

蒋承霖.应用泊松耿贝尔分布估算海上极端风速.气象科学,2023,43(6):847-852.

JIANG Chenglin.Estimation of extreme wind speed over the sea using Poisson-Gumbel distribution.Journal of the Meteorological Sciences, 2023,43(6):847-852.

应用泊松耿贝尔分布估算海上极端风速

蒋承霖

(广东省气候中心,广州 510080)

摘要 采用泊松耿贝尔分布,基于中国气象局发布的《CMA-STI 热带气旋最佳路径数据集》资料来估算海上极端风速,并以上川岛气象站多年实测资料通过概率评估来加以验证。结果表明,采用泊松耿贝尔分布可以得到较为保守的海上极值风速取值。对于海上的小面积区域的重现期风速估算,采用 50 km 半径区域进行评估,可以得到较为合理的估算结果,当评估区域较大时,则需考虑适当扩大评估半径。

关键词 热带气旋;泊松耿贝尔分布;海上极端风速

分类号: P412.16

doi:10.12306/2021jms.0065

文献标识码: A

Estimation of extreme wind speed over the sea using Poisson-Gumbel distribution

JIANG Chenglin

(Guangdong Climate Center, Guangzhou 510080, China)

Abstract Based on CMA-STI data set published by China Meteorological Administration, Poisson-Gumbel distribution was used to estimate the extreme wind speed at sea, and the data of shangchuandao meteorological station for more than 60 years were verified by probability evaluation. Results show that Poisson-Gumbel distribution can be used to obtain a more conservative value of extreme wind speed at sea. For the estimation of return period wind speed in a small area on the sea, a 50 km radius area can get a more reasonable estimation result. When the evaluation area is large, it is necessary to consider expanding the evaluation radius appropriately.

Key words tropical cyclone; Poisson-Gumbel distribution; extreme wind speed at sea

引言

广东沿海常年受到台风影响,每年 6—10 月是台风影响的主要时段,根据 1949—2018 年资料统计,平均每年有 5.2 个台风登陆广东,台风过境时往往会带来狂风骤雨,摧毁农作物和建筑,威胁人民生命和财产安全。2015 年台风“彩虹”影响期间,湛江市麻章区湖光镇实测录得最大 10 min 平均风速达 $48.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (15 级),实测录得 3 s 阵风达 $67.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (超过 17 级)。

台风作为主要的致灾因子,每年都给我带来严重的经济损失,政府部门开始探索巨灾保险制度^[1-2]来分散台风的风险。国内外学者也一直致力于沿海抗风方面的研究。宋丽莉等^[3]通过广东沿海近地层大风特性的研究,为热带气旋影响的沿海地区抗风参数取值提供了依据;MA, et al^[4]利用实测资料和台风模拟模型,对受台风影响的海上风电场进行极端风速预报;CHEN, et al^[5]对未来湄公河流域的热带气旋活动进行了模拟,结果显示热带气旋最大风速的重现期将显著缩短,热带气旋强度明

收稿日期(Received):2021-05-28;修改稿日期(Revised):2021-07-09

基金项目:广东省气象局科学技术研究资助项目(2016B26)

通信作者(Corresponding author):蒋承霖(JIANG Chenglin).47261975@qq.com

显增强,也预示着相关灾害的发生也会增加。Bhardwaj, et al^[6]采用极值理论对孟加拉湾热带气旋极端风速的进行了概率评估,表明从热带风暴强度到超强台风强度,累积超越概率逐渐减小,热带风暴发生的超越概率约为 99%,超强台风发生的超越概率约为 15%。乔光全等^[7]统计分析了南中国海及各区域热带气旋的年际变化、时空分布及强度特征。

我国现阶段的设计风速一般采用 50 a 一遇的最大 10 min 平均风速,如海上风电场的风机选型,跨海大桥的建设等都需要估算当地的设计风速,在沿海地区,大部分气象站都设置在陆地,海上观测资料较难获得,而再分析海面风场资料在大风速区间有明显的系统偏差^[8],在无海上测风塔观测的情况下,较难对近海区域的极端风速进行估算,本文基于中国气象局发布的《CMA-STI 热带气旋最佳路径数据集》资料,应用泊松耿贝尔分布估得到一种估算海上极端风速的方法,并以上川岛气象站多年实测资料通过概率计算来加以检验。

1 资料

热带气旋资料来自中国气象局编制的《CMA-STI 热带气旋最佳路径数据集》,研究时段为 1949—2020 年,采用上川岛气象站(21°44'N, 112°46'E)建站至 2020 年的历史最大风速序列对泊松耿贝尔分布计算结果进行校核。上川岛气象站只于 1969 年 7 月 1 日迁过一次站,该站为海岛站,观测环境较好,未受城市化影响,能较好反映广东沿海的气候特征。

2 Poisson-Gumbul 复合极值分布

当某个主要为台风影响的海区内无连续测风资料可供使用时,通常采用 Poisson-Gumbul 复合分布求取极值风速。

由于每年台风的强度、移动路径及发生次数是随机的,海域所受台风影响的次数也随机,从而构成某种离散型分布,而台风影响下的最大风速可构成某种连续型分布。

假定台风影响次数 n 服从 Poisson 分布,概率函数记为:

$$P_k = e^{-\lambda} \frac{\lambda^K}{K!}, \quad (1)$$

式中: λ 为热带气旋影响海区总次数/总年数; K 表示次数, $K=0,1,2,\dots,n$ 。

假设台风影响下的风速服从 Gumbel 分布,概率函数记为:

$$G(x) = -\exp\{-\exp[-\alpha(x-\delta)]\}, \quad (2)$$

根据复合极值理论,一个离散型分布和一个连续型分布可构成复合极值分布,即 Poisson-Gumbel 复合分布,概率函数记为:

$$F(x) = \sum_{k=0}^{\infty} P_k [G(x)]^k = e^{-\lambda[1-G(x)]} = P, \quad (3)$$

则:

$$G(x) = 1 + \frac{1}{\lambda} \ln P, \quad (4)$$

$$\exp\{-\exp[-\alpha(x-\delta)]\} = 1 + \frac{1}{\lambda} \ln P, \quad (5)$$

取两次对数,可得:

$$\alpha(x-\delta) = -\ln[-\ln(1 + \frac{1}{\lambda} \ln P)], \quad (6)$$

$$-\ln[-\ln(1 + \frac{1}{\lambda} \ln P)] = \Phi_P, \quad (7)$$

设计概率为 P 的极值 x_p 为:

$$x_p = \delta + \Phi_P / \alpha, \quad (8)$$

其中: $G(x)$ 为 Gumbel 分布概率函数; x 为变量; $F(x)$ 为 Poisson-Gumbel 复合分布概率函数; α 为风速序列概率分布的尺度参数; δ 为风速序列概率分布的位置参数,其估算方法为:

$$\alpha = S_y / S_x, \quad (9)$$

$$\delta = \bar{x} - \bar{y} / \alpha, \quad (10)$$

其中: $\bar{y}$ 和 S_y 只与有限样本数 N 有关,可查表求得^[9]; $\bar{x}$ 和 S_x 为有限样本的平均值和标准差; Φ_P 值则由设计概率 P 和序列 λ 值依式(7)计算得到。

3 台风影响频数分布拟合检验

上川岛气象站位于(21°44'N, 112°46'E),以上川岛气象站位置为中心,半径 100 km 的范围作为台风影响海域,所有中心路径经过影响海域的台风均选取区域内中心最大风速值(距海平面 10 m 高度)作为样本,组成样本序列,通过挑选,72 a 中共有 102 个热带气旋样本,逐年分布情况见图 1。其中达台风及以上等级的有 48 个,强度达到强热带风暴、热带风暴、热带低压等级的热带气旋分别为 27、12、15 个。

表 1 为影响海域的台风频数分布,检验热带气旋出现频次是否符合泊松分布,由下式得出:

$$\chi^2 = \sum_{i=0}^K \frac{(f_i - nP_i)^2}{nP_i} \quad i = 0, 1, \dots, 5, \quad (11)$$

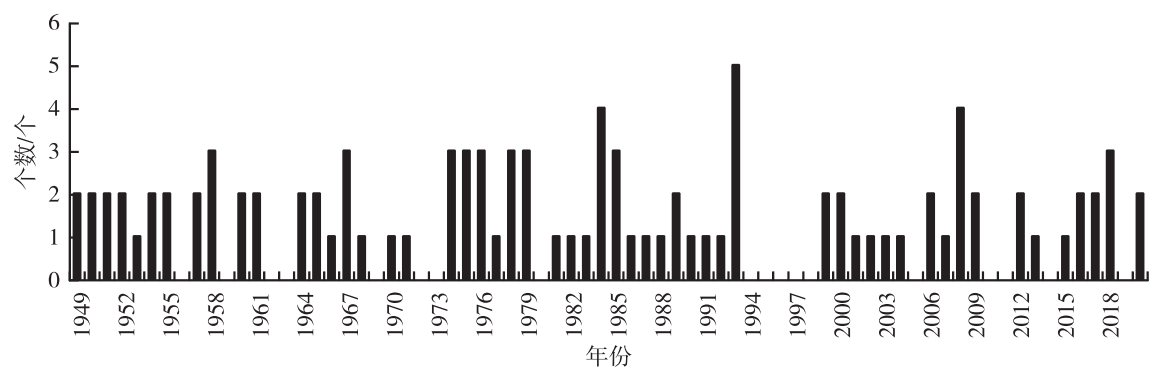


图1 上川岛气象站 100 km 半径范围逐年影响的热带气旋个数
Fig.1 The number of tropical cyclones in the 100 km radius of Shangchuan Island meteorological station

式中: f_i 为各组实际出现次数; n 为实际总年数; P_i 为各组理论分布频数,由式(11)求得 $\lambda = 102/72 = 1.4167$; $K=6$ 。取信度为 $t=0.05$; Poisson 分布的自由度为 $6-3=3$,查 χ^2 分布表, $\chi^2 = 7.815$,大于 $\chi'^2 = 1.0995$,表明该海域台风影响频数符合 Poisson 分布。

表1 台风频数拟合检验

Table 1 Fitting test of typhoon frequency

次数/次	f_i	P_i	$\frac{(f_i - nP_i)^2}{nP_i}$
0	18	0.242 5	0.035 4
1	22	0.343 6	0.234 9
2	20	0.243 4	0.428 6
3	9	0.114 9	0.086 6
4	2	0.040 7	0.274 0
5	1	0.011 5	0.040 1
$\sum n_i \cdot f_i = 120$			$\chi'^2 = 1.099 5$

$$\sum_{k=-\infty}^{\infty} (-1)^k e^{-2k^2\eta^2} \quad (13)$$

根据信度 t 找到满足 $P(\eta_t) = 1 - t$ 的临界值 η_t , 然后比较 η 与 η_t ,若 $\eta < \eta_t$,则接收原假设;若 $\eta \geq \eta_t$,则拒绝原假设。

表2为影响海域风速序列检验。 $P(x)$ 由各组上限值及 $\delta=20.325, \alpha=0.119$ 代入式(2)得到。

表2 台风风速序列拟合优度检验

Table 2 Goodness of fit test of typhoon wind speed series

风速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	频数	累积 频数	$P_n(x)$	$P(x)$	$P_n(x)-P(x)$
≤ 13.9	16	16	0.155 3	0.161 0	0.005 7
14.0~15.9	14	30	0.291 3	0.224 9	0.066 4
16.0~17.9	0	30	0.291 3	0.295 4	0.004 2
18.0~19.9	1	31	0.301 0	0.369 3	0.068 3
20.0~21.9	12	43	0.417 5	0.443 1	0.025 6
22.0~23.9	1	44	0.427 2	0.514 2	0.087 0
24.0~25.9	17	61	0.592 2	0.580 7	0.011 5
26.0~27.9	0	61	0.592 2	0.641 4	0.049 2
28.0~29.9	1	62	0.601 9	0.695 7	0.093 7
30.0~31.9	11	73	0.708 7	0.743 4	0.034 7
32.0~33.9	1	74	0.718 4	0.784 9	0.066 4
34.0~35.9	16	90	0.873 8	0.820 4	0.053 4
36.0~37.9	0	90	0.873 8	0.850 7	0.023 1
38.0~39.9	0	90	0.873 8	0.876 2	0.002 4
40.0~41.9	7	97	0.941 7	0.897 6	0.044 1
42.0~43.9	2	99	0.961 2	0.915 5	0.045 6
44.0~45.9	1	100	0.970 9	0.930 4	0.040 4
46.0~47.9	0	100	0.970 9	0.942 8	0.028 1
48.0~49.9	1	101	0.980 6	0.953 0	0.027 6
50.0~51.9	1	102	0.990 3	0.961 4	0.028 9

4 台风影响海域的风速分布拟合检验

风速的拟合检验采用柯尔莫哥洛夫(Колмогоров)方法^[10]。将风速由大到小作成有序统计量并分组,计算各组理论点与经验点间的最大偏差:

$$D = | P_n(x) - P(x) |_{\max} \quad (12)$$

式中: $P_n(x)$ 为经验分布的累积频率; $P_n(x) = N/(n+1)$; N 为累积频数; n 为总样本数; $P(x)$ 为理论分布累积概率。按 Колмогоров 概率分布适度准则, 设 $\eta = \sqrt{n}D$, 则:

$$P(\eta) = \left\{ | P_n(x) - P(x) |_{\max} < \frac{\eta}{\sqrt{n}} \right\} =$$

最大 $D_{\max} = 0.093\ 7$, 则 $\eta = \sqrt{102} \times 0.093\ 7 = 0.946$, 查“柯尔莫哥洛夫检验临界值表”, 若取信度 $t = 0.05$, 则 $\eta < \eta_t = 1.35$, 说明项目海域内的台风风速符合 Gumbel 分布。

5 区域极值风速估算

以热带气旋样本序列由式 (8) 计算 Poisson-Gumbel 复合分布极值, 计算结果显示, 100 km 半径内台风影响海域距海平面 10 m 高度 50 a 一遇 2 min 平均风速为 $56.0\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, 100 a 一遇为 $61.8\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

根据不同时距风速换算系数, 将 2 min 平均最大风速换算为 10 min 平均最大风速, 换算系数为 $0.92^{[10]}$, 推算得到台风影响海域内距海平面 10 m 高度 50 a 一遇 10 min 平均风速为 $51.5\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, 100 a 一遇 10 min 平均风速为 $56.9\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, 详见表 3。

表 3 100 km 半径评估区域重现期风速计算结果			
Table 3 Calculation results of wind speed in return period of 100 km radius assessment area			
重现期/a	距海平面 10 m 高度 2 min 平均风速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	距海平面 10 m 高度 10 min 平均风速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	参数
50	56.0	51.5	$\alpha = 0.119$
100	61.8	56.9	$\delta = 20.325$

6 极值风速检验

对于热带气旋资料采用泊松耿贝尔法推算得到的极端风速, 为了检验其合理性, 本文采用 1958—2020 年上川岛气象站的最大风速序列通过

计算重现期风速后进行对比分析。

1958—2020 年上川岛气象站逐年最大风速资料经过次时订正、高度订正和迁站订正后, 建立 10 min 平均年最大风速序列 (图 2)。可以看到, 最大值为 $38.4\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, 出现在 1958 年, 最小值为 $15.1\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, 出现在 1961 年。

上川岛气象站的年最大风速序列采用柯尔莫哥洛夫 (Колмогоров) 拟合适度检验方法, 计算得到柯氏拟合适度指标分别为 0.533, 小于 $K_{0.05} = 1.35$, 说明该序列符合极值 I 型分布。

采用极值 I 型概率分布函数, 最大风速频率曲线拟合见图 3, 计算得到上川岛气象站距地面 10 m 高度 50 a 一遇 10 min 平均风速为 $41.2\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, 100 a 一遇 10 min 平均风速为 $44.3\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。拟合的平均标准差为 $5.43\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, 平均相对偏差为 1.74%。

与上川岛气象站采用极值 I 型概率分布函数得到的极值风速相比, 采用泊松耿贝尔分布推算得到的台风影响海域内距海平面 10 m 高度 50 a 一遇 10 min 平均风速 $51.5\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 明显偏大, 这是由于泊松耿贝尔分布的评估范围为 100 km 半径的圆形区域, 范围明显较大, 热带气旋到达沿海时, 由于水汽输送减少, 强度往往会下降, 登陆时的风速也往往比在离岸 100 km 处海域要小, 通过对沿海台风大风的特征参数进行研究, 发现我国沿海地区台风的最大风速半径均值为 $40.5\ \text{km}^{[11]}$, 为了消除台风在距离较远时的最大风速入选样本的影响, 我们将影响区域由 100 km 半径逐渐缩减到 40 km 半径的圆形区域, 重新利用泊松耿贝尔分布推算极值风速, 得到新的评估结果, 随着半径的缩小, 最后入选的样本也逐渐减少, 经检验, 各个样本序列同样符合

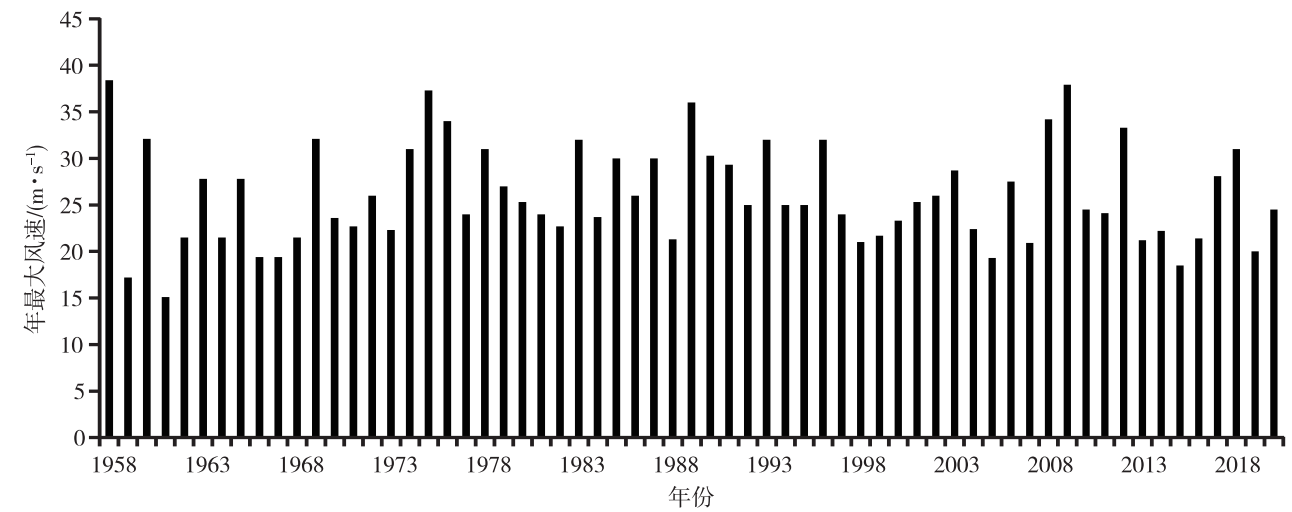


图 2 上川岛气象站历年最大 10 min 平均风速
Fig.2 Annual maximum 10 min average wind speed of Shangchuandao meteorological station

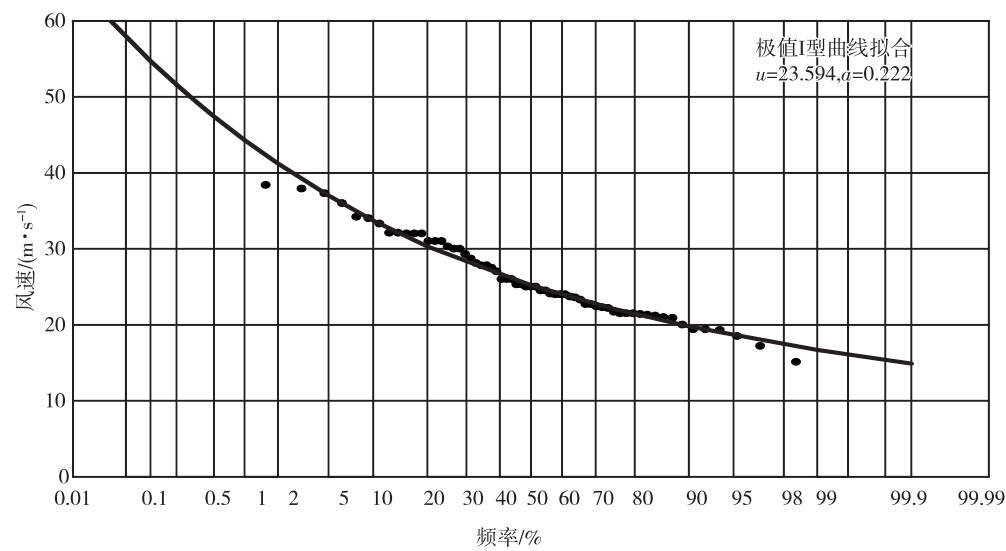


图3 上川岛气象站年最大风速频率曲线拟合

Fig.3 Fitting diagram of annual maximum wind speed frequency curve of Shangchuandao meteorological station

Poisson 分布和耿贝尔分布。重新评估后,得到不同评估半径的区域距海平面 10 m 高度 50 a 一遇的 10 min 平均风速,计算结果及相关参数见表 4,可见评估范围越大,得到的重现期风速越大,50 km 半径的计算结果与上川岛气象站历史风速序列计算的结果较为接近,评估半径为 40 km 时,由于风速较大的台风样本入选数量较少,导致计算结果偏小。

7 结论

(1) 采用上川岛气象站实测资料通过极值 I 型分布计算得到的 50 a 一遇的 10 min 平均风速为 $41.2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,采用《CMA-STI 热带气旋最佳路径数据集》资料通过泊松耿贝尔分布得到 50~100 km 半径

评估区域的 50 a 一遇的 10 min 平均风速在 $44.0\sim 51.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 之间,说明在缺少气象观测数据的近海地区,用泊松耿贝尔分布可以得到较为保守的海上极值风速取值。

(2) 由于采用泊松耿贝尔分布的评估区域较大,所得到的重现期风速较大,对于海上的小面积区域的重现期风速估算,采用 50 km 半径区域进行评估,可以得到较为合理的估算结果,当评估区域较大时,则需考虑适当扩大评估半径。

(3) 由于海上的长期测风资料较为缺乏,只采用了一个气象站来对泊松耿贝尔分布的评估结果进行验证,若今后有多个海上站点的历时资料后,可对大范围海域的评估风速进行更进一步的复核。

表 4 40~100 km 半径评估区域 50 a 重现期风速计算结果

Table 4 Wind speed calculation results of 50 years return period in 40-100 km radius assessment area

半径/km	样本数	距海平面 10 m 高度		参数 α	参数 δ	上川岛 10 m 高度 10 min 平均风速/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$
		2 min 平均风速/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	10 min 平均风速/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$			
40	25	39.9	36.7	0.129	18.096	
50	38	47.8	44.0	0.115	19.685	
60	51	51.2	47.1	0.111	19.409	
70	65	51.6	47.4	0.119	19.823	41.2
80	80	54.5	50.1	0.117	20.312	
90	95	55.5	51.0	0.119	20.329	
100	102	56.0	51.5	0.119	20.325	

参 考 文 献

- [1] 陈育林. 巨灾保险制度探索. 中国金融, 2021, (1): 51-53.
CHEN Yulin. Exploration of catastrophe insurance system. China Finance (in Chinese), 2021, (1): 51-53.
- [2] 刘水杏, 王国军. 巨灾保险发展的国际经验. 中国金融, 2021, (1): 56-58.
LIU Shuixing, WANG Guojun. International experience of catastrophe insurance development. China Finance (in Chinese), 2021, (1): 56-58.
- [3] 宋丽莉, 毛慧琴, 汤海燕, 等. 广东沿海近地层大风特性的观测分析. 热带气象学报, 2004, 20(6): 731-736.
SONG Lili, MAO Huiqin, TANG Haiyan, et al. Observation and analysis of Guangdong coastal gales in the Near-Surface layer. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 2004, 20(6): 731-736.
- [4] MA Xinwen, CHEN Yan, YI Wenwu, et al. Prediction of extreme wind speed for offshore wind farms considering parametrization of surface roughness. Energies, 2021, 14(4): 1033.
- [5] CHEN Aifang, Emanuel K A, CHEN Deliang, et al. Rising future tropical cyclone-induced extreme winds in the Mekong river basin. Sci. Bull., 2020, 65(5): 419-424.
- [6] Bhardwaj P, Singh O, Yadav R B S. Probabilistic assessment of tropical cyclones' extreme wind speed in the Bay of Bengal; implications for future cyclonic hazard. Nat. Hazards, 2020, 101(1): 275-295.
- [7] 乔光全, 冯曦, 冯卫兵, 等. 南中国海热带气旋时空分布及强度特征统计分析. 海洋预报, 2019, 36(6): 53-61.
QIAO Guangquan, FENG Xi, FENG Weibing, et al. Statistical analysis of the spatial and temporal distribution and intensity characteristics of Tropical Cyclones in the South China Sea. Marine Forecasts (in Chinese), 2019, 36(6): 53-61.
- [8] 张友权. 台湾海峡三种再分析海面风场资料的评估. 渔业研究, 2020, 42(6): 556-571.
ZHANG Youquan. Evaluation of three reanalysis surface wind products in Taiwan Strait. Journal of Fisheries Research (in Chinese), 2020, 42(6): 556-571.
- [9] 屠其璞, 王俊德, 丁裕国, 等. 气象应用概率统计学[M]. 北京: 气象出版社, 1984.
TU Qipu, WANG Junde, DING Yuguo, et al. Applied probability statistics of meteorology [M]. Beijing: Meteorology Press (in Chinese), 1984.
- [10] 阎俊岳, 陈乾金, 张秀芝, 等. 中国近海气候[M] 北京: 科学出版社, 1993.
YAN Junyue, CHEN Qianjin, ZHANG Xiuzhi, et al. Coastal climate of China[M] Beijing: Science Press (in Chinese), 1993.
- [11] 薛霖. 我国沿海台风大风及其风工程参数特性研究[博士论文]. 北京: 中国气象科学研究院, 2018.
XUE Lin. Tropical cyclone-induced strong wind and its engineering parameter characteristics in the coastal areas of China [D]. Beijing: Chinese Academy of Meteorological Sciences (in Chinese), 2018.