

## 中国东南地区热带气旋大风及其伴随天气的统计特征

刘婧茹 李英 孟青 王洁

### Statistical Characteristics of Tropical Cyclone Gale and Its Accompanying Weather in Southeast China

LIU Jingru LI Ying MENG Qing WANG Jie

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.2110.21136>

#### 您可能感兴趣的其他文章 Articles you may be interested in

##### 青藏高原云团东传过程及其中中尺度对流系统的统计特征

大气科学. 2019, 43(5): 1019 <https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.1812.18167>

##### 1956~2012年浙闽登陆热带气旋降水精细化观测统计分析

Statistical Analysis of Accurate Observations of Tropical Cyclone Precipitation in Zhejiang and Fujian Provinces from 1956 to 2012

大气科学. 2018, 42(1): 16 <https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.1705.16253>

##### 西北太平洋地区热带气旋闪电活动的气候学特征及其与气旋强度变化的关系

Climatological Characteristics of Lightning Activity within Tropical Cyclones and Its Relationship to Cyclone Intensity Change over the Northwest Pacific

大气科学. 2017, 41(6): 1167 <https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.1704.17102>

##### 登陆热带气旋在鄱阳湖区的活动特征及原因分析

Characteristics of Landfalling Tropical Cyclone Activities over the Poyang Lake Basin and Mechanisms Analysis

大气科学. 2017, 41(2): 385 <https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.1605.16129>

##### 南京地区雨滴谱参数的详细统计分析及其在天气雷达探测中的应用

Comprehensive Statistical Analysis of Rain Drop Size Distribution Parameters and Their Application to Weather Radar Measurement in Nanjing

大气科学. 2019, 43(3): 691 <https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.1805.18113>

##### 春季影响江淮地区的天气尺度气旋活动与同期降水的联系

Simultaneous Relationship between Precipitation and Activities of Springtime Synoptic Scale Affecting Cyclone over the Yangtzi-Huaihe River Valleys

大气科学. 2019, 43(2): 311 <https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.1804.17294>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

刘婧茹, 李英, 孟青, 等. 2023. 中国东南地区热带气旋大风及其伴随天气的统计特征 [J]. 大气科学, 47(4): 1024–1038. LIU Jingru, LI Ying, MENG Qing, et al. 2023. Statistical Characteristics of Tropical Cyclone Gale and Its Accompanying Weather in Southeast China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 47(4): 1024–1038. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2110.21136

# 中国东南地区热带气旋大风及其伴随天气的统计特征

刘婧茹<sup>1</sup> 李英<sup>1</sup> 孟青<sup>1</sup> 王洁<sup>2</sup>

1 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京 100081

2 北京玖天气象科技有限公司, 北京 100081

**摘要** 利用 2010~2016 年中国地面站重要天气报文、中国气象局 (CMA) 热带气旋最佳路径数据集以及地面站逐小时降水资料, 对热带气旋 (TC) 影响下我国东南地区地面大风及其伴随天气特征进行统计分析, 结果表明: (1) 该区域 TC 大风主要沿海岸线分布, 至内陆频次递减; TC 大风多以东北风向为主, 登陆前大风站点居多, 12 级以上的强风速基本分布在距 TC 中心 300 km 范围内。(2) 强热带风暴 (STS) 和台风 (TY) 强度 TC 引起的站点大风最多, 但 16 级以上大风主要出现在强台风 (STY) 和超强台风 (Super TY) 强度等级。慢速 TC 引起的站点大风主要出现其移向右前侧, 快速主要出现在其右后侧。TC 大风中向岸风均值略大于离岸风, 其中 12 级以上风速向岸风站点多于离岸风, 但 16 级以上大风则是离岸风站点明显多于向岸风。(3) 约 89.8% 的 TC 大风伴随降水, 分布于 TC 中心附近, 东北风为主, 峰值出现在 8 月。约 10.2% 的 TC 大风无降水, 主要分布在 TC 外围, 北风和东南风为主, 风速较弱, 多出现于 5 月和 12 月。12 级以上 TC 大风几乎均伴随着降水, 而无降水 TC 大风风速达 12 级以上样本很少。(4) 约 23.8% 的 TC 大风伴随强对流天气, 以东北风为主, 平均风速大于非强对流 TC 大风。TC 大风伴随的强对流天气包括短时强降水和雷暴, 以短时强降水居多 (约占该类 TC 大风的 79.5%), 主要分布在 TC 中心附近东北象限, 而雷暴 TC 大风则主要出现在 TC 外围 (约占该类 TC 大风的 28.0%), 东南象限相对较少。(5) 同时出现短时强降水和雷暴的 TC 大风仅占强对流 TC 大风的 7.5%, TC 大风的 1.8%, 说明 TC 大风伴随的短时强降水中不常见雷暴现象。

**关键词** 东南地区 热带气旋大风 伴随天气 统计特征

文章编号 1006-9895(2023)04-1024-15

中图分类号 P425.4+7

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2110.21136

## Statistical Characteristics of Tropical Cyclone Gale and Its Accompanying Weather in Southeast China

LIU Jingru<sup>1</sup>, LI Ying<sup>1</sup>, MENG Qing<sup>1</sup>, and WANG Jie<sup>2</sup>

1 State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

2 Beijing Jiutian Meteorological Technology Co. Ltd, Beijing 100081

**Abstract** The China Meteorological Administration (CMA) tropical cyclone best track data and hour-by-hour precipitation data from 2010 to 2016 were used in a statistical analysis of surface gales and their accompanying weather in southeastern China under the influence of tropical cyclones (TCs), and the results show that: (1) In this region, TC gale is

收稿日期 2021-07-26; 网络预出版日期 2021-11-30

作者简介 刘婧茹, 女, 1997 年出生, 硕士研究生, 主要从事热带气旋研究。E-mail: liujingru0611@163.com

通讯作者 李英, E-mail: yli@cma.gov.cn

资助项目 国家自然科学基金项目 41930972、42005141, 国家科技部“科技助力经济 2020”重点专项 KJZLJJ 202006

**Funded by** National Natural Science Foundation of China (Grants 41930972, 42005141), Ministry of Science and Technology's "Technology Boosts Economy 2020" Special Key Program (Grant KJZLJJ 202006)

primarily dispersed along the coastline, with decreasing frequency from coast to inland; TC gale is dominated by the northeast wind direction, and the gale occurs primarily before the typhoon landfall. Strong wind speeds of magnitude 12 and higher are scattered within 300 km of the TC center; (2) TCs of tropical storm (TS) and typhoon (TY) intensity caused the most gales, while strong wind speeds of magnitude 16 and above are mainly found in the severe typhoon (STY) and super typhoon (Super TY) intensity classes. Gale induced by slow TC appears primarily on the right front side, while gale caused by quick TC appears primarily on the right rear side. The mean onshore wind speed of TC gales is slightly greater than the offshore wind speed, despite the fact that the station frequency of onshore wind is greater than that of offshore wind when the wind speed is between level 12 and level 16, and when the wind speed is above level 16, offshore wind is much greater than that of onshore wind; (3) The percentage of TC gales that are precipitation-accompanied accounts for roughly 89.8% of the total number of TC gales; these gales are primarily caused by northeasterly winds, peaking in August. About 10.2% of the TC's gales are dry, with the majority occurring at the TC's periphery with weak northerly and southeasterly winds, primarily in May and December. TC gales with wind speeds above level 12 are almost always accompanied by precipitation, while there are few samples of TC gales with wind speeds above 12 without precipitation; (4) TC gales accompanied by strong convective weather account for approximately 23.8% of the total TC gale, with northeasterly winds dominating, the average wind speed is larger than the non-strong convective TC gale; strong convective weather with short-term heavy precipitation and thunderstorms, with the majority of which is short-term heavy precipitation (approximately 79.5% of this type of TC gale), mainly distributed in the northeast quadrant near the TC center, while thunderstorm TC gale mainly appears in the periphery of TC (approximately 28.0% of this type of TC gale), of which there are relatively few in the southeast quadrant. (5) TC gale with both short-term heavy precipitation and thunderstorms accounts for only 1.8% of the total TC gale and 7.5% of strong convective TC gale, indicating that thunderstorms are not common in TC gale with short-term heavy precipitation.

**Keywords** Southeast China, Tropical cyclone gale, Accompanying weather, Statistical characteristics

## 1 引言

热带气旋 (TC) 作为中心气压极低的涡旋具有强大的气压梯度和旋转力, 能引起极大的风速, 是 TC 致灾的主要因素之一 (梁必骥等, 1995)。根据《天气预报业务规范》, TC 影响下 10 min 平均风速  $\geq 10.8 \text{ m s}^{-1}$  (6 级) 或 2 min 平均风速  $\geq 17.2 \text{ m s}^{-1}$  (8 级) 即定义为 TC 大风。登陆我国的 TC 约 89% 会引起大风过程 (杨玉华和雷小途, 2004); 而广东沿海 95% 的 8 级以上大风都是由 TC 造成的, 历史极大风速更是 100% 来自 TC 天气 (宋丽莉等, 2004)。20 世纪 80 年代后, 虽然 TC 大风频率呈下降趋势 (Ni et al., 2015), 但在全球变暖的气候条件下, 超级台风的频数增多, 这可能会导致其引发的极端大风频次增加 (Chen et al., 2020)。

TC 大风的影响因子复杂。一方面由于  $\beta$  效应以及环境气压形势等因素 (Powell, 1987; Chan et al., 2004; Zhang et al., 2013), TC 环流内地面和低空风场表现出不对称性, 最大风速一般位于 TC 前进方向的右侧 (Uhlhorn et al., 2014; Klotz and Jiang, 2016); 另一方面是复杂下垫面的影响。下垫面摩

擦 (Shapiro and Willoughby, 1982; 陈德花等, 2018)、山脉阻挡绕流 (綦昕瑶和高路, 2020)、狭管效应、喇叭口效应 (高珊等, 2012; 盛春岩等, 2014) 等, 均能影响 TC 大风的强度和分布。如, 地形影响下 TC 可能出现中心填塞的空心结构 (郭达烽等, 2017), 使 TC 大风分布在其外围。此外, TC 在与中纬度天气系统相互作用的变性过程中风场结构也会发生显著变化 (王佳琪和李英, 2019)。

登陆过程中不仅 TC 大风结构复杂变化, 其伴随的天气也不尽相同, 可出现降水或无降水或是伴随不同强对流天气等。陈联寿等 (2004) 指出 TC 在周围环流 (高空槽、冷涡等系统) 作用下生成的对流系统 (雷暴、龙卷、飚线等) 和中小尺度涡旋、地形次生中心等均可在局部地区产生强对流天气。中小尺度对流天气系统的产生、发展和卷入有时又会促进 TC 发展, 对 TC 大风产生影响 (周海霞和刘春霞, 2014)。TC 强对流大风不仅出现在 TC 内核附近, 还常在其边缘或外围出现, 如 TC 前部龙卷 (Morotomi et al., 2020), TC 前沿 300-500 公里出现的飚线 (Meng and Zhang, 2012) 等。台前飚线过境时风向突变, 风速增大近一倍, 风层厚度伸展至对流层上部 (陈永林等, 2009)。而 TC 外

围的强风通过加强低层风切变, 增加水汽输送, 可为强对流的发展积累对流不稳定能量 (Zheng et al., 2016)。另一方面, 大部分 TC 大风伴随着降水。降水导致的下沉气流可将自由大气中的高速空气注入边界层产生下击暴流, 至地面扩散从而导致地表风速的增强 (Parrish et al., 1982; Caracena and Maier, 1987)。螺旋雨带作为 TC 结构的核心降水区域, 不仅可通过潜热释放的正反馈机制导致风场的外扩 (Xu and Wang, 2010), 还会影响横跨最大风速半径的水平压力梯度从而改变风速大小 (Wang, 2009)。同时, 登陆台风的风场环境也会影响降雨, 最大风速的不同会造成降雨的强度和范围不同 (程正泉等, 2009)。

由此可见, TC 登陆过程中与下垫面和环境不同环流系统的相互作用, TC 大风及其伴随天气复杂多变, 其致灾机理也不尽相同, 而目前相关研究不多。我国东南地区频受 TC 影响, 本文拟对该区域 TC 大风及其伴随天气特征进行统计分析, 以增强和提高 TC 影响下地面大风及其不同天气特征的认识和预报水平。

## 2 数据与方法

我国东南地区大致选取范围 (15°N~35°N, 105°E~123°E), 包括江苏、安徽、上海、浙江、福建、江西、广东、广西、海南几个省份以及河南、

湖北、湖南的部分地区。采用 2010~2016 年 3 小时一次的中国地面站重要天气报文和 CMA 热带气旋最佳路径数据集 (Ying et al., 2014; Lu et al., 2021), 提取 TC 大风及其天气现象以及 TC 信息。重要天气报文包括站点的经纬度、海拔高度、2 min 平均达到 17 m s<sup>-1</sup> 以上的风速值、风向, 以及雷暴、远电、冰雹等强对流天气的信息。共涉及 703 个地面站 (包括自动站, 图 1a)。由于海拔较高的测站中常年有大风记录, 容易与强对流大风混淆, 因此首先剔除重要天气报文中 20 个海拔 600 m 以上高山站, 保留 683 个站点进行统计。将 6 小时一次的 CMA 热带气旋最佳路径位置插值为 3 小时, 引用梁莉等 (2018) 对我国登陆热带气旋引起的大陆地面风场分布特征工作中的提取依据, 定义距离气旋中心 500 公里内的地面大风为 TC 大风。

对 TC 大风风速风向分布特征讨论中: 引起大风的 TC 依据《热带气旋等级》国家标准分为热带低压 (TD, 正点前 2 min 至正点内的平均风速 10.8~17.1 m s<sup>-1</sup>, 下同)、热带风暴 (TS, 17.2~24.4 m s<sup>-1</sup>)、强热带风暴 (STS, 24.5~32.6 m s<sup>-1</sup>)、台风 (TY, 32.7~41.4 m s<sup>-1</sup>)、强台风 (STY, 41.5~50.9 m s<sup>-1</sup>)、超强台风 (Super TY, 大于或等于 51.0 m s<sup>-1</sup>) 六种等级。根据 TC 路径插值后 3 小时移动总距离与时间之比得每小时移动平均距

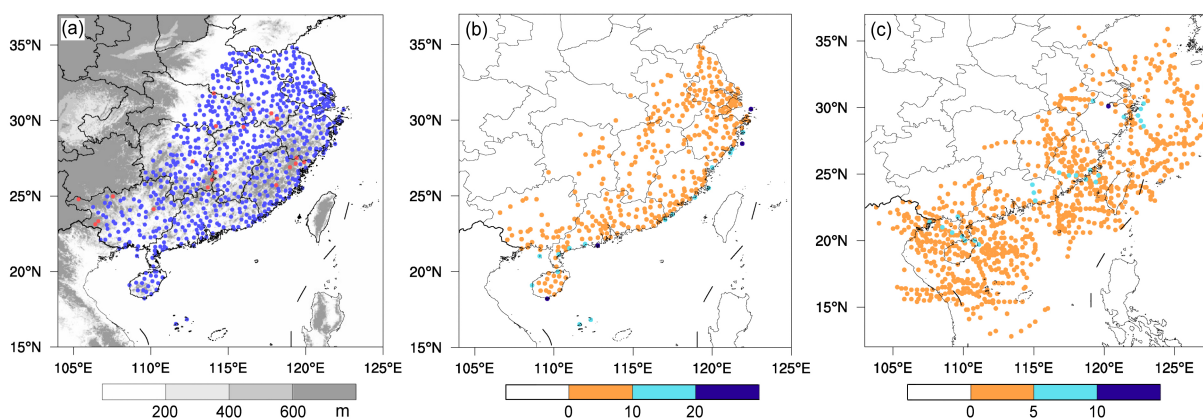


图 1 (a) 东南地区 703 个国家地面站分布 (填色表示海拔高度, 蓝色圆点为海拔 600 m 以下的站点, 红色圆点表示海拔大于或等于 600 m 的高山站点); 2010~2016 年 (b) 各站点 (圆点) 热带气旋 (TC) 大风年均频次分布和 (c) 引起大风的 TC 中心 (圆点) 位置地理分布, 圆点的颜色代表不同频次

Fig. 1 (a) Distributions of 703 national ground stations in the southeast region of China (filled color indicates altitude, blue dots are stations below 600 m above sea level, red dots indicate high mountain stations with an altitude greater than or equal to 600 m); geographical distributions of (b) the average annual frequency of TC (Tropical Cyclone) gales at each station and (c) the location of TC causing gale from 2010 to 2016, with the color of the dots representing different frequencies

离，即为 1 小时平均移动速度。将东南地区海岸线大致视为东西向（广东、广西）、东北—西南向（福建、浙江）、南北向（江苏、上海），其中内陆省份江西、湖南的识别标准以临近省份福建为参考，河南、安徽和湖北以江苏省为参考，识别海洋吹向陆地的向岸风和陆地吹向海洋的离岸风。

再根据重要天气报文中提取出的天气记录和地面观测逐小时降水资料对 TC 大风伴随的天气现象进行分类：将 TC 大风同时观测到雷暴、冰雹等强对流天气以及过去三小时内 1 小时降水量大于或等于 20 mm 的短时强降水定义为强对流伴随 TC 大风；根据过去三小时降水情况将 TC 大风分为伴随降水 TC 大风和无降水 TC 大风。

### 3 东南地区热带气旋大风总体特征

#### 3.1 时空分布

图 1b 和 c 分别给出 2010~2016 年中国东南地区站点观测的 TC 大风年均频次地理分布以及引起大风的 TC 中心分布，可见 TC 大风站点分布主要沿着海岸线，沿海至内陆递减，这与杨玉华和雷小途（2004）研究结果相似。2010~2016 年间年均频次大于 20 次的站点都出现在海南、广东和浙江沿岸，其中年均最高频次 27 次的站点位于海南三亚站，而内陆的站点多为 10 次以下。引起大风 TC 中心位置（图 1c）也主要集中在沿海，登陆前

居多，三块频发区分别位于海南岛附近、广东福建沿岸和浙江沿岸。其中引起站点大风频次最多的 TC 是 2012 年在浙江省登陆的台风“海葵”，影响期间已减弱为强热带风暴级别。

#### 3.2 风速特征

图 2a 给出 TC 大风各站点相对 TC 中心的风速分布，圆心为 TC 中心，各个圆点代表各站点相对 TC 中心的位置，圆点大小和颜色深浅都表示风速的大小。可见站点 TC 大风风速与其距 TC 中心距离呈负相关关系，随距离的增大而逐渐减小，较大风速区域出现在距 TC 中心 300 km 范围内，其中风速大于  $33 \text{ m s}^{-1}$ （12 级）的站点（红点）基本分布在 300 km 圈内，西南象限较少，而  $51 \text{ m s}^{-1}$ （16 级）的站点（共 16 个站次，紫色）均分布在距离 TC 中心 200 km 的圈内，最小距离为 3.1 km。

图 2 分别给出 2010~2016 年间各站点 TC 大风风速均值（图 2b）和极大值（图 2c）的分布，可以看出 TC 大风风速均值主要在  $17\sim 25 \text{ m s}^{-1}$ （8~10 级）之间，但广东雷州半岛多个站点以及福建、广西个别站点风速均值可达  $25 \text{ m s}^{-1}$ （10 级）以上；图 2c 中 TC 极大风速值由沿海向内陆递减， $33 \text{ m s}^{-1}$  以上的风速极大值主要出现海岸线上，其中大于  $51 \text{ m s}^{-1}$ （16 级）以上的风速出现在浙江、广东沿海， $53 \text{ m s}^{-1}$  的最强极大风速出现在浙江大陈站和广东汕尾站。其余靠近内陆的站点 TC 风速

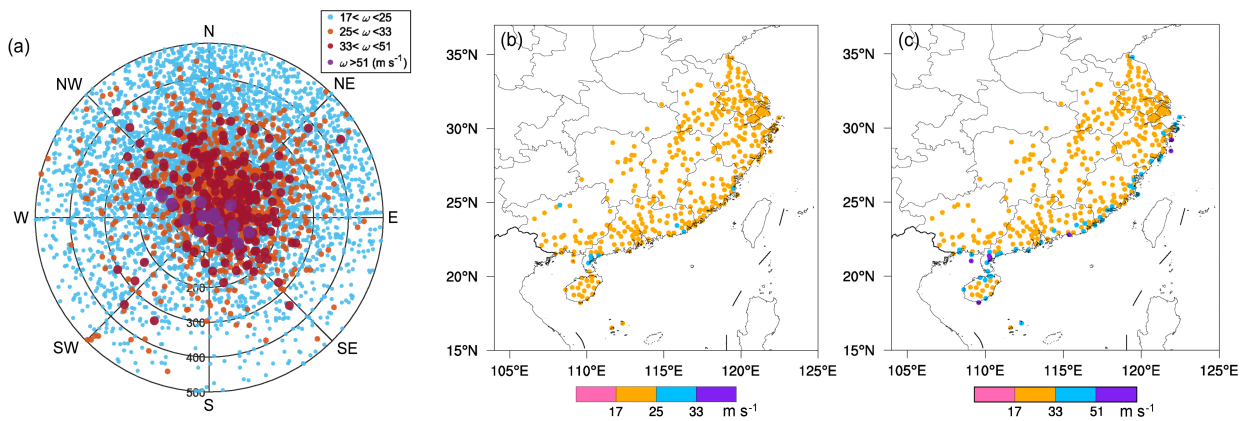


图 2 2010~2016 年 (a) TC 大风相对 TC 中心的风速分布，圆点大小及颜色深浅代表风速大小（单位： $\text{m s}^{-1}$ ），由里至外各圈代表站点与 TC 中心的距离（每圈 100 km，下同）；各站点（圆点）TC 大风风速 (b) 均值和 (c) 极大值分布，颜色深浅代表各站点风速大小（单位： $\text{m s}^{-1}$ ）， $17 \text{ m s}^{-1}$ 、 $25 \text{ m s}^{-1}$ 、 $33 \text{ m s}^{-1}$  和  $51 \text{ m s}^{-1}$  分别对应 8、10、12、16 级风力

Fig. 2 (a) Wind speed distributions of TC gale relative to TC center from 2010 to 2020; the size of the dots and color shades represent the magnitude of wind speed (units:  $\text{m s}^{-1}$ ); each circle from inside to outside represents the distance between the station and TC (100 km per circle), the same below. Distributions of (b) mean and (c) maximum TC gale wind speed at each station (dots), with the color shades representing the magnitude of wind speed,  $17 \text{ m s}^{-1}$ ,  $25 \text{ m s}^{-1}$ ,  $33 \text{ m s}^{-1}$ , and  $51 \text{ m s}^{-1}$  corresponding to 8, 10, 12, and 16 wind force

极大值均在  $17\sim 33\text{ m s}^{-1}$  之间。

图 3 显示不同强度等级 TC 引起的站点大风相对 TC 中心的分布 (图 3a-c) 以及相应 TC 中心的地理位置 (图 3d-f)。如图 3a 所见, TC 为弱于 TD、TD 和 TS 强度时多引起 12 级以下大风 (蓝色和橙色圆点), 高频区位于 TC 东侧, 大于  $25\text{ m s}^{-1}$  (10 级) 风速值 (橙色和红色圆点) 主要出现在台风环流东部  $300\text{ km}$  范围内, 最强可达  $35\text{ m s}^{-1}$ 。此时 TC 处于登陆后阶段强度一般减弱 (图 3d), 引起的大风风速也较弱。STS 和 TY 强度级别 TC 引起的站点大风主要出现在 TC 北侧, 尤其是东北部, 12 级以上大风多出现在 TC 中心东北象限和东南象限  $200\text{ km}$  范围内 (红色和紫色圆点), 东北象限多于东南象限, 16 级以上大风 (紫色圆点) 分布在 TC 中心附近右侧  $100\text{ km}$  范围内 (图 3b)。根据海岸线走向即为 TC 前进方向的右侧, 北半球台风前进方向的右侧, 即台风与副高之间的气压梯度密集区, 在此侧台风大风的强度较强。此时 TC 中心大部分分布在海上, 少部分在近海岸的陆地

(图 3e), 故 TC 东南侧能观测到大风的站点明显减少。STY 和 Super TY 等级 TC 引起的大风基本出现在 TC 北侧, 尤其是西北侧, 东南侧大风最少 (图 3c), 这与此时 TC 中心几乎都位于海上, 东南侧站点观测稀少有关 (图 3f)。STY 和 Super TY 等级 TC 引起站点 16 级以上大风 (紫色圆点) 的频数最多, 主要集中在 TC 中心  $100\text{ km}$  以内西北和东南侧。

如图 4 给出引起大风的不同移速 TC 与站点大风的相对位置分布 (图 4a-c) 以及相应 TC 中心地理位置 (图 4d-f)。TC 平均移动速度分别为小于  $15\text{ km h}^{-1}$ 、移动速度大于  $15\text{ km h}^{-1}$  但小于  $25\text{ km h}^{-1}$  和移动速度大于  $25\text{ km h}^{-1}$  三种情况。TC 移动速度小于  $15\text{ km h}^{-1}$  时所引起 12 级以上大风 (红色和紫色圆点) 主要分布在 TC 环流西北象限 (图 4a), TC 移动方向的前侧。此时 TC 中心位置分布相对集中 (图 4d), 海上多于陆地。引起大风 TC 移速在  $15\sim 25\text{ km h}^{-1}$  之间的偏多 (图 4b), 此时 12 级以上大风多分布在 TC 环流北侧  $300\text{ km}$  范围内,

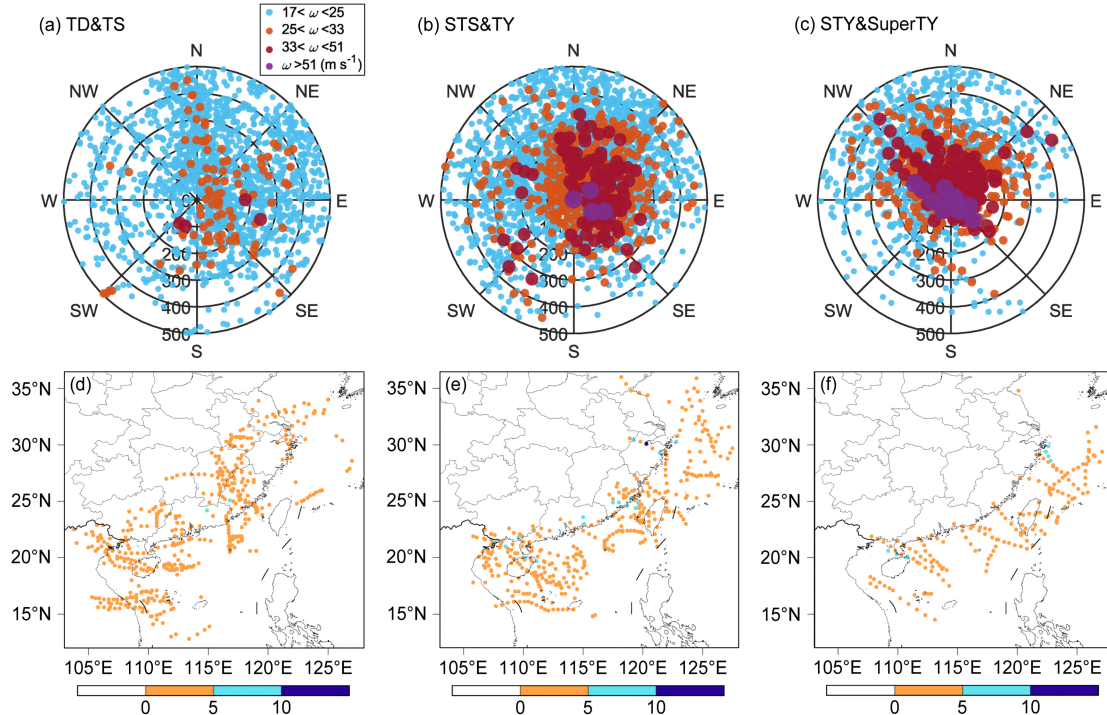


图 3 2010~2016 年不同强度等级时 TC 大风站点相对 TC 中心位置的风速分布 (第一行, 填色, 单位:  $\text{m s}^{-1}$ ) 以及引起大风的 TC 中心 (圆点) 位置地理分布 (第二行, 圆点的颜色代表不同频次): (a、d) 弱于热带低压 (TD)、TD 和热带风暴 (TS); (b、e) 强热带风暴 (STS) 和台风 (TY); (c、f) 强台风 (STY) 和超强台风 (Super TY)

Fig. 3 Wind speed distributions of a TC gale relative to the TC center (top line, shaded, units:  $\text{m s}^{-1}$ ) and the locations of TC causing gales (bottom line, the color of the dots representing different frequencies) at different intensity levels from 2010 to 2016: (a) Weaker than tropical depression (TD), TD, and Tropical storm (TS); (b) Severe tropical storm (STS) and typhoon (TY); (c) severe typhoon (STY) and super typhoon (Super TY)

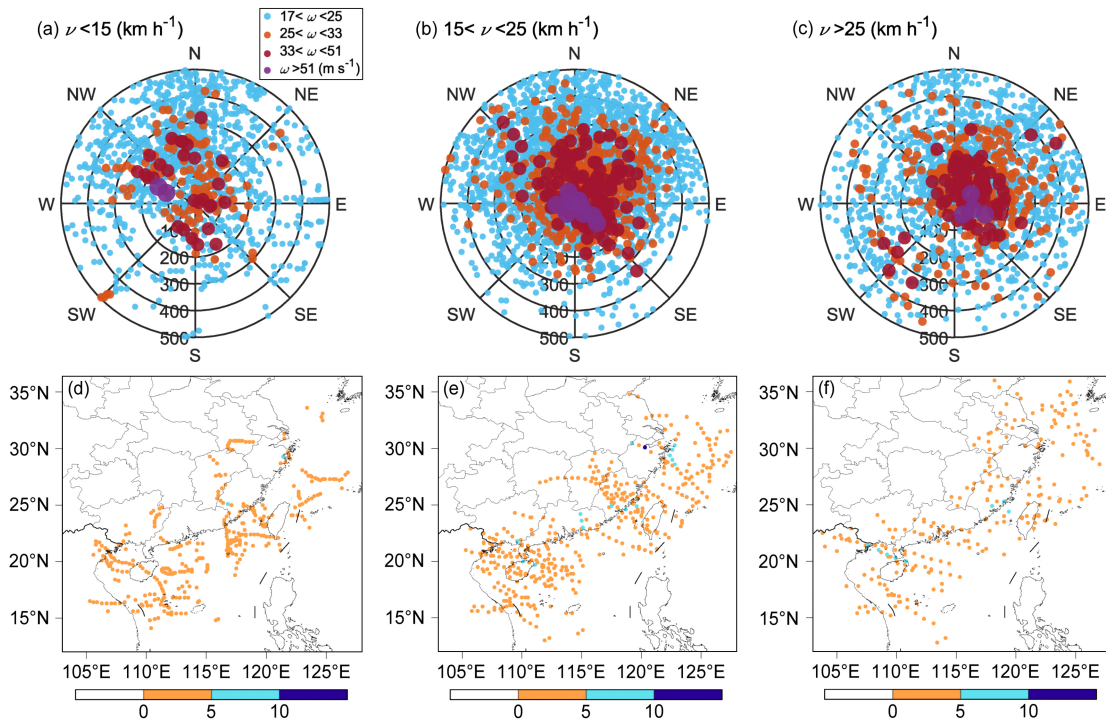


图 4 2010~2016 年 TC 不同移动速度时 TC 大风站点相对 TC 中心位置的风速分布（第一行，填色，单位： $\text{m s}^{-1}$ ）以及 TC 中心（圆点）位置地理分布（第二行，圆点的颜色代表不同频次）：（a、d）小于或等于  $15 \text{ km h}^{-1}$ ；（b、e）大于  $15 \text{ km h}^{-1}$  且小于或等于  $25 \text{ km h}^{-1}$ ；（c、f）大于  $25 \text{ km h}^{-1}$

Fig. 4 Wind speed distributions of TC gale relative to TC center (top line, shaded, units:  $\text{m s}^{-1}$ ) and the location of TC causing gales (bottom line, the color of the dots represent different frequency) when TCs move at different speeds from 2010 to 2016: (a, d) Less than or equal to  $15 \text{ km h}^{-1}$ , (b, e) greater than  $15 \text{ km h}^{-1}$  and less than or equal to  $25 \text{ km h}^{-1}$ , (c, f) greater than  $25 \text{ km h}^{-1}$

在 TC 移动方向的右侧和前侧。对应 TC 中心位置海上和陆地均有，陆地上福建省最多（图 4e）。当 TC 移动速度大于  $25 \text{ km h}^{-1}$  时（图 4c），12 级以上大风主要出现在相对 TC 中心东北侧 100 km 范围内，其移动方向的右侧。此时 TC 分布广泛（图 4f）。快速移动 TC 受副高引导气流影响明显，强风位置与 TC 和副高之间较大的气压梯度力有关。

### 3.3 风向特征

图 5 显示相对 TC 不同方位 TC 大风风向特征。当站点位于 TC 西北方向（图 5a）时，TC 大风风向主要是偏北风，其中东北风占所有风向的比例超过 40%，其次是北风和西北风，分别占约 20%；位于东北方向时则是偏东风向占主导，东北风多于东南风（图 5b）；位于西南方向时主要是偏西风，西北风比例略多于西南风（图 5c）；位于东南方向时几乎都为偏南风，东南风和西南风分布均匀（图 5d）。当站点位于 TC 东北和西南方向或是东南和西北方向时，TC 引起的台站地面风向几乎相反，这主要是与 TC 的逆时针涡旋环流影响有关。

研究表明（陈燕和张宁, 2019），海陆分布明显影响风阵性特征，一般来说，离岸风的湍流强度明显大于向岸风。2010~2016 年 TC 大风的离岸风（图 6a）和向岸风（图 6b）风速分布如图所示，东南地区离岸风主要出现在 TC 中心西北和西南侧，风速平均值约为  $21.13 \text{ m s}^{-1}$ 。向岸风主要分布于 TC 东北侧，均值约为  $21.35 \text{ m s}^{-1}$ ，略大于离岸风。其中  $25 \text{ m s}^{-1}$ （12 级）以上风速（橙色和红色标记）向岸风多于离岸风，但  $51 \text{ m s}^{-1}$ （16 级）以上风速（紫色标记）则主要是离岸风（12 个样本），而向岸风仅 1 个样本。

## 4 台风大风伴随天气现象分类特征

图 7a 和 b 分别给出伴随降水和强对流天气的 TC 大风占比情况。伴随降水过程的 TC 大风占比约为 89.8%（图 7a，深蓝色和浅蓝色），其中一小时降水量大于或等于  $20 \text{ mm}$  的短时强降水（深蓝色）占 TC 大风总数比例约为 18.9%，约占降水 TC 大风的 21.1%，无降水 TC 大风仅占总数的

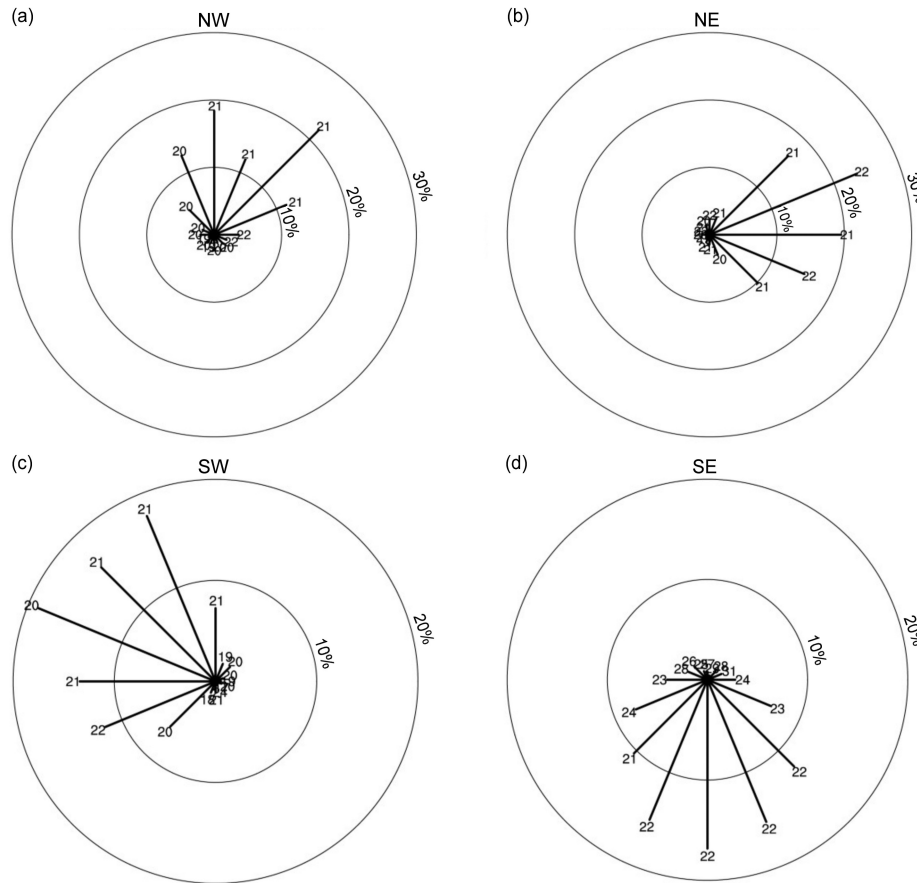


图 5 2010~2016 年台站位于 TC (a) 西北 (NW)、(b) 东北 (NE)、(c) 西南 (SW) 和 (d) 东南 (SE) 不同方位时大风风向十六分位频数分布。图中线段所指方位为风向, 线段末端数字为风速均值, 线段长度代表该风向所占比例, 各圈数字代表比例大小 (下同)

Fig. 5 Frequency distributions of the sixteenth quantile of wind direction when the station is located in different orientations of TC (a) northwest (NW), (b) northeast (NE), (c) southwest (SW), and (d) southeast (SE) from 2010 to 2016, where the orientation indicated by the line segment is the wind direction, the number at the end of the line segment is the mean wind speed, the length of the line segment represents the proportion of that wind direction, and the number of each circle represents the proportion size (the same below)

10.2% (灰色), 说明大部分 TC 大风与其降水一般同时出现, 仅有大风出现的情况较少。

图 7b 显示 TC 大风中伴随强对流天气情况, 深绿色表示 TC 大风中仅伴随雷暴天气, 橙色表示 TC 大风中仅伴随短时强降水天气, 浅绿色则表示两者皆有。表 1 给出伴随各类强对流天气的 TC 大风占比, 可以看出 TC 大风中大概有 23.8% 的情况伴随强对流天气, 伴随的强对流天气中以短时强降水居多 (约占该类 TC 大风的 79.5%), 占 TC 大风总数约 18.9% (橙色加浅绿)。伴随雷暴的强对流 TC 大风较少 (约占该类 TC 大风的 28.0%), 占 TC 大风约 6.7% (深绿加浅绿)。同时出现雷暴和短时强降水 (浅绿色) 的 TC 大风仅占有 TC 大风的 1.8%, 占强对流 TC 大风的 7.5%, 说明 TC 大风伴随的短时强降水中出现雷暴是小概率

表 1 伴随各类强对流天气的 TC 大风占比

Table 1 Proportion of TC gales accompanying various types of strong convective weather

TC大风种类	占有所有TC大风比例	占伴随强对流TC大风比例
伴随短时强降水TC大风	18.9%	79.5%
伴随雷暴TC大风	6.7%	28.0%
伴随短时强降水和雷暴TC大风	1.8%	7.5%

事件。统计中未发现 TC 大风有冰雹、龙卷等其他强对流天气。本文统计所用天气记录来自于国家标准站 3 小时一次的观测, 时空分辨率较粗, 对龙卷、冰雹等中小尺度天气可能未能完全记录。

#### 4.1 时间变化

图 8 显示伴随强对流天气以及降水 TC 大风频次及其占比的时间变化。年变化 (图 8a) 可以看

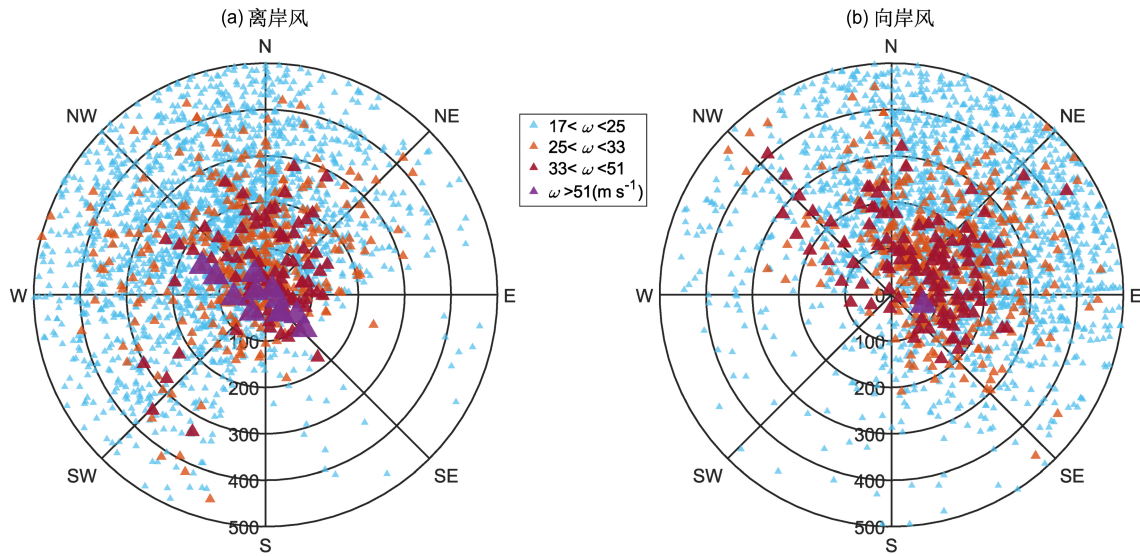


图 6 2010~2016 年 TC 大风中 (a) 离岸风和 (b) 向岸风风速等级距 TC 中心相对位置, 三角形大小及颜色深浅代表风速大小 (单位:  $m s^{-1}$ ), 圆圈代表站点与 TC 中心的距离 (每圈 100 km)

Fig. 6 Relative position of (a) offshore wind and (b) onshore wind speed levels of TC gales from 2010 to 2016. The size of the triangle and color shades represent the magnitude of wind speed (units:  $m s^{-1}$ ); the circle represents the distance between the station and TC (100 km per circle)

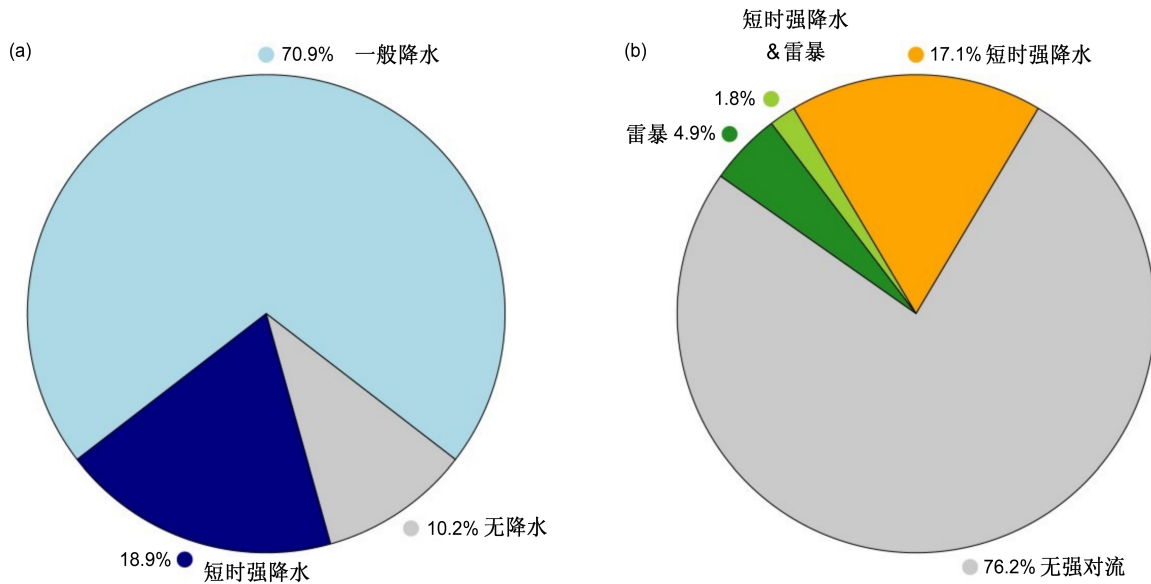


图 7 2010~2016 年 (a) 伴随降水 TC 大风占比饼状图, 浅蓝色表示一小时降水量小于 20 mm, 深蓝色代表一小时降水量大于或等于 20 mm 的短时强降水, 灰色代表无降水; (b) 伴随各类强对流天气 TC 大风的占比饼状图, 深绿色代表仅雷暴天气, 浅绿色代表雷暴和短时强降水同时发生, 橙色代表仅短时强降水天气, 灰色代表无强对流天气

Fig. 7 (a) Pie chart of the proportion of TC gale accompanied by precipitation from 2010 to 2016, light blue represents one-hour precipitation less than 20 mm, dark blue represents short-term heavy precipitation with one-hour precipitation greater than 20 mm, and gray represents no precipitation. (b) Pie chart of the proportion of TC gale accompanied by various types of strong convective weather from 2010 to 2016, dark green represents only thunderstorm weather; orange represents only short-term heavy precipitation weather, and light green represents thunderstorms and short-time heavy precipitation at the same time, and gray represents no strong convective weather

出, 伴随降水 TC 大风 (绿色) 频数最多, 年均频次约为 1.05 站次, 近年来呈现出增加的趋势。[竺](#)

[夏英和宋文玲 \(2017\)](#) 研究表明, 2016 年赤道西太平洋及暖池区海温偏高导致台风活动频繁, 给华

南到江淮一带带来了异常多的降水。气候变化影响下, 台风降水的频次增加可能会导致伴随降水 TC 大风频次的增加, 该类大风占 TC 大风总数的比例可见 (图 8c), 除 2010 年 64% 和 2011 年 83% 以外, 其他各年均达 90% 以上, 其中伴随短时强降水 (深蓝色) TC 大风年均频次约为 0.11 站次, 2014 年占比最多, 达 33%。月变化 (图 8b) 显示, 尽管东南地区全年均可能受 TC 影响, 但统计期间仅 5~12 月份出现 TC 大风, 其频数从 5 月开始逐月递增, 到 8 月达到峰值, 9 月之后递减, 主要集中在 7~10 月份。有降水的 TC 大风 (绿色) 频次峰值出现在 8 月。如图 8d 所示, 8~10 月有降水

TC 大风占有所有 TC 大风的比例都达到 90% 以上, 其中 9 月占比最高 94%; 短时强降水 TC 大风 (图 8d 深蓝色) 7~10 月在 TC 大风中的占比都在 20% 左右, 其中 11 月最高为 28%。无降水 TC 大风多出现在 5 月和 12 月, 分别占有所有 TC 大风的 25% 和 33%。这两个月份均未出现伴随短时强降水。

伴随强对流天气的 TC 大风年均频次约为每个站点 0.13 次, 尽管该类 TC 大风总频次在 2016 年最多 (图 8a 橙色), 但却在 2014 年占有所有 TC 大风比例最高, 达到总数的 41% (图 8e)。月变化趋势特征与伴随降水 TC 大风类似, 频次也以 8 月、

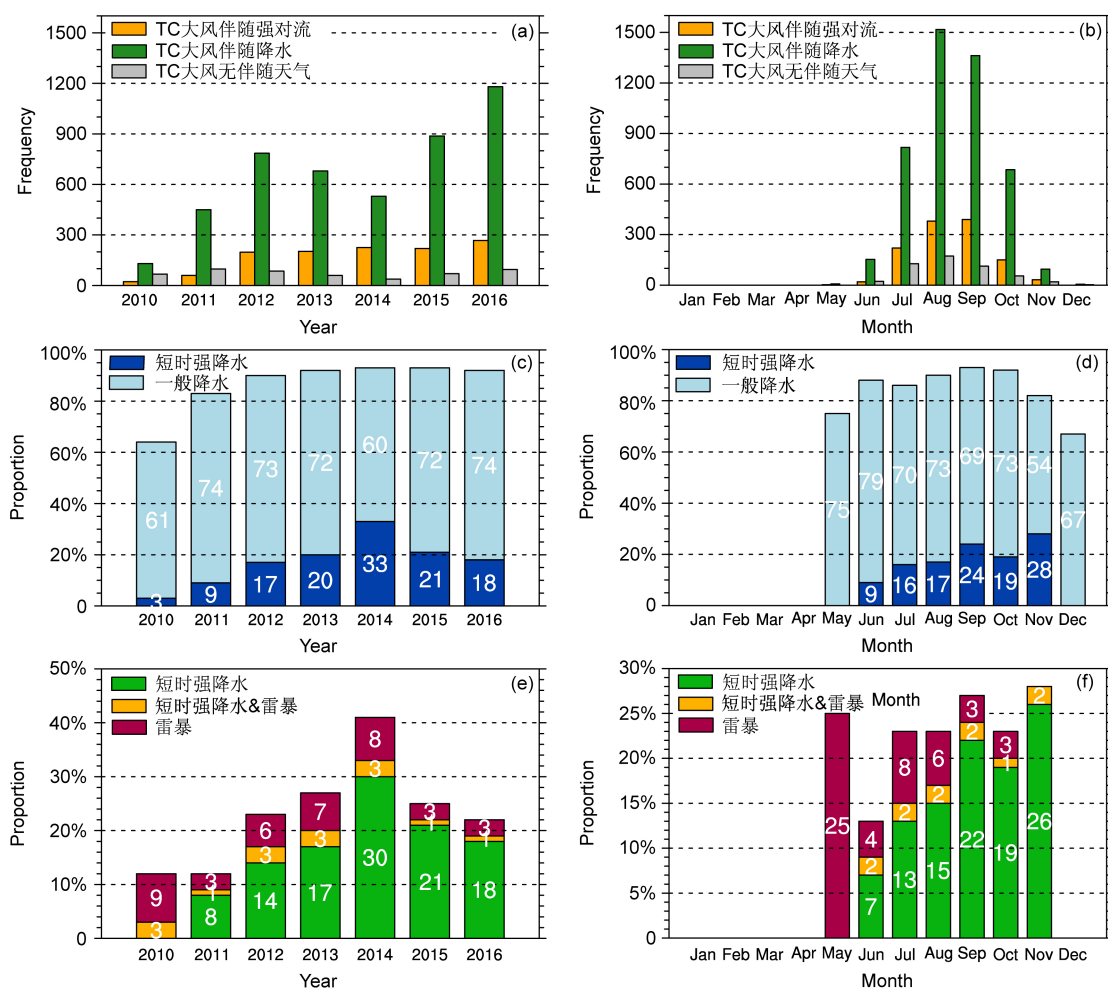


图 8 2010~2016 年伴随降水 (绿色)、伴随强对流 (橙色) 和无伴随天气 (灰色) TC 大风频次的 (a) 年变化和 (b) 月变化; 伴随降水 TC 大风占有所有 TC 大风总数比例的 (c) 年变化和 (d) 月变化; 伴随短时强降水 (绿色)、雷暴 (红色) 以及两者并存 (黄色) TC 大风占有所有 TC 大风总数比例的 (e) 年变化和 (f) 月变化。图中柱上的数字为百分数值

Fig. 8 (a) Annual and (b) monthly changes in the frequency of TC gales with precipitation (green), TC gales with strong convection (orange) and TC gales without accompanying weather (gray), (c) annual and (d) monthly changes in the proportion of TC gales with precipitation to the total number of all TC gales, and (e) annual and (f) monthly changes in the proportion of TC gales to the total number of all TC gales accompanied by short-term heavy precipitation (green), thunderstorms (red), and both (yellow) from 2010 to 2016. Numbers on the columns mean percentages

9月居多，其次是7月和10月（图8b 橙色），而占比情况（图8f）则是11月、9月和5月较高，但都不超过30%。图8e、f还显示伴随短时强降水、雷暴以及两者并存三种TC大风占有所有TC大风比例的年变化和月变化，可见伴随强对流天气中短时强降水占比最多。6~11月短时强降水大风的占比大致是逐月递增的趋势，11月达到峰值，而12月时TC大风中未有强对流天气伴随。伴随雷暴天气TC大风的占比则5月份最多，7、8月次之。5月未见有短时强降水伴随的TC大风。

### 4.2 空间分布特征

#### 4.2.1 强对流TC大风

图9a给出2010~2016年伴随强对流TC大风的站点年均频次分布，可以看出高频次站点分布在广东沿岸和海南，其中最高频次年均2.5次的站点为海南的三亚站。其次是广西、福建和浙江沿岸，内陆省份江西、安徽仅有零星几个站点出现，频次分布为年均每个站点1次以下，可见我国东南地区伴随强对流天气TC大风高频区主要分布在沿海和南部区域。图9b是伴随强对流TC大风相对TC中心的分布，此类TC大风在TC内核和外围均有分布，短时强降水TC大风（红色五角星）主要出现在200 km以内的内核区域，东部居多，在200~

500 km范围内则是东北象限多于其它象限；伴随雷暴TC大风（蓝色五角星）主要分布在距离TC中心的300 km以外，其中东南象限出现站次较少。

#### 4.2.2 有无降水TC大风

图10a、b分别给出2010~2016年有无降水TC大风的频次分布。有降水TC大风占有所有TC大风的比例高达89.8%，其站点分布与总体特征较为接近，年均20次以上的高频站点均出现在沿岸，沿海向内陆依次递减。无降水站点和频次明显少于有降水的情况，仅占有所有TC大风的10.2%，只在浙江沿岸出现几个年均大于5次的高频站点，其中最高频次为浙江嵊泗年均10.2次，其他的站点年均频次多在3次以下。

图10c和d分别显示有、无降水TC大风站点相对TC中心的分布，前者多出现在TC中心附近，北部明显多于南部；后者则主要位于TC的外围，且在西北象限频次较多，而内核区域有明显的空缺。两者分布差异主要与TC云带结构的分布有关。图10给出伴随不同等级降水量的TC大风站点相对于TC中心的位置分布，可见1小时降水量小于14.9 mm的（黄色和蓝色）频次最多，降水量在5.0~29.9 mm之间时（黄色和橙色）相对位置的分布较为均匀，中心明显多于外围。而降水大于

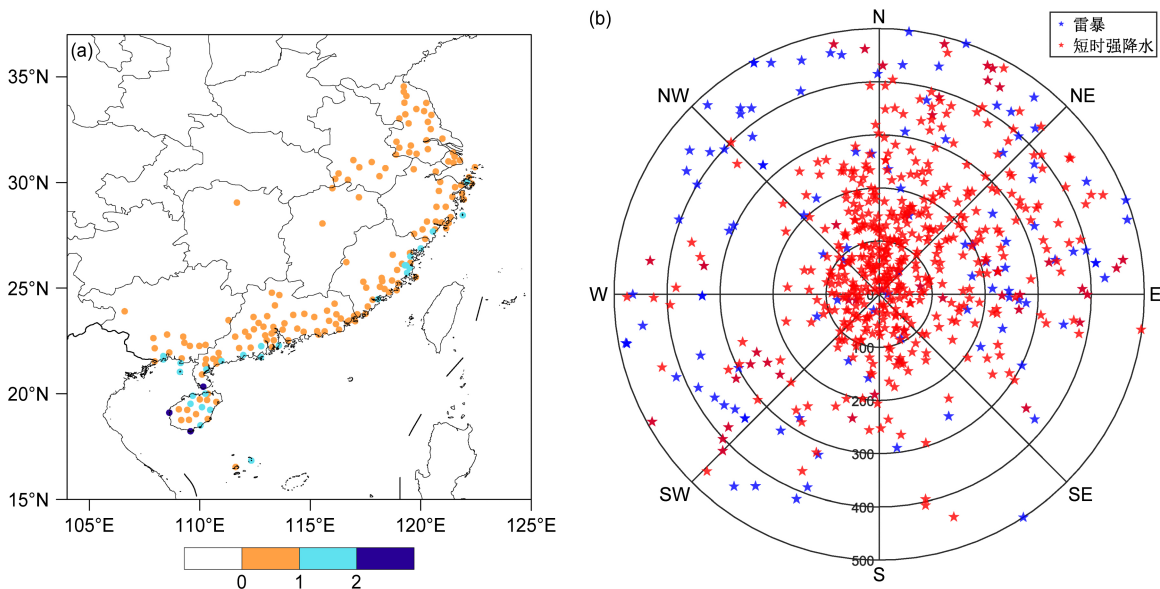


图9 2010~2016年 (a) 伴随强对流TC大风站点年均频次分布；(b) 伴随强对流TC大风相对TC中心的位置分布，蓝色为雷暴天气，红色为短时强降水

Fig. 9 (a) Annual average frequency distributions of TC gale accompanied by strong convection at each station from 2010 to 2016; (b) location distribution of TC gales accompanied by strong convection relative to the TC center from 2010 to 2016, blue for thunderstorms and red for short duration heavy precipitation

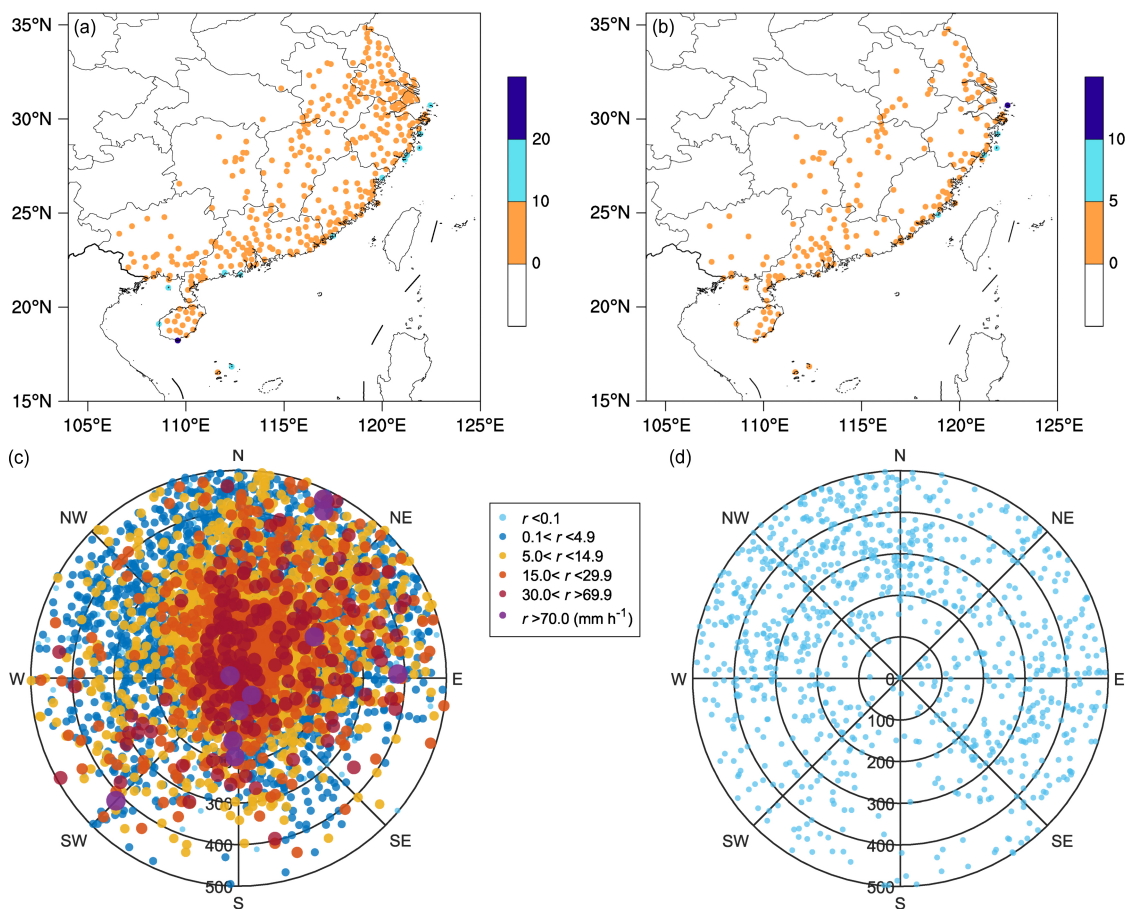


图 10 2010~2016 年 (a) 伴随降水 TC 大风和 (b) 无降水 TC 大风的年均频次空间分布, 圆点颜色深浅代表频次; (c) 伴随不同等级小时降水量 TC 大风站点相对 TC 中心位置分布, 圆点大小及颜色深浅代表降水量大小 (单位: mm) 和 (d) 无降水 TC 大风相对 TC 中心位置分布

Fig. 10 Spatial distributions of the annual average frequency of (a) TC gales with precipitation and (b) TC gales without precipitation from 2010 to 2016, with the color shades of dots representing frequency; (c) distributions of TC gale stations accompanied by hourly precipitation of different intensities relative to TC center location, where the size of the dots and color shades represent the amount of precipitation (units: mm); and (d) TC gales without precipitation relative to the location of TC centers

30.0 mm (红色和紫色) 的 TC 大风主要集中在 TC 东北象限。

### 4.3 风速特征

#### 4.3.1 强对流 TC 大风

从 2010~2016 年间伴随强对流 TC 大风风速均值和极大值的站点分布来看 (图略), 均值为  $25\sim 33\text{ m s}^{-1}$  (8~12 级) 之间的站点较多, 广东雷州半岛及浙江沿岸出现风速均值大于  $33\text{ m s}^{-1}$  (12 级) 的站点。强对流 TC 大风极大值分布与之相似, 沿岸向内陆递减。极大值大于  $51\text{ m s}^{-1}$  (16 级) 的强对流 TC 大风出现在广东、浙江沿岸。

图 11a 给出 2010~2016 年 TC 大风 (蓝色)、强对流 TC 大风 (绿色) 风速值的盒须图, 并与期间东南地区所有强对流大风 (包含台风影响) 的风

速值情况对照 (红色)。可以看出, 三类大风的风速极大值均为  $53\text{ m s}^{-1}$ , 其中强对流 TC 大风极大值出现在伴随短时强降水天气, 一小时降水量达 24.6 mm。三者均值都超过  $20\text{ m s}^{-1}$ , 其中强对流 TC 大风均值最小, 伴随强对流的 TC 大风风速均值最大, 约为  $23.60\text{ m s}^{-1}$ 。伴随强对流 TC 大风的第 50 和 75 百分位分别对应风速  $22\text{ m s}^{-1}$  和  $27\text{ m s}^{-1}$ , 均明显高于该区域所有 TC 大风及所有强对流大风。可见伴随强对流的 TC 大风的总体风速均强于其他强对流大风和非强对流 TC 大风, 可能造成更为严重的破坏性。

#### 4.3.2 有无降水 TC 大风

从 2010~2016 年间站点有无降水 TC 大风风速均值和极大值的空间分布来看 (图略), 该区域

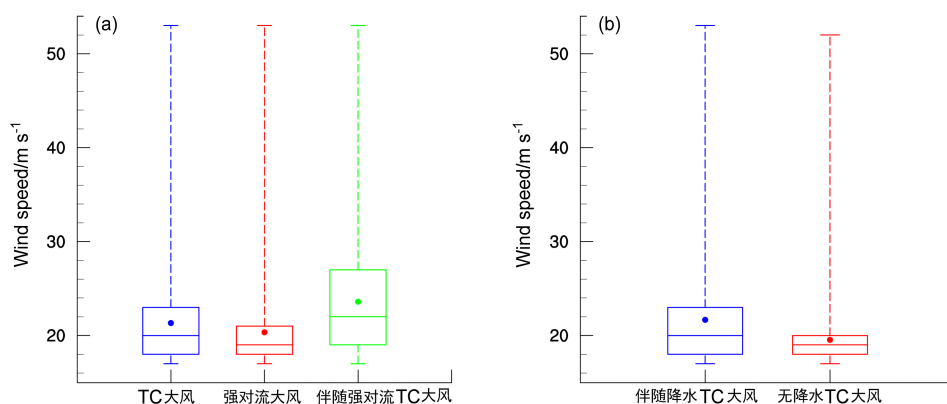


图 11 2010~2016 年 (a) TC 大风 (蓝色)、强对流大风 (红色) 和伴随强对流 TC 大风 (绿色) 以及 (b) 伴随降水 TC 大风 (蓝色)、无降水 TC 大风 (红色) 的风速盒须图, 盒须图最高和最低线段分别为最大值和最小值, 盒线段从上至下分别是第 75、50、25 分位的风速, 圆点为风速均值

Fig. 11 Box-and-whisker plots of (a) wind speeds for TC gale (blue), strong convective gale (red), and accompanying strong convective TC gale (green) and (b) accompanying precipitation TC gale (blue), and TC gale without precipitation (red) from 2010 to 2016, with the highest and lowest line segments of the box-and-whisker plots being the maximum and minimum values, respectively, and the box-and-whisker segments from top to bottom being the wind speeds at the 75th, 50th, and 25th quartiles, respectively, and the dots are the mean wind speeds

站点有降水 TC 大风风速均值主要在  $17\sim 25\text{ m s}^{-1}$  ( $8\sim 10$  级), 风速均值大于  $25\text{ m s}^{-1}$  ( $10$  级) 集中在雷州半岛以及福建浙江沿岸。无降水 TC 大风各站点的风速均值多在  $25\text{ m s}^{-1}$  ( $10$  级) 以下, 仅出现一个大于  $25\text{ m s}^{-1}$  ( $10$  级) 的站点, 位于广西; 有、无降水 TC 大风极大值的分布中, 风速  $51\text{ m s}^{-1}$  ( $16$  级) 以上的极大值站点基本都出现在有降水的情况, 主要集中在海岸线沿岸附近。无降水各站点的风速极大值较小, 大多为  $17\sim 33\text{ m s}^{-1}$  ( $8\sim 12$  级), 仅有沿海的四个站点大于  $33\text{ m s}^{-1}$  ( $12$  级), 说明无降水 TC 大风不仅均值小, 极大风速也不强。

对比有、无降水 TC 大风的风速盒须图可见 (图 11b), 有降水时的风速均值为  $21.67\text{ m/s}$ , 大于无降水的均值  $19.54\text{ m s}^{-1}$ , 有降水的第 50、75 分位 TC 风速值 ( $20\text{ m s}^{-1}$  和  $23\text{ m s}^{-1}$ ) 也均要大于无降水时的风速值 ( $19\text{ m s}^{-1}$  和  $20\text{ m s}^{-1}$ ), 说明较强的风速大多出现在有降水的情况, 以一小时降水量小于  $20\text{ mm}$  的一般降水居多。伴随降水的 TC 大风风速极值略大于无降水 TC 大风极值。一个极值  $53\text{ m s}^{-1}$  出现在 2012 年台风“海葵”影响下的浙江大陈站, 伴随  $24.6\text{ mm h}^{-1}$  的短时强降水。另一个是 2013 年台风“天兔”影响的广东汕尾站, 伴随一小时降水量为  $10.1\text{ mm}$  的一般降水。无降水 TC 大风极值达到  $52\text{ m s}^{-1}$ , 仅有 2010 年“康森”影响海南三亚站一个样本。

## 4.4 风向特征

### 4.4.1 强对流 TC 大风

图 12a-c 给出 TC 大风、伴随强对流 TC 大风以及东南地区所有强对流大风 (包含 TC 影响) 的风向分布, 可见 TC 大风的风向以东北风为主 (图 12a), 占总数的 40% 左右, 其次是西北风和东南风, 西南风最少, 根据东南地区海陆位置关系, 可以推断 TC 引起的各站点大风主要出现在 TC 登陆前; 强对流 TC 大风风向则是偏东分量占据超过 50% (图 12b), 东北风多于东南风, 偏西风比所有 TC 大风略多一些。强对流大风 (包含 TC 影响) 多以偏西风为主 (图 12c), 约占其总数的 70%, 其中西北风略多于西风。

### 4.4.2 有无降水 TC 大风

图 12d 和 e 分别给出是否伴随降水 TC 大风的风向分布, 可见有降水 TC 大风 (d) 东北风居多, 与 TC 大风总体的风向分布较为相似, 多为 TC 登陆前引起的大风; 无降水 TC 大风 (e) 各个风向分布均匀, 其中东北风和东南风占据大多数, 其次是西北风, 说明 TC 登陆前、后引起的大风都有。

## 5 小结

登陆过程中 TC 大风及其伴随的天气复杂多变, 本文利用 2010~2016 年重要天气报文和 CMA 热带气旋最佳路径数据以及地面逐小时降水资料, 对

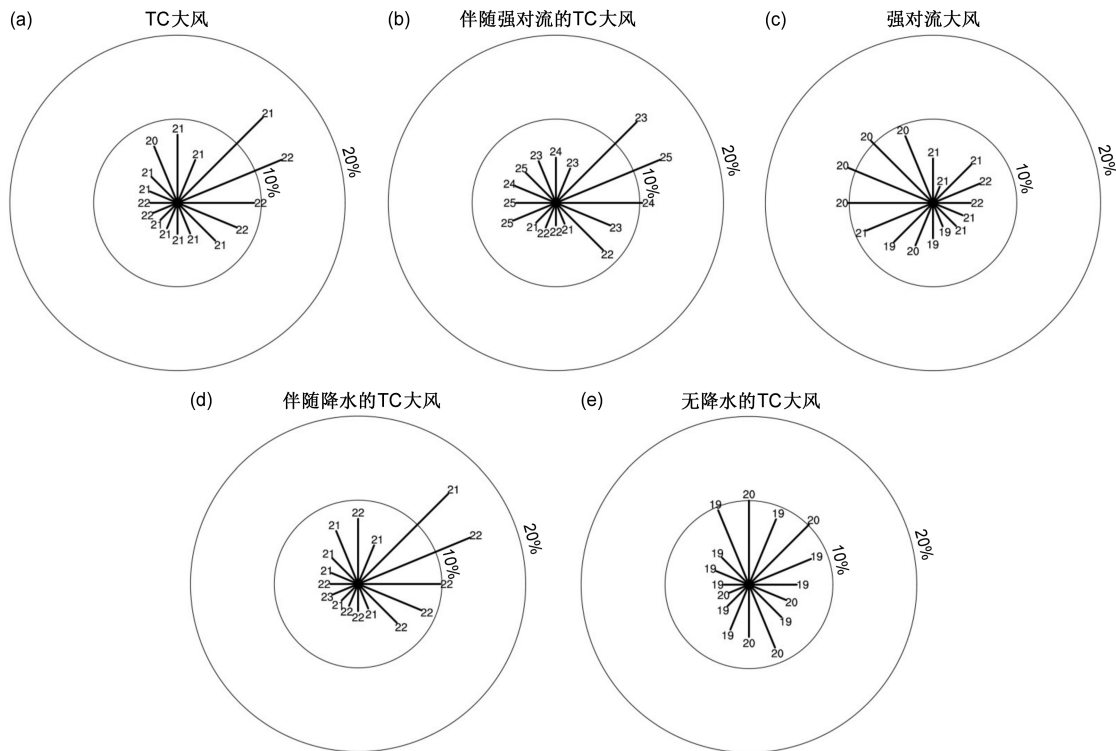


图 12 2010~2016 年 (a) TC 大风、(b) 伴随强对流 TC 大风、(c) 强对流大风、(d) 伴随降水 TC 大风以及 (e) 无降水 TC 大风风向十六方位频数分布

Fig. 12 Wind direction hexadecimal frequency distribution of (a) TC gale, (b) TC gale accompanied by strong convection, (c) strong convective gale, (d) TC gale accompanied by precipitation, and (e) TC gale without precipitation from 2010 to 2016

我国频受 TC 影响东南地区的 TC 大风及其伴随天气特征进行统计分析, 主要结论如下:

(1) 2010~2016 年间东南地区的 TC 大风站点主要沿着海岸线分布, 至内陆频数递减, 12 级以上强风速站点基本分布在距 TC 中心 300 km 范围内, TC 登陆前发生大风站点居多。

(2) STS 和 TY 强度 TC 引起的站点大风最多, 但 16 级以上大风主要出现在 STY 和 Super TY 强度等级。慢速 TC 引起的站点大风主要出现其移向右前侧, 快速主要出现在其右后侧。TC 大风中的离岸风平均风速略小于向岸风, 但 16 级以上离岸大风站点频次明显多于向岸大风。

(3) 伴随降水 TC 大风约占 TC 大风总数的 89.8%, 其中 12 级以上的 TC 大风几乎均伴随着降水。该类大风以东北风为主, 分布靠近 TC 中心, 频数峰值在 8 月。无降水 TC 大风约占 10.2%, 以东北风和东南风为主, 出现在 TC 外围, 多出现在 5 月和 12 月。

(4) 伴随强对流天气的 TC 大风约占 TC 大风总数的 23.8%, 东北风为主, 风速均值大于非强对

流 TC 大风和其他强对流大风, 可能造成更为严重的破坏性, 在业务预报和防灾减灾中要更加引起重视。伴随的强对流天气中约 79.5% 为短时强降水, 主要分布在 TC 中心附近东北象限, 约 28.0% 为雷暴 TC 大风, 主要出现在距 TC 中心的 300 km 以外。同时出现短时强降水和雷暴的仅占所有 TC 大风的 1.8%, 占伴随强对流 TC 大风的 7.5%。

TC 大风及其伴随的各种对流天气时空尺度较小, 本文采用的资料时间分辨率较粗, 可能遗漏一些强对流 TC 大风; 统计中未见龙卷等强对流天气, 与观测记录有关, 也可能与本文定义的台风大风范围有关。另外, 本文仅对伴随各类天气的 TC 大风进行初步统计分析, 降水或强对流天气与大风之间的相互作用及其致灾机制, 还需要进一步探讨。

### 参考文献 (References)

- Caracena F, Maier M W. 1987. Analysis of a microburst in the face meteorological mesonet network in southern Florida [J]. Mon. Wea. Rev., 115(5): 969-985. doi:10.1175/1520-0493(1987)115<0969:aoamit>2.0.co;2

- Chan J C L, Liu K S, Ching S E, et al. 2004. Asymmetric distribution of convection associated with tropical cyclones making landfall along the South China coast [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 132(10): 2410–2420. doi:10.1175/1520-0493(2004)132<2410:ADOCAW>2.0.CO;2
- 陈德花, 张玲, 张伟, 等. 2018. “莫兰蒂”台风致灾大风的结构特征及成因 [J]. *大气科学学报*, 41(5): 692–701. Chen Dehua, Zhang Ling, Zhang Wei, et al. 2018. Structure characteristics and cause analysis of catastrophic wind caused by super typhoon Meranti [J]. *Trans. Atmos. Sci. (in Chinese)*, 41(5): 692–701. doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20180203004
- 陈联寿, 罗哲贤, 李英. 2004. 登陆热带气旋研究的进展 [J]. *气象学报*, 62(5): 541–549. Chen Lianshou, Luo Zhexian, Li Ying. 2004. Research advances on tropical cyclone landfall process [J]. *Acta Meteor. Sinica (in Chinese)*, 62(5): 541–549. doi:10.11676/qxxb2004.055
- 陈燕, 张宁. 2019. 江苏沿海近地层风阵性及台风对其影响 [J]. *应用气象学报*, 30(2): 177–190. Chen Yan, Zhang Ning. 2019. The wind turbulence of the near-surface layer of Jiangsu coastal area and its response to typhoon [J]. *J. Appl. Meteor. Sci. (in Chinese)*, 30(2): 177–190. doi:10.11898/1001-7313.20190205
- Chen Y, Duan Z D, Yang J, et al. 2020. Typhoons of western North Pacific basin under warming climate and implications for future wind hazard of East Asia [J]. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, 208: 104415. doi:10.1016/j.jweia.2020.104415
- 陈永林, 王智, 曹晓岗, 等. 2009. 0509 号台风 (Matsa) 登陆螺旋云带的增幅及其台前飚线的特征研究 [J]. *气象学报*, 67(5): 828–839. Chen Yonglin, Wang Zhi, Cao Xiaogang, et al. 2009. Characteristic analysis of the strengthening spiral bands and the preceding squall lines in association with the 0509 Typhoon “Matsa” [J]. *Acta Meteor. Sinica (in Chinese)*, 67(5): 828–839. doi:10.11676/qxxb2009.081
- 程正泉, 陈联寿, 李英. 2009. 登陆台风降水的大尺度环流诊断分析 [J]. *气象学报*, 67(5): 840–850. Cheng Zhengquan, Chen Lianshou, Li Ying. 2009. Diagnostic analysis of large-scale circulation features associated with strong and weak landfalling typhoon precipitation events [J]. *Acta Meteor. Sinica (in Chinese)*, 67(5): 840–850. doi:10.11676/qxxb2009.082
- 高珊, 吴幸毓, 何小宁. 2012. 1010 号台风 “莫兰蒂” 对福建近海风场的影响及其成因分析 [J]. *台湾海峡*, 31(2): 173–181. Gao Shan, Wu Xingyu, He Xiaoning. 2012. Analysis of characteristics and formation of offshore wind field in Fujian influenced by 1010 typhoon Meranti [J]. *J. Oceanogr. Taiwan Strait (in Chinese)*, 31(2): 173–181. doi:10.3969/j.issn.1000-8160.2012.02.004
- 郭达烽, 周芳, 陈翔翔, 等. 2017. 登陆台风 “麦德姆” 的空心结构及其特征 [J]. *气象与环境学报*, 33(3): 10–20. Guo Dafeng, Zhou Fang, Chen Xiangxiang, et al. 2017. Analysis of the hollow structure and characteristics of landing typhoon “Matmo” [J]. *J. Meteor. Environ. (in Chinese)*, 33(3): 10–20. doi:10.3969/j.issn.1673-503x.2017.03.002
- Klotz B W, Jiang H Y. 2016. Global composites of surface wind speeds in tropical cyclones based on a 12 year scatterometer database [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 43(19): 10480–10488. doi:10.1002/2016gl071066
- 梁必骐, 梁经萍, 温之平. 1995. 中国台风灾害及其影响的研究 [J]. *自然灾害学报*, 4(1): 84–91. Liang Biqi, Liang Jingping, Wen Zhiping. 1995. Study of typhoon disasters and its affects in China [J]. *Journal of Natural Disasters (in Chinese)*, 4(1): 84–91. doi:10.13577/j.jnd.1995.0114
- 梁莉, 崔晓鹏, 王成鑫, 等. 2018. 我国登陆热带气旋引起的大陆地面风场分布 [J]. *大气科学*, 42(1): 96–108. Liang Li, Cui Xiaopeng, Wang Chengxin, et al. 2018. Characteristic distribution of surface winds associated with landfalling tropical cyclones in mainland of China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 42(1): 96–108. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1708.16224
- Lu X Q, Yu H, Ying M, et al. 2021. Western North Pacific tropical cyclone database created by the China Meteorological Administration [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 38(4): 690–699. doi:10.1007/s00376-020-0211-7
- Meng Z Y, Zhang Y J. 2012. On the squall lines preceding landfalling tropical cyclones in China [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 140(2): 445–470. doi:10.1175/mwr-d-10-05080.1
- Morotomi K, Shimamura S, Kobayashi F, et al. 2020. Evolution of a tornado and debris ball associated with super typhoon hagibis 2019 observed by X-band phased array weather radar in Japan [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 47(24): e2020GL091061. doi:10.1029/2020gl091061
- Ni X, Zhang Q H, Ma D, et al. 2015. Climatology and trends of tropical cyclone high wind in mainland of China: 1959–2011 [J]. *J. Geophys. Res.*, 120(24): 12378–12393. doi:10.1002/2015jd024031
- Parrish J R, Burpee R W, Marks Jr F D, et al. 1982. Rainfall patterns observed by digitized radar during the landfall of hurricane Frederic (1979) [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 110(12): 1933–1944. doi:10.1175/1520-0493(1982)110<1933:RPOBDR>2.0.CO;2
- Powell M D. 1987. Changes in the low-level kinematic and thermodynamic structure of hurricane Alicia (1983) at landfall [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 115(1): 75–99. doi:10.1175/1520-0493(1987)115<0075:CITLLK>2.0.CO;2
- 蔡昕瑶, 高路. 2020. 不同地形条件下的台风灾害链致灾分析——以“利奇马”台风为例 [J]. *福建师范大学学报 (自然科学版)*, 36(5): 74–83. Qi Xinyao, Gao Lu. 2020. Analysis on typhoon disaster chain under different terrain conditions: A case study of typhoon Lekima in 2019 [J]. *Journal of Fujian Normal University (Natural Science Edition) (in Chinese)*, 36(5): 74–83. doi:10.12046/j.issn.1000-5277.2020.05.011
- Shapiro L J, Willoughby H E. 1982. The response of balanced hurricanes to local sources of heat and momentum [J]. *J. Atmos. Sci.*, 39(2): 378–394. doi:10.1175/1520-0469(1982)039<0378:TROBHT>2.0.CO;2
- 盛春岩, 李建华, 范苏丹. 2014. 地形及下垫面对渤海大风影响的数值研究 [J]. *气象*, 40(11): 1338–1344. Sheng Chunyan, Li Jianhua, Fan Sudan. 2014. Numerical study of terrain and underlying surface effect on Bohai gale [J]. *Meteor. Mon. (in Chinese)*, 40(11): 1338–1344. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2014.11.006
- 宋丽莉, 毛慧琴, 汤海燕, 等. 2004. 广东沿海近地层大风特性的观测

- 分析 [J]. 热带气象学报, 20(6): 731–736. Song Lili, Mao Huiqin, Tang Haiyan, et al. 2004. Observation and analysis of Guangdong coastal Gales in the near-surface layer [J]. J. Trop. Meteor. (in Chinese), 20(6): 731–736. doi:10.16032/j.issn.1004-4965.2004.06.014
- Uhlhorn E W, Klotz B W, Vukicevic T, et al. 2014. Observed hurricane wind speed asymmetries and relationships to motion and environmental shear [J]. Mon. Wea. Rev., 142(3): 1290–1311. doi:10.1175/mwr-d-13-00249.1
- 王佳琪, 李英. 2019. 西北太平洋热带气旋变性过程中的风及降水分布变化特征分析 [J]. 大气科学, 43(6): 1329–1343. Wang Jiaqi, Li Ying. 2019. Characteristics of wind and rainfall distribution of tropical cyclones during their extratropical transition processes over the western North Pacific [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 43(6): 1329–1343. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1903.18213
- Wang Y Q. 2009. How do outer spiral rainbands affect tropical cyclone structure and intensity? [J]. J. Atmos. Sci., 66(5): 1250–1273. doi:10.1175/2008jas2737.1
- Xu J, Wang Y Q. 2010. Sensitivity of tropical cyclone inner-core size and intensity to the radial distribution of surface entropy flux [J]. J. Atmos. Sci., 67(6): 1831–1852. doi:10.1175/2010jas3387.1
- 杨玉华, 雷小途. 2004. 我国登陆台风引起的大风分布特征的初步分析 [J]. 热带气象学报, 20(6): 633–642. Yang Yuhua, Lei Xiaotu. 2004. Statistics of strong wind distribution caused by landfall typhoon in China [J]. J. Trop. Meteor. (in Chinese), 20(6): 633–642. doi:10.3969/j.issn.1004-4965.2004.06.003
- 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. doi:10.1175/jtech-d-12-00119.1
- Zhang J A, Rogers R F, Reasor P D, et al. 2013. Asymmetric hurricane boundary layer structure from dropsonde composites in relation to the environmental vertical wind shear [J]. Mon. Wea. Rev., 141(11): 3968–3984. doi:10.1175/mwr-d-12-00335.1
- Zheng T F, Huang J, Wan Q L, et al. 2016. Observational study on the pre-tropical cyclone squall line of 8 August 2007 over the coast of South China [J]. J. Trop. Meteor., 22(4): 508–521. doi:10.16555/j.1006-8775.2016.04.006
- 周海霞, 刘春霞. 2014. 1321 号强台风“蝴蝶”发生与发展特点分析 [J]. 云南大学学报 (自然科学版), 36(S1): 35–44. Zhou Haixia, Liu Chunxia. 2014. Analysis on characteristics of occurrence and development of strong typhoon Wutip (1321) [J]. J. Yunnan Univ. (in Chinese), 36(S1): 35–44. doi:10.7540/j.ynu.20140130
- 竺夏英, 宋文玲. 2017. 2016 年秋季中国气候特征及其可能成因 [J]. 气象, 43(4): 495–500. Zhu Xiaying, Song Wenling. 2017. Features of climatic anomalies in China during the fall of 2016 and the possible causes [J]. Meteor. Mon. (in Chinese), 43(4): 495–500. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2017.04.012