

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2026.04.001

南海西北部台风过程风、浪统计特征研究

张琪¹, 李佳谦², 谢波涛¹, 梁丙臣^{2,3}, 邵珠晓²

(1. 中海油研究总院有限责任公司; 2. 中国海洋大学工程学院; 3. 中国海洋大学海岸与海洋工程全国重点实验室)

摘要: 为探究台风过程中风、浪统计特征, 基于 40 年(1979—2018 年)波浪后报数据和再分析风速数据, 采用轨迹追踪和时间匹配方法提取了南海西北部海域 3 个研究点台风显著影响期间风速和有效波高数据, 分析了风速风向与有效波高波向的联合分布特征以及台风过程中风浪延迟特征, 并基于极值理论, 提取了每场台风过境期间的最大有效波高和最大风速样本, 基于三参数威布尔分布模型和 Copula 模型计算了 50、100、150、200 a 单变量重现期和联合重现期下的外推值。结果表明: 在研究区域北部台风驱动的超过 6.0 m 强浪均主要分布在 33.75°~123.75°扇区, 且研究区域风速和有效波高达到峰值的时间差主要集中在 0~20 h; 由于考虑了更广泛的风险范围, 联合重现期的外推值大于单变量重现期的外推值。

关键词: 南海西北部; 台风过程; 统计特征; 联合分布; 三参数威布尔分布; Copula 模型

Study on statistical characteristics of wind and waves during typhoon processes in the northwestern South China Sea

Zhang Qi¹, Li Jiaqian², Xie Botao¹, Liang Bingchen^{2,3}, Shao Zhuxiao²

(1. CNOOC Research Institute Co., Ltd.; 2. College of Engineering, Ocean University of China;
3. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Ocean University of China)

Abstract: To investigate the statistical characteristics of wind and waves during typhoon processes, based on 40-year (1979-2018) hindcast wave data and reanalysis wind speed data, the wind speed and significant wave height data during periods of significant typhoon influence at three study sites in the northwestern South China Sea were extracted using trajectory tracking and time matching methods. The joint distribution characteristics of wind speed and wind direction, as well as significant wave height and wave direction, were analyzed, and the delay characteristics of wind and waves during typhoon processes were examined. Furthermore, based on the extreme value theory, the maximum significant wave height and maximum wind speed samples during each typhoon process were extracted. Based on the three-parameter Weibull distribution model and Copula model, the extrapolated values for 50-year, 100-year, 150-year, and 200-year return periods under univariate and joint return periods were calculated. The results indicate that in the northern part of the study area, strong waves exceeding 6.0 m driven by typhoons are mainly distributed in the 33.75°-123.75° sector, and the time difference between the peak wind speed and peak significant wave height in the study area is mainly concentrated in 0-20 h. Because a broader risk range is considered, the extrapolated values of the joint return periods are greater than those of the univariate return periods.

Key words: the northwestern South China Sea; typhoon process; statistical characteristic; joint distribution; three-parameter Weibull distribution; Copula model

台风作为一种破坏力极强的气旋系统,其驱动的巨浪对海上航运、海上油气开发、渔业生产及近岸港口、防波堤等基础设施构成严重威胁^[1-2]。南海作为西北太平洋最大的边缘海之一,地处热带气旋活跃区,是太平洋台风向我国华南沿海及东南亚地区移动的主要通道和影响区域,台风活动异常频繁^[3-4]。根据中国海洋灾害公报统计数据,2018—2023 年平均每年有 3 个台风进入南海或对南海海域造成显著影响,年均造成的直接经济损失超过 6.76 亿元。频发的台风灾害不仅严重威胁南海沿岸人民的生命财产安全,也对区域海洋经济发展造成巨大冲击。因此,探究台风影响下南海海域的波浪特征对于海洋工程实践是至关重要的。

鉴于台风期间波浪观测数据稀缺,目前国内外学者广泛利用后报数据研究南海海域台风驱动的波浪特

基金项目: 国家自然科学基金项目(52301344,42406249);海岸与海洋工程全国重点实验室开放基金项目(SL2507)

作者简介: 张琪(1995—),女,工程师,硕士,主要从事油气平台环境条件参数研究。E-mail:zhangqi52@cnooc.com.cn

通信作者: 李佳谦(1997—),男,博士研究生,主要从事海岸防灾减灾研究。E-mail:jiaqianli1727@163.com

征。石洪源等^[5]基于嵌套气压场与 Veno Takeo-ECMWF 合成风场驱动 SWAN 模型,探究了台风“山神”期间南海西北部台风浪的空间分布特征。沈旭伟等^[6]采用 WW3 模型揭示了在台风“鲇鱼”期间,北部湾以风浪为主,而南海开阔海域涌浪占优,且涌浪方向随台风路径北移由东向转为东北向。林金波等^[7]采用 SWAN 波浪模型对台风“天鸽”和“山竹”进行了模拟,研究结果表明台风路径右前侧波高显著增大。陈彤彤等^[8]利用 SWAN 波浪模型揭示了 2014 年台风“海鸥”期间南海北部海域波浪的时空变化特征。杨志衡等^[9]利用 SWAN 波浪模型模拟了 1959—2021 年显著影响海南岛周边的台风过程,揭示了波高和波向的联合分布特征。李军政等^[10]利用 WW3 模式模拟了台风“纳沙”期间南海北部海域的波浪特征,结果揭示该海域波浪在台风影响下以混合浪为主。Shao 等^[11]利用 SWAN 波浪模型模拟了南海 40 年(1975—2014 年)台风过程,并进一步探究了南海不同重现期波高的空间分布特征。

尽管台风引发的强浪已得到广泛研究,但对其伴随的对海洋工程构成巨大威胁的强风研究仍较少。此外,台风过程中风、浪要素的相对关系尚未完全明晰,这可能导致海洋工程从业人员难以预判台风过程中的风浪演变规律,无法科学规划施工窗口期和制定作业安全预案,导致极端海况下工程作业的安全风险显著增大。近年来,我国深水油气开发也逐步走向远海,相关工程建设与运营安全面临越来越多的挑战。由于南海多数深水开发区域处于台风频发区,台风驱动的极端海洋环境要素(强风、巨浪)对油田的安全生产构成严峻挑战。因此,亟须深入分析历史真实台风过程中的风、浪统计特征,为海洋工程实践、运营提供有力支撑。

本文基于 40 年(1979—2018 年)波浪后报数据和再分析风速数据,系统分析了南海西北部海域台风显著影响期间风、浪的统计特征,提取了 40 年每场台风过境期间的最大有效波高和风速样本,并基于三参数威布尔分布模型和 Copula 模型计算了单变量重现期和联合重现期下有效波高和风速的外推值,研究结果可为南海西北部海域海岸及近海工程的结构设计、风险分析提供数据支撑。

1 研究方法

1.1 研究区域与数据来源

本文聚焦于南海西北部海域(17°N~22°N, 110°E~118°E),深入探究 1979—2018 年台风过程中风、浪参数的统计特征。选取 3 个研究点(A1、A2 和 A3)进行详细分析,研究区域和研究点位置如图 1 所示。



图 1 研究区域及 3 个研究点位置

Fig. 1 Study region and locations of three study sites

波浪数据(有效波高和平均波向)采用 Shao 等^[12]基于 SWAN 模型模拟的 40 年(1979—2018 年)波浪后报数据。相比于实测数据,后报数据能够提供更高时空分辨率的波浪信息,弥补观测数据在空间覆盖和时间连续性上的不足。SWAN 模型基于球坐标系,计算域范围为 3.5°S~50°N, 99°E~150°E,经纬度空间分辨率为 0.1°,计算时间步长为 30 min,输出时间步长为 1 h。Shao 等^[12]将模拟的波浪数据与浮标实测波浪数据进行了详细的对比,结果显示与实测数据吻合较好。风速数据来自欧洲中期天气预报中心(ECMWF)的 ERA5 数据集,时间跨度为 1979—2018 年,时间分辨率为 1 h,经纬度空间分辨率均为 0.25°。研究期间台风轨迹信息,如时间、纬度、经度和中心最大风速,均来自中国气象局上海台风研究所,该研究所提供了西北太平洋地区最佳热带气旋轨迹数据,时间间隔为 6 h。

1.2 台风过程中风、浪数据提取

以研究区域的 3 个研究点为中心,300 km(台风显著影响范围)^[11]为半径划定 3 个台风检索范围。基于该检索范围与 40 年台风路径信息,分别检索 1979—2018 年进入 3 个台风检索范围的台风事件。根据 40 年的波浪和风速数据集,记录每场台风从进入到离开检索范围期间研究点位置的逐时波浪数据和风速数据,这些数据作为每个研究点台风过程的待分析数据用于探究台风期间风、浪统计特征。图 2 为研究点位置台风过程风、浪数据提取的示意图。

1.3 分布模型

1.3.1 边缘分布模型

三参数威布尔分布具有较强的灵活性,其通过形状参数、尺度参数和位置参数的协同作用,能够灵活调

控概率分布的基本形态、离散程度和位置偏移,从而实现对不同偏度和峰度特征数据的拟合。这一特性使其在海洋工程和气象学等领域得到广泛应用^[13-14],尤其适用于描述波高、风速等具有明显非对称分布特征的海环境参数的概率分布特性^[15-16]。因此,本文采用三参数威布尔模型构建有效波高和风速样本的边缘分布,其累积分布函数表达式为:

$$F(x) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{x - \gamma}{\eta}\right)^\beta\right] \quad (x \geq \gamma) \tag{1}$$

式中: x 为随机变量的取值; β 为形状参数; η 为尺度参数; γ 为位置参数。本文采用极大似然法估计三参数威布尔分布的参数,并采用 Kolmogorov-Smirnov (K-S) 检验和均方根误差 (RMSE) 统计量定量评估拟合效果。

1.3.2 联合分布模型

Copula 模型被广泛用于描述海洋环境参数的联合分布^[17],其主要优势在于,每个海洋变量的分布模型选择具有灵活性^[18-19]。根据 Sklar 定理,存在一个 Copula 模型函数 $C(\cdot, \cdot)$,可以连接随机变量 X 和 Y 的边缘分布,其二元分布形式表示为:

$$F_{XY}(x, y) = C(F_X(x), F_Y(y)) \tag{2}$$

式中: $F_{XY}(x, y)$ 为联合累积分布函数; $F_X(x)$ 、 $F_Y(y)$ 为随机变量的边缘累积分布函数; x, y 分别为随机变量 X, Y 的取值。

本文选择常用的 Gaussian-Copula、 t -Copula、Clayton Copula、Frank Copula 和 Gumbel Copula 5 种二元 Copula 模型作为风速和有效波高联合分布的候选模型,采用极大似然法来估计这些 Copula 模型的参数、采用 Cramér-von Mises 统计量 (S_n)^[20] 来评估模型的拟合性能并确定最优的 Copula 模型。统计量 S_n 可以衡量二元经验 Copula 模型与理论 Copula 模型之间的偏差,其定义如下:

$$S_n = \sum_{i=1}^n |\hat{C}_E[(u_1)_i, (u_2)_i] - C[(u_1)_i, (u_2)_i]|^2 \tag{3}$$

其中 $(u_1)_i = F_X(x_i)$ $(u_2)_i = F_Y(y_i)$

式中: n 为样本数量; $C(\cdot, \cdot)$ 为所选择的 Copula 模型函数; $\hat{C}_E(\cdot, \cdot)$ 为经验 Copula 模型函数,其表达式如下:

$$\hat{C}_E(u_1, u_2) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n I((u_1)_i \leq u_1, (u_2)_i \leq u_2) \tag{4}$$

式中: I 为指示函数。若 $(u_1)_i \leq u_1$ 且 $(u_2)_i \leq u_2$, 则 $I((u_1)_i \leq u_1, (u_2)_i \leq u_2) = 1$ 。

1.4 重现期和外推值

对于单变量分析,当给定重现期 T 时,海洋变量 X 的外推值 R_T 可通过下式求得^[21]:

$$R_T = F_X^{-1}\left(1 - \frac{N}{T}\right) \tag{5}$$

式中: N 为两次连续极端事件之间的平均间隔; $F_X^{-1}(\cdot)$ 为海洋变量 X 的边缘累积分布函数的逆函数。

对于双变量分析,联合重现期 (T_{or}) 通常被用作海洋工程设计的标准^[22]。设 X 和 Y 分别表示台风过境期间最大有效波高和最大风速, x 和 y 分别表示二者的给定阈值,当 $X \geq x$ 或 $Y \geq y$ 中至少有一个条件成立时,即认为发生联合超越事件。基于 OR 联合超越准则,联合重现期可定义为:

$$T_{or} = \frac{N}{P(X \geq x \cup Y \geq y)} = \frac{N}{1 - F_{XY}(x, y)} \tag{6}$$

式中: $P(X \geq x \cup Y \geq y)$ 为联合超越概率。值得注意的是,所有具有相同联合超越概率水平的海洋变量组合将具有相同的联合重现期。因此对于给定重现期 T_0 ,海洋变量组合 (X_i, Y_i) 将是无穷无尽的。Li 等^[23] 建议将上述组合中联合概率密度最高的事件 (X_0, Y_0) 作为该给定重现期的联合外推值:

$$(X_0, Y_0) = \operatorname{argmax}_{f_{xy}}(X_i, Y_i) \quad ((X_i, Y_i) \in D) \tag{7}$$

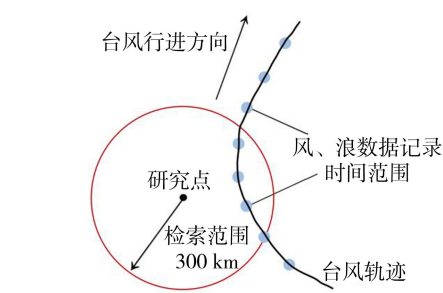


图 2 台风过程风、浪数据提取示意图
Fig. 2 Schematic diagram of wind and wave data extraction during typhoon process

式中; f_{xy} 为海洋变量的联合概率密度函数; D 为满足联合重现期 T_0 条件的所有海洋变量组合。

2 台风过程风、浪分布特征分析

探究台风过程中风、浪统计特征对于提升海洋工程的抗灾韧性、保障海上设施的安全运行以及优化海洋资源开发具有重要的指导意义。基于 40 年数据,通过轨迹追踪和时间匹配方法,在研究点 A1、A2、A3 分别记录到 188 次、173 次和 215 次台风事件。基于这些台风事件,本文分析了台风过境期间风速风向与有效波高波向的联合分布特征,研究结果可为海洋工程设计提供精准的环境载荷参数,优化工程结构的抗风浪能力。进一步,分析了台风过程中风浪延迟特征,可帮助海洋工程从业者准确预测风浪变化,合理安排施工和作业时间,降低极端海况下的安全风险。

2.1 风速风向联合分布特征

基于提取的 40 年台风过程的风速数据,以 4 m/s 为风速分级标准、22.5°为风向分级标准绘制了 3 个研究点的风速玫瑰图(图 3)。鉴于台风本身是一种气旋结构,其驱动的风向在其影响区域内呈现出全方向性分布特征:①研究点 A1,8~16 m/s 的风速在 191.25°~281.25°扇区的频率显著高于其他扇区,而 16~20 m/s 的风速在 123.75°~236.25°扇区的频率相对偏低。值得注意的是,超过 20 m/s 的强风表现出显著的方向性特征,主要分布在 258.75°~101.25°扇区。②研究点 A2,8~16 m/s 的风速在 326.25°~56.25°扇区的频率显著高于其他扇区。与研究点 A1 类似,16~20 m/s 的风速在 123.75°~236.25°扇区的频率相对较低。然而,与研究点 A1 不同的是,研究点 A2 的较强风速(超过 20 m/s)分布范围相对较广,为 213.75°~101.25°扇区。③研究点 A3,8~16 m/s 风速的分布特征与研究点 A1 相似,在 191.25°~258.75°扇区的频率相对较高。与研究点 A1 和 A2 不同的是,超过 20 m/s 的强风频率显著偏低。

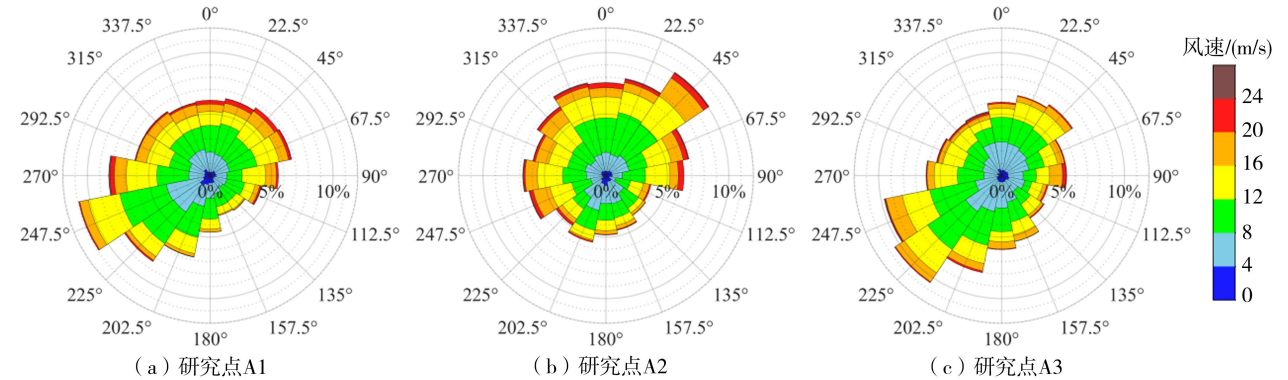


图 3 台风过程中风速风向联合分布玫瑰图

Fig. 3 Rose diagrams of joint distribution of wind speed and wind direction during typhoon processes

2.2 有效波高波向联合分布特征

图 4 为 3 个研究点的有效波高玫瑰图,其绘制依据为 1.5 m 的有效波高分级标准以及 22.5°的波向分级标准。结果显示,研究点 A1 和 A2 有效波高的方向分布特征显著相似,主要分布在 33.75°~213.75°方向扇

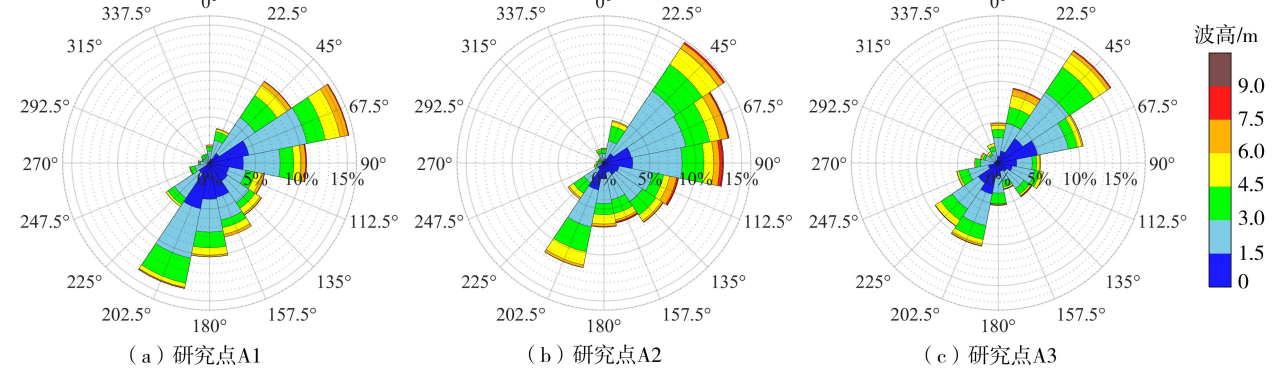


图 4 台风过程中有效波高波向联合分布玫瑰图

Fig. 4 Rose diagrams of joint distribution of significant wave height and wave direction during typhoon processes

区(占比约为 90%)。此外,在这两个研究点超过 6.0 m 的强浪均主要分布在 33.75°~123.75°扇区。值得注意的是,研究点 A2 超过 7.5 m 的强浪在正东方向扇区的频率显著大于其他扇区。与研究点 A1 和 A2 不同,研究点 A3 的有效波高主要分布在两个方向扇区内,即 11.25°~78.75°和 191.25°~236.25°扇区,且在 11.25°~78.75°扇区发生超过 6.0 m 强浪的频率显著大于 191.25°~236.25°扇区。除此之外,可以发现,研究点 A3 超过 6.0 m 的强浪频率显著低于研究点 A1 和 A2。

2.3 风、浪延迟关系统计特征

风是波浪生成和发展的主要能量来源^[24]。鉴于风能向波浪能转化需要经历复杂的物理过程,包括风对水面的摩擦、能量传递以及波浪的成长等,因此波浪的生成和发展相对于风速变化存在时间延迟^[25]。表 1 为 3 个研究点台风过程中风速与有效波高达到峰值的时间差统计结果。可以发现在台风显著影响期间,风速与有效波高达到峰值的时间差主要集中在 0~20 h。

表 1 台风过程中风速与有效波高峰值时间差统计结果
Table 1 Statistical results of the time differences between peak wind speed and peak significant wave height during typhoon processes

研究点	不同时间差的频次		
	0~<10 h	10~<20 h	≥20 h
A1	168	12	8
A2	150	14	9
A3	181	20	14

3 有效波高与风速外推值分析

有效波高和风速是海岸与近海工程(包括港口、防波堤、海上平台等)设计、建设、安装及运营活动中最为关键的环境参数。为了确保工程结构在整个设计使用寿命期间能够抵御极端海洋环境条件的冲击,保障其安全性与稳定性,通常需要基于长期历史数据匹配合适的概率分布模型来计算较长重现期下(如 50 年一遇或 100 年一遇)有效波高和风速的外推值^[15,26]。这些值可作为确定工程设计标准和安全裕度的基础依据。为满足极值理论各扇区数据相互独立的假设^[27],本文从每场台风过程中提取最大有效波高和最大风速样本作为重现期极值推算的样本,即在研究点 A1、A2、A3 分别提取 188 个、173 个和 215 个有效波高和风速样本。

3.1 单变量分析

分析最大有效波高和最大风速样本的频率分布特征有助于更好地理解数据的统计特性,为选择合适的边缘分布模型提供依据,从而更准确地计算长期外推值。表 2 给出了 3 个研究点有效波高和风速样本的频率分布特征,可见研究点 A3 波浪和风速的整体强度小于研究点 A1 和 A2,研究点 A2 的离散程度大于研究点 A1 和 A3。在偏度特征方面,3 个研究点的有效波高和风速样本均表现出显著的非对称性分布特征,具体表现为明显的右偏态分布。这种分布特征表明,与标准正态分布相比,样本分布右侧具有更长的拖尾现象。进一步分析峰度特征发现,研究点 A2 和 A3 的有效波高样本峰度值大于 3,这一统计特征揭示了有效波高样本的厚尾分布特性,表明极端波高事件发生的概率相对较高。

表 2 有效波高和风速样本的频率分布特征

Table 2 Frequency distribution characteristics of significant wave height and wind speed samples

研究点	有效波高				风速			
	平均值/m	标准差/m	偏度	峰度	平均值/(m/s)	标准差/(m/s)	偏度	峰度
A1	3.5953	1.8176	0.6928	2.7668	15.0709	4.9334	0.3630	2.7941
A2	3.8934	2.0227	0.8015	3.3884	15.2121	5.1939	0.3350	2.8716
A3	3.3074	1.7832	0.8913	3.5868	13.7664	4.6107	0.2644	2.8738

本文采用三参数威布尔分布模型对 3 个研究点从每场台风过程中提取的最大有效波高和最大风速样本进行拟合,并采用极大似然法得到该分布模型的参数,结果如表 3 所示。图 5 和图 6 对比了 3 个研究点有效波高和风速样本的经验概率分布和理论概率分布,结果显示整体差异较小,表明三参数威布尔分布能较好刻画有效波高和风速样本的概率分布特征。采用 K-S 检验和 RMSE 统计量定量评估拟合效果,结果见表 4,经验分布函数与理论分布函数之间的最大偏差 Δ 值和 RMSE 值均较小,进一步证明了三参数威布尔分布拟合的可靠性。基于构建的概率分布模型,计算了 50、100、150、200 a 重现期下的有效波高和风速外推值,结果如表 5 所示,可见研究点 A2 的有效波高外推值大于研究点 A1 和 A3,而研究点 A3 的风速外推值小于研究点 A1 和 A2。

表 3 有效波高和风速样本的参数估计结果

Table 3 Parameter estimation results of significant wave height and wind speed samples

研究点	有效波高			风速		
	位置参数/m	尺度参数/m	形状参数	位置参数/(m/s)	尺度参数/(m/s)	形状参数
A1	0.1960	1.9967	3.8510	3.5964	3.5964	3.5964
A2	0.2900	1.8858	4.0723	1.3531	1.3531	1.3531
A3	0.2690	1.8068	3.4313	2.4886	2.4886	2.4886

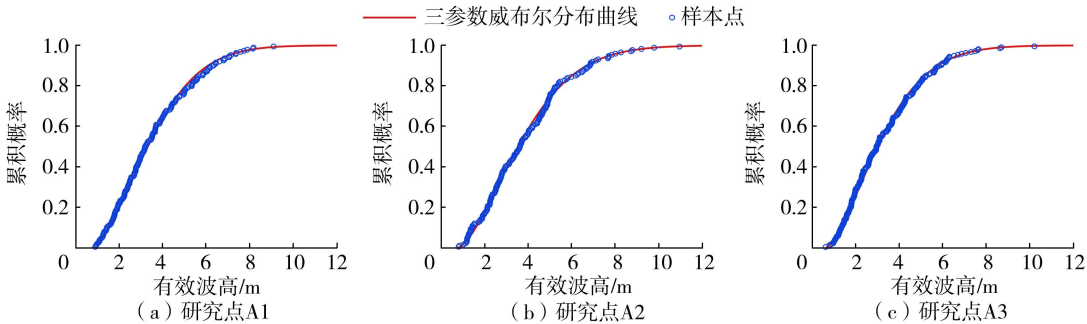


图 5 有效波高样本经验和理论累积概率分布

Fig.5 Empirical and theoretical cumulative probability distributions of significant wave height samples

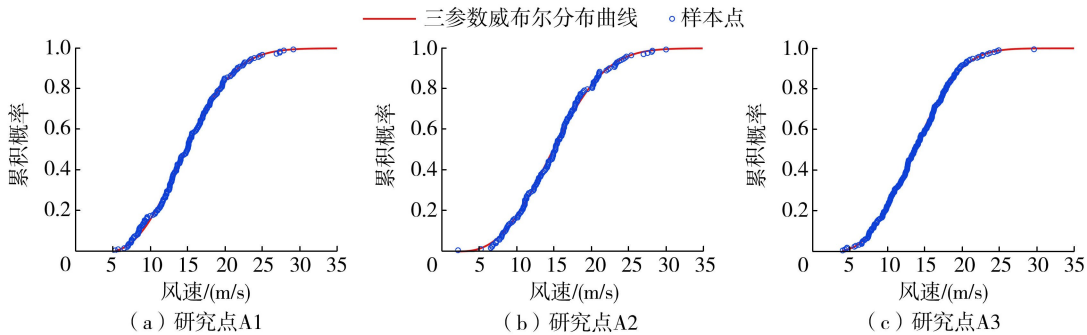


图 6 风速样本经验和理论累积概率分布

Fig.6 Empirical and theoretical cumulative probability distributions of wind speed samples

表 4 有效波高和风速样本的 K-S 检验和 RMSE 结果

Table 4 K-S test and RMSE results of significant wave height and wind speed samples

研究点	有效波高			风速		
	Δ 值	P 值	RMSE/m	Δ 值	P 值	RMSE/(m/s)
A1	0.0492	0.7334	0.0236	0.0368	0.9529	0.0121
A2	0.0436	0.8833	0.0171	0.0410	0.9217	0.0144
A3	0.0533	0.5085	0.0225	0.0305	0.9849	0.0120

表 5 不同重现期下有效波高和风速的外推值

Table 5 Extrapolated values of significant wave height and wind speed under different return periods

重现期/a	有效波高/m			风速/(m/s)		
	研究点 A1	研究点 A2	研究点 A3	研究点 A1	研究点 A2	研究点 A3
50	9.20	10.22	9.16	29.08	29.24	26.84
100	9.76	10.88	9.76	30.33	30.44	27.95
150	10.07	11.25	10.09	31.02	31.10	28.56
200	10.28	11.51	10.32	31.49	31.55	28.98

3.2 联合分布分析

基于三参数威布尔分布构建的概率分布模型,采用 Copula 模型进一步构建了有效波高和风速的联合分布。在 3 个研究点评估了 5 个候选 Copula 模型,使用 Cramér-von Mises 统计量(S_n)来计算拟合优度,结果如表 6 所示。表 6 结果表明, Frank-Copula 模型在 3 个研究点表现出最好的拟合性能, S_n 值均为最小。为了进一步验证建模的可靠性,将 Frank-Copula 模型得出的联合分布概率与这 3 个研究点的经验分布概率比较

(图 7),结果显示,经验和理论联合分布概率的整体差异较小,表明 Frank-Copula 模型可以较好地刻画有效波高和风速的联合分布特征。

表 6 联合分布的 Cramér-von Mises 统计量
Table 6 Cramér-von Mises statistics of joint distribution

研究点	S_n				
	Gaussian-Copula	t-Copula	Clayton-Copula	Frank-Copula	Gumbel-Copula
A1	0.025 9	0.025 5	0.037 4	0.020 3	0.029 9
A2	0.020 0	0.018 7	0.034 6	0.015 1	0.021 6
A3	0.024 0	0.023 1	0.040 1	0.019 9	0.024 2

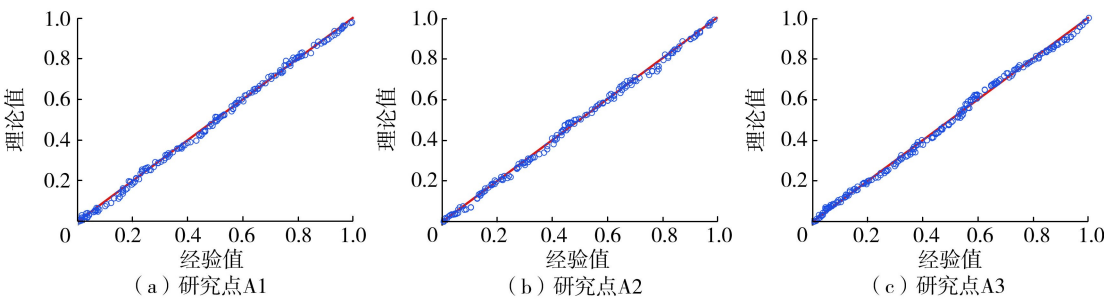


图 7 有效波高和风速样本的经验和理论联合分布概率

Fig. 7 Empirical and theoretical joint distribution probabilities of significant wave height and wind speed samples

基于构建的 Frank-Copula 模型,3 个研究点 50、100、150、200 a 联合重现期等值线如图 8 所示。进一步,基于式(7)计算得到 50、100、150、200 a 联合重现期下的有效波高和风速外推值,如表 7 所示。结果显示,在相同的重现水平下,联合重现期的外推值大于单变量重现期的外推值。这种现象与张琦等^[17]研究波高周期联合分布的结论一致,可以从超越概率的角度进行解释。例如,对于某一特定波高,单变量分析中的超越概率是指波高超过该特定波高的波浪事件的发生概率。然而,如式(6)所示,联合超越概率是指波高超过该特定波高或风速超过期望值的联合事件的发生概率,可以得出结论,对于某一特定波高,联合分布的风险域比单变量的风险域更宽(即联合超越概率通常大于单变量超越概率),从而导致联合分布的重现期缩短。因此,当联合重现期和单变量重现期相同时,联合重现期的外推值将大于单变量重现期的外推值,才能保证联合超越概率等于单变量超越概率。

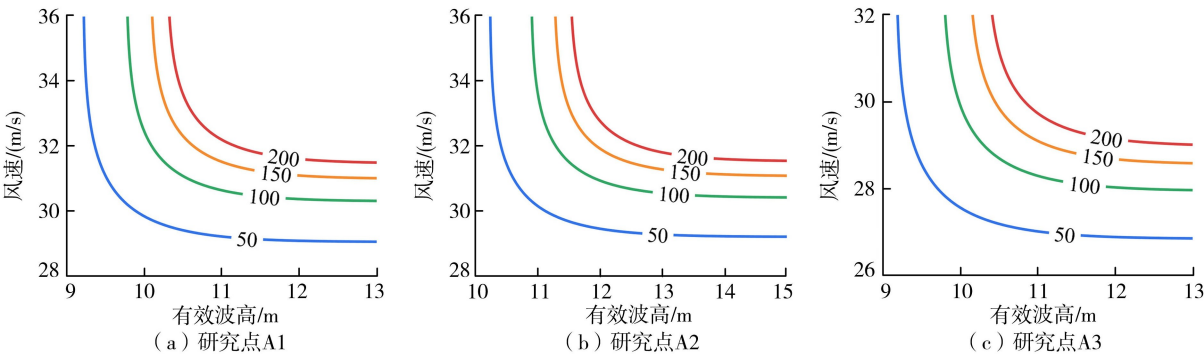


图 8 联合重现期等值线(单位:a)

Fig. 8 Contour lines of joint return period (unit: a)

表 7 不同联合重现期下有效波高和风速的外推值

Table 7 Extrapolated values of significant wave height and wind speed under different joint return periods

联合重现期/a	有效波高/m			风速/(m/s)		
	研究点 A1	研究点 A2	研究点 A3	研究点 A1	研究点 A2	研究点 A3
50	9.74	10.87	9.73	30.31	30.38	27.95
100	10.28	11.48	10.34	31.48	31.57	28.93
150	10.58	11.84	10.65	32.13	32.19	29.53
200	10.79	12.09	10.86	32.57	32.61	29.95

总的来说,这些外推结果可以为研究区域海岸和近海工程结构的设计提供重要支撑。例如,单变量重现期的外推值可以为只针对特定海洋变量敏感结构的设计提供参考,可以在保证结构安全的基础上有效降低工程成本。联合重现期的外推值考虑了更广泛的风险范围,能更真实反映台风过程中的多灾害耦合情景,可为复杂海洋工程结构的综合设计与风险评估提供更可靠的依据,从而提高工程的抗灾能力和适应性。

4 结 论

a. 台风影响下的风向呈现全方位分布,但不同风速等级表现出显著的空间差异性:①研究点 A1,8~16 m/s 风速主要分布在 191. 25°~281. 25°扇区内,强风(>20 m/s)表现出显著的方向性特征,主要分布在 258. 75°~101. 25°扇区内;②研究点 A2,8~16 m/s 风速主要分布在 326. 25°~56. 25°扇区内,强风分布范围更广,主要分布在 213. 75°~101. 25°扇区内;③研究点 A3,8~16 m/s 风速分布与研究点 A1 相似,主要分布在 191. 25°~258. 75°扇区内,但强风频率较低。

b. 3 个研究点的有效波高波向分布呈现显著空间差异。研究点 A1 和 A2 有效波高波向分布较为一致,主要集中于 33. 75°~213. 75°扇区内,且强浪(>6. 0 m)集中在 33. 75°~123. 75°扇区内;研究点 A2 超过 7. 5 m 的强浪在正东方向频率尤为突出。研究点 A3 有效波高呈双峰分布(即 11. 25°~78. 75°和 191. 25°~236. 25°扇区),强浪频率显著低于研究点 A1 和 A2,且集中于 11. 25°~78. 75°扇区内。此外,风浪延迟特征研究揭示了台风显著影响期间风速和有效波高达到峰值的时间差主要集中在 0~20 h。

c. 40 年每场台风过程中最大的有效波高和风速样本呈现明显的右偏分布特征;Frank-Copula 可以较好地刻画南海西北部海域台风过境期间最大有效波高和最大风速的联合分布特征;由于考虑了更广泛的风险范围,联合重现期的外推值大于单变量重现期的外推值。

参考文献:

[1] 胡正元,冯曦,冯卫兵,等. 基于盘古气象大模型的台风路径及台风浪波高预报研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2026,54(3):28-36. (Hu Zhengyuan,Feng Xi,Feng Weibing,et al. Research on prediction of typhoon tracks and typhoon wave heights based on Pangu-Weather[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2026,54(3):28-36. (in Chinese))

[2] 陈希,桂祁军,闵锦忠,等. 湛江港海域台风浪模拟研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2003,31(5):593-596. (Chen Xi,Gui Qijun,Min Jinzhong,et al. Simulation of typhoon waves in Zhanjiang Port sea area[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2003,31(5):593-596. (in Chinese))

[3] 王海平,向纯怡. 2024 年西北太平洋和南海台风活动概述[J]. 海洋气象学报,2025,45(3):137-150. (Wang Haiping,Xiang Chunyi. Overview of typhoon activities over western North Pacific and the South China Sea in 2024[J]. Journal of Marine Meteorology,2025,45(3):137-150. (in Chinese))

[4] 孙佳,左军成,黄琳,等. 东海沿岸台风及风暴潮灾害特征及成因[J]. 河海大学学报(自然科学版),2013,41(5):461-465. (Sun Jia,Zuo Juncheng,Huang Lin,et al. Characteristics and causes of typhoon and storm surge along coast of East China Sea [J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2013,41(5):461-465. (in Chinese))

[5] 石洪源,曹雪峰,文先华,等. 台风“山神”过境期间南海西北部海南岛附近海区台风浪空间特征数值模拟研究[J]. 海洋环境科学,2016,35(3):366-373. (Shi Hongyuan,Cao Xuefeng,Wen Xianhua,et al. Numerical model research of the spatial characteristics of typhoon waves in the northwestern of the South China Sea near Hainan Island during the transmit of typhoon “Son-Tink”[J]. Marine Environmental Science,2016,35(3):366-373. (in Chinese))

[6] 沈旭伟,范力阳,陈国平,等. 台风“鲇鱼”作用下南海波浪场的数值模拟研究[J]. 水道港口,2016,37(4):369-374. (Shen Xuwei,Fan Liyang,Chen Guoping,et al. Numerical simulation studies of influence on wave field in the South China Sea caused by typhoon Megi[J]. Journal of Waterway and Harbor,2016,37(4):369-374. (in Chinese))

[7] 林金波,毛鸿飞,吴光林,等. 基于混合风场的南海台风浪数值模拟[J]. 广东海洋大学学报,2021,41(6):44-52. (Lin Jinbo,Mao Hongfei,Wu Guanglin,et al. Numerical modeling of typhoon waves in South China Sea based on mixed wind field [J]. Journal of Guangdong Ocean University,2021,41(6):44-52. (in Chinese))

[8] 陈彤彤,周良明,王智峰,等. 台风“海鸥”期间南海北部波浪和 SST 变化特征分析[J]. 海洋湖沼通报,2017(4):1-11. (Chen Tongtong,Zhou Liangming,Wang Zhifeng,et al. Surface waves and SST analysis in the northern of South China Sea during Typhoon “Kalmaegi”[J]. Transactions of Oceanology and Limnology,2017(4):1-11. (in Chinese))

[9] 杨志衡,牛小静. 海南岛历史台风浪模拟和评估[J]. 海洋预报,2024,41(5):26-33. (Yang Zhiheng,Niu Xiaojing. Simulation

and assessment of historical storm waves around Hainan Island[J]. Marine Forecasts,2024,41(5):26-33. (in Chinese))

[10] 李军政,马玉祥,艾丛芳,等. 台风“纳沙”影响下中国南海北部波浪特征研究[C]//中国海洋学会海洋工程分会. 第二十一届中国海洋(岸)工程学术讨论会论文集(下). 青岛:中国海洋大学出版社,2024:125-129.

[11] Shao Zhuxiao,Liang Bingchen,Li Huajun,et al. Study of sampling methods for assessment of extreme significant wave heights in the South China Sea[J]. Ocean Engineering,2018,168:173-184.

[12] Shao Zhuxiao,Liang Bingchen,Gao Huijun. Extracting independent and identically distributed samples from time series significant wave heights in the Yellow Sea[J]. Coastal Engineering,2020,158:103693.

[13] Kong Lisha,Zhang Xiuzhi,Wu Huanping,et al. Estimation of extreme wind speeds with different return periods in the Northwest Pacific[J]. Meteorological Applications,2024,31(6):e70012.

[14] Albani A,Ghani S S A,Ibrahim M Z,et al. Three-parameter weibull for offshore wind speed distribution in malaysia[J]. Journal of Advanced Research in Applied Sciences and Engineering Technology,2024,39(1):149-158.

[15] Muraleedharan G,Lucas C,Martins D,et al. On the distribution of significant wave height and associated peak periods[J]. Coastal Engineering,2015,103:42-51.

[16] Katalinić M,Parunov J. Comprehensive wind and wave statistics and extreme values for design and analysis of marine structures in the Adriatic Sea[J]. Journal of Marine Science and Engineering,2021,9(5):522.

[17] 张琦,梁丙臣,邵珠晓. 基于 Copula 函数的黄海波高周期联合统计分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(4):108-114. (Zhang Qi,Liang Bingchen,Shao Zhuxiao. Joint statistical analysis of wave height and wave period of Yellow Sea based on Copula function[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2023,51(4):108-114. (in Chinese))

[18] 万永静,刁秀媚,刘俊,等. 基于 Copula 函数的暴雨潮位组合分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2017,45(3):211-217. (Wan Yongjing,Diao Xiumei,Liu Jun,et al. Combined analysis of rainstorm and tide level based on Copula function[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2017,45(3):211-217. (in Chinese))

[19] 赵玲玲,张鑫辉,刘昌明,等. 华南中小流域设计暴雨洪水同频率检验与重现水平推算[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(2):157-163. (Zhao Lingling,Zhang Xinhui,Liu Changming,et al. Same frequency test and recurrence level estimation of design storm flood in a small and medium-sized basin of South Cina[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2023,51(2):157-163. (in Chinese))

[20] Mazas F,Hamm L. An event-based approach for extreme joint probabilities of waves and sea levels[J]. Coastal Engineering,2017,122:44-59.

[21] 王亚欣,梁丙臣,邵珠晓. 黄海南部海域的极值波高推算[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(6):117-122. (Wang Yaxin,Liang Bingchen,Shao Zhuxiao. Calculation of extreme wave height in southern Yellow Sea[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2023,51(6):117-122. (in Chinese))

[22] Li Jiangxia,Pan Shunqi,Chen Yongping,et al. The performance of the copulas in estimating the joint probability of extreme waves and surges along east coasts of the mainland China[J]. Ocean Enginerring,2021,237:109581.

[23] Li Jiaqian,Liang Bingchen,Shao Zhuxiao,et al. Joint probability analysis of significant wave height and wind speed under extreme weather conditions[J]. Ocean Engineering,2025,334:121664.

[24] 周悦,董增川,徐伟,等. 基于 SWAN 模型的风生波河道防浪林消浪模拟[J]. 河海大学学报(自然科学版),2019,47(4):323-328. (Zhou Yue,Dong Zengchuan,Xu Wei,et al. Wave attenuation simulation of vegetation based on the SWAN model in rivers[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2019,47(4):323-328. (in Chinese))

[25] Valentina L,Felice A. On Correlation between Wind and Wave Storms[J]. Journal of Marine Science and Engineering,2021,9(12):1426.

[26] Liang Bingchen,Shao Zhuxiao,Li Huajun,et al. An automated threshold selection method based on the characteristic of extrapolated significant wave heights[J]. Coastal Engineering,2019,144:22-32.

[27] Li Jiaqian,Shao Zhuxiao,Liang Bingchen,et al. Regional assessment of extreme significant wave heights in the Bohai Sea and northern Yellow Sea[J]. Applied Ocean Research,2022,123:103182.

(收稿日期:2025-08-04 编辑:熊水斌)