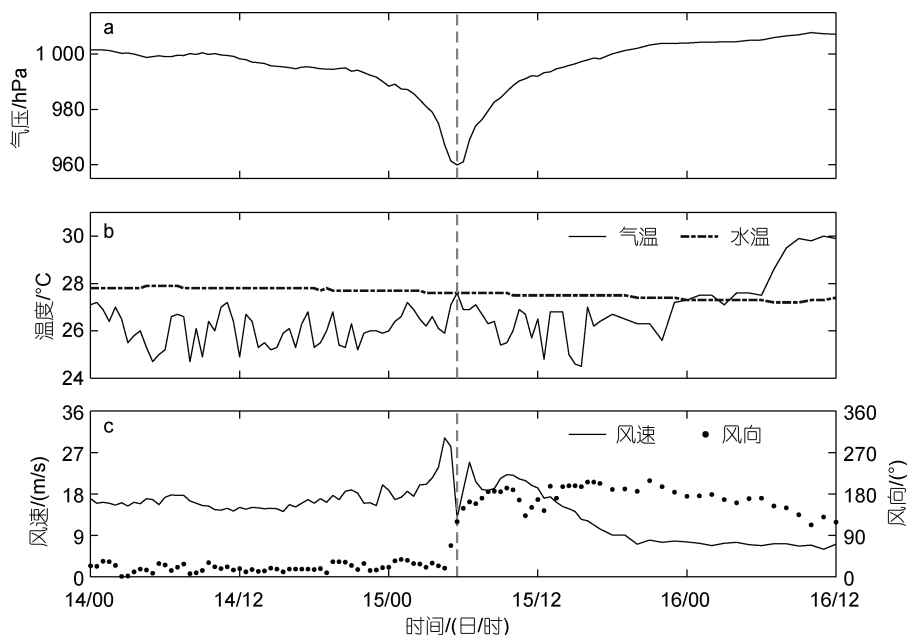


图 2 台风“卡努”期间 SF301 浮标海面气压(a)、气温水温(b)、风速风向(c)时间序列图

Fig.2 Time series of sea level pressure (a), air temperature and sea surface temperature (b), and wind speed and direction (c) observed at buoy SF301 during typhoon Khanun
注: 横坐标所示日期为 2017 年 10 月

台风进入南海前浮标观测气温一直在 28~30 °C, 进入南海后浮标观测气温迅速降至 27 °C, 不过随着台风逐渐接近浮标, 观测气温并未继续下降, 而是在 24.5~27.5 °C 之间波动。台风中心经过时气温相对较高为 27.6 °C, 台风前眼壁区和后眼壁区经过时气温相对较低, 分别为 25.9 °C 和 26.9 °C, 与台风中心分别相差 1.7 °C 和 0.7 °C (图 2b), 台风登陆后观测气温迅速恢复至 30 °C 左右。通常台风导致的上层海洋混合会引起海面水温降低(Price, 1981), 进而对台风强度产生负反馈, 而当混合层较厚时则海面降温则不太明显, 海洋可持续为台风提供能量进而使之强化。“卡努”过境期间, 浮标观测海表水温在一直高于海面气温且并未发生明显的变化(图 2b), 仅台风中心经过浮标时气温和海表水温完全相等, 这意味着“卡努”一直从海洋吸收热量, 这导致了“卡努”的强度在南海迅速加强。不过台风引起的海表降温与台风强度、混合层厚度、台风移动速度等多种因素有关, 台风“卡努”移动速度较快也是海面降温不明显的-一个原因。

2.2 海面风

在“卡努”之前南海北部海域盛行东北风, 风速约

为 10 m/s。10 月 14 日, “卡努”进入南海后, 浮标观测的 10 min 平均风速增大至 16 m/s 左右。10 月 15 日, 随着“卡努”向西北移动, 台风中心距离浮标站越来越近, 观测风速也越来越大。10 月 15 日 04:30 左右, 台风前眼壁区经过时, 风速达到最大, 10 min 平均风速为 30.2 m/s, 风向为 19°; 1 s 极大风速最大值出现在 05:00, 为 44.2 m/s, 风向为 55°。台风中心经过浮标站时风速迅速减小, 05:30, 10min 平均风速降至 12.8 m/s。台风后眼壁区经过浮标时, 风速再次增大, 06:30, 10 min 平均风速为 24.9 m/s, 风向为 163°; 1 s 极大风速为 38.6 m/s, 风向为 148°。

台风过境期间浮标观测风速随时间变化曲线呈现明显的“M”型双峰分布, 且第二个峰值小于第一个, 说明台风“卡努”空间结构不对称, 主要是受观测海域强劲东北季风的影响。风向沿着顺时针方向旋转, 前眼壁和后眼壁区平均风向变化 150°。浮标观测的 10 min 平均风速在台风中心前后两个极值时间间隔为 2 h, 利用 CMA 热带气旋最佳路径数据计算的该时段台风移动速度为 8 m/s, 2 h 移动距离为 57.6 km, 可以估算出“卡努”经过浮标时最大风速半径大约为

29 km, 同时刻美国 JTWC 数据集最大风速半径为 56 km, 接近估算结果的 2 倍。

值得一提的是, 台风后眼壁区经过后, 浮标观测风速在 9:30 左右再次出现一个极值, 10 min 平均风速为 22.2 m/s, 1 s 极大风速为 31.6 m/s, 这是由于“卡努”经过浮标后强度不断增大导致风速增强。台风的影响一直持续到 10 月 16 日, 10 月 17 日开始浮标观测风逐渐恢复到台风前的东北风。

2.3 波浪

受强劲的东北季风影响, “卡努”进入南海之前浮标所在海域海浪较大, 有效波高在 3 m 左右, 最大波高可达 6 m。随着台风中心逐渐靠近浮标站, 波高越来越大, 波高在台风前眼壁经过 30 min 后达到最大, 有效波高

和最大波高分别为 10.8 m 和 14.3 m (图 3a), 这与强热带风暴“贝碧嘉”波高最大值出现时间滞后风速最大值 40 min 的观测结果基本一致(苏志等, 2020)。台风中心经过之后, 波高逐渐减小, 不过在 9:30 有效波高出现一个次极大值, 这是该时段风速增强导致的。

波向和风向变化趋势一致, 由最初的 N 向沿顺时针方向逐渐转换到 SE 向, 波向的转变发生在台风中心经过时刻, 波向转变比风向转变滞后 1 h 左右。波向在风向的逆时针方向, 二者相差 $30^\circ \pm 23^\circ$, 说明波浪主要是由局地风产生的。观测结果还表明, “卡努”期间波周期随着波高增大而增加, 二者相关性为 0.82, 有效波高最高时对应的有效波周期最长, 为 11.2 s (图 3b)。

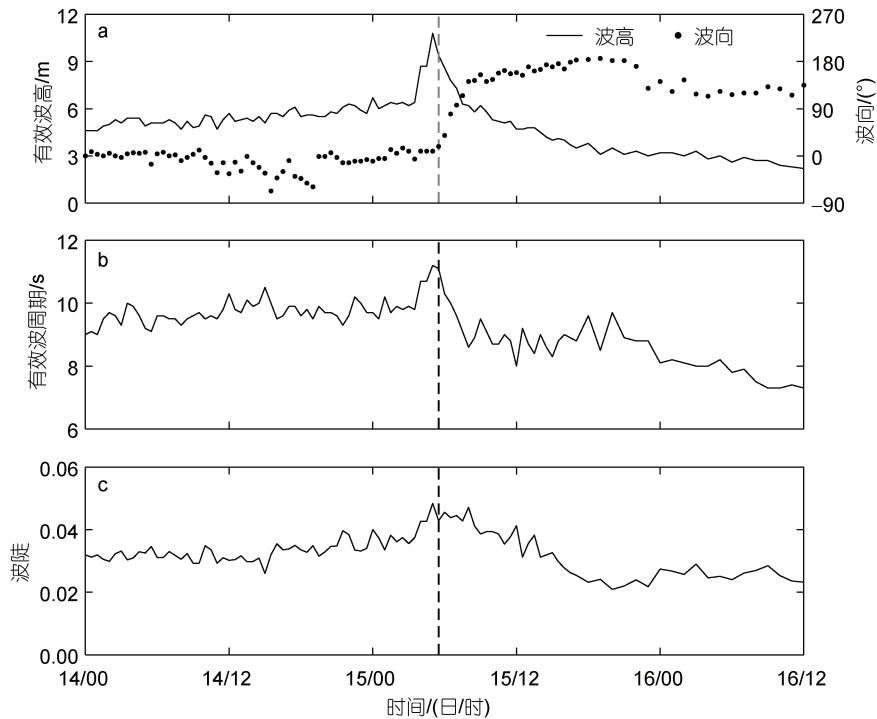


图 3 台风“卡努”期间 SF301 浮标站有效波高和波向(a)、有效波周期(b)、波陡(c)时间序列图

Fig.3 Time series of significant wave height and direction (a), significant wave period (b), and wave steepness (c) observed at buoy SF301 during typhoon Khanun

注: 横坐标所示日期为 2017 年 10 月

台风期间的海浪通常既有风浪, 也有涌浪, 有效波陡是判别波浪类型的一种有效的方法, 一般波陡越小, 越接近于涌浪, 波陡越大, 越接近风浪(孙璐等, 2014)。根据 Thompson 的理论(Thompson *et al.*, 1984), 有效波陡为有效波高和主波长之比, 可用以下公式计算:

$$\delta = \frac{H_s}{\frac{g}{2\pi} T_p^2}, \quad (1)$$

$$T_p = T_s / 0.937, \quad (2)$$

其中: δ 为有效波陡, H_s 为有效波高, g 为重力加速度, T_p 为谱峰周期, T_s 为有效波周期。由于浮标观测结果未输出谱峰周期, 谱峰周期可根据经验公式(2)计算(文圣常等, 1984)。 $\delta \geq 0.025$ 时海浪以风浪为主, $0.01 \leq \delta < 0.025$ 时海浪为未成熟的涌浪, $\delta < 0.01$ 时海浪为成熟的涌浪(Thompson *et al.*, 1984)。

从图 3c 可以看出, 台风期间波陡大部分时间均

大于 0.025, 并且随着台风逐渐接近浮标, 风速越来越强, 海浪不断成长, 波高越来越高, 波陡也越来越大, 最大波陡为 0.049, 台风远离浮标后, 波陡则迅速减小, 15 日 18 时左右已低于 0.025, 说明台风“卡努”影响期间海浪主要以风浪为主, 台风过后则为混合浪。

3 风浪关系讨论

从上节的分析结果不难发现, “卡努”期间有效波高和海面风速变化趋势几乎一致, 相关系数为 0.9。Hao 等(2020)的风浪模型表明在低风速(≤ 16.808 m/s)情况下, 有效波高 H_s 和海面 10 m 风速呈二次多项式关系; 在高风速下(>16.808 m/s)二者呈线性关系[式(3)]。

$$H_s = \begin{cases} -0.082 + 0.076U_{10} + 0.011U_{10}^2 & 0 < U_{10} \leq 16.808 \\ 0.588 + 0.217U_{10} & 16.808 < U_{10} < 40 \end{cases} \quad (3)$$

其中 U_{10} 为海面 10 m 的风速。鉴于“卡努”期间浮标观测风速较大, 本文分别对风-浪的关系进行了线性拟合和二次多项式拟合。由于浮标观测风速距离海面高度为 6 m, 在拟合前先利用经验公式(Hsu *et al.*, 2017)计算海面 10 m 的风速 U_{10} 。

$$U_{10} = U_6 \ln(10/Z_0) / \ln(6/Z_0), \quad (4)$$

$$Z_0/H_s = 1200(H_s/L_p)^{4.5}, \quad (5)$$

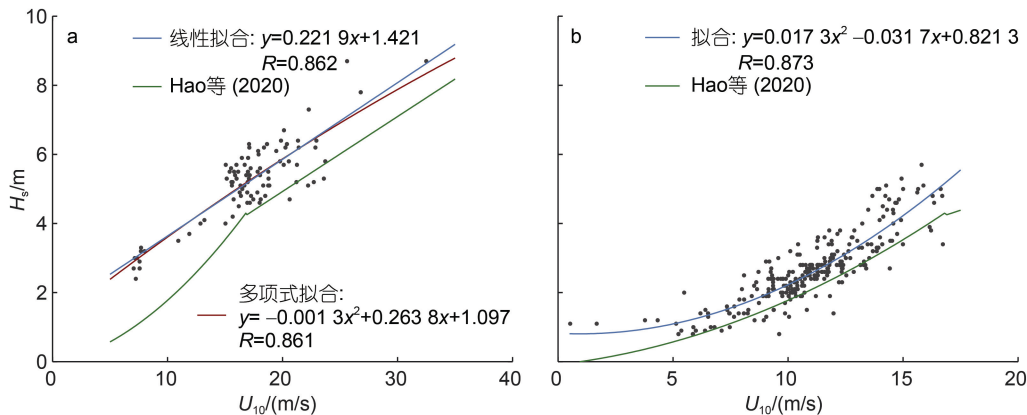


图4 台风“卡努”期间(a)和台风前 13 d (b)有效波高、风散点图和拟合曲线

Fig.4 Relationship between significant wave height and wind speed during the period of typhoon (a) and 13 days before the typhoon arrival (b)

注: U_{10} 表示 10 m 的风速; H_s 表示有效波高; R 表示相关系数

“卡努”期间波高和周期变化趋势高度一致, 说明二者存在内在的联系。大量的研究表明(Toba, 1972; 管长龙等, 2001, 2004; Hsu *et al.*, 2017; 李朝等, 2021; Niu *et al.*, 2021), 风浪的无因次波高和无因次周期之间存在着幂指数关系:

$$\frac{gH_s}{U_{10}^2} = a \left(\frac{gT_s}{U_{10}} \right)^b, \quad (9)$$

其中, U_6 为海面 6 m 的风速, Z_0 为粗糙长度, $L_p = 1.56T_p^2$ 为主要波波长。剔除波陡小于 0.025 的数据后, 有效波高和海面 10 m 风速的关系模型如下:

$$H_s = -0.0013U_{10}^2 + 0.2638U_{10} + 1.097, \quad (6)$$

$$H_s = 0.2219U_{10} + 1.421. \quad (7)$$

式(6)和(7)拟合效果都比较好, 相关系数分别为 0.861 和 0.862, 均方根误差均分别为 0.589 m 和 0.587 m。从图 4a 可以看出, 二者的拟合结果十分接近, 然而在高风速情况下, 式(7)的拟合效果更好, 可以认为“卡努”期间有效波高和风速更接近线性关系, 这与 Hao 等(2020)的模型是一致的。不过利用 Hao 等(2020)的风浪模型计算的同期有效波高, 其平均误差和均方根误差分别为 -1.01 m 和 0.65 m, 显著低估了有效波高(图 4a)。

本文进一步分析了“卡努”之前 13 d (2017 年 10 月 1~13 日)的风-浪关系, 风-浪关系模型为:

$$H_s = 0.0173U_{10}^2 - 0.0317U_{10} + 0.8213. \quad (8)$$

从图 4b 可以看出, 有效波高和海面风速在非台风期间呈二次多项式关系, 拟合结果与观测结果的相关系数为 0.873, 标准差为 0.49 m。Hao 等(2020)的风浪模型计算的结果与本文的模型趋势十分接近, 标准差为 0.5 m, 不过其平均误差为 -0.52 m, 低估了非台风期间的有效波高。

其中, gH_s/U_{10}^2 为无因次波高, gT_s/U_{10} 为无因次周期, a 和 b 分别为待拟合的参数。Toba(1972)基于实验室观测结果提出无因次波高和周期满足 3/2 指数律,

其无因次波高和周期是基于海面风场的摩擦速度, 管长龙等(2004)进一步将海面风场的摩擦速度转换为海面 10 m 风速, 提出了如下 2 个无因次波高和周期的幂指数关系:

$$\frac{gH_s}{U_{10}^2} = 0.0135 \left(\frac{gT_s}{U_{10}} \right)^{1.5}, \quad (10)$$

$$\frac{gH_s}{U_{10}^2} = 0.01244 \left(\frac{gT_s}{U_{10}} \right)^{1.5}. \quad (11)$$

Hsu 等(2017)和 Niu 等(2021)分别基于台风期间的风浪数据, 建立了无因次波高和周期关系模型, 二者满足线性关系:

$$\frac{gH_s}{U_{10}^2} = \frac{1}{35} \frac{gT_s}{U_{10}}. \quad (12)$$

参照 Hsu 等(2017)的方法, 本文选择风速大于 9 m/s, 波陡 $\delta \geq 0.025$ 的风浪数据分析无因次波高和周期的关系。台风“卡努”期间二者关系为

$$\frac{gH_s}{U_{10}^2} = 0.01757 \left(\frac{gT_s}{U_{10}} \right)^{1.364}. \quad (13)$$

从图 5a 可以看出, 式(13)的拟合效果很好, 相关系数达 0.957, 标准差为 0.011 8。与 Hsu 等(2017)和 Niu 等(2021)的模型存在显著的差距。虽然 Niu 等(2021)的模型也是基于南海北部的浮标资料, 不过其位于近岸浅水区域, 而本文的浮标则位于陆坡深水区域, 可能水深的不同是导致差异的原因。管长龙等(2004)提出的模型则与本文的模型十分接近, 特别是式(10)的模型, 标准差仅 0.0121; 式(11)的模型与观测结果差异相对较大。这说明台风期间的无因次波高和周期满足 3/2 指数律。

本文进一步分析了台风前 13 d 的无因次波高周期关系(图 5b), 其结果如下:

$$\frac{gH_s}{U_{10}^2} = 0.01269 \left(\frac{gT_s}{U_{10}} \right)^{1.531}. \quad (14)$$

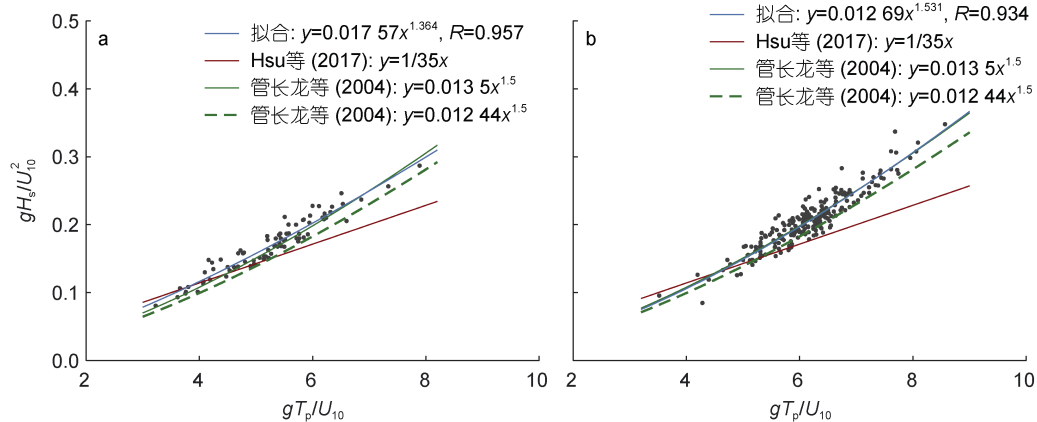


图 5 台风“卡努”期间(a)和台风前 13 d (b)无因次波高、周期散点图和拟合曲线

Fig.5 Relationship between dimensionless wave height and dimensionless wave period during the period of typhoon (a) and 13 days before typhoon arrival (b)

注: g 表示重力加速度, T_p 为谱峰周期

其拟合的相关系数为 0.934, 标准差为 0.014 4, 幂函数的指数接近 3/2。从图 5b 可以看出 Hsu 等(2017)和 Niu 等(2021)的模型与观测结果差异显著, 而管长龙等(2004)等提出的式(10)模型与观测结果也十分一致, 与本文拟合的模型曲线几乎重合, 说明在非台风期间风浪的无因次波高和无因次周期也满足 3/2 指数律。

4 结论

由于台风路径的不确定性, 导致其中心附近区域的风浪观测资料十分稀少, CMA 热带气旋最佳路径数据显示 2017 年的强台风“卡努”恰好经过南海北部陆坡的 SF301 浮标, 该浮标获取了台风前后海面水

文气象数据。本文基于浮标观测资料, 分析了“卡努”影响期间的风和海浪特征, 以及风和海浪之间的关系, 得出以下结论:

(1) “卡努”经过浮标时估算最大风速半径约为 29 km, 中心气压为 959.9 hPa。台风期间, 风速随时间呈“M”型双峰分布, 且第二个峰值小于第一个, 前、后眼壁区的 10 min 平均风速分别为 30.2 m/s 和 24.9 m/s, 1s 极大风速分别为 44.2 m/s 和 38.6 m/s。海表温度一直高于海面气温, 仅台风中心时刻二者相等, 这意味着“卡努”一直从海洋吸收热量, 这是“卡努”的强度在南海迅速加强的主要原因。

(2) 浮标观测的有效波高和最大波高最大值分

别为 10.8 m 和 14.3 m, 滞后最大风速 30 min, 波周期随着波高增大而增加, 有效波周期最长为 11.2 s; 波向和风向变化趋势一致, 二者相差 $30^{\circ} \pm 23^{\circ}$, 表明波浪主要是由局地风产生的, 波陡均大于 0.025, 波浪以风浪为主。

(3) 台风期间有效波高和海面风速接近线性关系, 非台风期间二者呈二次多项式关系; 台风期间和非台风期间无因次波高和周期满足幂指数关系, 无论是“卡努”台风期间还是非台风期间, 观测海域的无因次波高和周期均十分接近 $3/2$ 指数律, 不过由于本文采用的样本有限, 台风等极端天气下的风浪关系还需进一步研究。

参 考 文 献

- 王小丹, 赵文静, 2019. 基于 ERA-Interim 再分析资料的南沙海域风、浪场特征分析[J]. 海洋预报, 36(2): 30-37.
- 王蓉, 姚小娟, 肖瑜璋, 等, 2013. 1208 号台风“韦森特”特征分析[J]. 海洋预报, 30(6): 13-20.
- 王毅, 涂小萍, 蒋璐璐, 等, 2020. 台风“利奇马”影响期间浙江沿海海浪特征分析[J]. 气象科学, 40(1): 97-105.
- 文圣常, 余宙文, 1984. 波浪理论与计算原理[M]. 北京: 科学出版社: 200.
- 卢莹, 赵海坤, 赵丹, 等, 2021. 1984-2017 年影响中国热带气旋灾害的时空特征分析[J]. 海洋学报, 43(6): 45-61.
- 庄红波, 高瑞泉, 范文龙, 2013. 台风影响下海浪的特征分析[J]. 气象水文海洋仪器, 30(2): 30-34, 40.
- 孙璐, 黄楚光, 蔡伟叙, 等, 2014. 广海湾海浪要素的基本特征及典型台风过程的波浪分析[J]. 热带海洋学报, 33(3): 17-23.
- 苏志, 何如, 陶伟, 等, 2020. 利用浮标站观测资料分析台风“贝碧嘉”过境时风浪变化特征[J]. 气象科技, 48(3): 415-420.
- 李朝, 侯一筠, 李水清, 等, 2021. 两类典型台风路径影响下的黄、渤海海浪场特征研究[J]. 海洋与湖沼, 52(1): 51-65.
- 陈大可, 雷小途, 王伟, 等, 2013. 上层海洋对台风的响应和调制机理[J]. 地球科学进展, 28(10): 1077-1086.
- 郎喜白, 2011. 201003 号台风“灿都”分析[J]. 海洋预报, 28(3): 26-31.
- 赵凯, 栾曙光, 张瑞瑾, 2011. 强台风“珍珠”引起的近岸波浪场数值分析[J]. 海洋预报, 28(4): 35-42.
- 姚圣康, 2006. 0509“麦莎”台风浪特征分析[J]. 海洋预报, 23(S1): 73-78.
- 夏璐一, 栾曙光, 张超, 2014. 西北行路径台风浪的特征分析[J]. 大连海洋大学学报, 29(6): 654-658.
- 黄浩辉, 陈雯超, 植石群, 等, 2021. 基于测风塔实测台风威廉逊登陆过程的强风特性分析[J]. 气象, 47(2): 143-156.
- 韩晓伟, 周林, 游大鸣, 等, 2011. 0801 号台风风浪场和涌浪场的数值模拟[J]. 大气科学学报, 34(5): 597-605.
- 雷小途, 陈佩燕, 杨玉华, 等, 2009. 中国台风灾情特征及其灾害客观评估方法[J]. 气象学报, 67(5): 875-883.
- 管长龙, 孙群, 2001. 风浪成长关系的分析及其对 $3/2$ 指数律的支持[J]. 青岛海洋大学学报, 31(5): 633-639.
- 管长龙, 张淑芳, 孙建, 等, 2004. 深水风浪的风区指数律[J]. 中国海洋大学学报, 34(5): 704-712.
- HAO Z Z, TU Q G, ZHANG S Q, *et al*, 2020. Wind-wave relationship model and analysis of typhoon wave fields in the South China Sea from HY-2A satellite observations [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 13: 4008-4015.
- HSU S A, HE, Y J, SHEN H, 2017. Buoy measurements of wind-wave relations during hurricane Matthew in 2016 [J]. Journal of Physical Oceanography, 47(10): 2603-2609.
- LU X Q, YU H, YING M, *et al*, 2021. Western North Pacific tropical cyclone database created by the China Meteorological Administration [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 38(4): 690-699.
- NIU Q R, FENG Y Q, 2021. Relationships between the typhoon-induced wind and waves in the northern South China Sea [J]. Geophysical Research Letters, 48(8): e2020GL091665.
- PRICE J F, 1981. Upper ocean response to a hurricane [J]. Journal of Physical Oceanography, 11(2): 153-175.
- TOBA Y, 1972. Local balance in the air-sea boundary processes. I. On the growth process of wind waves [J]. Journal of the Oceanographical Society of Japan, 28(3): 109-120.
- THOMPSON W C, NELSON A R, SEDIVY D G, 1984. Wave group anatomy of ocean wave spectra [J]. Coastal Engineering, 1(19): 661-677.
- XU Y, HE H L, SONG J B, *et al*, 2017. Observations and modeling of typhoon waves in the South China Sea [J]. Journal of Physical Oceanography, 47(6): 1307-1324.
- YING M, ZHANG W, YU H, *et al*, 2014. An overview of the China Meteorological Administration tropical cyclone database [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 31(2): 287-301.
- ZHANG Q, WU L G, LIU Q F, 2009. Tropical cyclone damages in China 1983-2006 [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 90(4): 489-495.

THE WIND AND WAVE CHARACTERISTICS DURING SEVERE TYPHOON KHANUN

DENG Dan^{1,2}, ZHOU Quan³, MA Lei^{1,2}, LI Rui-Xiang^{1,2}

(1. South China Sea Marine Survey Center, Ministry of Natural Resources, Guangzhou 510300, China; 2. Key Laboratory of Marine Environmental Survey Technology and Application, Ministry of Natural Resources, Guangzhou 510300, China, 3. South China Institute of Environmental Sciences, Ministry of Ecology and Environment, Guangzhou 510530, China)

Abstract Frequent typhoons in summer in the northern South China Sea pose a great threat to production activities at sea and lives and properties. Due to the uncertainty of the typhoon's track, wind, and wave observation data in the vicinity of typhoon center are very scarce. The best track data of typhoon from CMA showed that the severe typhoon Khanun passed over the SF301 buoy in the northern South China Sea in October 10. Based on the buoy data, the characteristics of wind and waves during the typhoon were analyzed. The observed results showed that the central pressure was 959.9 hPa when typhoon passing over the buoy. The time series of wind speed exhibited a bimodal distribution. The 10-min mean wind speed in the front and rear eye-wall were 30.2 and 24.9 m/s, respectively, and the one-second extreme wind speed were 44.2 and 38.6 m/s, respectively. The waves during Khanun were dominated by wind seas, which were mainly generated by local wind. The observed maximum value of significant wave height and maximum wave height was 10.8 and 14.3 m, respectively, which lagged the maximum wind speed for 30 min. The significant wave height had a nearly linear relationship with the sea surface wind speed during typhoon Khanun passage, but a quadratic polynomial relationship during non-typhoon period. The dimensionless wave height and period were related according to the power-law function, which follows the 3/2 power law proposed by Toba for both typhoon and non-typhoon period.

Key words the South China Sea; buoy; typhoon; Khanun; wind; wave