基于多源资料与多方法互验的深远海重现期最大风速评估*

常蕊[1] 王铭昊[1] 黄子立[1] 尹宜舟[1] 卢超[2] 王贺[3] 陈扬馨[1] 顾正强[4]

1 国家气候中心，北京，100081

2 深圳市国家气候观象台，深圳，518001

3 国家海洋技术中心，天津，300112

4 辽宁省气候中心，沈阳，110016

摘　要：深远海风电开发过程中，热带气旋诱发的极端大风对工程安全构成严重威胁。深远海区域普遍存在观测站点稀疏、长期实测资料匮乏、轮毂高度大风数据缺失等问题，现有工程评估依赖有限数据源或单一方法，难以保障评估结果的可靠性与稳健性。文章以珠江口外海某深远海风电场为研究对象，依托参证气象站长期观测、场址短期实测、HY-2B 卫星反演、ERA5 再分析及热带气旋最佳路径等多源数据，综合采用工程台风风场模型模拟、蒙特卡洛模拟、站-址相关分析、频谱补偿、极值概率拟合及气候趋势分析等方法，开展场区现状及未来重现期最大风速评估。结果表明：该场址 150 m 高度 50 年一遇最大风速推荐值为 55.9 m•s-1，且极端风速呈上升趋势，2050 年预计可达 59.2 m•s-1。所提多源资料与多方法互验的评估技术降低了有限数据源、单一方法带来的评估不确定性，提升了弱探测区域重现期最大风速评估结果的稳健性，并初步实现了风电工程重现期参数从静态评估向动态气候适应的拓展，为深远海风电场选址、风机选型及灾害风险防控提供参考。

关键词：深远海风电；弱探测区域；重现期最大风速；多源资料；多方法互验

中图分类号：P49，P47　**文献标志码：**A　**DOI：**10.7519/j.issn.1000-0526.2026.100801

Assessment of Return Period Maximum Wind Speeds over Deep-Offshore Areas Based on Multi-Source Data and Multi-Method Cross Validation

CHANG Rui[1]　WANG Minghao[1]　HUANG Zili[1]　YIN Yizhou[1]　LU Chao[2]　WANG He[3]

CHEN Yangxin[1]　GU Zhengqiang[4]

1 National Climate Centre, Beijing 100081

2 Shenzhen National Climate Observatory, Shenzhen 518001

*国家重点研发计划项目（2024YFF0809204）和中国气象局创新发展专项（CXFZ2026QB01）共同资助

2026 年 5 月 20 日收稿；2026 年 10 月 8 日收修订稿

第一作者：常蕊，主要从事风电场高影响气象事件研究。Email: changrui@cma.gov.cn

《气象》待刊

3 National Ocean Technology Centre, Tianjin 300112

4 Liaoning Climate Centre, Shenyang 110016

Abstract: In the development of deep−offshore wind farms, extreme winds induced by tropical cyclones pose a significant threat to engineering safety. These areas are generally characterized by sparse observation stations, insufficient long-term measured data, and a lack of strong wind measurements at hub height. Existing evaluations commonly adopt limited data sources or a single method, and this is hard to ensure the reliability and robustness of the assessment results. Taking a deep-offshore wind farm off the Pearl River Estuary as the research object, this paper develops a return-period wind speed evaluation method supported by multi-source dataset and multi‑ method cross validation. Moreover, based on long-term observations from meteorological stations, short-term on-site measurement, HY-2B satellite retrievals, ERA5 reanalysis data, and tropical cyclone best-track data, this paper assesses the maximum wind speeds under current and future climates by comprehensively adopting the typhoon wind field model simulation, Monte Carlo simulation, station and farm site correlation analysis, spectral correction, extreme value distribution fitting, and climate trend prediction. The results show that the recommended 50-year return period maximum wind speed at 150 m height at the wind farm site is 55.9 $m•s^{-1}$, and the extreme wind speed presents an upward trend, projected to reach 59.2 $m•s^{-1}$ by 2050. The proposed multi-source and multi-method cross-validated method reduces the assessment uncertainty caused by limited data sources and a single method, improving the robustness of maximum wind speed estimation in data-sparse areas. This represents an initial step in expanding extreme wind evaluation from static assessment to dynamic climate-adaptive assessment. These study achievements can provide an important basis for site selection, turbine selection, and disaster-risk prevention of deep-offshore wind farms.

Key words: deep−offshore wind farm, weakly detected area, return period maximum wind speed, multi−source data, multi−method cross−validation

引言

能源转型背景下，海上风电正快速向深远海方向发展。我国东南沿海是全球热带气旋活动最频繁的区域之一，热带气旋引发的极端大风是制约深远海风电场安全设计、风机选型与长期稳定运行的主要气象灾害。重现期最大风速是风机抗风设计、结构荷载计算及灾害风险评估的关键参数，其精准程度直接决定工程安全性与经济性。

近年来，国内外围绕重现期最大风速评估已取得一定进展。所用资料可分为实测资料、卫星遥感资料与再分析资料三类。在实测资料方面，现场测风是研究近地层风特性最直接、最可靠的手段。Song et al (2012；2016)、陈雯超等（2019）和赵小平等（2016）依托测风塔梯度实测数据，对登陆广东、海南的多个台风进行了对比分析，定量揭示了台风眼壁区与外围强风区风廓线的差异；海洋浮标、船测等原位观测则可为其他资料提供精度校验与偏差订正支撑（陈怀怀等，2025）。在卫星遥感资料方面，HY-2B 散射计、FY-3 系列微波辐射计及合成孔径雷达 Sentinel-1 SAR 等卫星载荷已逐步应用于海面风速反演，部分产品与热带气旋

最佳路径数据的相关系数达 0.9 以上（张有广和林静，2025），在一定程度上弥补了远海区域观测覆盖不足的缺陷。再分析资料方面，ERA5、MERRA-2、CFSR 等长序列再分析资料已逐渐被用于极值风速推算（Imberger et al,2024;Larsén et al,2022;Liu et al,2025;Chapman-Smith et al,2026），但已有研究指出，再分析资料对高风速存在系统性低估（Gandoin and Garza,2024），需引入频谱补偿（Larsén and Ott,2022）等方法进行优化后，方可开展极值风速估算。在此背景下，多源数据融合成为缓解深远海观测稀缺问题、提升极值风速评估稳健性的重要途径（陈莅佳等，2025）。

在方法层面，工程台风风场模拟、极值拟合、随机模拟及观测-推算融合等技术持续完善。工程台风风场模型从 Batts、Thompson 等经验模型逐步发展至 Holland、Yan-Meng 等物理约束更强的参数化模型，可较好刻画最大风速半径、气压剖面、风场结构与垂直风切变，适配台风风场模拟（李玉辉，2023；逯智科等，2025）。极值拟合方面，耿贝尔、威布尔、皮尔逊-Ⅲ型、泊松-广义帕累托（Poisson-Generalized Pareto Distribution，泊松-GPD）、泊松-耿贝尔等分布被广泛用于重现期最大风速估算（孙安健和刘小宁，1993；黄林宏等，2016）；K-S 检验、概率权重矩、线性矩等方法被用于拟合函数优选与参数估计，以提升尾部拟合稳定性。针对历史大风样本不足的问题，蒙特卡洛模拟通过生成万年合成台风事件，扩充极值样本容量，在我国东南沿海及韩国南部海域等工程实践中表现出较好的适用性（Guo et al,2019;Jho and Kim,2025）。观测-推算融合方面，站-址相关分析、分位数匹配等方法被用于短序列延长，实现陆-海、近-远风场之间的传递。上述技术共同支撑以 GB/T 18451.1—2022（国家市场监督管理总局和国家标准化管理委员会，2022）、GB 50009—2012（中华人民共和国住房和城乡建设部和中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局，2012）为核心的工程评估体系，为风机设计、结构抗风、风险防控提供依据。

尽管现有体系日趋成熟，深远海弱探测区域的重现期最大风速评估仍面临不少瓶颈。一是观测站点稀疏、长期连续实测匮乏，轮毂高度大风资料严重缺失；二是单一数据源难以覆盖极端风况，单一模型假设与实际物理过程存在偏差，导致重现期最大风速推算不确定性大、工程应用风险偏高；三是气候变化背景下，热带气旋强度增强、极端风速呈上升趋势，传统基于历史平稳假设的评估方法难以反映未来风险特征。基于 ERA5 长序列再分析数据的研究表明，全球海洋 50 年一遇最大风速以约 0.016 m s^{-1} a^{-1} 的速率上升（Zhao et al,2025），亚洲近海风电场面临超设计标准的极端风速威胁比例超过 40%；在高排放情景下，我国近海台风引发的轮毂高度 50 年一遇最大风速增幅可达 6%~32%（许智棋，2025），对风机安全提

出更高要求。可见，现有评估多依赖有限数据源或单一模型，缺乏多源融合与多方法交叉验证，难以满足深远海高可靠、低风险工程设计需求。

为此，本文以珠江口外海某深远海风电场为例，整合地面气象观测、卫星遥感、再分析及热带气旋最佳路径四类数据，融合台风风场模拟、蒙特卡洛模拟、站-址相关分析、频谱补偿、多种极值拟合等方法，构建多源资料支撑、多方法交叉验证的重现期最大风速评估方法，以期为我国深远海风电场台风灾害防控与工程安全设计提供技术支撑。

1 研究区与数据

1.1 研究区域及场址观测概况

本文研究对象为位于珠江口外海的珠江口外海某深远海风电场，场址海域平均水深 85 m，离岸距离约 200 km，属于典型的深远海弱探测区域。场址观测依托一座海面高程 62 m 的石油平台开展，超声测风传感器安装于平台西北角顶面上方 2 m 处（图 1）。观测选用英国 Gill WindObserver 75 二维超声风速风向传感器，其原始采样步长 25 ms（原始采样频率 40 Hz），对外输出时间步长 1 s，风速测量量程为 0~75 $m \cdot s^{-1}$。配套数据采集系统基于传感器时序输出数据，统计并记录 10 min 平均风速和风向。该仪器在投入使用前已完成标准风洞统一标定。

受石油平台钢结构本体遮挡的影响，平台周边局部风场存在结构性扰动，会对实测风速造成一定干扰。尽管如此，该场址的连续观测数据仍可为本区域深远海工程大风特征分析提供原位实测依据，具有工程设计参考价值。

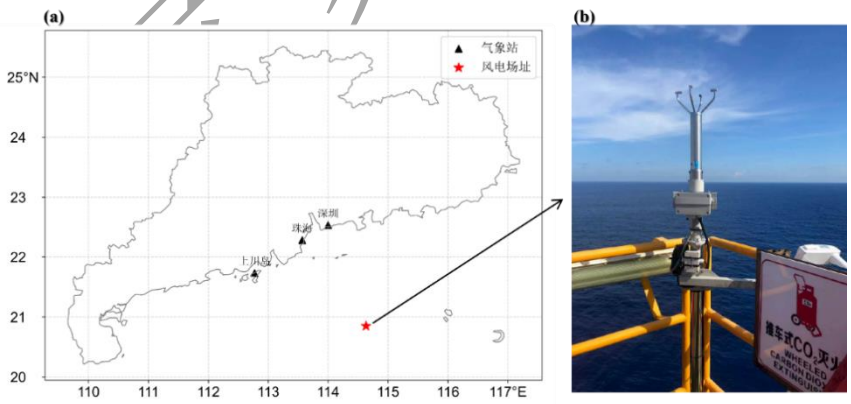


图 1 （a）珠江口外海某深远海风电场场址及周边气象站分布；（b）场址处的超声风速传感器

Fig. 1(a) Distribution of the deep-offshore wind farm site off the Pearl River Estuary and meteorological stations nearby, and (b) the ultrasonic anemometer at the farm site

1.2 数据

1.2.1 场址短期观测

本文收集了场址处 2020 年 4 月至 2025 年 12 月的逐小时平均风速、气压、气温等实测

数据。测风时段内共记录到 9 个台风影响过程，包括 2025 年“桦加沙”、2024 年“桃芝”、2022 年“马鞍”等。图 2 给出了各台风影响期间，场址距台风中心最近时刻前后各 48 h 的风速与气压演变曲线。由风速时序变化可见，大多数台风过程未表现出典型的双峰特征。结合 GB/T 36745—2018（国家市场监督管理总局和中国国家标准化管理委员会，2018）的判别标准与图 2 各子图标注的最近距离可知，在 9 个台风过程中，场址与台风中心的最近距离大多超过 30 km，表明场址整体处于台风外围强风影响区。

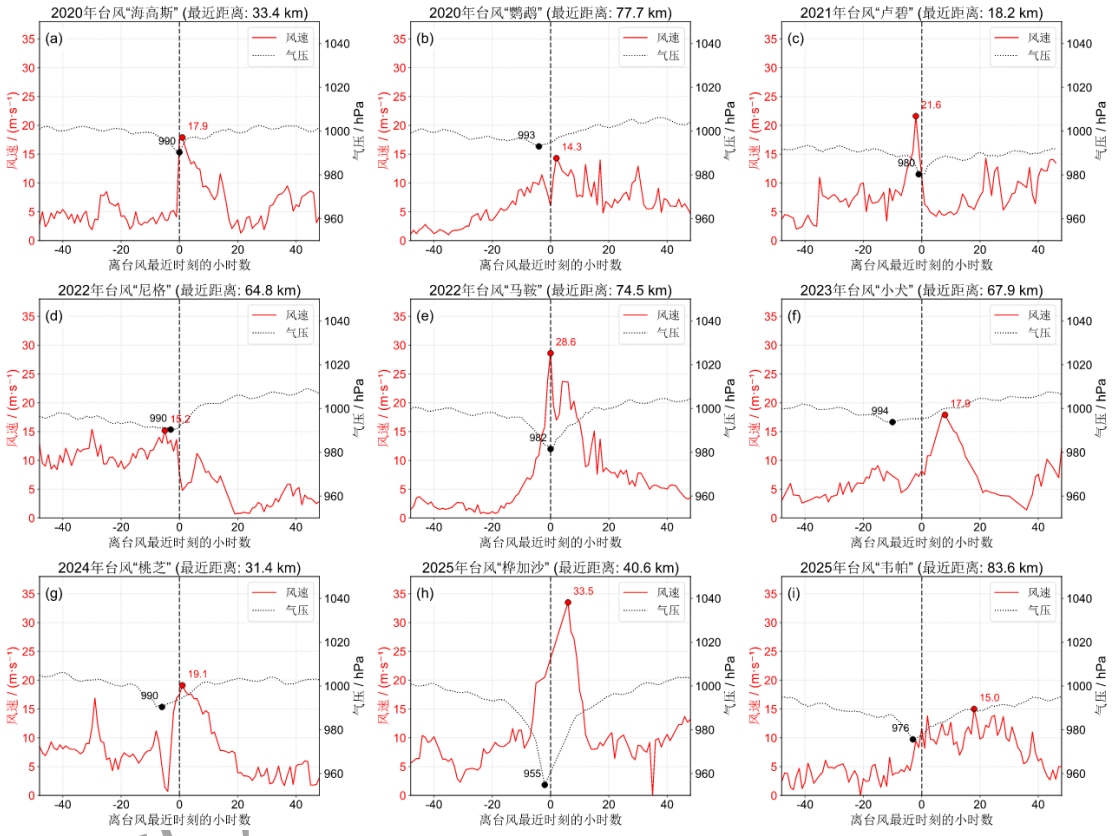


图 2 场址测风期间 9 个台风影响下逐小时风速与气压的时序变化（64m 高度，距台风中心最近时刻前后各 48 h）

（a）2020 年“海高斯”（最近距离 33.4 km），（b）2020 年“鹦鹉”（最近距离 77.7 km），（c）2021 年“卢碧”（最近距离 18.2 km），（d）2022 年“尼格”（最近距离 64.8 km），（e）2022 年“马鞍”（最近距离 74.5 km），（f）2023 年“小犬”（最近距离 67.9 km），（g）2024 年“桃芝”（最近距离 31.4 km），（h）2025 年“桦加沙”（最近距离 40.6 km），（i）2025 年“韦帕”（最近距离 83.6 km）

Fig. 2 Time series of hourly wind speed and air pressure at an altitude of 64m from the farm observation station (hereinafter referred to as the farm station) under the influence of nine typhoons during the farm station wind measurement period (48 h before and after the closest approach of typhoon centers to the wind farm site)

(a) 2020 Higos (closest distance: 33.4 km), (b) 2020 Nuri (closest distance: 77.7 km), (c) 2021 Lupit (closest distance: 18.2 km), (d) 2022 Nalgae (closest distance: 64.8 km), (e) 2022 Ma-on (closest distance: 74.5 km), (f) 2023 Koinu (closest distance: 67.9 km), (g) 2024 Toraji (closest distance: 31.4 km), (h) 2025 Ragasa (closest distance: 40.6 km), (i) 2025 Wipha (closest distance: 83.6 km)

1.2.2 参证气象站长期观测

场址周边 250 km 范围内共有 3 个国家级气象站可作为备选参证站，分别为上川岛站、深圳站与珠海站（图 1）。本文收集了各站建站以来的长期气象观测数据，要素包括逐小时平均风速、气压、气温等，各站点基本信息见表 1。

表 1 周边气象站基础信息

Tab.1 Basic information of the surrounding meteorological stations

站名	距离（km）	测站海拔（m）	观测时段	观测站级别
上川岛	216.4	22	1962—2025 年	基本站
深圳	197.9	63	1980—2025 年	基本站
珠海	193.3	52	1980—2025 年	基本站

1.2.3 热带气旋最佳路径

热带气旋路径与强度资料来源于中国气象局上海台风研究所（CMA-STI）整编的《西北太平洋热带气旋最佳路径数据集》（Ying et al，2014）。本文采用 1949—2025 年的长时序数据集，其空间范围覆盖赤道以北、180° E 以西的西北太平洋及南海海域。该数据集以 6 h 为时间间隔，记录各热带气旋的中心经纬度、中心最低气压和最大风速等参数；于每年热带气旋季结束后，融合常规气象观测与多源非常规观测资料，对全年热带气旋的移动路径与强度开展事后再分析，统一整编形成标准化最佳路径产品。

1.2.4 HY-2B 卫星遥感海面风与 ERA5 再分析风速

为交叉验证基于场址实测资料的评估结果，本文进一步引入卫星遥感风场资料与再分析风速资料开展多源风速数据的比对校核。所选用的 HY-2B 海洋卫星的散射计 L2B 级海面风场产品，由搭载于该卫星的 Ku 波段（13.256 GHz）微波散射计获取：散射计主动发射微波脉冲并接收海面回波信号，借助 NSCAT-4 地球物理模式函数和 Pencil-beam Wind Processor 算法反演，得到海面 10 m 高度风速数据，其均方根误差在 1.0 $m \cdot s^{-1}$ 以内（Wang et al, 2020）。由于该产品的空间分辨率为 25 km，为匹配场址位置与风矢量单元的空间代表性，本文以场址为中心，提取半径 12.5 km（即半个网格间距）范围内的有效风场反演数据，构建了 2018 年 11 月至 2025 年 12 月的场址区域风速序列。受卫星过境频次限制，该遥感数据的月平均样本覆盖率不足 3%（图略），有效观测样本稀缺，且现有匹配样本多集中于常规风速段，缺乏大风过程的有效观测记录，因此难以支撑区域大风特征分析，仅用于校验再分析风速资料。

本文使用的 ERA5 全球大气再分析数据集由欧洲中期天气预报中心研制（Hersbach et al, 2020），时间跨度为 1940—2025 年，空间分辨率为 0.25° ×0.25° 。为评估其在研究区域的

适用性，本文对 HY-2B 卫星遥感风速与 ERA5 再分析风速进行逐点匹配及对比验证，共得到 1315 组有效匹配样本。对比结果表明，两组风速序列的变化趋势一致，相关系数为 0.95；但误差分析显示，场址区域内 ERA5 再分析风速相较于 HY-2B 卫星反演风速偏低 1.41 $m•s^{-1}$，存在系统性低估（图 3）。同时，受再分析数据时空平滑特征的影响，ERA5 对大风过程的刻画能力存在固有缺陷，不宜直接用于极端风速分析。

基于上述数据特性与误差特征，采用移动平均偏差订正方法对 ERA5 逐时风速数据进行整体抬升处理（增幅为 1.41 $m•s^{-1}$），在完整保留原始风速序列波动特性与频谱结构的前提下消除其系统性偏差，进而利用订正后的 ERA5 风速序列开展年最大风速评估，具体方法详见 2.3 节。

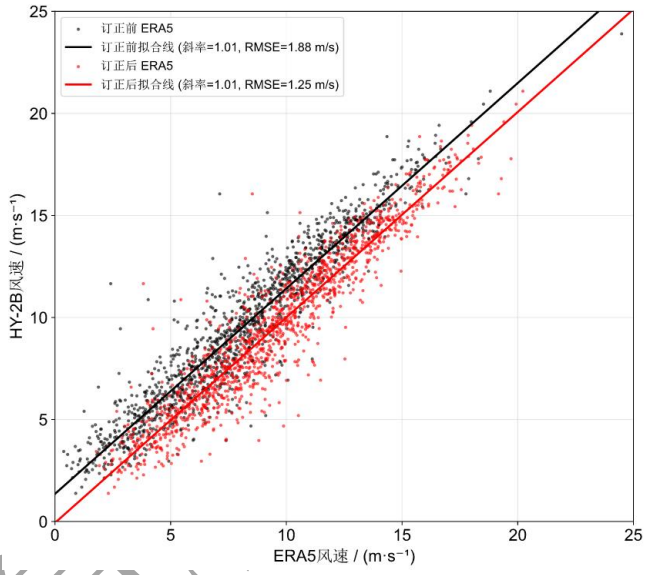


图 3 HY-2B 卫星反演风速与订正前后的 ERA5 逐小时风速的散点图

Fig.3 Scatter plot of the HY-2B satellite-retrieval wind speeds versus the ERA5 reanalysis hourly wind speeds before and after correction

2 模型与方法

2.1 工程台风风场模型

采用 Batts 工程台风风场模型开展台风风场模拟，该模型通过最大梯度风速V_{gx}公式并考虑地表风速修正，可计算不同位置、不同高度处的台风风速，核心公式如下：

$$V_{gx} = K\sqrt{\Delta p} - \frac{R_m \cdot f_c}{2} \qquad (1)$$

式中：R_m为最大风速半径，f_c为科氏力参数，Δp为中心压差，K为经验常数，取值 6.72。R_m处、海面以上 10 m 高度处的最大风速V_{10,R_m}为：

$$V_{10,R_m} = 0.865 \cdot V_{gx} + 0.5 \cdot C \qquad (2)$$

式中：C 为台风移动速度。距台风中心 r 处、海面以上 10 m 高度处的最大风速$V_{10,r}$为：

$$V_{10,r} = \begin{cases} V_{10,R_m} \cdot \frac{r}{R_m}, & r < R_m \\ V_{10,R_m} \cdot \left(\frac{R_m}{r}\right)^{\beta}, & r \geq R_m \end{cases} \qquad (3)$$

式中：β为风速衰减指数，取值 0.6。$V_{10,r}$为距台风中心 r 处的基本风速。考虑不同方位影响后，该位置处的台风风速为：

$$V_{10,r,\alpha} = V_{10,r} - 0.5 \cdot c \cdot (1 - \cos\alpha) \qquad (4)$$

式中：α为台风移动方向与模拟点-台风中心连线的夹角，逆时针方向为正。

本文的工程台风风场模型选用 Batts 模型，主要基于以下考虑：2.2 小节的蒙特卡洛模拟在推算边界风速时已采用 Holland 模型与梯度风方程，若风场模拟环节仍沿用同类模型，易因单一模型贯穿整个分析流程而引入同源性误差。为提升台风风速推算方法的多样性与独立性，因此选用 Batts 模型，使其与蒙特卡洛模拟所采用的风场模型在动力学表达上相互独立。两种工程台风风场模型分别服务于评估流程的不同环节，模拟结果可相互印证，有助于增强重现期最大风速评估结论的可靠性与稳健性。

2.2 热带气旋风速蒙特卡洛模拟

蒙特卡洛模拟通过大量重复生成符合历史统计特征的合成热带气旋事件，推求低超越概率下的极端风速分位数，从而克服历史观测样本不足的问题。本文以影响场址区域的热带气旋最佳路径数据集为历史样本，开展 10000 年合成热带气旋事件模拟，步骤如下：

从历史最佳路径中提取中心气压差ΔP，最大风速半径R_m，移动速度 C、方向角α和最小距离d_{min}共 5 个核心参数。其中R_m由 Vickery 经验公式结合纬度和平移速度计算，其余参数按 IEC 61400-1: 2019 附录 J 推荐的方法逐路径点推算（IEC, 2019）。

对上述 5 个参数进行标准化，右偏参数取对数变换后构造参数向量；对参数矩阵的协方差矩阵进行特征值分解，结合年平均台风发生率确定模拟期总台风数；生成独立标准正态随机向量并转换为具有历史相关结构的多元正态变量，再通过分位数映射得到合成参数集。

采用 Holland 气压模型与梯度风方程计算场址处 10 min 平均风速并叠加对数随机波动，逐年取最大值得到 10000 个年最大风速样本，用于极值分布拟合。

2.3 基于频谱补偿方法的年最大风速推算

ERA5 再分析资料受模式分辨率限制，会平滑近地层高频湍流脉动，系统性低估高频风速能量。为还原近地层真实风场，本文采用频谱补偿方法对 ERA5 风速序列进行校正（Larsén et al, 2012；常蕊等，2019）。该方法基于快速傅里叶变换（FFT），通过对比 ERA5 与高频风

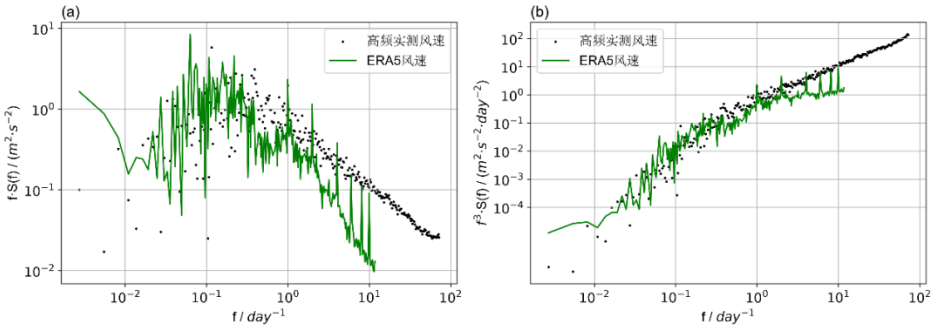
速资料的频谱特征，识别能谱能量衰减的临界截断频率f_0（即频谱补偿起始频率）。该频率一般介于 $10^0 \sim 10^1$ d^{-1} 之间，本文取 3.5 $^{-1}$；随后利用高频资料中高于f_0的能谱对 ERA5 能谱的截断部分进行补偿，并对补偿后的全频率段能谱进行积分，逐年计算年最大风速$\overline{Umax}$：

$$\frac{\overline{Umax}-\bar{U}}{\sigma} = \sqrt{2 * \ln\left(\frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{m_2}{m_0}}T_0\right)} \qquad (5)$$

式中：$\bar{U}$为 ERA5 风速序列的年平均值；σ序列的标准差；T_0 为时间跨度，本文时间步长以天为基准，故取 365 天；m_0、m_2分别代表 ERA5 风速序列 0 阶谱矩和 2 阶谱矩，计算公式为：

$$m_j = 2\int_0^{\infty} \omega^j S(\omega) d\omega\,，\ \omega = 2\pi f \qquad (6)$$

图 4 以某测风塔全年无台风时段的连续观测为例，示意了 ERA5 高频能谱的截断特征。依据前述公式及图 4 可知，m_0和m_2分别对应图 4(a 和 4b 中绿色曲线在整个频率域上的积分值。



注：S(f)为基于 FFT 估算的单边功率谱密度，单位为$m^2 \cdot s^{-2} \cdot d$；$f \cdot S(f)$和$f^3 \cdot S(f)$为不同的频率加权形式。

图 4 外海某测风塔实测风速的单边功率谱密度的频率加权形式与 ERA5 风速的对比：(a) $f \cdot S(f)$和(b)$f^3 \cdot S(f)$

Fig.4 Comparison of power spectral density between ERA5 wind speeds and high-frequency observed wind speeds at an offshore wind measurement mast

(a) $f \cdot S(f)$, (b) $f^3 \cdot S(f)$

鉴于目标场址缺乏连续高频实测数据，无法直接利用实测能谱进行补偿，本文参照 Imberger et al (2024)的方法，对频率大于截断频率f_0的频段采用-5/3 幂律经验能谱补齐高频能量，构建全域等效功率谱，并在风速序列服从高斯分布的假设下重构逐年最大风速序列。

需要指出的是，上述频谱补偿法主要适用于冷空气等常规天气系统驱动的大风过程，仅能估算非台风影响下的年最大风速。针对研究区冷空气大风与台风大风并存的特点，本文在 3.4 节采用如下策略融合两类年最大风速序列：基于频谱补偿的 ERA5 风速提取冷空气大风影响下的年最大风速，基于最佳路径数据与工程台风风场模型提取台风影响下的年最大风速；逐年取两者中的较大值作为融合的年最大风速，进而推算 50 年一遇最大风速（V_{50}）。

2.4 极值统计模型

2.4.1 三种经典极值分布

本文选取耿贝尔、威布尔及皮尔逊 III 型三种常用极值分布进行参数估计。采用 Kolmogorov-Smirnov 检验（以下简称为 K-S 检验），该方法检验统计样本经验值与理论分布的最大绝对差异，K-S 值越小，拟合优度越高。

2.4.2 复合极值模型

针对工程台风风场模型生成的最大风速序列，分别采用两种复合极值模型开展极值风速频率分析。

（1）泊松-GPD 联合分布

假设单位时段内风速超过给定阈值的事件频次服从泊松分布，超过阈值的风速服从 GPD 分布，则年最大风速的累积分布函数为：

$$F(x) = \exp\{-\lambda\left[1+\xi\cdot\frac{x-u}{\sigma}\right]^{-\frac{1}{\xi}}\},\quad x > u \qquad (7)$$

式中：u为风速阈值，λ为年均风速超阈值的时间次数，ξ为形状参数，σ为尺度参数。该模型侧重于风速序列的极端尾部行为，对高风速段的频率分布刻画更为精细。

（2）泊松-耿贝尔联合分布

假定每年台风事件发生次数服从泊松分布，单场台风事件的最大风速服从耿贝尔分布，则年最大风速的累积分布函数为：

$$F(x) = \exp[-\gamma(1-G(x))] \qquad (8)$$

式中：γ为年平均台风影响次数，$G(x)$为台风影响下风速的耿贝尔分布。该模型针对离散台风事件峰值建模，适用于台风驱动型极值风速推算。

上述两种模型分别从超阈值尾部和离散独立台风事件峰值两个不同视角刻画极端风速统计特征，其结果可相互校核，有助于综合评估场址极值风速的不确定性范围。

2.5 备选参证站与场址观测站大风相关性分析

采用多阈值滑动窗口法筛选大风样本，以日最大风速为基准，分析场址观测站与备选参证气象站之间的大风相关性。考虑到台风自东南向西北移动，场址观测站的风速峰值一般先于备选参证站出现大风过程，两站大风过程存在时间差。引入时间滞后的相关系数，对大风样本（全序列前 5%，日最大风速≥20 $m\cdot s^{-1}$）的计算结果表明，滞后相关系数显著高于同期相关系数（图 5），其中以珠海站最优，达 0.65（图 5d）。

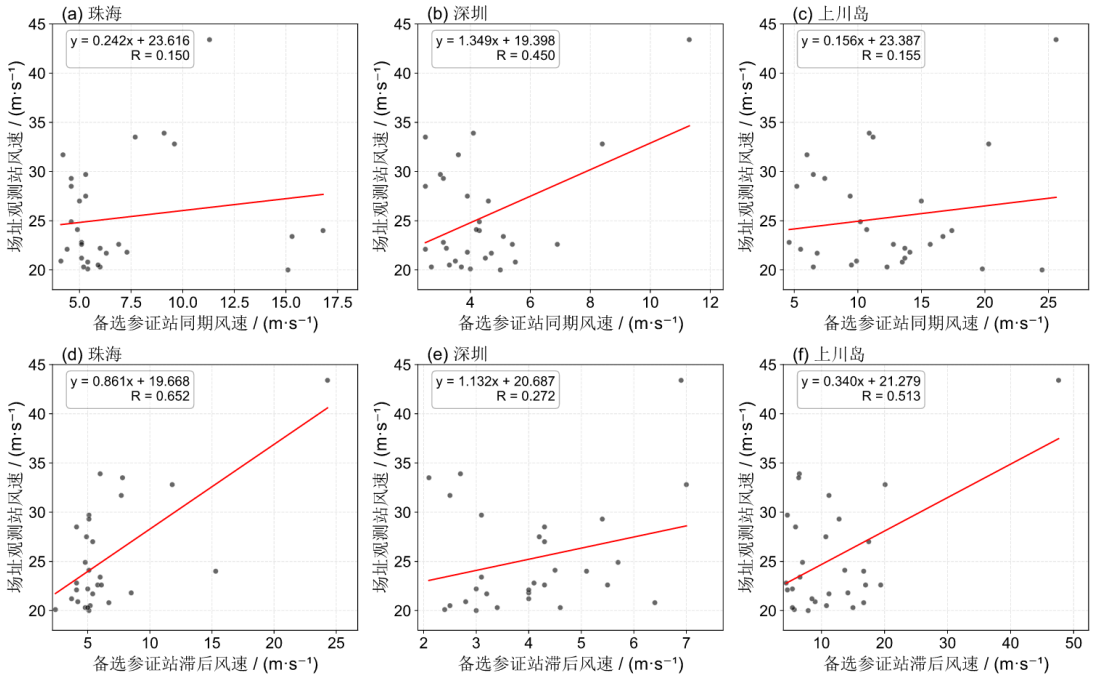


图 5 场址观测站大风样本（日最大风速≥20 m•s^{-1}，样本全序列前 5%）与备选参证站的相关性分析（a~c）同期相关，（d~f）滞后相关

Fig.5 Correlation analysis between strong wind samples at the farm station (daily maximum wind speed ≥20 m•s^{-1}, top 5% of the full samples) and the candidate meteorological stations (a–c) concurrent correlation, (d–f) lagging correlation

为支撑台风移动背景下的滞后相关分析，提取场址测风时段内 9 个台风过程中珠海站与场址观测站的逐时风速（图 6）。分析发现：台风影响期间，珠海站的风速峰值出现时刻整体滞后于场址观测站，滞后时长约 3～19 h；滞后差异主要与台风移速和移动路径有关，该特征在一定程度上佐证了图 5 滞后相关性分析结果的可靠性。

基于大风样本的最优滞后相关关系，以珠海站日最大风速 x 为自变量、场址观测站日最大风速 y 为因变量，建立大风线性回归模型：y=0.861x+19.668（图 5d）。同时，依托图 6 中台风大风样本，采用比值法构建订正模型：y=1.719x。分别利用线性回归模型和比值模型将珠海站年最大风速推算至场址位置处，两类模型推算得到的场址逐年最大风速对比见图 7。可见：线性回归模型受斜率和截距双参数约束，长时序推算结果波动平缓；比值模型仅依靠单一比例系数约束，推算值波动性较强，珠海站大风年份经比值放大后场址推算风速偏高，小风年份则同步偏低（图 7）。

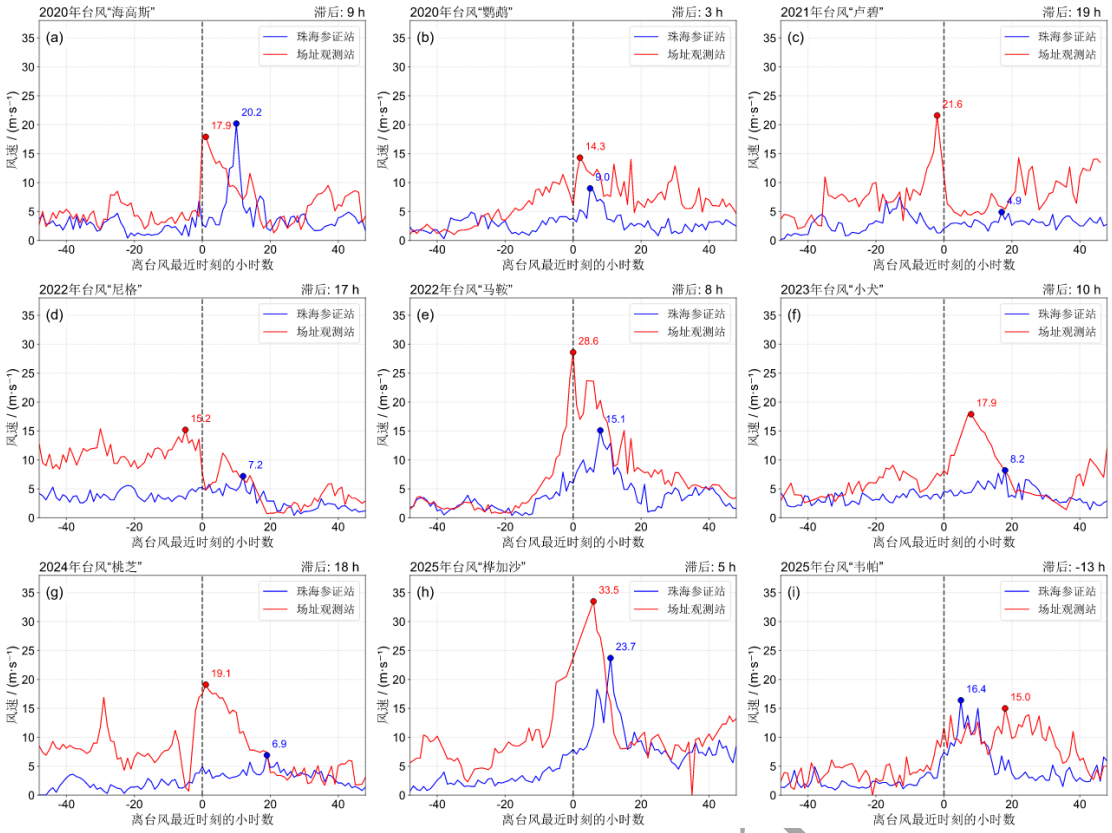


图 6 场址测风期间 9 个台风影响下珠海站与场址测站逐小时风速对比（距台风中心最近时刻前后各 48 h）：（a）2020 年“海高斯”（滞后 9 h），（b）2020 年“鹦鹉”（滞后 3 h），（c）2021 年“卢碧”（滞后 19 h），（d）2022 年“尼格”（滞后 17 h），（e）2022 年“马鞍”（滞后 8 h），（f）2023 年“小犬”（滞后 10 h），（g）2024 年“桃芝”（滞后 18 h），（h）2025 年“桦加沙”（滞后 5 h），（i）2025 年“韦帕”（超前 13 h）

Fig. 6 Comparison of hourly wind speeds between Zhuhai and the farm station under the influence of the nine typical typhoons during the farm station wind measurement period (48 h before and after the closest approach of typhoon centers to the wind farm site)

(a) 2020 Higos (lag of 9 h), (b) 2020 Nuri (lag of 3 h), (c) 2021 Lupit (lag of 19 h), (d) 2022 Nalgae (lag of 17 h), (e) 2022 Ma-on (lag of 8 h), (f) 2023 Koinu (lag of 10 h), (g) 2024 Toraji (lag of 18 h), (h) 2025 Ragasa (lag of 5 h), (i) 2025 Wipha (13 h in advance)

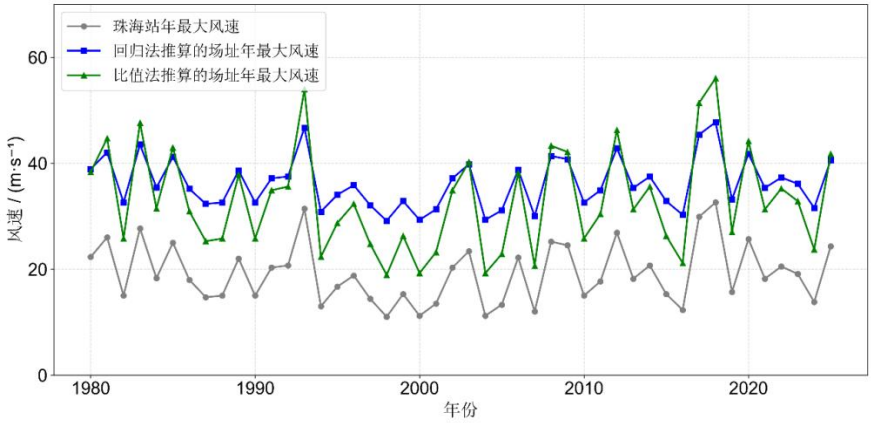


图 7 珠海站年最大风速与分别采取回归模型、比值模型推算的场址年最大风速

Fig. 7 Comparison of annual maximum wind speeds of the observed at Zhuhai Station with the estimated values by the regression-correction model and by the ratio model for the farm station

综合样本代表性与模型稳定性进行对比分析：比值模型依托有限台风个例构建，样本容量偏少，单一个例的台风强度或路径偏差易对订正结果产生干扰；线性回归模型基于全时段大风样本拟合，具有较好的统计代表性。尽管两站最优滞后相关程度存在一定局限，但相较小样本台风比值模型，线性回归模型的推算结果更稳健。因此，本文选用线性回归模型推算场址位置处的年最大风速，用于后续区域极值风速估算与海上风机抗风安全评估。

2.6 大风切变指数与空气密度订正

受现场观测条件制约，缺少风速垂直梯度实测资料，本文引入 Imberger et al (2024)基于频谱补偿方法、利用 ERA5 再分析数据推算的场址位置 100、150、200 m 高度的 V_{50}，并采用全局最优拟合算法对各层高度 V_{50} 进行拟合，得到场址大风条件下的风切变指数为 0.087。根据 Song et al (2016)提出的台风强度代表性判别标准，场址与台风中心的距离大多超过 30 km（图 2），处于台风外围强风影响范围；加之场址离岸距离较远，区域下垫面粗糙度整体偏低。本文推算的大风切变指数 0.087 与 Song et al (2016)针对广东沿海 A 类下垫面、台风外围强风场景推求的 0.08 相吻合，表明该取值具有合理性。

依据场址观测站实测气象资料统计夏季（台风高发期）空气密度，并联合珠海站的长序列夏季空气密度，采用长年代订正方法，将场址观测站短期实测的夏季空气密度修正至夏季长期平均状态。基于动量守恒原理（风速与空气密度的平方根成反比），计算得到场址位置夏季实际空气密度 1.160 kg·m^{-3} 与标准空气密度 1.225 kg·m^{-3} 之间的风速订正系数为 0.973。

3 场址 V_{50} 评估

本文引入多套数据源与多种风速推算方法，通过交叉验证提升推算结果的稳健性。

3.1 工程台风风场模型模拟

3.1.1 台风影响期间最大风速

依据 GB/T 38957-2020（国家市场监督管理总局和国家标准化管理委员会，2020），台风影响风险评估的核心评估范围为工程区域向外拓展 50～100 km。本文以场址位置为中心构建半径 100 km 的缓冲区，利用 ArcGIS 空间分析技术，筛选 1949—2025 年台风路径进入该缓冲区的台风，共 122 个。采用 2.1 小节所述工程台风风场模型模拟场址 10 m 高度风速，结合大风切变指数 0.087，将其推算至 150 m 高度，完成 122 个台风过程的最大风速重构（图 8）。统计分析表明，场址几乎每年都受到台风影响，但强度与频次存在年际差异：部分年份台风影响频次高、强度大，同一年内多个台风过程的最大风速均超过 25.0 m•s^{-1}，；部分年份虽有台风影响，但最大风速均未超过 15.0 m•s^{-1}。逐年提取台风影响期间的最大风速，推算

1949—2025 年场址年最大风速序列（图 8 黄色散点），其中最强的 5 个台风分别为：2018 年“山竹”（60.7 m•s^{-1}）、1954 年“艾达”（53.4 m•s^{-1}）、2025 年“桦加沙”（52.7 m•s^{-1}）、2012 年“韦森特”（49.9 m•s^{-1}）、1996 年“莎莉”（49.8 m•s^{-1}）。

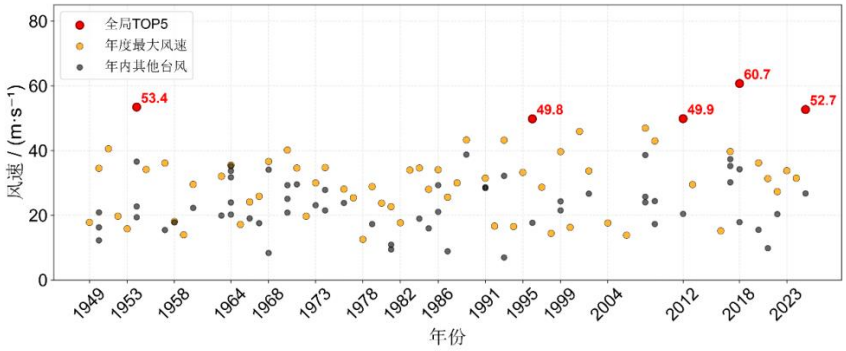


图 8 1949—2025 年进入场址 100 km 缓冲区的台风（122 个）影响期间 150 m 高度最大风速

Fig.8 Maximum wind speeds at 150 m height for 122 typhoons passing through the 100 km buffer zone of the farm site from 1949 to 2025

3.1.2 泊松-GPD 联合分布

基于重构得到的台风影响期间 150 m 轮毂高度最大风速（图 8 所有散点），分别采用 2.4 小节所述两类极值概率模型，对场址 V_{50} 进行估算与对比分析。

泊松-GPD 模型基于超阈值采样思想，能够捕捉台风风速序列的尾部特征与阈值超越规律，适合历史台风样本有限、极端事件发生频次较低场景下的极值统计推断。针对 1980-2025 年近期时段台风样本，以 28.5 m•s^{-1} 为极值筛选阈值，提取 33 个有效大风样本，通过泊松-GPD 模型拟合与参数估计，推算得到场区 V_{50} 为 56.1 m•s^{-1}（图 9）。泊松-耿贝尔复合极值模型以单场独立台风为统计单元，逐年提取全部影响场址的台风峰值风速参与拟合，方法简便，但仅利用单个年份极值信息，样本利用率较低，长重现期极值估算结果易偏低。若仅依据该模型的单一结果确定设计风速，会低估场址极端风荷载，存在工程安全隐患。

类似地，针对 1949—2025 年台风风速样本，以 31.5 m•s^{-1} 为超阈值筛选标准，得到 41 个有效大风样本，采用泊松-GPD 模型推算得到的 V_{50} 为 53.9 m•s^{-1}（图略）。该结果因包含较多弱台风样本，低估了当前气候背景下的真实风荷载水平，存在潜在安全风险。

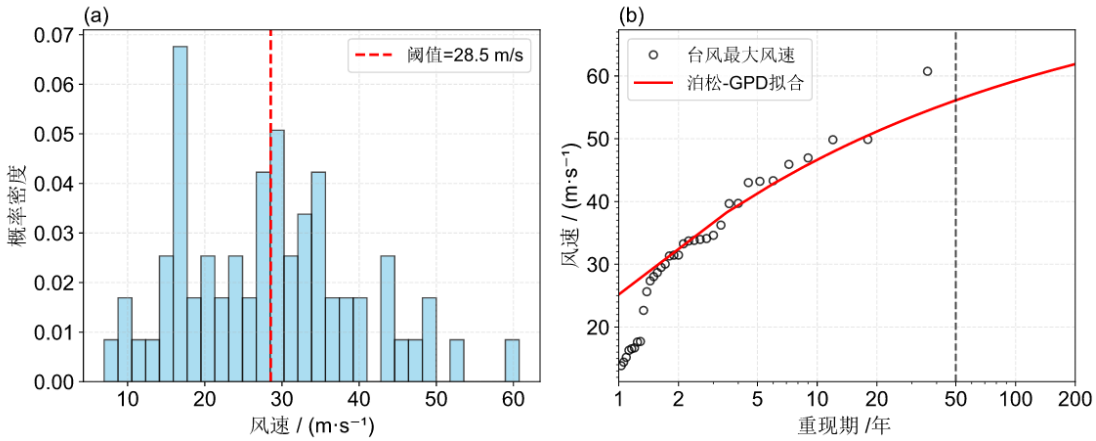


图 9 基于泊松-GPD 联合分布的 1980—2025 年场址（a）台风最大风速概率分布与（b）V_{50} 估计 Fig.9 Probability distribution and return period estimation of typhoon maximum wind speeds at the farm station based on the Poisson-GPD joint distribution from 1980 to 2025

(a) probability density of typhoon wind speeds, (b) return level plot of typhoon maximum wind speeds

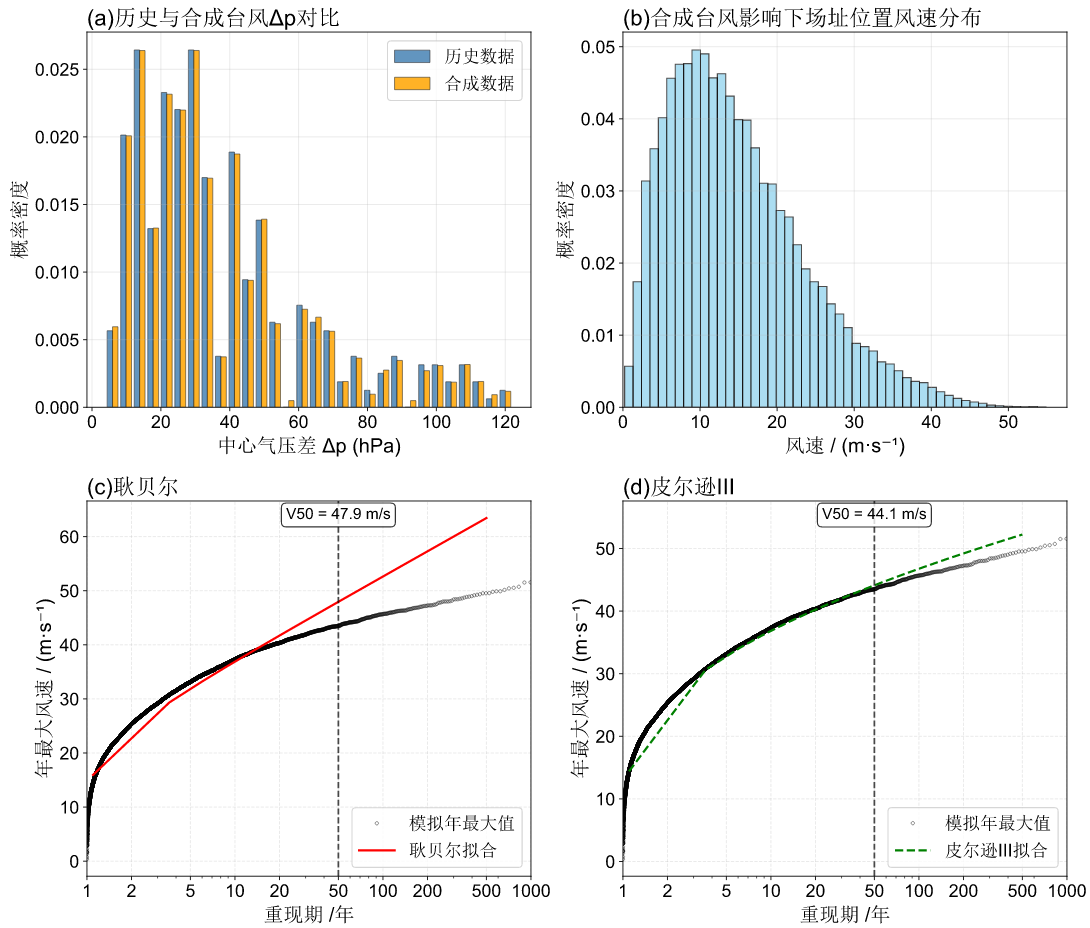
3.2 蒙特卡洛模拟

以历史热带气旋有效样本作为蒙特卡洛模拟的输入样本库，对台风关键参数进行随机抽样、概率分布拟合与数值模拟，生成时长为 10000 年的合成台风序列，计算标准空气密度条件下场址 10 m 高度处的最大风速，获得 10000 个年最大风速样本（图 10b）。

为客观评估合成风速样本的极值分布特征，选取工程领域常用的耿贝尔分布和皮尔逊 III 型分布两种极值分布模型，对 10000 个年最大风速样本进行拟合分析（图 10c 和 10d）。结果显示：两种模型在中等重现期（≤10 年）内吻合良好，在长重现期范围内皮尔逊 III 型分布推算结果略偏保守；K-S 检验表明，皮尔逊 III 型分布通过统计显著性检验，拟合结果更能反映场区台风极端风速的真实分布特征，且更贴合历史台风样本极值变化规律（图 10d）。

基于皮尔逊 III 型分布，在标准空气密度条件下，场址 10 m 高度 V_{50} 为 44.1 m•s^{-1}（图 10d），结合大风切变指数（0.087）推算得到 150 m 高度 V_{50} 约为 55.8 m•s^{-1}。针对近期时段（1980-2025 年）台风样本的对比分析显示，皮尔逊 III 型分布拟合优度依然较高，推算 150 m 高度 V_{50} 约为 55.3 m•s^{-1}，与全时段样本推算结果高度一致，佐证了蒙特卡洛模拟方法及皮尔逊 III 型分布的适用性与可靠性。

《气象学报》



注：黑点为模拟的年最大风速，红色实线为耿贝尔拟合曲线，绿色虚线为皮尔逊 III 型拟合曲线，灰色竖虚线对应 50 年重现期。

图 10 基于 1949—2025 年历史台风路径资料的场址 10 m 高度最大风速蒙特卡洛模拟（a）历史台风与合成台风中心气压差的概率密度对比；（b）合成台风影响下场址风速的概率密度分布；（c）年最大风速的耿贝尔分布拟合；（d）年最大风速的皮尔逊 III 型分布拟合

Fig.10 Monte Carlo simulation of typhoon maximum wind speeds at 10 m height at the farm station based on historical typhoon tracks from 1949 to 2025

(a) probability density comparison of central pressure difference between historical and synthetic typhoons, (b) probability density distribution of wind speeds at the farm station under synthetic typhoon impacts, (c) Gumbel distribution fitting of annual maximum wind speeds, (d) Pearson type III distribution fitting of annual maximum wind speeds

3.3 站-址相关融合台风影响

基于 2.5 小节所述参证气象站与场址观测站的大风相关模型，本文利用珠海气象站的长序列历史年最大风速，推算得到场址 64 m 高度的年最大风速序列。引入空气密度订正系数和大风切变指数，推算得到场址位置在标准空气密度下 150 m 高度的年最大风速序列（图 11 红色柱状）。将该序列与台风影响期间重构的年最大风速（图 8 橘色散点，即图 11 蓝色柱状）逐年对比，取每年二者中的较大值，构建场址 150 m 高度融合的年最大风速序列（图 11 绿线）。该序列兼顾了常规大风与台风大风过程的贡献，能够反映场址实际面临的极值风

荷载特征，与区域台风频发的气候背景相吻合。

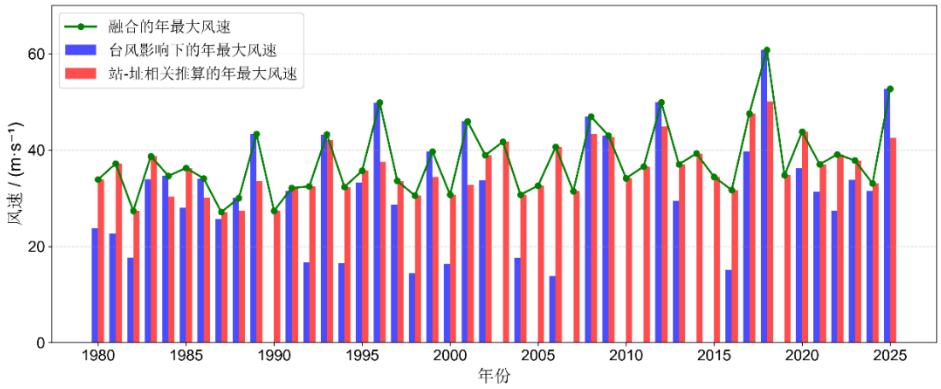


图 11 站-址相关推算的年最大风速、台风影响下的年最大风速及融合的年最大风速

Fig.11 Annual maximum wind speeds extrapolated by strong wind correlation, typhoon influence, and their fusion

基于上述 1980—2025 年共 46 年的融合年最大风速序列，采用 2.4.1 节所述的极值概率分布函数进行 V_{50} 推算。结果表明，耿贝尔分布的 V_{50} 推算结果为 55.6 m•s^{-1}，皮尔逊 III 型分布为 55.9 m•s^{-1}，两种模型均通过显著性检验且拟合优度较高（图 12）。综合工程设计保守性与极值分布适用性，在本节站-址相关融合台风影响的技术路线下，推荐采用皮尔逊 III 型分布的推算结果 55.9 m•s^{-1}，作为场址 150 m 高度 V_{50} 的推荐取值。

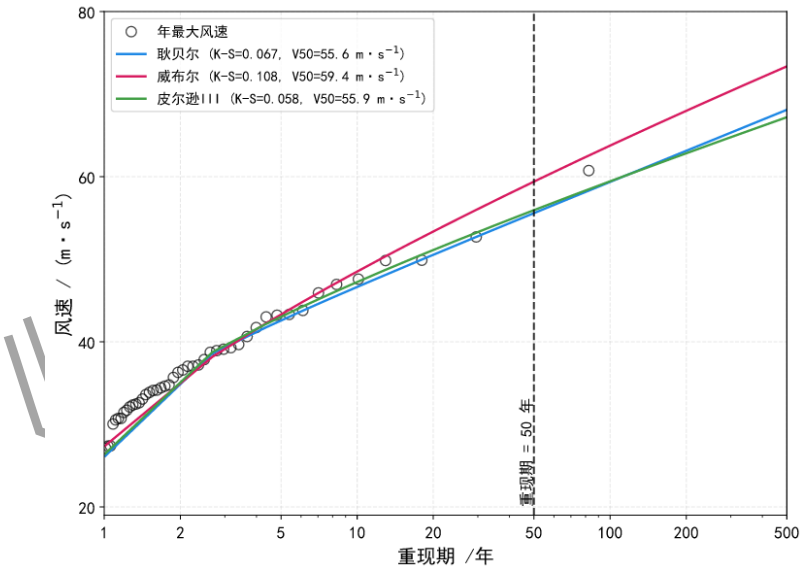


图 12 采取站-地相关与台风影响融合得到的 年最大风速序列的三种极值分布 V_{50} 拟合结果对比

Fig.12 Comparison of the V_{50} fitting results for three extreme value distribution functions

3.4 频谱补偿融合台风影响

利用 ERA5 再分析资料开展场址年最大风速重构。首先采用 2.3 节所述频谱补偿方法校正 ERA5 的高频截断偏差，还原近地层风场的真实脉动特性与极端风速水平，获得适用于极值统计的 ERA5 频谱补偿年最大风速数据。结合卫星遥感资料的偏差检验结果，对补偿后的

年最大风速进行系统偏差订正；再引入空气密度订正系数和大风切变指数，将订正后的ERA5 年最大风速推算至 150 m 高度（图 13 红色直方柱），与台风影响期间重构的最大风速（图 13 蓝色直方柱）逐年对比，取每年较大值，构建 1949—2025 年 150 m 高度兼顾常规大风与台风强风作用的融合年最大风速（图 13 绿线），以反映场区不同天气系统下的大风特征。

采用三种极值分布函数对上述融合的年最大风速序列开展拟合分析。结果表明，耿贝尔分布拟合优度最优，且通过统计显著性检验（图略），符合工程设计常规选用惯例。针对 1980—2025 年近期时段的年最大风速数据，基于该分布推算的 V_{50} 为 56.1 m•s^{-1}，与其他方法的推算结果差异较小。

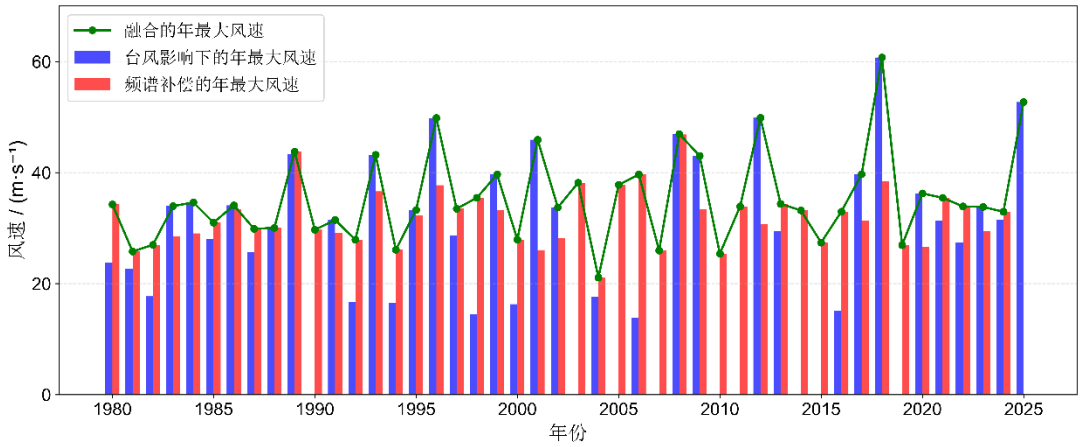


图 13 频谱补偿推算的年最大风速、台风影响下的年最大风速及融合的年最大风速

Fig.13 Annual maximum wind speeds derived from spectral correction, typhoon influence, and their fusion

3.5 综合评估及预估

3.5.1 综合评估

对上述由多套数据源、多种极值评估方法得到的 V_{50} 结果开展交叉验证与综合比对。结果表明，各方法的评估结果介于 53.9～56.1 m•s^{-1} 之间（图 14），整体离散程度处于工程合理范围，差异主要来源于极值评估方法及样本时段选取的不同。

从评估方法来看，工程台风风场模型模拟、蒙特卡洛模拟、站-址相关融合台风影响、频谱补偿融合台风影响等方法的结果整体相近，其中站-址相关融合台风影响方法综合了实测代表性与物理合理性，数据约束更全面。从时间时段来看，1980 年以来的近期序列评估结果普遍高于 1949 年以来的长序列，反映了气候背景与台风活动年代际变化的抬升作用。

综合对比数据源完备性、方法适用性及结果合理性，本文采用参证站长期观测资料、场址观测站短期资料与热带气旋最佳路径数据集相融合，结合站-址大风相关关系、工程台风风场模型及多极值分布拟合，以得到的 55.9 m•s^{-1} 作为场址 V_{50} 的最终推荐值。

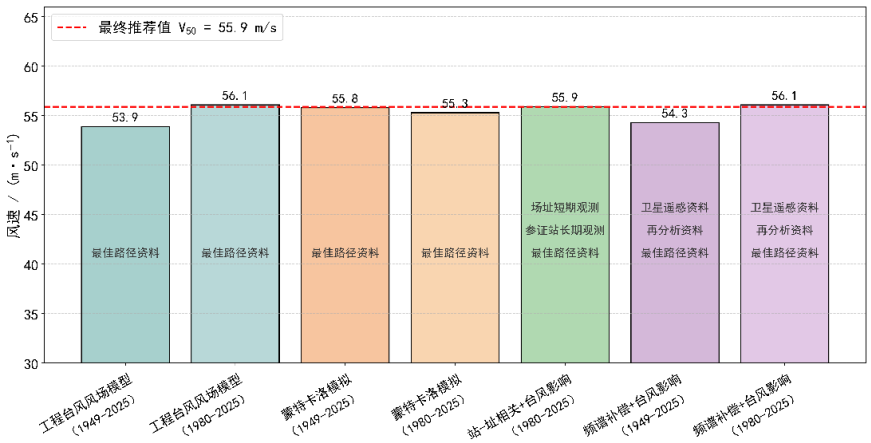


图 14 不同方法推算的 V_{50} 对比

Fig.14 Comparison of V_{50} maximum wind speeds calculated by different methods

3.5.2 趋势预估

基于 1980-2025 年融合的年最大风速，采用 30 年滑动窗口逐次计算各窗口期的 V_{50}，共获得 17 个有效样本，量化场址重现期最大风速的长期演变特征。由于有限样本条件下极值分布对序列尾部的超概率极端事件高度敏感，2012 年“韦森特”、2018 年“山竹”与 2025 年“桦加沙”等台风事件均导致 V_{50} 出现 1～2 m•s^{-1} 的跳变，其中 2018 年“山竹”影响最显著（图 15 红线）。

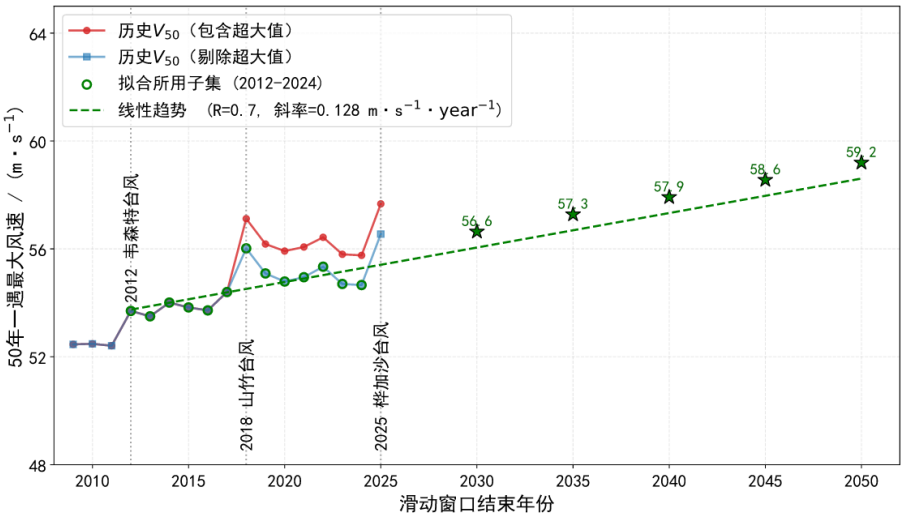


图 15 150 m 高度 V_{50} 30 年滑动窗口估算及线性趋势

Fig.15 Estimation results and linear trend of 30-year sliding window for V_{50} wind speeds at 150 m height

为降低单次超概率极端事件对趋势分析的干扰，本文开展敏感性分析，剔除 2018 年“山竹”台风个例，选取滑动窗口结束年份为 2012-2024 年的 13 个样本子集开展线性趋势分析。该子集既保留了台风强度增强的背景信号，又规避了非系统性扰动。线性拟合结果表明，场

址 V_{50} 呈上升趋势，增长速率约为 0.128 $m \cdot s^{-1}$·年（相关系数 R=0.7）。外推至 2050 年，V_{50} 预估约为 59.2 $m \cdot s^{-1}$，已超出台风型风电机组极端风速设计阈值（57.0 $m \cdot s^{-1}$），提示工程设计需关注未来极端风速风险。

上述预估结果与已有气候变化背景下极端风速变化的研究结论具有较好的一致性，本文方法的科学性及结论的可靠性可得到交叉验证。基于高分辨率气候模式与台风降尺度技术的研究表明，在高排放情景（SSP5-8.5）下，受海表温度与对流层顶温度协同增暖、垂直风切变减弱等因素驱动，我国近海热带气旋强度将明显增强，风机轮毂高度处热带气旋引起的 V_{50} 预估增幅可达 3.55~8.01 $m \cdot s^{-1}$（约 6 %～32%）（许智棋，2025）。针对中国东南沿海的多模式集合研究显示，高排放情景下，从近期（2015-2044 年）到远期（2073-2100 年），V_{50} 的区域平均增幅约为 6%（Sheng et al, 2025）。考虑海温升高的数值试验结果亦表明，南海区域海表温度每升高 2 ℃，极端风速增幅可达 4.06%～8.59%（Chow et al, 2024）。本文基于线性趋势预估的 2050 年 V_{50}（59.2 $m \cdot s^{-1}$）相较于当前水平（55.9 $m \cdot s^{-1}$）的增幅约为 3.3 $m \cdot s^{-1}$，约 6%，与上述文献预估的结果相吻合，进一步验证了本文方法的合理性与结论的参考价值。

4 结论与讨论

本文针对深远海弱探测区域重现期最大风速评估中的数据稀缺、不同方法评估结果不确定性高的难题，开展多数据源、多方法互验研究，形成以下结论：

（1）多源数据与多方法互验是深远海重现期最大风速评估的有效途径。单一数据源或单一方法虽能在特定条件下快速给出结果，但难以刻画重现期最大风速的完整特征，工程应用风险较高。本文整合场址短期实测、参证气象站长期观测、HY-2B 卫星遥感、ERA5 再分析及热带气旋最佳路径等多源数据，建立了工程台风风场模型模拟、蒙特卡洛模拟、站-址相关融合台风影响与频谱补偿融合台风影响 4 种推算方法，并以泊松-GPD、泊松-耿贝尔、耿贝尔、皮尔逊 III 型等多种极值分布交叉校核。各方法推算的 V_{50} 离散程度处于工程合理范围，表明多源资料与多方法互验能够降低评估的不确定性。

（2）基于多数据源与多方法互验的评估技术，本文推荐场址位置处 150 m 高度、标准空气密度条件下的 50 年一遇最大风速取值为 55.9 $m \cdot s^{-1}$。该取值既能覆盖历史极端台风风速场景，又兼顾工程安全性与经济性，可避免过度设计或安全隐患。

（3）从长期气候变化的动态视角来看，场址区域重现期最大风速呈增强趋势。近期时间序列的评估结果普遍高于历史更长序列；2050 年预估 V_{50} 约为 59.2 $m \cdot s^{-1}$，已超出常规台风型风电机组设计阈值。该预估结果与气候变化背景下极端风速变化的多项研究结论相互印

证，提示工程设计需关注未来极端风速风险，并在全生命周期内预留气候适应空间。

对于弱探测区域而言，多源数据支撑、多方法交叉互验是提升重现期最大风速评估稳健性、降低工程设计风险的重要技术手段，但本文所提方法仍存在以下局限：研究区缺乏轮毂高度长期连续的原位观测，场址实测序列较短，站-址相关性推算存在代表性误差，难以完全刻画局地大风的演变特征；工程台风风场采用 Batts 模型，计算效率与稳定性可满足工程评估需求，但对台风眼墙非对称结构、边界层湍流过程、海-气相互作用等物理过程的描述相对简约，在超强台风条件下的风速模拟精度仍有提升空间；仅针对场址台风外围大风工况采用单一切变指数 0.087，后续可依托实测台风样本区分眼壁、外围两类环流情景，开展分场景风切变特征研究；趋势预估仅采用历史序列线性外推，后续可结合 CMIP6 多模式气候情景与典型浓度路径开展情景分析，优化气候响应预估。

总体而言，本文在多源数据支撑、多方法交叉验证及工程应用方面开展了有益尝试，所提方法在我国东南沿海、南海及其他受热带气旋影响的区域具有推广价值，有助于提升工程气候韧性与安全保障水平。

参考文献

常蕊, 朱蓉, 尹宜舟, 等, 2019. 基于频谱补偿和数值模拟技术的江苏近海大气边界层百米高度处极端风速研究[J]. 气象学报, 77(5): 938-948. Chang R, Zhu R, Yin Y Z, et al, 2019. Estimation of offshore extreme winds at 100 m over Jiangsu province based on spectral correction and numerical simulation[J]. Acta Meteor Sin, 77(5): 938-948 (in Chinese).

陈怀怀, 殷晓斌, 冯倩, 等, 2025. 海洋二号卫星海面风场融合产品的验证分析[J]. 遥感学报, 29(12): 3448-3458. Chen H H, Yin X B, Feng Q, et al, 2025. Validation and analysis of ocean surface wind field using HY-2 satellite fusion products[J]. Natl Remote Sens Bull, 29(12): 3448-3458 (in Chinese).

陈莅佳, 徐晶, 陈丽凡, 等, 2025. 基于多源数据的爆发性气旋海上大风分布特征[J]. 应用气象学报, 36(6): 641-653. Chen L J, Xu J, Chen L F, et al, 2025. Characteristics of near-surface strong winds associated with explosive cyclones over oceans based on multi-source data fusion[J]. J Appl Meteor Sci, 36(6): 641-653 (in Chinese).

陈雯超, 刘爱君, 宋丽莉, 等, 2019. 不同强风天气系统风特性的个例分析[J]. 气象, 45(2): 251-262. Chen W C, Liu A J, Song L L, et al, 2019. Case study of wind characteristics of different strong wind systems[J]. Meteor Mon, 45(2): 251-262 (in Chinese).

国家市场监督管理总局, 中国国家标准化管理委员会, 2018. GB/T 36745-2018 台风涡旋测风数据判别规范[S]. 北京: 中国标准出版社: 1-5. State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China, 2018. GB/T 36745-2018 Specification for typhoon cyclone observational wind data differentiating[S]. Beijing: Standards Press of China: 1-5 (in Chinese).

国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会, 2020. GB/T 38957-2020 海上风电场热带气旋影响评估技术规范[S]. 北京: 中国

标准出版社: 1-9. State Administration for Market Regulation, National Standardization Administration, 2020. GB/T 38957-2020 Technical specification for effect evaluation of tropical cyclone on offshore wind power project[S]. Beijing: Standards Press of China: 1-9 (in Chinese).

国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会, 2022. GB/T 18451.1-2022 风力发电机组 设计要求[S]. 北京: 中国标准出版社: 1-128. State Administration for Market Regulation, National Standardization Administration, 2022. GB/T 18451.1-2022 Wind energy generation systems—design requirements[S]. Beijing: Standards Press of China: 1-128 (in Chinese).

黄林宏, 宋丽莉, 李刚, 等, 2016. IEC 的风机选型参数估算方法在中国的适用性研究[J]. 气象, 42(12): 1522-1530. Huang L H, Song L L, Li G, et al, 2016. Applicability of estimation methods of IEC WTGS selecting parameters in China[J]. Meteor Mon, 42(12): 1522-1530 (in Chinese).

李玉辉, 2023. 台风条件下风电场的风险评估方法研究[D]. 重庆: 重庆交通大学. Li Y H, 2023. Research on risk assessment methods for wind farm under typhoon conditions[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University (in Chinese).

逯智科, 徐万海, 王玮, 等, 2025. 台风极值风速预测研究综述[J]. 力学与实践, 47(5): 906-919. Lu Z K, Xu W H, Wang W, et al, 2025. A review of research on prediction of typhoon extreme wind speeds[J]. Mech Eng, 47(5): 906-919 (in Chinese).

孙安健, 刘小宁, 1993. 极端风速分布模式在我国各气候区域的适用性[J]. 气象, 19(10): 12-15. Sun A J, Liu X N, 1993. The adaptability of extreme wind speed distribution models in various climate regions in China[J]. Meteor Mon, 19(10): 12-15 (in Chinese).

许智棋, 2025. 气候变化背景下热带气旋演变对我国海上风电机安全性的影响[R]//第一届未来大气科学论坛论. 北京: 未来大气科学论坛理事会. Xu Z Q, 2025. Impact of tropical cyclone evolution on safety of offshore wind turbines in China under climate change[R]//The First Future Atmospheric Science Forum. Beijing: Future Atmospheric Science Forum Council (in Chinese).

张有广, 林静, 2025. 联合卫星雷达高度计和辐射计数据的海面高风速反演方法评估[J]. 海洋学报, 47(4): 65-75. Zhang Y G, Lin J, 2025. Evaluation of sea surface high wind speed inversion method using joint satellite radar altimeter and radiometer data[J]. Haiyang Xuebao, 47(4): 65-75 (in Chinese).

赵小平, 朱晶晶, 樊晶, 等, 2016. 强台风海鸥登陆期间近地层风特性分析[J]. 气象, 42(4): 415-423. Zhao X P, Zhu J J, Fan J, et al, 2016. Analysis on wind characteristics in surface layer during landfall of Typhoon Kalmaegi[J]. Meteor Mon, 42(4): 415-423 (in Chinese).

中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 2012. GB 50009-2012 建筑结构荷载规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社: 220-221. Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, 2012. GB 50009-2012 Load code for the design of building structures[S]. Beijing: China Architecture & Building Press: 220-221 (in Chinese).

Chapman-Smith K, Larsén X G, Laier Brodersen M, 2026. 50-year wind speed maps for tropical-cyclone-affected regions using best track data[J]. Wind Energy Sci, 11(5): 1889-1912.

Chow T N, Tam C Y, Chen J L, et al, 2024. Effects of background synoptic environment in controlling South China Sea tropical cyclone intensity and size changes in pseudo-global warming experiments[J]. J Climate, 37(5): 1811-1832.

Gandoin R, Garza J, 2024. Underestimation of strong wind speeds offshore in ERA5: evidence, discussion and correction[J]. Wind

Energy Sci, 9(8): 1727-1745.

Guo Y X, Hou Y J, Qi P, 2019. Analysis of typhoon wind hazard in Shenzhen City by Monte-Carlo simulation[J]. J Oceanol Limnol, 37(6): 1994-2013.

Hersbach H, Bell B, Berrisford P, et al, 2020. The ERA5 global reanalysis[J]. Q J Roy Meteor Soc, 146(730): 1999-2049.

IEC, 2019. IEC 61400‑1: 2019 Wind energy generation systems - part 1: design requirements[S]. Geneva: International Electrotechnical Commission.

Imberger M, Larsén X G, Davis N, 2024. Global atlas for siting parameters ocean and coasts - ensemble calculation of 50-year return winds[R]. Roskilde: DTU Wind and Energy Systems: 2-24.

Jho M H, Kim G H, 2025. Estimation of design wind speed in coastal areas using Monte Carlo simulation: a case study of Marado[J]. J Coastal Disaster Prev, 12(3): 119-129.

Larsén X G, Ott S, Badger J, et al, 2012. Recipes for correcting the impact of effective mesoscale resolution on the estimation of extreme winds[J]. J Appl Meteor Climatol, 51(3): 521-533.

Larsén X G, Ott S, 2022. Adjusted spectral correction method for calculating extreme winds in tropical-cyclone-affected water areas[J]. Wind Energy Sci, 7(6): 2457-2468.

Larsén X G, Davis N, Hannesdóttir Á, et al, 2022. The global atlas for siting parameters project: extreme wind, turbulence, and turbine classes[J]. Wind Energy, 25(11): 1841-1859.

Liu G B, Jiang S L, Zheng M L, et al, 2025. A global ERA5-based tropical cyclone wind field dataset enhanced by integrated parametric correction methods[J]. Sci Data, 12(1): 1429.

Sheng C, Zhang Y B, Cheng H, et al, 2025. Impact of climate change on tropical cyclone wind and wave hazards and structural reliability of offshore wind turbines along the southeast coast of China[J]. Coastal Eng, 201: 104810.

Song L L, Li Q S, Chen W C, et al, 2012. Wind characteristics of a strong typhoon in marine surface boundary layer[J]. Wind Struct, 15(1): 1-15.

Song L L, Chen W C, Wang B L, et al, 2016. Characteristics of wind profiles in the landfalling typhoon boundary layer[J]. J Wind Eng Ind Aerodyn, 149: 77-88, doi: 10.1016/j.jweia.2015.11.008.

Wang H, Zhu J H, Lin M S, et al, 2020. Evaluating Chinese HY-2B HSCAT ocean wind products using buoys and other scatterometers[J]. IEEE Geosci Remote Sens Lett, 17(6): 923-927.

Ying M, Zhang W, Yu H, et al, 2014. An overview of the China Meteorological Administration tropical cyclone database[J]. J Atmos Oceanic Technol, 31(2): 287-301.

Zhao Y N, Tao Y H, Chen Y T, et al, 2025. Increasing extreme winds challenge offshore wind energy resilience[J]. Nat Commun, 16(1): 9529.

气象学报待刊