浙北沿海区域性大风特征及影响天气系统分析

申华羽[1,2]，邱金晶[3]，史学凡[4]，汪冬冬[1,2]，诸葛丰林[1]，张雯琪[1,2]，陈晔峰[3]

1 宁波市气象服务中心，宁波 315012

2 宁波市气象灾害应急预警中心，宁波 315012

3 浙江省气象科学研究所，杭州 310008

4 宁波市北仑区气象台，宁波 315826

提要：利用2015—2024年55个气象观测站数据和ERA5再分析资料，分析浙北沿海区域性大风特征，并对大风过程进行客观分类，总结主要大风影响天气系统。结果表明：浙北沿海区域性大风平均小时数为1050 h•a⁻¹，具有显著的年际和季节变化特征；16个风向中NW、NNW、N、NNE为代表的北大风占66.7%，其中NNW最高达25.2%；南大风则以S和SSE为主，分别占10.9%和6.1%。大风过程平均发生51.5次•a⁻¹；1月最多，平均为5.5次；6月最少，仅为1.7次，且时间集中程度和空间影响范围均为全年最低。影响浙北沿海的区域性大风过程可分为4类：热带气旋类、冷高压类、温带气旋类和高压后部类，热带气旋类平均发生7.5次•a⁻¹，该类过程平均持续时间最长且强度最强；冷高压类平均发生20.9次•a⁻¹，持续时间和强度仅次于热带气旋类，根据冷高压南下位置分为东路、中路、西路3型，东路型持续时间最长，中路型强度更强；温带气旋类平均发生14.5次•a⁻¹，集中在3—4月，根据气旋中心位置分为东海气旋型和江淮气旋型，前者大风持续时间和强度均大于后者；高压后部类过程平均发生8.6次•a⁻¹，集中在5—7月，该类过程持续时间最短且大风强度最弱。

关键词：浙北沿海，区域性大风，k-means聚类，大风天气系统

P425，P458

10.7519/j.issn.1000-0526.2026.092901

Characteristics and Impact Weather Systems of Regional Gales in the Coastal Waters of Northern Zhejiang

SHEN Huayu[1,2] QIU Jinjing[3] SHI Xuefan[4] WANG Dongdong[1,2] ZHUGE Fenglin[1,2] ZHANG Wenqi[1,2] CHEN Yefeng[3]

1 Ningbo Meteorological Service Center of Zhejiang Province, Ningbo 315012

2 Ningbo Meteorological Disaster Warning Center of Zhejiang Province, Ningbo 315012

3 Zhejiang Institute of Meteorological Sciences, Hangzhou 310008

4 Ningbo Beilun Meteorological Station of Zhejiang Province, Ningbo 315826

Abstract: Using observation data from 55 weather stations during 2015-2024 and ERA5 reanalysis data, this paper analyzes the characteristics and impact weather systems of regional gales in the coastal waters of northern Zhejiang. Moreover, the gale processes are objectively classified, and the major weather systems influencing gales are summarized. The results show that the regional gales can reach 1,050 hours per year on average, featured with significant annual variation and seasonal variation. Among the 16 wind directions, northern gales (NW, NNW, N, NNE) account for 66.7%, with NNW being the most frequent (25.2%). Southerly gales are

浙江省"尖兵""领雁"研发攻关计划项目(2024C03256),浙江省自然科学基金联合基金项目(LZJMY23D050004),宁波市自然科学基金项目(2024J160),浙江省自然科学基金联合基金项目(LZJMY25D050008),宁波市气象科技计划项目(NBQX2024005A)共同资助

2025-5-19 。。。 2026-9-29。。。

第一作者:申华羽,主要从事应用气象服务工作,E-mail:huayushen82@163.com

primarily from S and SSE directions, contributing 10.9% and 6.1%, respectively. The average occurrence of gale events is 51.5 times per year, with the highest frequency in January (5.5 times). Gales appear the least in June, only 1.7 times, when the time concentration and spatial impact range are the lowest in the whole year. The regional gale processes affecting the coastal waters of northern Zhejiang can be classified into four categories: Tropical Cyclone Type, Cold High-pressure Type, Extratropical Cyclone Type and High-pressure Rear Type. Tropical Cyclone Type gales occur at a frequency of 7.5 times per year, demonstrating the longest duration and the strongest intensity. Cold High-pressure Type events occur at a frequency of 20.9 times per year, ranking the next to Tropical Cyclone Type in both duration and intensity. Based on the southward displacement of cold high-pressure systems, the gales are further classified into Eastern-path Type, Central-path Type and Western-path Type, with Eastern-path Type gales exhibiting the longest duration and Central-path Type gales displaying the strongest intensity. Extratropical Cyclone Type events occur at a frequency of 14.5 times per year, primarily concentrated from March to April. Extratropical cyclones are classified into East China Sea Cyclones and Jianghuai Cyclones based on their center locations, with the former exhibiting longer duration and greater intensity than the latter. High-pressure Rear Type gales occur at an average frequency of 8.6 times per year, mainly from May to July, having the shortest duration and weakest intensity among all gale types.
Key words: the coastal waters of northern Zhejiang, regional gale, k-means clustering, gale weather system

引言

大风是沿海主要气象灾害之一（戴厚兴和吴兆麟，2016；王凯等，2020），不仅会严重危害海上交通和渔业生产安全，还会制约海洋经济的发展。浙北沿海坐拥宁波舟山港、上海洋山港两个世界级港口，还有中国最大渔场舟山渔场，海洋产业对于国民经济发展具有举足轻重的作用。据统计宁波舟山港每年由于气象条件导致的海事交通管制持续时间约为 900 h，大风和海雾是导致管制的主要天气因素（钱燕珍等，2022）。分析浙北沿海区域性大风特征，对于灾害性大风防御具有重要意义，同时可以为大风预报服务提供指导，提升港航、渔业等行业的作业效率。

气象观测站（简称观测站）数据是研究大风的最直接资料，但由于风速风向具有阵性和局地性特征，观测站容易受到海拔高度、下垫面性质、局地地形等多个要素的影响，相对于降水、气温等要素，风速风向对观测环境的要求更高。现有针对沿海大风特征的研究大多基于少量的代表性较好的风速风向观测站，李超等（2013）选取资料完整性较好的 3 个观测站分析江苏沿海 30 a 大风气候特征；卢美和朱业（2011）利用 5 个观测站分析浙江沿海大风气候特征，并且对比了浙江北部沿海和中南部沿海的大风差异；郭冬艳等（2011）利用 7 个自动气象站分析琼州海峡沿岸大风分布规律，并基于大风天气影响系统分析南北沿岸大风的差异；曲巧娜等（2018）利用 44 个观测站分析黄海和渤海近海大风的气候特征，尽管观测站数较多，但分析区域覆盖 5 个海区，站点空间密度仍显不足。基于少量代表性观测站风速风向资料的研究分析可能存在一定片面性，尽管这些站点经过严格条件筛选，但在海拔高度、下垫面环境等方面仍存在差异，只能代表其所在位置综合因素作用下的真实风速风向，难以代表区域性大风特征。近年来再分析资料不断发展，凭借其时空连续性和完整性优势，在大风研究中得到广泛应用。郭浩康等（2026）基于常规观测数据和 ERA5 再分析资料，对 2025 年 4 月中国中东部极端雨雪大风天气进行分析；管靓等（2026）结合 ERA5 再分析资料和热带气旋最佳路径资料，诊断分析了 1981—2022 年近海北上热带气旋造成上海沿岸水域

大风的成因；魏晓雯等（2021）以海南洋浦港为例，利用 ERA5 再分析资料通过合成分析等方法探讨不同类型大风过程的环流特征、发生机制及预报指标。再分析资料主要被用于大风环流形势分析和天气系统分类等方面，但在研究区域性大风特征，特别是大风的极端性方面，很难充分发挥作用。

已有不少研究针对不同类型大风的特征开展统计分析。平凡和杨磊（2026）分析了东北冷涡背景下强雷暴大风的分布和环境特征；曹倩等（2024）结合观测站资料和闪电定位、天气雷达资料，分析江西雷暴大风时空分布特征，并总结雷暴大风发生前的大气环境；李英等（2023）根据热带气旋最佳路径数据集以及地面站逐小时资料，对热带气旋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。上述文献均先依据特定条件筛选出对应类型的大风事件，再对其进行统计分析。也有研究对大风进行分型，传统方法包括主观天气学分型和客观环流分型。主观天气学分型主要依赖预报员对天气形势的经验性归纳，难以实现大样本量分析，如蔡荣辉等（2017）将洞庭湖区域的 15 次雷暴大风过程根据天气形势分为 4 类进行分析。客观环流分型则借助统计或数学方法减少主观性，如孟思彤等（2024）利用 Lamb-Jenkinson 方法对金沙江下游峡谷区偏北大风进行大气环流形势分类，于慧珍等（2023）利用旋转 T 模态主成分分析研究山东半岛南部沿海大风的环流形势。随着智能化技术的发展，聚类算法与机器学习也被引入大风分型研究，该类方法可以处理更大样本量数据，也可以捕捉更复杂的特征，如曲巧娜和吴炜（2024）利用 k-means 聚类分析方法对黄渤海区域超 3.5 万个海平面气压场样本进行分类，发现 8 种天气类型中有 5 种类型发生大风的概率高于 60%。总体而言，大风研究已从针对特定天气系统的统计分析和依赖经验的主观分型，逐步走向客观化、大样本化和智能化分型，将分型结果与观测特征分析相结合，可以更好地揭示不同类型大风的形成机理与致灾规律。

近几年浙江省气象部门在沿海地区和岛屿建设了大量观测站，这些站点在海拔高度、周边地形、下垫面环境等方面存在差异，但仍可以为区域性大风研究提供数据支持，特别是浙北沿海岛屿众多，观测站点空间密度明显高于浙南，具备较好的研究基础。本文基于浙北沿海观测站资料判断区域性大风小时和大风过程，分析该区域的大风特征，实现大风过程客观分类，分析结果可以为大风预报预警和业务服务提供支撑。

1 资料与方法

1.1 资料

姚日升等（2016）通过模糊聚类对浙江省观测站进行空间分型，最终得到 120 个可以代表沿海风速和风向特征的站点。本文在此基础上选取位于宁波、舟山、嘉兴行政区域的观测站，以及台州的部分观测站（纬度高于宁波最南的北渔山站），站点小时数据完整率需达 90%以上，最终有 55 个观测站参与分析，站点空间分布见图 1。所用资料为 2015—2024 年逐小时风速和风向数据，包括小时最大风速风向、小时极大风速风向，前者为整点前 1 h 内的 10 min 平均风速最大值及其对应的风向，后者为整点前 1 h 内的瞬时风速最大值及其对应的风向。

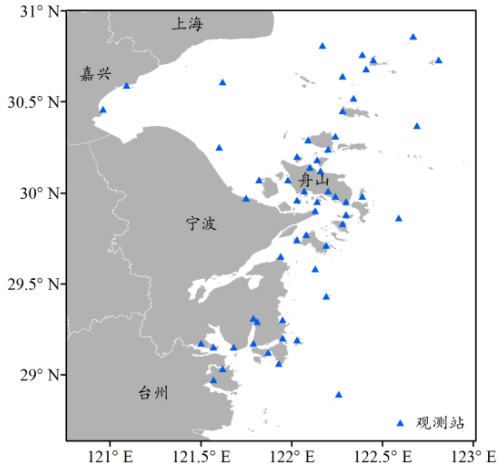


图 1 浙北沿海气象观测站分布

Fig.1 Distribution of meteorological stations in the coastal waters of northern Zhejiang

采用 ERA5 再分析资料进行大风过程分型，要素包括海平面气压、10 m 风场，空间分辨率为 0.25° ×0.25° ，时间分辨率为 1 h。ERA5 再分析资料为欧洲中期天气预报中心（ECMWF）推出的第五代全球再分析资料（Hersbach et al，2020；陈君芝等，2023；杨世昆等，2023），已成为当前气象与气候研究的主流再分析资料之一。

1.2 区域性大风过程判别

以往文献一般基于出现大风的观测站个数或比例判别区域性大风过程（王黉等，2019；周福等，2017；方翀等，2014），本文选取总站点数的 20%作为阈值，先判别区域性大风小时，再判别区域性大风过程。当观测站点小时最大风速≥6 级（10.8 m·s^{-1}）或小时极大风速≥8 级（17.2 m·s^{-1}）的站数达到总站数的 20%及以上，即定义为一个大风小时；统计该时次所有站点的 16 风向，站点比例最高的风向即为该大风小时的主导风向。若任意时段内大风小时数≥3 h，且两个相邻大风小时的间隔≤12 h，则定义为一次大风过程（申华羽等，2020），第一个大风小时为大风过程开始时间，最后一个大风小时为结束时间。

为了评价区域性大风过程的强度特征，计算大风过程期间的大风时间占比（R1）和空间占比（R2），R1 反映大风过程在时间维度上的集中和稳定程度，R2 反映大风过程在空间维度上的广泛程度。公式如下：

$$R1 = \frac{\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m} H_{ij}}{\sum_{i=1}^{n} D_i S_i} \tag{1}$$

$$R2 = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} \frac{N_i}{S_i} \tag{2}$$

式中，n 为大风过程总数，m 为观测站总数，H_{ij}为第 i 次大风过程第 j 个观测站的大风小时数，D_i为第 i 次大风过程持续小时数，S_i为第 i 次大风过程有效观测站点总数，N_i为第 i 次大风过程的大风站点数。

1.3 大风过程分类

利用 k-means 聚类分析方法实现大风过程客观分型。k-means 方法是一种非层级聚类算法，可以将一定数量的样本分为相互独立、互不包含的类别（李雨欣等，2021）。大风与气压梯度力直接相关，本文选取 ERA5 海平面气压场进行 k-means 聚类，空间范围以 30° N、122° E 为中心向四个方向分别延伸 10 个经纬度，即 20～40° N、112～132° E。该中心通过取所有站点经度的最大值与最小值，求算术平均后取整，得到中心点经度；对纬度作同样处理，得到中心点纬度。众多研究表明，浙江沿海大风影响天气系统主要包括热带气旋、冷高压、低压、倒槽、高压后部等（曹宗元等，2023；董加斌和胡波，2007）。部分大风过程中

可能有多个天气系统先后或共同影响，如温带气旋入海后往往会引导冷空气南下，共同造成风速增大。本文选取每次大风过程开始时间的海平面气压场进行聚类分析，确定该过程的唯一归类。

2 结果分析

2.1 区域性大风小时数特征

2015—2024 年浙北沿海区域性大风小时数平均为 1050 h•a^{-1}，逐年差异较大（图 2a），2019 年之前维持在 1100 h 以上，2018 年最高达 1460 h，2019 年开始显著下降，2019—2023 年连续五年不足 1000 h•a^{-1}，其中 2020 年最低仅有 760 h，2024 年再度回升至 1128 h；结合逐月大风小时数可知（图略），2019—2023 年大风小时数下降主要出现在冬季和春季，这可能与东亚冬季风强度偏弱有关(赵俊虎等,2020;代潭龙等,2021;支蓉和郑志海,2022)，导致冷高压大风过程偏少偏弱，此外 2020 年西北太平洋热带气旋活动偏少，共同导致年大风小时数为 10 年内最低。大风小时数逐月变化同样显著（图 2b），主要集中在冬季和秋季，分别占全年大风小时数的 35.1%和 29.7%，其中 12 月大风最频繁，平均小时数达 150.4 h，其次 1 月为 125.8 h；春季大风小时数占全年 20.9%，呈逐月下降趋势；夏季大风小时数最少，占全年 14.3%，6 月平均仅出现 20 h；结合大风影响天气系统分析可知，秋冬季冷空气活动频繁，夏季则多热带气旋活动，春末夏初季节交替仅有少量温带气旋和高压后部导致的大风过程，因此谷值出现在 6 月。

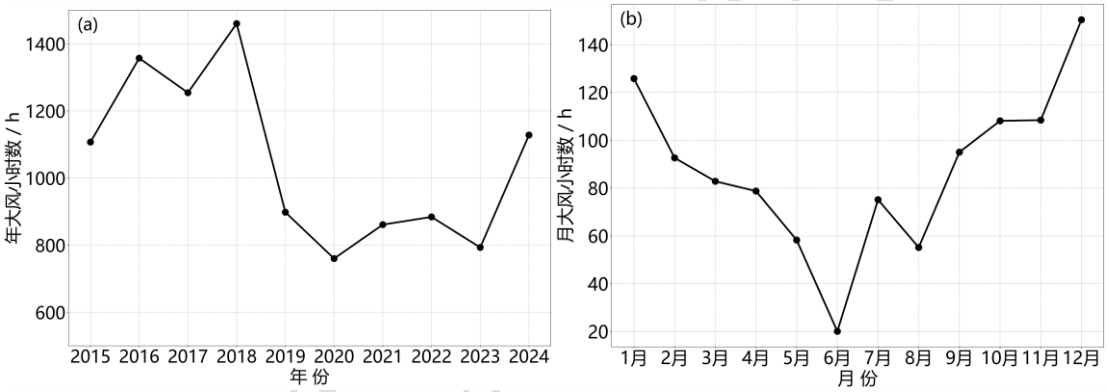


图 2 浙北沿海区域性大风小时数(a)年际变化和(b)月际变化

Fig.2 (a) Annual and (b) monthly variations of regional gale hours in the coastal waters of northern Zhejiang

图 3 为不同月份的大风小时数日变化分布。可以看出，除 12 月和 1 月峰值出现在早晨 04—08 时（北京时，下同）外，其他月份峰值基本出现在下午到上半夜。其中，2—3 月、9—10 月峰值集中在 15—19 时；4—8 月集中在 20—23 时；11 月则表现为 04 时和 20 时的双峰结构。风速日变化与大气稳定层结密切相关，大部分月份大风频次峰值出现在下午到上半夜，原因可能有两个方面，其一，该时段大气较不稳定，冷高压大风、高压后部南大风等多种大风过程易出现动量下传导致的风力增强；其二，下午到上半夜为强对流天气高发时段，可能导致区域性雷暴大风。图 4 给出大风的主导风向分布，由于浙北沿海为典型亚热带季风气候，季风风向特征明显，以冬季风为代表的北大风样本最多，NW、NNW、N、NNE 占总大风小时数的 66.7%左右，其中 NNW 频次最高，达 25.2%，其次 N 为 18.9%，以夏季风为代表的南大风占总小时数的 17.0%，其中 S 为 10.9%，SSE 为 6.1%。

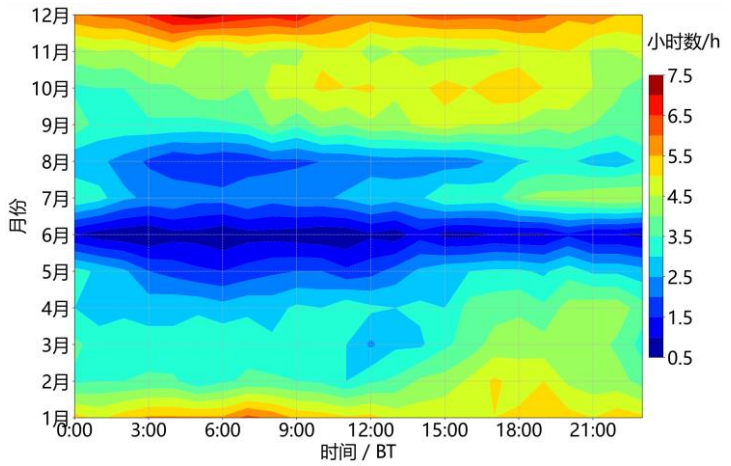


图 3 浙北沿海区域性大风小时数逐月日变化

Fig.3 Diurnal variation of monthly regional gale hours in the coastal waters of northern Zhejiang

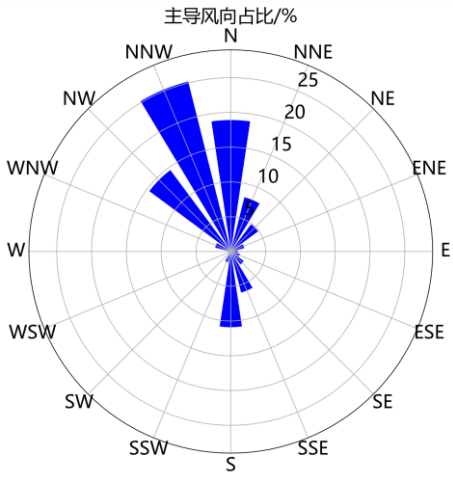


图 4 浙北沿海区域性大风主导风向分布

Fig.4 Frequency distribution of regional gale wind directions in the coastal waters of northern Zhejiang

2.2 区域性大风过程特征

2015—2024 年共判别出大风过程 515 次，平均为 51.5 次•a^{-1}，10 月至次年 4 月大风过程数（图 5）月平均达 5 次左右，1 月最多为 5.5 次，其次为 2 月的 5.4 次；5—9 月过程数较少，除 7 月达 4.2 次外，其他月份均不足 4 次，6 月仅有 1.7 次。图 6 给出大风过程的时间占比(R1)和空间占比(R2)月变化，可以看出，R1 逐月变化范围为 24%～36%，波动相对平缓，高值集中在 7—9 月，峰值出现在 9 月（35.9%），次峰值为 7 月（35.7%）；10 月至次年 2 月 R1 值在 30.9%～33.0%；3—6 月均在 30%以下，且呈逐月下降趋势，谷值在 6 月（24.0%）。R2 整体高于 R1，且波动更明显，峰值同样出现在 9 月（60.9%），12 月（57.6%）次之，谷值为 6 月（37.2%），除了峰值和谷值，其他月份波动较小，均在 50%左右。总体来看，春末初夏大风过程的时间集中程度较低、空间影响范围偏小，而盛夏和秋冬季节大风过程的时间集中程度更高、空间影响范围更大。这主要与大风影响天气系统的季节差异有关，春末初夏主要影响天气系统包括高压后部南大风和温带气旋，前者日变化特征明显，后者往往伴随偏南大风到偏北大风转变，均易造成大风的时间和空间不连续；盛夏和初秋多出现热带气旋大风，冬季则多冷高压大风，两类大风持续时间较长，且影响范围更大。关于不同类型大风的统计特征在影响天气系统客观分类后作进一步分析。

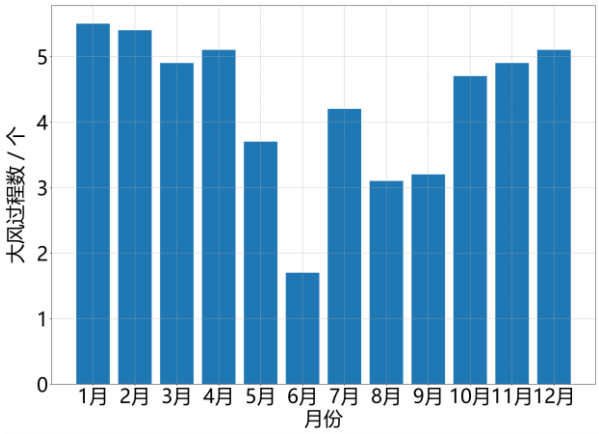


图 5 浙北沿海区域性大风过程数月变化

Fig.5 Monthly variation of regional gale processes in the coastal waters of northern Zhejiang

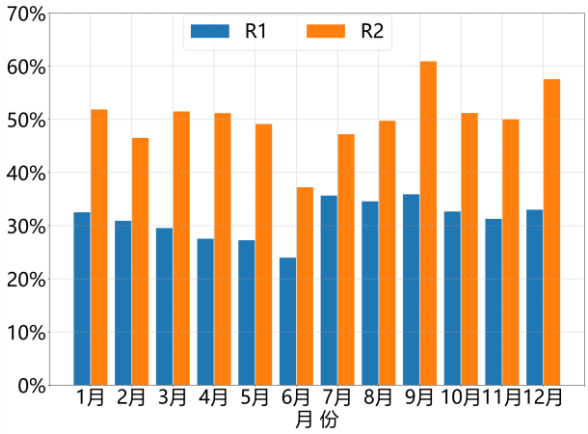


图 6 区域性大风过程的大风时间占比(R1)和空间占比(R2)月变化

Fig.6 Monthly variation of the temporal (R1) and spatial (R2) proportions of gale times during regional gale processes

2.3 浙北沿海大风过程分类

由于热带气旋路径差异，导致不同热带气旋大风过程的海平面气压空间分布差异较大，不利于 k-means 聚类分析，因此首先根据中央气象台最优台风路径筛选热带气旋导致的大风过程。陈可鑫等（2020）研究表明部分超强台风 7 级风圈半径可达 600～800 km，6 级风圈半径则更大。当热带气旋与冷空气等其他天气系统相互作用时，大风区的影响范围还会进一步提升。本文在聚类分析空间区域的基础上向东和向南各延伸 2°，即大风过程期间有热带气旋中心进入 18～40° N、112～134° E 区域的过程判断为热带气旋影响。在剔除热带气旋大风过程后再对其余大风过程进行聚类分析，考虑到不同季节海平面气压存在较大差异，而风场主要与气压梯度有关，因此将每个大风过程开始时间的海平面气压场减去该时次空间平均值，从而对海平面气压空间场进行标准化处理，再进行 k-means 聚类分析。图 7 为 k-means 聚类分析的轮廓系数 S 随分类数 k 值的变化曲线，可见轮廓系数的拐点出现在 k=6 时，即浙北沿海除热带气旋外的大风过程分为 6 型最为合理。

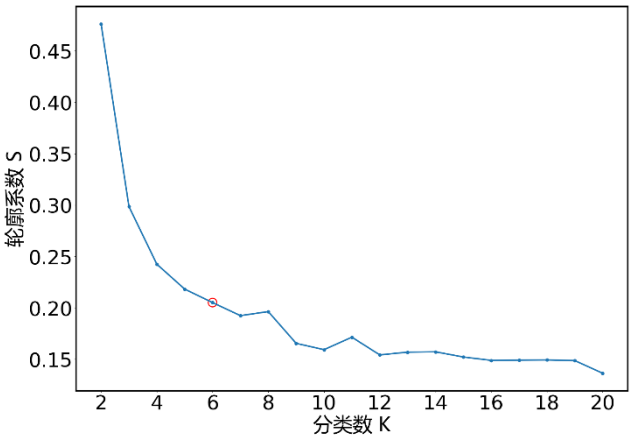
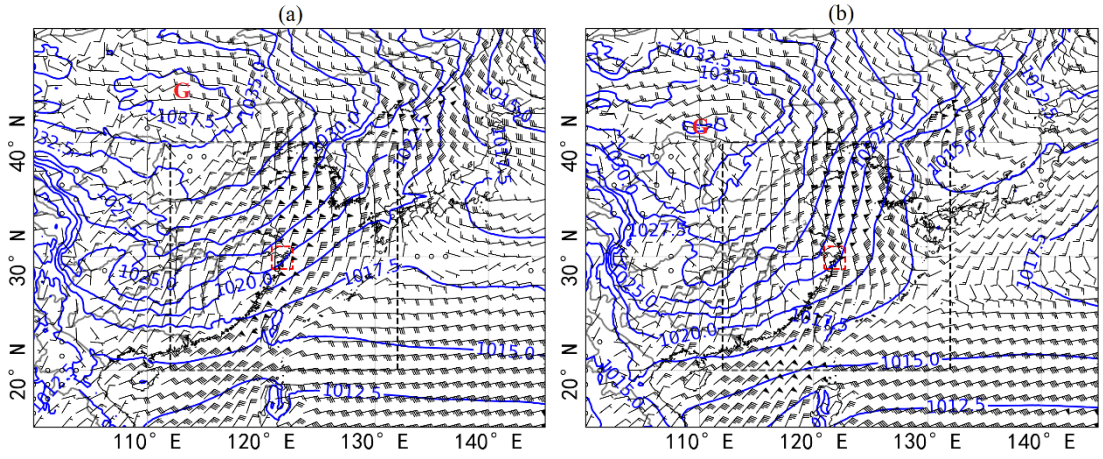
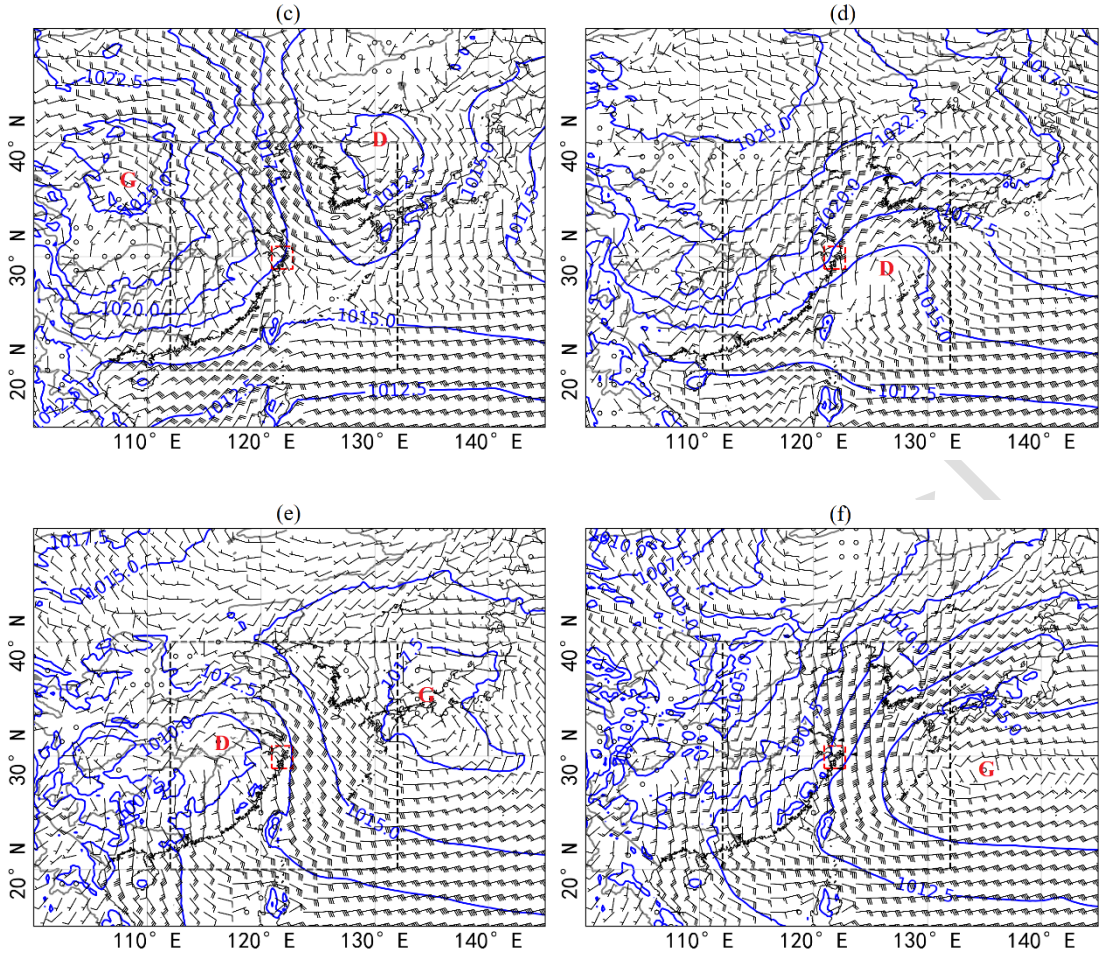


图 7 k-means 轮廓系数 S 随分类数 k 的变化曲线

Fig.7 Variation curve of k-means silhouette coefficient with the number k of clusters

图 8 为 k-means 聚类分析得到除热带气旋外的 6 型大风过程的海平面气压和 10 m 风合成平均场。图 8a～8c 对应冷高压类大风过程，三者差异在于朝鲜半岛到日本海是否有低压存在，导致冷高压中心位置及南下路径不同。其中图 8a 为东路型冷高压，高压中心位于蒙古国，高压范围覆盖东亚地区，过程开始阶段浙北沿海以东北大风为主；图 8b 为中路型冷高压，高压中心位于河套地区顶部，高压范围可覆盖至朝鲜半岛，在日本海附近有低压存在，冷空气开始阶段浙北沿海以偏北大风为主；图 8c 为西路型冷高压，高压中心位于河套地区，高压范围仅可覆盖中国大陆，在朝鲜半岛有低压存在，冷空气开始阶段浙北沿海以西北大风为主。图 8d 和 8e 为温带气旋类大风，图 8d 对应东海气旋型，表现为气旋中心在闽北到浙南沿海发展并向东北方向移动，浙北沿海大风过程主要为偏北大风，因此在业务中有时会将该类归为冷高压类；图 8e 为江淮气旋型，表现为气旋中心自长江中下游一带发展东移入海，浙北沿海在低压发展初期表现为偏南大风，随着气旋入海，其后部往往伴有冷锋南下，因此浙北沿海转为偏北大风。图 8f 为高压后部类，海上高压大多为副热带高压，也可以为冷高压入海后的变性高压，过程期间浙北沿海均为偏南大风。综上分析，影响浙北沿海的大风过程可分为 4 类 7 型，即：热带气旋类、冷高压类、温带气旋类、高压后部类；其中冷高压类可进一步分为东路、中路、西路 3 型，温带气旋类分为东海气旋和江淮气旋 2 型。





注：红色虚线矩形区域为浙北沿海范围，黑色虚线矩形区域为 k-means 聚类分析区域，G 为高压中心，D 为低压中心

图 8 除热带气旋外 6 型大风过程的海平面气压（蓝色等值线，单位：hPa）和 10 m 风（风羽）合成平均场（a）东路冷高压，（b）中路冷高压，（c）西路冷高压，（d）东海气旋，（e）江淮气旋，（f）高压后部

Fig.8 Composite mean fields of sea level pressure (blue contour, unit: hPa) and 10 m wind (barb) for six types of gale processes excluding tropical cyclones

(a) eastern-path cold high-pressure type, (b) central-path cold high-pressure type, (c) western-path cold high-pressure type, (d) East China Sea cyclone type, (e) Jianghuai cyclone type, (f) high-pressure rear type

2.4 各类大风过程特征

统计每次大风过程的持续时间，以及过程期间全部站点小时最大风速和小时极大风的最大值、75%分位数、中位数、平均值等参数，进而统计上述参数的各类型大风过程平均值。表 1 可以看出，热带气旋类大风过程年平均 7.5 次，多于俞燎霓等（2013）指出的浙江平均影响热带气旋为 4.7 个•a^{-1}。这一差异除与所用资料及统计时段和方法不同有关外，还因为本文所判别的热带气旋大风包含了部分由热带气旋与其他天气系统共同导致的大风过程。热带气旋类大风过程平均持续时间达 35.9 h，R1 为 37.9%，R2 为 66.0%，小时最大风速和小时极大风速的最大值分别达 23.2 m • s^{-1} 和 29.1 m • s^{-1}，上述参数均高于其他类型，因此热带气旋类大风过程为所有分类中持续时间最长、影响范围最广且强度最强；该类大风过程主要集中在 7—10 月，9 月频次最高，其次为 10 月。冷高压类大风过程数 20.9 次•a^{-1}，占

比 40.6%，主要出现在 11 月、12 月和 1 月；其中东路型平均出现 8.9 次•a^{-1}，平均持续时间达 29.9 h，为三种冷高压中比例最高且持续时间最长；中路型平均出现 7.9 次•a^{-1}，占比 15.3%，该型冷高压大风强度更强且影响范围更广，小时最大风速的最大值、75%分位数、平均值分别为 20.6 m • s^{-1}、11.4 m • s^{-1}、9.0 m • s^{-1}，小时极大风速分别为 24.8 m • s^{-1}、15.7 m • s^{-1}、13.3 m • s^{-1}，R1 和 R2 分别为 33.1%和 55.3%；西路型仅有 4.1 次•a^{-1}，占比 8.0%，为冷高压类大风中出现频次最低。温带气旋类大风过程占比 28.2%，主要出现在春季，频次最高为 4 月和 3 月；其中东海气旋型平均出现 6.8 次•a^{-1}，占比 13.2%，平均持续时间 20.5 h；江淮气旋型平均出现 7.7 次•a^{-1}，占比 15.0%，平均持续时间 16.0 h；东海气旋大风的持续时间、影响范围和强度均大于江淮气旋型。高压后部类平均出现 8.6 次•a^{-1}，占比 16.7%，主要出现在春末夏初的 5—7 月，该类过程为所有大风分类中持续时间最短、影响范围最小且强度最弱，平均持续时间仅有 15.1 h，小时最大风速的最大值、75%分位数、平均值分别为 17.9 m • s^{-1}、10.4 m • s^{-1}、7.9 m • s^{-1}，小时极大风速的最大值、75%分位数、平均值分别为 22.7 m • s^{-1}、14.4 m • s^{-1}、11.5 m • s^{-1}，R1 和 R2 分别为 25.0%和 42.1%，上述参数显著低于其他类型。总体来看，就过程持续时间、影响范围及大风强度而言，影响程度依次为：热带气旋类>冷高压类>温带气旋类>高压后部类，但就年累计影响时间而言，依次为：冷高压类>温带气旋类>热带气旋类>高压后部类。

表 1 不同类型大风过程的统计参数

Table 1 Statistical parameters of different types of gale processes

统计参数		热带气旋类	冷高压类			温带气旋类		高压后部类
			东路型	中路型	西路型	东海气旋型	江淮气旋型	
年平均大风过程数		7.5	8.9	7.9	4.1	6.8	7.7	8.6
大风过程比例		14.6%	17.3%	15.3%	8.0%	13.2%	15.0%	16.7%
过程平均持续时间/h		35.9	29.9	22.2	19.0	20.5	16.0	15.1
R1		37.9%	31.4%	33.1%	31.7%	30.2%	27.4%	25.0%
R2		66.0%	47.9%	55.3%	51.9%	50.2%	45.2%	42.1%
累计大风小时数最多的 3 个月份		9 月 10 月 7 月	12 月 1 月 11 月	1 月 12 月 2 月	12 月 11 月 5 月	4 月 3 月 1 月	4 月 3 月 5 月	5 月 7 月 6 月
小时最大风速	最大值/(m • s^{-1})	23.2	19.7	20.6	19.3	19.5	18.7	17.9
	75%分位数/(m • s^{-1})	11.8	11.0	11.4	11.3	11.0	10.6	10.4
	中位数/(m • s^{-1})	8.7	8.1	8.6	8.4	8.0	7.4	7.4
	平均值/(m • s^{-1})	9.3	8.6	9.0	8.7	8.6	8.0	7.9
小时极大风速	最大值/(m • s^{-1})	29.1	24.4	24.8	23.2	23.7	23.8	22.7
	75%分位数/(m • s^{-1})	16.5	15.1	15.7	15.4	14.9	14.7	14.4
	中位数/(m • s^{-1})	13.5	12.5	13.3	12.8	12.2	11.4	11.4
	平均值/(m • s^{-1})	13.8	12.7	13.3	12.5	12.3	11.5	11.5

3 结论与讨论

本文利用浙北沿海 55 个观测站 2015—2024 年风速风向资料，统计区域性大风小时和大风过程，总结了主要大风影响天气系统及各类大风过程特征。主要结论如下：

（1）浙北沿海区域性大风小时数平均为 1050 h•a^{-1}，逐年和逐月差异均较大。冬季和秋季合计占全年 64.8%，其中 12 月小时数最高，平均达 150.4 h，夏季大风出现频次最低，6 月

平均小时数仅有 20 h。大部分月份频次峰值出现在下午到上半夜，特别是春季和夏季。16个风向中 NW、NNW、N、NNE 合计占比约 66.7%，其中 NNW 最多达 25.2%，南大风则以 S 和 SSE 为主，占比分别为 10.9%和 6.1%。

（2）浙北沿海区域性大风过程平均出现 51.5 次•a^{-1}。6 月过程数最少，平均仅有 1.7 次，且时间集中程度和空间影响范围全年最低；7 月—9 月过程数为 3～4 次，其中 9 月时间集中程度和空间影响范围全年最高；10—12 月及 1—4 月平均出现 5 次左右，1 月最多为 5.5 次。

（3）热带气旋类大风过程平均出现 7.5 次•a^{-1}， 9 月频次最高，其次为 10 月。该类大风平均持续时间达 35.9 h，R1 为 37.9%，R2 为 66.0%，小时最大风速和小时极大风速的最大值分别达 23.2 m • s^{-1}和 29.1 m • s^{-1}，上述参数均高于其他类型，因此热带气旋类为所有分类中持续时间最长、影响范围最广且大风强度最强。

（4）k-means 聚类分析表明，除热带气旋外的大风过程分为 6 型最为合理。其中，冷高压类包含 3 型，根据冷高压南下路径分别对应为东路型、中路型和西路型，累计出现 20.9 次•a^{-1}；冷高压类大风过程持续时间、影响范围和强度仅次于热带气旋类，东路型出现频次最高、平均持续时间最长，中路型影响范围最大、强度最强，西路型频次最低。温带气旋类包含 2 型，根据气旋中心位置对应为东海气旋型和江淮气旋型，累计出现 14.5 次•a^{-1}，主要出现在 3—4 月；东海气旋型大风持续时间、影响范围和强度均大于江淮气旋型。高压后部类仅有 1 型，平均出现 8.6 次•a^{-1}，主要在 5—7 月，该类过程大风持续时间最短、影响范围最小且大风强度最弱。

区域性大风监测预报是沿海气象部门的业务重点之一。本文所用大风过程判别方法和客观分类方法，可为沿海灾害性大风个例库建设提供参考。但所用资料为地面观测站数据和再分析资料海平面气压数据，未引入高空环流场和其他物理量深入分析各类大风特征，后续可结合高低空大气环流形势探讨各类大风的预报指标，也可尝试用于数值预报 10 m 风预报的分类订正释用。

参考文献：

蔡荣辉,姚蓉,黄小玉,等,2017.洞庭湖区域雷暴大风分型及预报分析研究[J].气象,43(5):560-572. Cai R H,Yao R,Huang X Y,et al,2017.Synoptic situation classification and forecast analysis of thunderstorm in Dongting Lake[J].Meteor Mon,43(5):560-572(in Chinese).

曹倩,郭建平,孙玉萍,等,2024.2015—2023 年江西雷暴大风特征分析[J].气象,50(12):1495-1508. Cao Q,Guo J P,Sun Y P,et al,2024.Analysis on the characteristics of thunderstorm gale in Jiangxi Province during 2015-2023[J].Meteor Mon,50(12):1495-1508(in Chinese).

曹宗元,王坚侃,何晴,等,2023.浙江沿海大风气候特征及影响系统分析[J].海洋预报,40(2):89-97. Cao Z Y,Wang J K,He Q,et al,2023.Analysis of the climatic characteristics and influence system of strong wind along the coast of Zhejiang[J].Mar Forecasts,40(2):89-97 (in Chinese).

陈君芝,施晓晖,温敏,2023.ERA5 再分析 10 m 风速数据在“两洋一海”的适用性分析[J].气象,49(1):39-51. Chen J Z,Shi X H,Wen M,2023.Applicability of ERA5 surface wind speed data in the region of “Two Oceans and One Sea”[J].Meteor Mon,49(1):39-51 (in Chinese).

陈可鑫,陈光华,向纯怡,等,2020.基于 MTCSWA 风场资料对西北太平洋热带气旋风场结构的气候统计特征研究[J].气候与环境研究,25(6):588—600. Chen K X,Chen G H,Xiang C Y,et al,2020.Statistical characteristics of wind field structures of tropical cyclones over the western north pacific based on MTCSWA data[J].Clim Envir Res,25(6):588-600(in Chinese).

戴厚兴,吴兆麟,2016.恶劣天气下海上交通安全风险动态预评估体系[J].中国航海,39(3):73-76. Dai H X,Wu Z L,2016.Dynamic risk pre-evaluation system for marine traffic safety under rough weather[J].Navig China,39(3):73-76 (in Chinese).

代潭龙,王秋玲,王国复,等,2021.2020 年中国气候主要特征及主要天气气候事件[J].气象,47(4):478-487. Dai T L,Wang Q L,Wang G F,et al,2021.Climatic characteristics and major meteorological events over China in 2020[J].Meteor Mon,47(4):478-487 (in Chinese).

董加斌,胡波,2007.浙江沿海大风的天气气候概况[J].台湾海峡,26(4):476-483. Dong J B,Hu B,2007.Synoptic and climatic survey of the gale in the coast of Zhejiang province[J].J Oceanogr Taiwan Strait,26(4):476-483 (in Chinese).

方翀,郑永光,林隐静,等,2014.导致区域性雷暴大风天气的云型分类及统计特征分析[J].气象,40(8):905-915. Fang C,Zheng Y G,Lin Y J,et al,2014.Classification and characteristics of cloud patterns triggering regional thunderstorm high winds[J].Meteor Mon,40(8):905-915 (in Chinese).

管靓,岳彩军,陆文婧,等,2026.基于 Q 矢量分解的上海沿岸水域近海北上热带气旋大风成因分析[J].高原气象,45(1):136-147. Guan L,Yue C J,Lu W J,et al,2026.Cause analysis of offshore northward tropical cyclone gales in Shanghai coastal areas based on the Q vector partitioning method[J].Plateau Meteor,45(1):136-147 (in Chinese).

郭冬艳,姜涛,陈有龙,等,2011.琼州海峡沿岸大风分布规律及影响系统分析[J].气象,37(11):1372-1379. Guo D Y,Jiang T,Chen Y L,et al,2011.Analysis on distribution pattern of high wind events in Qiongzhou strait coastal zones and its weather systems[J].Meteor Mon, 37(11):1372-1379 (in Chinese).

郭浩康,李春,王建波,2026.2025 年 4 月中国中东部极端雨雪大风天气特征及成因分析[J].气象学报,84(3):404-420. Guo H K,Li C,Wang J B,2026.Characteristics and formation mechanisms of the extreme rain,snow,and gale events in central and eastern China in April 2025[J].Acta Meteor Sin, 84(3):404-420(in Chinese).

李超,魏建苏,严文莲,等,2013.江苏沿海大风特征及其变化分析[J].气象科学,33(5):584-589. Li C,Wei J S,Yan W L,et al,2013.Synoptic and climatic survey of the gale in the coast of Jiangsu province[J].J Meteor Sci,33(5):584-589 (in Chinese).

李英,王洁,刘婧茹,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. Li Y,Wang J,Liu J R,et al,2023.Statistical characteristics of tropical cyclone gale and its accompanying weather in southeast China[J].Chin J Atmos Sci,47(4):1024-1038(in Chinese).

李雨欣,王瑛,马庆媛,等,2021.基于 DTW 与 K-means 算法的河北场雨及雨型分区特征研究[J].地球信息科学学报,23(5):860-868. Li Y X,Wang Y,Ma Q Y,et al,2021.Research on the characteristics of rainfall events and rain pattern zoning in Hebei based on data mining technology[J].J Geo-Inf Sci,23(5):860-868 (in Chinese).

卢美,朱业,2011.浙江沿海大风的天气气候特征[J].杭州师范大学学报(自然科学版),10(5):474-480. Lu M,Zhu Y,2011.Weather and climate characteristics of the coastal gale in Zhejiang[J].J Hangzhou Norm Univ (Nat Sci Ed),10(5):474-480 (in Chinese).

孟思彤,尹晔,白爱娟,等,2024.白鹤滩水电站干季偏北大风环流形势分析和客观判识[J].气象,50(10):1243-1255. Meng S T,Yin Y,Bai A J,et al,2024.Analysis and objective identification of northerly strong wind circulation pattern for Baihetan hydroelectric power station in dry season[J].Meteor Mon,50(10):1243-1255 (in Chinese).

平凡,杨磊,2026.东北冷涡强雷暴大风分布与环境特征研究[J].气象学报,84(3):455-472. Ping F,Yang L,2026.Distribution and environmental characteristics of severe thunderstorm gusts associated with the northeast China cold vortex[J].Acta Meteor Sin,84(3):455-472(in Chinese).

钱燕珍,赵昶昱,孔扬,等,2022.港口气象服务进展及其效益评估技术研究[J].海洋开发与管理,39(4):55-61. Qian Y Z,Zhao C Y,Kong Y,et al,2022.Research progress on the port meteorological service in view of benefit assessment[J].Ocean Dev Manage,39(4):55-61 (in Chinese).

曲巧娜,盛春岩,杨晓霞,等,2018.黄、渤海沿海大风变化特征及影响系统[J].气象科学,38(2):212-220. Qu Q N,Sheng C Y,Yang X X,et al,2018. Variation characteristics of gale in the coastal Yellow Sea and the Bohai Sea and its weather system[J].J Meteor Sci,38(2):212-220 (in Chinese).

曲巧娜,吴炜,2024.黄渤海海区风速推算方法及效果评估[J].气象,50(2):234-245. Qu Q N,Wu W,2024.Calculation method for wind field in the Yellow sea and Bohai sea area based on coastal actual condition and effect Evaluation[J].Meteor Mon,50(2):234-245(in Chinese).

申华羽,方艳莹,涂小萍,等,2020.ECMWF 细网格 10 m 风预报在浙江沿海的评估与订正[J].气象,46(11):1485-1494. Shen H Y,Fang Y Y,Tu X P,et al,2020.Verification of ECMWF 10 m wind forecast for coastal Zhejiang province[J].Meteor Mon,46(11):1485-1494 (in Chinese).

王黉,李英,吴哲红,等,2019.我国大风机理研究和预报技术进展[J].气象科技,47(4):600-607. Wang H,Li Y,Wu Z H,et al,2019.Advances in researches on mechanisms and forecast techniques of high winds in China[J].Meteor Sci Technol,47(4):600-607 (in Chinese).

王凯,梁益同,刘敏,2020.“东方之星”翻沉事件风灾现场调查分析与致灾风速估算[J].气象,46(1):98-107. Wang K,Liang Y T,Liu M,2020.Field investigation and analysis of wind disaster and estimation of disaster wind speed of the capsizing accident of cruise ship “Oriental Star”[J].Meteor Mon,46(1):98-107 (in Chinese).

魏晓雯,陈亮,赵蕾,等,2021.南海港口大风的环流特征及其预报指标——以海南洋浦港为例[J].气象科技,49(5):754-761. Wei X W,Chen L,Zhao L,et al,2021.Circulation characteristics and forecasting indicators of high wind in a port of South China Sea:taking Yangpu Port as an example[J].Meteor Sci Technol,49(5):754-761 (in Chinese).

杨世昆,杨玲,张雪芬,等,2023.地基遥感联合反演大气边界层高度与ERA5再分析资料比对分析[J].气象,49(2):178-187. Yang S K,Yang L,Zhang X F,et al,2023.Comparison and analysis of atmospheric boundary layer height retrieved by ground-based remote sensing and ERA5 reanalysis data[J].Meteor Mon,49(2):178-187 (in Chinese).

姚日升,涂小萍,蒋璐璐,等,2016.浙江近海冬季大风风速推算和ASCAT风速订正方法探讨[J].气象,42(5):621-627. Yao R S,Tu X P,Jiang L L,et al,2016.Analysis on methods about the winter offshore gale speed estimation and ASCAT wind correction in Zhejiang[J].Meteor Mon,42(5):621-627 (in Chinese).

于慧珍,马艳,韩旭卿,2023.不同天气形势下山东半岛南部沿海大风特征及其成因[J].气象科技,51(1):94-103. Yu H Z,Ma Y,Han X Q,2023.Characteristics and causes for gale at southern Shandong Peninsula coast of different circulation patterns[J].Meteor Sci Technol,51(1):94-103 (in Chinese).

俞燎霓,胡波,董加斌,等,2013.1953～2012 年间影响浙江的热带气旋大风的气候特征及其影响因素分析[J].应用海洋学学报,32(2):171-177. Yu L N,Hu B,Dong J B,et al,2013.Analyses on the characteristics of violent wind of TCs and the corresponding influence factors in Zhejiang Province from 1953 to 2012[J].J Appl Oceanogr,32(2):171-177(in Chinese).

赵俊虎,宋文玲,柯宗建,2020.2019/2020年冬季我国暖湿气候特征及成因分析[J].气象,46(7):982-993. Zhao J H,Song W L,Ke Z J,2020.Characteristics and causes analysis of the warm and wet winter in China in 2019/2020[J].Meteor Mon,46(7):982-993 (in Chinese).

支蓉,郑志海,2022.2021/2022年冬季中国气候异常特征及南方降水异常偏多成因分析[J].气象,48(7):925-935. Zhi R,Zheng Z H,2022.Characteristics of climate anomalies over China in winter 2021/2022 and causes for precipitation anomalies over southern China[J].Meteor Mon,48(7):925-935 (in Chinese).

周福,蒋璐璐,涂小萍,等,2017.浙江省几种灾害性大风近地面阵风系数特征[J].应用气象学报,28(1):119-128. Zhou F,Jiang L L,Tu X P,et al,2017.Near-surface gust factor characteristics in several disastrous winds over Zhejiang province[J].J Appl Meteor Sci,28(1): 119-128 (in Chinese).

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