

ECMWF 细网格 10 m 风预报在浙江沿海的评估与订正

中华羽¹ 方艳莹¹ 涂小萍^{2*} 吕劲文¹ 陆鋈¹ 蒋璐璐² 郑铮²

1 宁波市气象服务中心, 浙江宁波 315012

2 宁波市气象台, 浙江宁波 315012

提要: 利用浙江沿海观测站资料, 对 2015—2018 年 ECMWF 细网格 10 m 风预报进行检验评估。结果表明: 站点预报误差与离岸距离密切相关, 离岸较远的站点预报与观测一致性更高, 但风速预报偏小, 风向预报有逆时针偏差, 海岸线附近站点一致性较差, 风速略有偏大, 风向有顺时针偏差。随着预报时效延长, 风速相关系数逐渐下降, 风速和风向均方根误差逐渐增加, 海岸线附近的站点随时效变化相对平缓, 远离海岸线的站点变化幅度更大。进一步对浮标站分析表明, 冬季风主导的 NW、N、NE 三个风向预报存在明显系统性偏差, 大风速时风速预报偏小, 弱风速时风向预报有顺时针偏差, 风速和风向预报离散度均表现为 NW>N>NE; 夏季风主导的 S 和 SW 风向, 风速和风向预报误差相对 NW 和 N 更小。三种典型大风天气系统中, 冷空气大风过程预报效果最好, 12 h 时效内预报准确率达 97%, 96 h 时效内达 70% 以上; 热带气旋大风过程预报准确率随时效下降最显著, 36 h 内准确率达 85% 以上, 36 h 后准确率降低, 96 h 后不足 50%; 低压倒槽大风预报准确率最差, 144 h 时效内准确率均在 60% 以下, 且随时效变化不大。冷空气和热带气旋过程浮标站最大风速预报与观测基本符合线性分布, 冷空气过程最大风速在 144 h 时效内相关系数均可通过 0.05 显著性水平检验, 热带气旋仅 48 h 时效内可通过 0.05 显著性水平检验。通过线性回归方法, 对冷空气过程浮标站最大风速预报进行订正, 独立样本检验表明, 该方法可以有效减小预报误差。

关键词: ECMWF, 10 m 风, 预报检验, 浙江沿海

Application and Verification of ECMWF 10 m Wind Forecast for Coastal Zhejiang Province

SHEN Huayu¹ FANG Yanying¹ TU Xiaoping^{2*} LV Jinwen¹ LU Yun¹ JIANG Lulu² ZHENG Zheng²

1 Ningbo Meteorological Service Center, Ningbo 315012 China

2 Ningbo Meteorological Observatory, Ningbo 315012 China

Abstract: Using the observation data from Zhejiang coastal stations, the ECMWF 10 m wind forecast from 2015 to 2018 was verified and evaluated. The result shows: The prediction error is closely related to the offshore distance, the farther the station is from the coastline, the higher the consistency is. For far-shore stations, the predicted wind speeds are lower than the observed values and the wind directions have counterclockwise deviations. While for near-shore stations, it shows higher and clockwise. With forecast lead time extending, the correlation coefficient of wind speed gradually decreases, while the root-mean-square error of wind speed and wind direction gradually increases, and this change is more pronounced for far offshore stations. Further analysis on buoy stations indicates that the forecasts of NW, N and NE winds prevailing in winter have significant systematic deviations. Wind speeds were predicted lower for strong winds, and wind directions had clockwise deviations for light winds. The forecast dispersions of wind speed and wind direction are NW>N>NE. The prediction errors of S and SW winds prevailing in summer are relatively smaller than that of NW and N wind directions. Regarding the three typical gale systems, the cold air gales obtain the best forecast outcome, with the accuracy reaching 97% and over 70%

宁波市科技局公益计划项目 (2019C50004)、浙江省气象科技计划项目 (2018YB03) 和宁波市气象科技计划项目 (NBQX2015006B) 共同资助

第一作者: 中华羽 (1982-), 男, 工程师, 硕士, 主要从事短期天气预报. E-mail: huayushen82@163.com

通讯作者: 涂小萍 (1968-), 女, 正研级高工, 硕士, 主要从事天气预报和研究. E-mail: txp_hk@aliyun.com

for 12 h and 96 h lead time. The accuracy of tropical cyclone wind forecast declined most significantly over the lead time. It remains 85% for 36 h lead time but decreases sharply to less than 50% beyond 96 h. For low pressures or reverse trough systems, the forecast accuracy remains less than 60% within 144 h. In specific, the maximum wind predictions and observations at buoy stations during cold air and tropical cyclone systems are basically in line with the linear distribution. The correlation coefficient for the cold air system can pass the 0.05 significance test within 144 h, while for tropical cyclones it passes only within 48 h. The linear regression method was used to correct the maximum wind speed forecast at buoy stations for cold air systems, and the independent sample tests prove that this method is effective in reducing prediction errors.

Key words: ECMWF, 10 m wind, forecast verification, the offshore of Zhejiang province

引言

浙江省拥有近 6500 km 海岸线, 约占中国海岸线总长的五分之一, 居中国首位。境内拥有货物吞吐量超 10 亿吨的世界级港口——宁波舟山港。“21 世纪海上丝绸之路”国家战略布局, 为浙江海洋经济发展带来前所未有的机遇和挑战, 同时海上航行安全和港口的高效精准作业都对气象预报和服务提出了更高的要求。大风作为影响航运交通的主要气象灾害之一 (刘哲等, 2018; 王静静等, 2012; 黎鑫等, 2016; 齐庆华等, 2019), 是沿海地区气象部门业务工作的重点。随着各种精细化数值预报产品投入业务使用, 大风预报服务能力得到了极大提高, 与此同时数值预报产品在不同区域的精细化评估检验显得愈发重要。

目前针对数值预报近地面气象要素的检验已有不少研究, 评估主要集中在降水 (董全等, 2016; 潘留杰等, 2015; 陈圣劼等, 2019; 罗玲等, 2019)、气温 (薛谦彬等, 2019; 万夫敬等, 2018; 贾丽红等, 2018) 等要素, 对于 10 m 风的分析相对较少。近年来随着近海海岛自动气象站和浮标站的建设, 近 10 m 风的数值预报评估工作也得到加强。侯淑梅等 (2014) 检验了 T639 数值预报产品对黄渤海沿海大风预报效果, 表明风速预报比观测偏小, 大风过程的开始时间预报略偏早, 而对于大风的结束时间和最大风速的开始和结束时间预报均略偏晚; 曾瑾瑜等 (2013) 利用福建省上半年沿海和港湾岛屿自动站的逐时极大风观测资料, 检验了 WRF、ECMWF 细网格以及 T639 三种模式预报的 10 m 风场, 结果表明 WRF 和 ECMWF 细网格的预报效果相对更好; 阎丽凤等 (2013) 客观检验 MM5、WRF-RUC 和 T639 三种数值模式对山东沿海风的预报性能, 认为模式普遍存在对于小风天气预报偏大、大风天气预报偏小的特点, WRF-RUC 模式预报准确率稍高于 MM5 模式, T639 模式预报相对较差; 吴俞等 (2015) 对 ECMWF 细网格 10 m 风场产品在南海海域的预报进行了检验, 结果表明风速预报比观测略偏大, 风向预报偏差多数集中分布在 $\pm 45^\circ$ 之间, 在不同风向、以及不同季节预报误差存在一定差异; 胡海川等 (2017) 研究认为, ECMWF 集合预报在我国近海洋面 10 m 风速的众数正确率及稳定性高于中值及平均值, 在此基础上建立的客观订正方法, 可以改进冷空气及台风大风天气过程的预报效果。总体来看, 由于海上观测资料稀少, 近岸地形对 10 m 风预报影响分析的研究相对较少, 对于近海系统性大风过程的预报评估尤为缺乏, 因此在很大程度上影响到风场数值产品的业务应用。

浙江沿海岛屿众多, 特别是北部近海海岸地形复杂, 风速和风向分布特征更为复杂。2005 年以来气象部门在浙江沿海先后建设了大量自动气象观测站, 2010 年又投放了 2 个浮标站, 为近海风的预报分析积累了宝贵资料。姚日升等 (2016) 通过模糊聚类对自动站进行空间分型, 最终得到 120 个可以代表浙江沿海风速和风向特征的自动站, 对这些站点进一步分析还表明, 自动站风速一般小于浮标站, 站点离岸距离是影响自动站和浮标站风速差值的主要因

子, 差值与海拔高度相关性反而不显著。本文利用2015—2018年沿海自动观测站及浮标观测站10 m风观测资料, 对ECMWF细网格数值预报10 m风进行了评估, 分析了误差的空间分布特征, 统计了影响浙江地区的几种典型大风天气系统的预报准确率, 并尝试利用线性回归对浮标站过程最大风速进行订正, 以提高ECMWF细网格数值预报10 m风在浙江近海的应用能力。

1 资料与方法

1.1 资料

所用资料包括2015—2018年浙江沿海气象观测站逐小时整点10 min平均风速和风向、逐小时极大风速和风向、ECMWF细网格预报10 m风场。在空间模糊聚类的基础上, 剔除缺测较多及海拔较高的站点, 最终有88个观测站(图1中蓝色和红色站点)参与评估分析, 其中舟山浮标站和温州浮标站离岸距离约47 km和70 km, 浮标站附近海域开阔, 受地形影响较小, 对海平面10 m风具有很好的代表性, 其他站点分布在沿海地区和海岛, 海拔高度大多在100 m以下, 19个站点海拔高度高于100 m, 受海拔高度和局地地形等因素影响, 具有一定的局地性。ECMWF细网格预报产品空间分辨率 $0.125^{\circ} \times 0.125^{\circ}$, 预报时效达1 d(240 h), 前72 h时间分辨率3 h, 72 h后分辨率6 h, 每天08、20时(北京时间)进行两次预报。

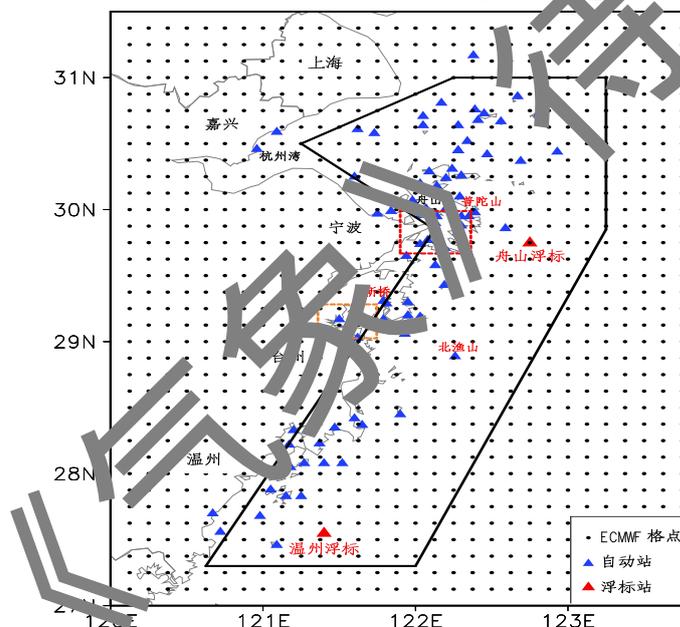


图1 ECMWF格点分布及88个浙江沿海观测站分布

(蓝色三角为自动站, 红色三角为浮标站, 黑色圆点为ECMWF格点, 黑色多边形区域内的模式格点用于模式预报大风过程的判断, 红色矩形区域为宁波舟山港, 黄色矩形区域为三门湾)

Fig.1 Distribution of ECMWF model grids and 88 observation stations in offshore Zhejiang

(The blue triangles are automatic weather stations, the red triangles are buoy stations, and black dots are ECMWF model grids. The grids in the black polygon are used for verification. The red rectangle is the Ningbo Zhoushan Port. The yellow rectangle is the Sanmen Bay)

1.2 误差统计方法

利用双线性插值方法, 将ECMWF细网格10 m风场插值到观测站点。将插值后的u和v分量转换为风向, 并取其与本站观测风向的偏差, 定义顺时针方向偏差为正, 逆时针方向偏差为负, 即风向偏差范围在 $-180^{\circ} \sim 180^{\circ}$ 之间。将插值后的风速和风向与观测值进行比较, 采用相关系数(R)、平均偏差(MBE)、均方根误差(RMSE)等统计指标(魏凤英, 2007)评估其预报效果。

1.3 大风过程判别及预报评估方法

实测大风过程定义：根据业务预报和服务经验，当图1中观测站点整点10 min平均风速 ≥ 6 级（ $10.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ）或小时极大风速 ≥ 8 级（ $17.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ）的站数达到总站数的20%及以上，即定义为一个大风时次。任意时段内大风时次 ≥ 3 ，且两个相邻大风时次的间隔 $\leq 12 \text{ h}$ ，则定义为一次大风过程。第一个大风时次为大风过程的开始时间，最后一个大风时次为结束时间。

预报大风过程定义：根据图1中黑色多边形区域内的格点进行判别，共329个格点，基本覆盖了参与评估的自动观测站点；考虑到预报大风过程的判别和评估主要针对沿海海面，为了排除陆地格点进入评估区域，多边形靠近陆地的直线要尽可能的靠近海岸线，因此部分站点不在多边形区域内。过程判别标准为：某预报时次风速 ≥ 6 级的格点占比达到20%及以上，则认为该时次预报有大风；如果同一起报场的240 h预报时效内预报的大风 ≥ 1 时次，且两个相邻大风时次的间隔 $\leq 12 \text{ h}$ ，则认为预报有一次大风过程。

大风过程评估方法：仅当有实测大风过程才评估模式对大风过程的预报能力，因此空报率不在统计范围。从实测大风过程开始时间检索不同起报时次的ECMWF预报，如果在实测大风过程开始时间的前后12 h内预报有大风过程开始则认为预报准确，否则为漏报。

2 预报误差分析

除浮标站资料为标准海平面10 m测风外，其余站点测风都是地形地貌、站点海拔及边界层热力条件作用的综合表现。模式站点预报风与实际风资料的偏差，本质上体现出模式对站点风的综合预报能力，将插值后的ECMWF风向风速与站点观测值进行直接对比，评估结果便于预报员直接参考。将ECMWF预报插值到站点，按12 h时效间隔进行归类，形成不同预报时效的数据集。12—72 h预报时效大部分站点样本量在1.0~1.1万之间，72 h时效后样本量在0.5万左右。

2.1 风速和风向误差空间分布

分析发现：不同时效的风向风速预报误差空间分布基本一致，预报风速与实测相关系数总体表现出平行于海岸线、自西向东逐渐增大的特点，而海岸线附近的站点风向预报的平均绝对偏差和均方根误差明显大于远离海岸线的站点。图2a—2e显示了12—24 h预报风速和风向评估指标的空间分布。图2a可见，预报与实测风速相关系数小于0.6的有4个站，都位于海岸线附近，达到0.8以上的有20个站，6个站点超过了0.85，都位于远离陆地的海上。风速平均偏差大多分布在 $\pm 3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 范围内，其中正偏差站数约60个，主要集中在海岸线附近以及宁波舟山港周边，即风速预报值相比观测值偏大，负偏差站数约28个，站点大多距海岸线相对较远，尤其是浙北沿海，风速预报偏小（图2b），平均偏差在 $\pm 1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 范围内站点占总站数的一半左右。均方根误差大多都在 $3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以内，其中28个站点小于 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，空间分布上，舟山浮标、温州浮标、嵊泗等海上站点均方根误差较小，此外部分沿海站点均方根误差也较小，主要分布在杭州湾、舟山本岛、三门湾等地区（图2c）。图2d和2e可以看到，12—24 h时效风向预报平均偏差大多在 $\pm 10^\circ$ 以内，风向正偏差的有46站，负偏差的42站，空间上在舟山岛以北逆时针偏差站点明显多于正偏差站点，舟山岛及宁波舟山港则多为顺时针偏差，且偏差达 10° 以上。风向预报的均方根误差受海陆地形影响更大，海岸线附近的站点明显大于远离海岸线的站点，尤其是宁波舟山港、三门湾等地形复杂地区，均方根误差达 50° 以上。总体来看，风速和风向预报效果较好的站点基本都位于远离陆地的海上，其中以舟山和温州两个浮标站预报值与观测值最为接近，说明ECMWF对于开阔海面的风向风速具有较好的可预报性，但无法较好地反应海拔高度、海陆分布、局

地形等因素造成的局地性风速风向差异。

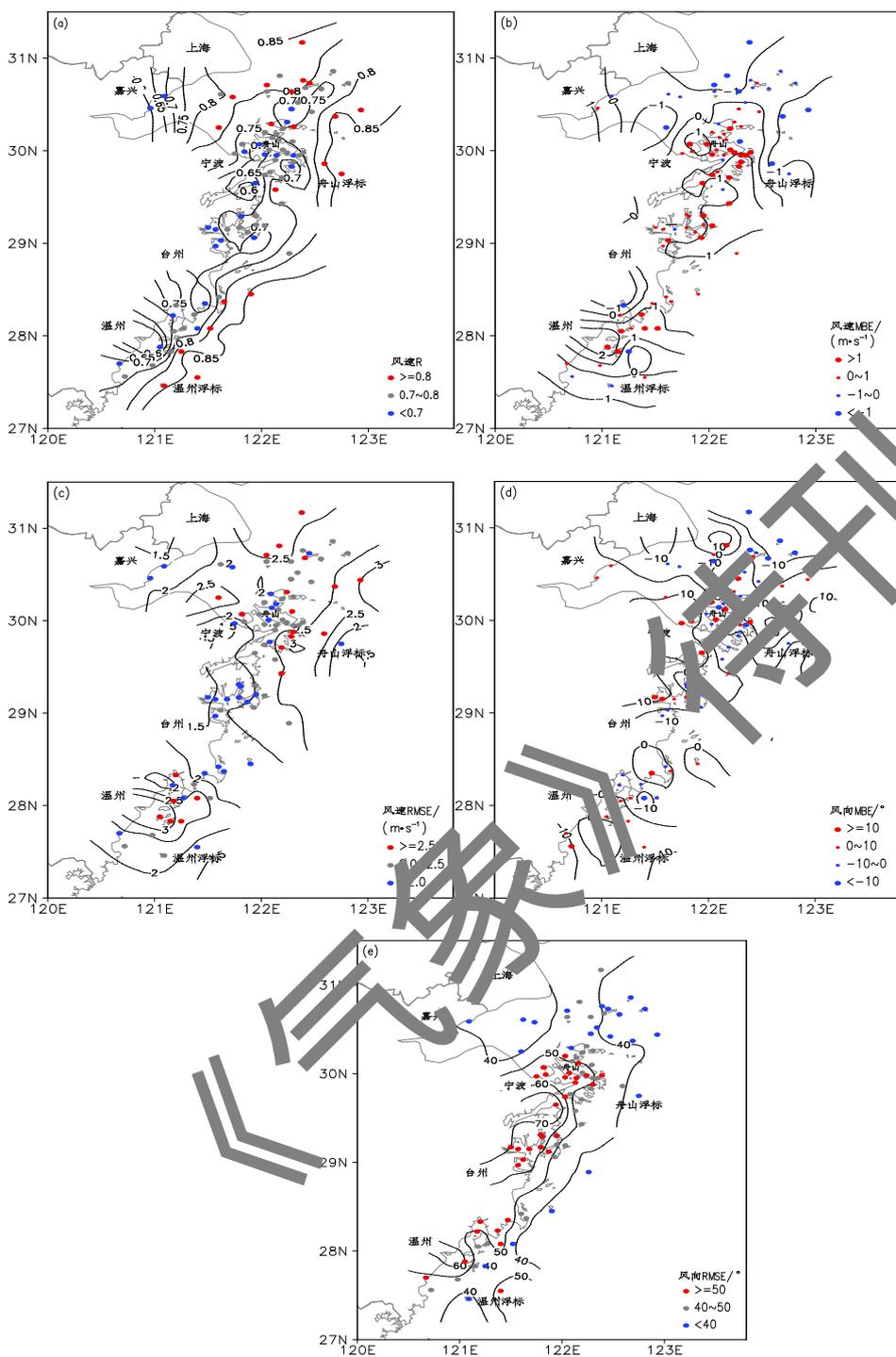


图2 2015—2018年ECMWF 10 m风速和风向预报88个观测站统计指标空间分布(统计样本为12~24 h时
效预报)(填色圆点为站点统计指标值,等值线为站点统计指标插值分布)

(a) 风速相关系数, (b) 风速平均偏差, (c) 风速均方根误差, (d) 风向平均偏差, (e) 风向均方根误差

Fig.2 Spatial distribution of statistical indicators of ECMWF 10 m wind speed and wind direction forecast for 88
observation stations from 2015 to 2018 (Here use 12—24 h lead time forecasts)

(Filling dots are statistical indicators, and contour lines are interpolation of these indicators)

(a) correlation coefficient of wind speed, (b) mean bias error of wind speed, (c) root mean square error of wind
speed, (d) mean bias error of wind direction, (e) root mean square error of wind direction

2.2 风速和风向误差随预报时效的变化

ECMWF 模式不同时效的 10 m 风预报误差空间分布特征基本一致, 但随时效的延长, 各站点的风速和风向预报误差都逐渐加大。选取舟山浮标、北渔山、普陀山、新桥四个站点, 分别代表远离海岸线的标准 10 m 海面、远离海岸线的海岛、近岸海岛、海岸线的站点, 分析四个站点预报误差随预报时效的变化。图 3a 可见, 风速相关系数随预报时效延长逐渐减小, 基本呈线性下降, 72 h 内舟山浮标相关系数在 0.7 以上, 北渔山和普陀山从 0.8 左右逐渐下降至 0.6~0.7 之间, 新桥站从 0.6 下降至 0.5 左右, 120 h 四个站点相关系数均下降至 0.45~0.65 之间, 240 h 降至 0.3 以下; 因此四个观测站下降速率存在显著差异, 预报时效越短观测站间相关系数相差越大, 随时效延长舟山浮标下降最快, 其次为北渔山, 新桥站下降幅度最小。风速均方根误差在临近时效站点间差异较小, 舟山浮标和新桥站在 $1.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右, 北渔山和普陀山在 $2.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右, 72 h 内均小于 $3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 之后逐渐增大, 其中新桥站变化相对平缓, 至 240 h 仅有 $2.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 其他 3 站变化速率较大, 至 240 h 均大于 $3.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。与前文分析一致, 风向均方根误差在 72 h 内站点间差异较大, 舟山浮标和北渔山在 40° 以下, 新桥站则达到 75° 左右, 随着预报时效延长风向均方根误差逐渐增大, 180 h 后四个站点均达 70° 以上。可见预报时效越短, 模式对影响风速风向的天气系统预报准确率越高, 海岸线附近的站点由于受海拔、地形等综合因素的影响, 预报误差相比远离海岸线的站点更大, 而随着预报时效的延长, 影响风速风向的天气系统预报准确率下降, 海拔和地形因素成为影响预报误差的次要因素, 因此海岸线附近的站点预报误差随时效变化相对平缓, 远离海岸线的站点预报误差随时效变化幅度更大。

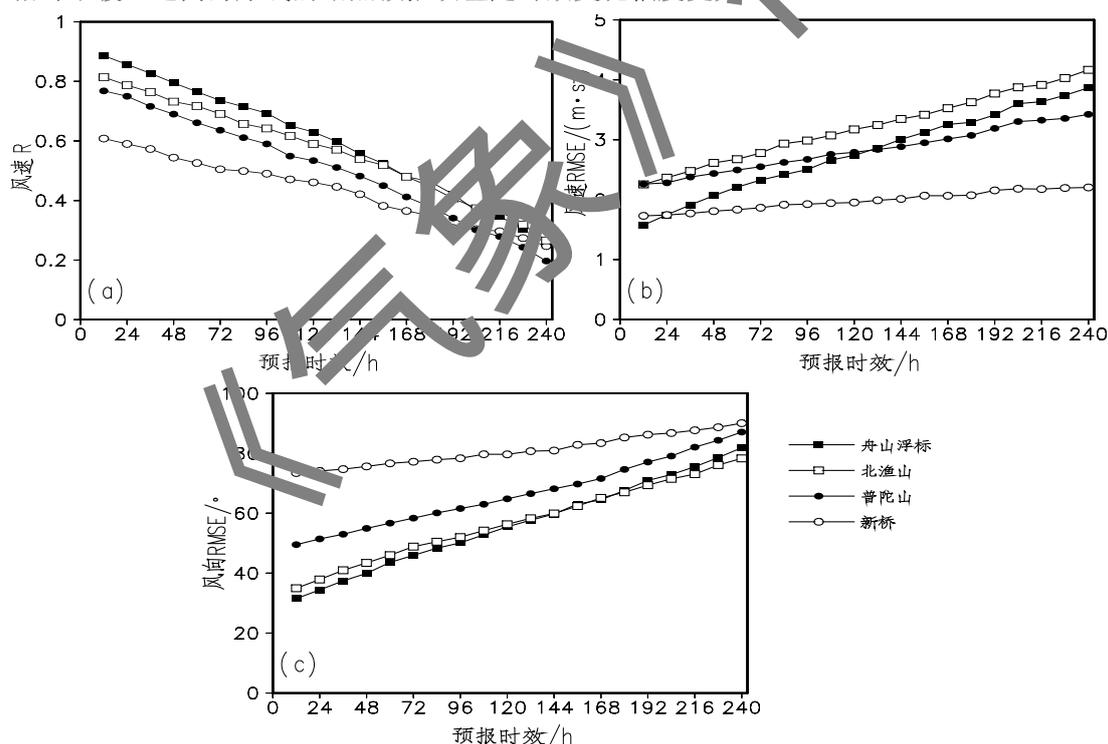


图3 2015—2018年ECMWF 10 m风速和风向预报4个观测站统计指标随时效变化

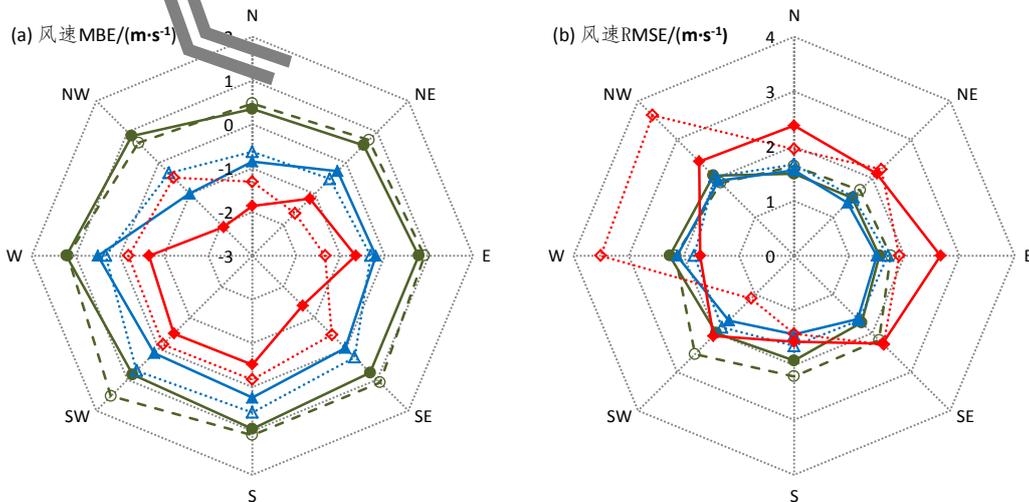
(a) 风速相关系数, (b) 风速均方根误差, (c) 风向均方根误差

Fig.3 Statistical indicators of ECMWF 10 m wind speed and wind direction forecast for 4 observation stations from 2015 to 2018 at different lead time

(a) correlation coefficient of wind speed, (b) root mean square error of wind speed, (c) root mean square error of wind direction

3 浮标站预报误差分析

由于浮标站风速和风向受地形影响较小，观测值基本可以代表宽阔海平面 10 m 风的真实情况，模式对浮标站的预报能力也最好，因此对舟山浮标和温州浮标进行详细分析，可以更好地了解 ECMWF 对于标准海平面 10 m 风的系统性偏差。按照八个方位，即北 (N)、东北 (NE)、东 (E)、东南 (SE)、南 (S)、西南 (SW)、西 (W)、西北 (NW)，对浮标观测风向进行划分，每个风向分为 ≤ 3 级、4~5 级、 ≥ 6 级三个风速等级，对应为弱风速、中等风速、强风速。图 4 为 12—24 h 时效风速和风向平均偏差和均方根误差的风向玫瑰图，可见，当风速 ≤ 3 级时，2 个浮标站风速预报在各个风向平均偏差大多在 $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右，均有偏大趋势，N 和 NE 风向偏差相对较小；风速均方根误差在 $1.5 \sim 2.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 之间，N 和 NE 风速预报离散度更小，S 和 SW 离散度较大；由于弱风速时主导风向不明显，风向预报偏差较大，NW、N、NE 表现为顺时针偏差，以 N 偏差最大，SW 和 W 表现为逆时针偏差；风向均方根误差在 NE、E、SE 时较小，NW、W、SW 时较大，温州浮标明显大于舟山浮标。当风速在 4~5 级时，风速平均偏差在 $\pm 1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 范围内，S、SW、W 三个风向略有偏小，其他风向略有偏大，风速均方根误差小于弱风速和强风速，同样也是 N 和 NE 风速离散度较小；风向平均偏差和均方根误差特征与弱风速相似，但风向均方根误差小于弱风速，N、NE、S、SW 尤为明显。风速 ≥ 6 级时，预报风速均有偏小趋势，N、NE、NW 表现更为明显，舟山浮标 N 和 NW 平均偏差达 $-2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右，其他风向平均偏差大多在 $-1 \sim 0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 之间，对应的 N、NE、NW 的风速均方根误差较弱风速和中等风速也更大，S 和 SW 风速均方根误差则较弱风速更小；强风速时风向预报离散度总体较小，尤其是舟山浮标，但各个风向的风向平均偏差存在差异，舟山浮标大多风向在 $\pm 10^\circ$ 内，SE 和 SW 风向略大，在 $\pm 20^\circ$ 左右，温州浮标在 NW 风向顺时针偏差达 50° 左右，E、SE、SW 风向则有逆时针偏差，其中 E 风向平均偏差达 -50° ，需要指出的是 E 和 SE 风速 ≥ 6 级的样本明显少于其他风向，因此统计特征的代表性需要进一步验证。总体来看，模式对 N、NE、NW 预报存在明显系统性偏差，大风速时风速预报偏小，弱风速时风向预报有顺时针偏差，风速和风向预报离散度均表现为 $\text{NW} > \text{N} > \text{NE}$ ；由于盛行 N、NE、NW 的季节主要是冬季，因此冬季当模式预报中等以上风速时需要在模式风力预报基础上加上系统偏差的考虑。对于夏季风主导的 S 和 SW，仅有强风速时预报偏小，且偏小程度不及 N、NE、NW，风速离散度在中等风速和强风速时更小，风向平均偏差相比 N、NE、NW 更小，但 SW 时有弱的逆时针偏差，风向离散度总体较 N、NE、NW 更小。



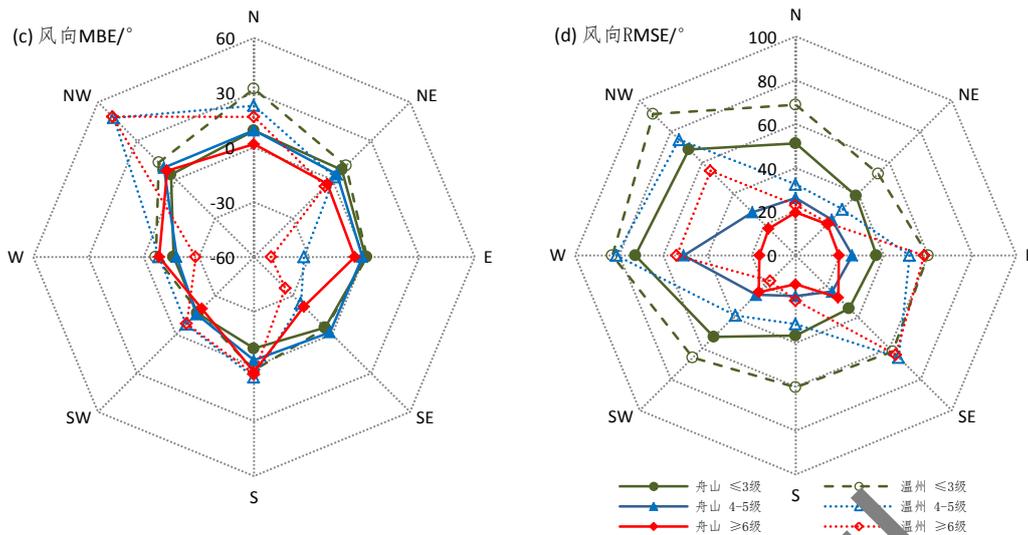


图4 2015—2018年ECMWF 10 m 风预报舟山浮标和温州浮标在8个风向及不同风速等级的统计指标（统计样本为12—24 h时效预报）

(a) 风速平均偏差, (b) 风速均方根误差, (c) 风向平均偏差, (d) 风向均方根误差

Fig.4 Statistical indicators of ECMWF 10 m wind forecast for Zhoushan buoy and Wenzhou buoy at different wind force levels in 8 wind directions from 2015 to 2018 (Here use 12—24 h lead time forecasts)

(a) mean bias error of wind speed, (b) root mean square error of wind speed, (c) mean bias error of wind direction, (d) root mean square error of wind direction.

4 系统性大风过程预报评估

以往针对大风过程的研究大多采用固定时间段内的最大风速或极大风速进行分析(姚日升等, 2016; 周福等, 2017)。但在数值预报评估中不可避免地存在大风过程起始时间偏差, 甚至漏报或空报, 采用固定时间段进行统计无法较好的表征大风过程预报效果。本文基于观测站点和预报网格点进行观测大风过程和预报大风过程的识别, 在此基础上统计系统性大风过程的预报准确率。按照影响浙江沿海的主要大风天气形势, 将大风过程分为冷空气大风、热带气旋大风和低压倒槽大风, 其中, 冬半年大风以冷空气大风为主, 春季及初夏多低压倒槽大风, 夏季大风主要是受热带气旋影响产生(董加斌等, 2015)。按大风过程标准判别, 并经过人工核查, 筛选出2015—2018年影响浙江沿海的大风过程, 包括: 冷空气大风过程99次, 热带气旋大风过程22次, 低压倒槽大风过程32次。

4.1 三种典型大风过程预报准确率

表1表明, 三种大风过程中, 冷空气的预报效果最好, 12 h预报时效内预报准确率达97%, 有3%的过程漏报。随着预报时效的延长, 过程预报准确率逐渐下降, 60 h时效内有80%以上准确, 96 h仍有70%准确。热带气旋大风过程预报准确率随时效变化更为显著, 36 h内预报准确率达85%以上, 受热带气旋路径预报偏差影响, 36 h后预报准确率快速降低, 48—84 h时效有70%左右的准确率, 96 h后降至50%及以下。造成低压倒槽大风的系统包括东北低压、江淮低压(切变)、东海低压等, 在4—6月低压倒槽大风最为常见, 此时冷暖气流交汇, 因此预报难度较大, 前60 h时效准确率仅有50%左右, 60 h后准确率均不足50%, 因此数值预报对于低压倒槽大风预报稳定性最差, 且随着时效延长预报准确率变化并不明显。

表 1 2015—2018 年三种典型大风过程预报准确率

Table 1 Forecast accuracy of three typical gale processes from 2015 to 2018

时效/h	冷空气大风		热带气旋大风		低压倒槽大风	
	漏报/%	准确/%	漏报/%	准确/%	漏报/%	准确/%
12	3.0	97.0	13.6	86.4	62.5	37.5
24	6.0	94.0	9.1	90.9	50.0	50.0
36	11.1	88.9	13.6	86.4	56.3	43.7
48	15.2	84.8	22.7	77.3	43.8	56.2
60	17.2	82.8	27.2	72.8	46.9	53.1
72	28.3	71.7	31.8	68.2	59.4	40.6
84	30.3	69.7	31.8	68.2	59.4	40.6
96	27.3	72.7	40.9	59.1	53.2	46.8
108	32.3	67.7	50.0	50.0	62.6	37.4
120	36.4	63.6	50.0	50.0	65.7	34.3
132	45.4	54.5	63.6	36.4	71.9	28.1
144	40.4	59.6	59.1	40.9	71.9	21.9

4.2 浮标站过程最大风速预报

过程最大风速预报是日常业务服务的重点，前文分析已表明，ECMWF 对于大风预报有偏小的趋势，并且由于预报受时间分辨率影响，导致过程最大风速预报难度更大。图 5 给出三种大风过程浮标站最大风速预报误差随预报时效变化曲线，由于观测数据缺失，两个浮标站的样本量存在一定差别。结果同样表明冷空气的过程最大风速预报效果明显优于热带气旋大风和低压倒槽大风。冷空气过程最大风速预报在 144 h 时效内相关系数均可通过 0.05 显著性水平检验，但预报均有偏小的趋势，舟山浮标站平均偏差达 $-2.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上，温州浮标站略好于舟山，平均偏差在 $-2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右，两个浮标站均方根误差大多在 $2 \sim 3.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 之间，随着预报时效延长，均方根误差逐渐增大。热带气旋过程在 48 h 时效内相关系数可以稳定通过 0.05 显著性水平检验，风速平均偏差在 $-2 \sim 1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 之间，舟山浮标偏小更明显，均方根误差舟山浮标在 $3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右，温州浮标均在 $3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上；48 h 之后相关性较差，平均偏差和均方根误差也迅速增大。低压倒槽过程最大风速预报稳定性总体较差，仅少部分时效相关系数可通过 0.05 显著性水平检验，且与冷空气和热带气旋不同，随着预报时效延长相关系数没有表现出明显的规律性变化。总体来看，冷空气和热带气旋预报与实测最大风速呈线性分布，低压倒槽线性关系较差。随着时效延长逐渐离散化，但冷空气和热带气旋仍基本符合线性关系，因此可以通过线性回归法进行过程最大风速订正。由于样本量限制，仅对冷空气过程做订正。

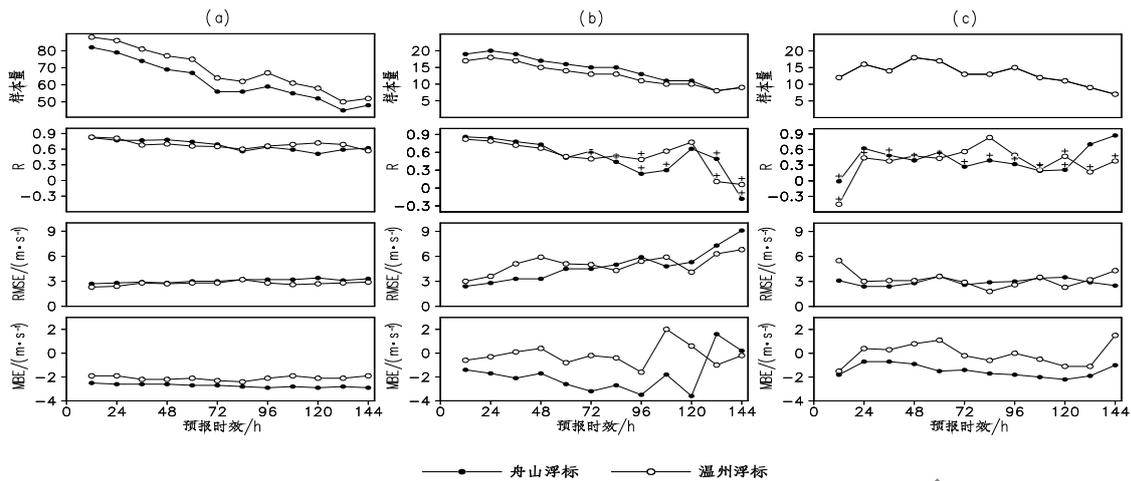


图 5 三种典型大风过程浮标站最大风速预报统计指标随时效变化
 (图 5a—图 5c 自上到下曲线依次为: 样本量、相关系数、均方根误差和平均偏差, 样本量为 2015—2018 年预报准确的大风过程个数, 由于资料缺失舟山浮标和温州浮标的样本量存在差异, 相关系数图中“+”表示未通过 0.05 显著性水平检验)

(a) 冷空气大风, (b) 热带气旋大风, (c) 低压倒槽大风

Fig.5 Statistical indicators of maximum wind speed forecast for the two buoy stations at different lead time during the three typical gale processes

(The figures from top to bottom in each column are: sample size, correlation coefficient, root mean square error and mean bias error. The sample size is the number of predicted gale processes from 2015 to 2018, it is different between Zhoushan buoy and Wenzhou buoy due to the data omission. “+” represents failure of passing the 0.05 significance test in correlation coefficient graph)

(a) cold air gale, (b) tropical cyclones gale, (c) low pressure or reverse troughs gale

4.3 浮标站冷空气过程最大风速订正

在过程预报准确的基础上, 利用受地干扰较小的浮标站风速检验过程最大风速的预报效果, 并利用线性回归法进行订正。将 2015—2017 年冷空气大风过程作为回归样本, 2018 年过程作为独立检验样本, 建立浮标站最大风速线性回归方程, 通过独立样本对回归方程进行检验。表 2 表明, 经过订正后, 过程最大风速误差大幅度减小, 平均偏差降至 $\pm 1.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以内, 均方根误差降至 $1 \sim 2.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 之间, 温州浮标均方根误差略大于舟山浮标。线性订正方法简单, 订正效果显著, 可以为业务预报提供参考。

表 2 2018 年冷空气过程浮标站最大风速预报平均偏差/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$ 和均方根误差/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$ 订正前后对比
 Table 2 Mean bias error/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$ and root mean square error/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$ of maximum wind forecast before and after correction for the two buoy stations during cold air gale processes in 2018

时效/h	舟山浮标					温州浮标				
	订正方程	订正前		订正后		订正方程	订正前		订正后	
		MBE	RMSE	MBE	RMSE		MBE	RMSE	MBE	RMSE
12	$y=1.05*x+1.86$	-2.8	3	-0.3	1	$y=1.18*x-0.51$	-2.2	2.8	-0.5	1.7
24	$y=0.98*x+2.75$	-2.7	2.9	-0.1	1	$y=1.29*x-1.71$	-2.2	2.8	-0.5	1.6
36	$y=0.95*x+3.16$	-2.7	3	-0.2	1.1	$y=0.91*x+3.17$	-2.7	3.3	-0.6	2
48	$y=0.82*x+4.74$	-2.6	2.8	-0.1	0.7	$y=0.95*x+2.65$	-2.6	3.3	-0.6	2
60	$y=0.73*x+5.94$	-2.6	3	-0.1	0.9	$y=1.17*x-0.25$	-2.8	3.5	-1	2.4

72	$y=0.79*x+5.25$	-2.6	3	0	1	$y=0.92*x+3.03$	-2.8	3.5	-0.7	2.1
84	$y=0.64*x+7.22$	-2.6	2.9	0.1	1	$y=0.70*x+6.13$	-2.3	3.5	0.2	2.3
96	$y=0.71*x+6.48$	-2.7	3	0.2	1	$y=1.07*x+1.04$	-2.4	3	-0.4	1.7
108	$y=0.61*x+7.62$	-2.4	2.7	0.3	0.9	$y=1.01*x+1.76$	-1.9	2.6	-0.1	1.7
120	$y=0.48*x+9.14$	-2.9	3.3	-0.2	1.2	$y=1.25*x-1.11$	-2.3	2.9	-0.3	1.8
132	$y=0.78*x+5.49$	-2.9	3.4	-0.1	1.3	$y=0.94*x+2.65$	-2.6	3.3	-0.7	2
144	$y=0.69*x+6.78$	-2.6	2.9	0.3	0.9	$y=0.84*x+3.70$	-2.3	3	-0.5	2.1

5 结论与讨论

通过对 2015—2018 年 ECMWF 细网格 10 m 风预报产品进行检验, 得到以下结论:

(1) ECMWF 预报与远离陆地的开阔海面 10 m 风观测最为接近。12—24 h 预报时效风速相关系数达 0.8 以上, 均方根误差小于 $2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 预报风速略有偏小, 风向均方根误差在 50° 以下, 有逆时针偏差; 海岸线附近的站点风速相关系数不足 0.7, 均方根误差达 $2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上, 预报风速偏大, 风向均方根误差在 50° 以上, 预报风向有顺时针偏差。随时效的延长, 风速相关系数呈线性下降, 风速和风向预报均方根误差则逐渐加大, 海岸线附近的站点随时效变化相对平缓, 远离海岸线的站点变化幅度更大。

(2) 浮标站分析表明, 在不同风向和不同风速等级上预报误差存在一定差异, 主要表现为: 模式对于 NW、N、NE 预报存在明显系统性偏差, 大风速时风速预报偏小, 弱风速时风向预报有顺时针偏差, 风速和风向预报离散度均表现为 $\text{NW}>\text{N}>\text{NE}$; 对于 S 和 SW, 仅有强风速时预报偏小, 且偏小程度不及 NW 和 N, 风速离散度在中等风速和强风速时更小, 风向平均偏差相比 NW 和 N 也更小。

(3) 影响浙江沿海的三种典型大风天气系统中, 冷空气大风预报效果最好, 12 h 预报时效内预报准确率达 97% 以上, 96 h 时效内仍有 70% 过程准确; 热带气旋大风过程预报准确率随时效变化更为显著, 36 h 内预报准确率均在 75% 以上, 受热带气旋路径预报偏差影响, 36 h 后预报准确率快速降低, 96 h 时效后降至 30% 及以下; 低压倒槽大风预报准确率最差, 且随时效延长准确率差异不大, 744 h 时效内预报准确率均在 60% 以下。

(4) 对比浮标站过程最大风速的观测值与预报值, 冷空气过程在 144 h 时效内相关系数均可通过 0.05 显著性水平检验, 热带气旋在 48 h 时效内可以通过 0.05 显著性水平检验, 低压倒槽过程最大风速预报稳定性较差; 冷空气和热带气旋过程基本符合线性分布, 但预报值偏小, 尤其是冷空气过程偏小尤为明显。通过线性回归方法, 对冷空气过程最大风速预报进行订正, 独立样本检验表明, 该方法可以有效减小预报误差, 在业务预报中可作为参考。

参考文献

- 陈圣劼, 刘梅, 张涵斌, 等, 2019. 集合预报产品在江苏省暴雨预报中的应用评估[J]. 气象, 45(7):893-907. Chen S J, Liu M, Zhang H B, et al, 2019. Evaluation on forecasting heavy rainfall over Jiangsu region using ensemble forecast techniques products[J]. Meteor Mon, 45(7):893-907(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).
- 董全, 金荣花, 代刊, 等, 2016. ECMWF 集合预报和确定性预报对淮河流域暴雨预报的对比分析[J]. 气象, 42(9):1146-1153. Dong Q, Jin R H, Dai K, et al, 2016. Comparison between ECMWF ensemble and deterministic forecast for heavy rainfall in the Huaihe River basin of China[J]. Meteor Mon, 42(9):1146-1153(in Chinese).
- 胡海川, 黄彬, 魏晓琳, 2017. 我国近海洋面 10 m 风速集合预报客观订正方法[J]. 气象, 43(7):856-862. Hu H C, Huang B, Wei X L, et al, Objective correction method of ensemble forecast of 10 m winds on Chinese offshore[J]. Meteor Mon, 43(7):856-862(in Chinese).

侯淑梅, 张少林, 盛春岩, 等, 2014. T639 数值预报产品对黄渤海沿海大风预报效果检验[J]. 海洋预报, 31(6):48-56. Hou S M, Zhang S L, Sheng C Y, et al, 2014. Evaluation of T639 numerical forecast products during the strong gales in the Yellow Sea and Bohai Sea[J]. *Marin Forec*, 31(6):48-56(in Chinese).

贾丽红, 张云惠, 何耀龙, 等, 2018. 基于多模式的新疆最高(低)气温预报误差订正及集成方法研究[J]. 干旱气象, 36(2): 310-318. Jia L H, Zhang Y H, He Y L, et al, 2018. Research on error correction and integration methods of maximum and minimum temperature forecast based on multi-model in Xinjiang[J]. *J Arid Meteor*, 36(2): 310-318(in Chinese).

罗玲, 娄小芬, 傅良, 等. ECMWF 极端降水预报指数在华东台风暴雨中的应用研究[J]. 气象, 2019, 45(10):1382-1391. Luo L, Lou X F, Fu L, et al, 2019. Application of precipitation extreme forecast index from ECMWF in typhoon rainstorm in East China[J]. *Meteor Mon*, 45(10):1382-1391 (in Chinese).

黎鑫, 张韧, 卢扬, 等, 2016. “海上丝绸之路”自然环境风险分析[J]. 海洋通报, 35(6):609-616. Li X, Zhang R, Lu Y, et al, 2016. Risk analysis for the natural environment of ‘Maritime Silk Road’ [J]. *Marin Sci Bull*, 35(6): 609-616(in Chinese).

刘哲, 张鹏, 刘南江, 等, 2018. “一带一路”中国重点区域自然灾害特征分析[J]. 灾害学, 33(4)65-71. Liu Z, Zhang P, Liu N J, et al, 2018. The analysis of the characteristics of natural disasters in key regions of “One-Belt-One-Road” initiative[J]. *J Catastrophol*, 33(4)65-71(in Chinese).

潘留杰, 张宏芳, 袁媛, 等, 2015. 基于 T639 细网格模式的陕西省秋淋天气预报效果评估[J]. 气象与环境学报, 31(6):9-17. Pan L J, Zhang H F, Yuan Y, et al, 2015. Verification of precipitation forecasting for autumn continuous rainfall by T639 refined grid model in Shanxi province[J]. *J Meteor Environ*, 31(6):9-17(in Chinese).

齐庆华, 蔡榕硕, 颜秀花, 2019. 气候变化与我国海洋灾害风险治理探讨[J]. 海洋通报, 38(4):361-367. Qi Q H, Cai R S, Yan X H, 2019. Discussion on climate change and marine disaster risk governance in the coastal China seas[J]. *Marin Sci Bull*, 38(4):361-367(in Chinese).

魏凤英, 2007. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 北京:气象出版社. Wei F Y, 2007. Modern climate statistical diagnosis and prediction technology [M]. Beijing: Meteorological Press (in Chinese).

万夫敬, 赵传湖, 马艳, 等, 2018. ECMWF 模式气温预报在青岛地区的检验与评估[J]. 气象科技, 46(1):112-120. Wan F J, Zhao C H, Ma Y, et al, 2018. Prediction effectiveness verification of ECMWF fine grid model for air temperature in Qingdao region[J]. *Meteor Sci Technol*, 46(1):112-120(in Chinese).

王静静, 刘敏, 权瑞松, 等, 2012. 沿海港口自然灾害风险评估[J]. 地理科学, 32(4):516-520. Wang J J, Liu M, Quan R S, et al, 2012. Natural disaster risk assessment of coastal ports in China[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 32(4):516-520(in Chinese).

吴俞, 冯文, 李勋, 等, 2015. ECMWF 细网格 10 m 风场产品在南海海域的预报检验[J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 40(9):204-212. Wu Y, Feng W, Li X, et al, 2015. On forecast test of ECMWF 10 m wind field products in South China Sea[J]. *J Southwest China Normal Unive(Natural Science Edition)*, 40(9):204-212(in Chinese).

薛湛彬, 陈娟, 张瑛, 等, 2019. ECMWF 高分辨率模式 2 m 温度预报误差订正方法研究[J]. 气象, 45(6):831-842. Xue C B, Chen X, Zhang Y, et al, 2019. Bias correction method for the 2 m temperature forecast of ECMWF high resolution model[J]. *Meteor Mon*, 45(6):831-842(in Chinese).

阎丽凤, 盛春岩, 肖明静, 等, 2013. MM5、WRF-RUC 及 T639 模式对山东沿海风力预报分级检验[J]. 气象科学, 33(3):340-346. Yan L F, Sheng C Y, Xiao M J, et al, 2013. Wind force forecast verification of the MM5, WRF-RUC and T639 models in Shandong coastal areas[J]. *Sci Meteor Sin*, 33(3):340-346(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).

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).

曾瑾瑜, 韩美, 吴幸毓, 等, 2015. WRF、EC 和 T639 模式在福建沿海冬半年大风预报中的检验与应用[J]. 海洋科学, 39(7): 75-85. Zeng J Y, Han M, Wu X Y, et al, 2015. Test and application of WRF, EC and T639 models in strong wind forecast in Fujian coast in winter half year[J]. *Marine Sci*, 39(7): 75-85(in Chinese).