

大连地区ECMWF细网格风向与实况的对比检验

隋玉秀¹, 杨景泰¹, 常慧琳¹, 卞若玟², 赵华睿¹, 肖剑³, 曹波³

(1.大连市气象服务中心, 辽宁 大连 116001; 2.大连市旅顺口区气象局, 辽宁 大连 116041; 3.空军航空大学, 辽宁 锦州 121000)

摘 要: 选取2016年1月—2018年12月ECMWF细网格10 m风资料, 与大连地区8个国家气象观测站地面5类实况风向资料进行对比分析。结果表明: 5类实况风向平均误差(ME)相差不大, 平均绝对误差(MAE)随着预报时限延长均呈增大趋势, 正点最大风MAE最小且各时限 r 均最大, 综合来看EC 10 m风向预报与正点最大风最为接近。统计分析EC 10 m风与大连地区正点最大风向的ME和MAE, 表明EC风向预报的ME均在 $0.1^{\circ} \sim 6^{\circ}$ 间, 预报略偏向实况风的来向左侧, 各时限MAE则均在 36° 以上。风向误差在不同风向、风级和站点中均差异明显, 东风误差最大, 当实况风力小于4级时, 各时限ME均为正差, 风级越小正差越大, 4级及以上均为负差, 风级越大越向负值偏离, 风级越大MAE越小。ME在不同风级和风向上均存在明显的日变化。夜间误差整体大于白天, 17—20时是全天误差最小的时段。对比08时和20时两个起报时次的风向ME、MAE与RMSE, 总体来看08时各时限的预报风向略好于20时。

关键词: 风向; 最大风; 日变化

中图分类号: P732.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2022)01-0021-11

1 引言

风是影响海上航运与作业最主要的气象因素之一, 海上及沿海风场研究对于理解海洋-陆地-大气之间的相互作用, 以及开展相关领域的研究尤为重要。受客观条件制约, 目前海上气象观测资料的空间分辨率和覆盖范围均非常有限, 并且大多离海岸线较近, 这在一定程度上制约了海上风的科研与服务。大连属半岛地形, 东部毗邻黄海北部海域, 西部紧邻渤海这一较为特殊的内陆海, 南部为黄渤海交界的渤海海峡, 是我国海陆分布最为复杂的地区之一, 海陆风和地形风效应均非常明显, 陆地及周边海域大风天气频发, 严重影响着海上运输、渔业、港口及海上作业等。

近年来, 随着天气预报技术的不断发展, 数值模式逐渐成为研究和预报风要素的主要方法^[1-3]。数值产品再分析资料作为初始场和边界场, 对沿海

及周边海域的风要素进行研究^[4-6], 这在一定程度上弥补了海上观测资料的不足, 给海洋气象服务创造了良好的效益。然而风要素是一个矢量, 既包含风速也包含风向, 由于其本身具有非连续和非正态分布的特点, 加之具有较强的地域性, 因此, 在实际工作中需要针对当地具体情况进行检验和订正。在风的检验方面, 很多学者都发现某些数值模式在不同的时间和季节对风的预报存在差异^[7-10], 不同的风向、风速、时效和地理位置等也都对最终预报效果产生影响^[8-12]。一些学者还针对不同数值模式产品预报的风场开展了比较研究。孙逸涵等^[10]综合分析检验了全球天气预报系统(Global Forecasting System, GFS)、欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-range Weather Forecasts, ECMWF, 简称EC)模式和T639资料在中国境内近地层的风速预报效果; 曾瑾瑜等^[11]对天气预报模式(Weather Research and Forecasting, WRF)、ECMWF和T639

收稿日期: 2020-08-12; 修回日期: 2020-12-03。

基金项目: 环渤海区域科技协同创新基金项目(QYXM201801)资助。

作者简介: 隋玉秀(1983-), 女, 高级工程师, 硕士, 主要从事天气预报与海洋气象服务工作。E-mail: 540798931@qq.com

这3种模式预报的福建沿海风场进行了对比检验;夏晓玲等^[13]检验了ECMWF模式、中国气象局新一代数值天气预报系统(Global/Regional Assimilation and Prediction System, GRAPES)和日本气象厅(Japan Meteorological Agency, JMA)模式对贵州省风速的预报误差,总体来看ECMWF模式评价较好。以上研究大多侧重于风速方面,而对风向的研究较少。当风力达到一定等级时,同样的风力作用下,不同的侧风对航运、海上钻井平台和港口等地高危作业产生的影响有显著差异,甚至会严重影响飞机的起降和飞行安全^[14-16]。即使在风不大的情况下,风向对火灾救援、城市热岛效应^[17]以及雾和霾等低能见度天气或空气污染过程^[18-21]也具有不可忽略的作用。对于大连来说,风向的变化及海陆风的转换有时还会对气温产生显著影响,例如春季当风向由陆风转为海风时,大连站小时降温有时可达6℃以上,降幅超过多数冷空气过程降温。

为了实现风向的准确预报,曾晓青等^[22]基于北京地区的情况给出了一种基于模式输出统计法(Model Output Statistics, MOS)的风向矢量预测方案,对风向预测具有较好能力。吴曼丽等^[23]采用卡尔曼滤波方法对第五代中尺度模式(Mesoscale Model 5, MM5)预报的辽宁沿海风矢量进行检验,但得出的风向预报效果并不理想,即便是预报结果最好的黄海北部,准确率也仅为57.3%,渤海北部只有41.1%。在实际观测业务中,风向的正点常规观测记录包含瞬时风向、2 min平均风向、10 min平均风向、极大风向和最大风向5类,但关于各类实况风向与数值预报格点风向的对应参考性研究目前还比较稀缺。吕明华等^[24]虽然提出了使用不同小时数据统计风向的方法,但与常规气象观测记录存在差异,不便于实际预报工作使用。因此,在日常的海洋气象服务中,有必要对照实际观测风向,对常用数值模式提供的大连沿海风向初始场和预报场资料进行系统性检验,从而获得高精度的本地化格点订正产品。

2 资料与方法

ECMWF模式具有较高的预报水平,在天气预报业务中应用广泛,其10 m风产品是海洋气象预报

的重要参考要素之一,对风的预报效果较好^[25-27]。选取2016年1月—2018年12月ECMWF细网格10 m风(简称“EC 10 m风”)逐日预报资料,包含08时(北京时,下同)和20时模式的分析场,以及003~240 h逐3 h或6 h预报,共计53个时次的分析和预报资料,空间分辨率为 $0.125^{\circ} \times 0.125^{\circ}$ 。考虑到观测资料的连续性和准确性,选取大连境内的大连、金州、长海、庄河、普兰店、瓦房店、长兴岛和旅顺8个国家气象观测站,这些站点遍布渤海、渤海海峡、黄海北部沿岸、海岛以及相对内陆的地区(见图1),能较好地代表大连海陆分布的特殊地理状况。将EC 10 m风预报插值到上述8个站,所有站点的风矢量分析和预报值均经过 U 、 V 分量双线性插值法内插到各个站点,然后再计算该站的风向和风速值。

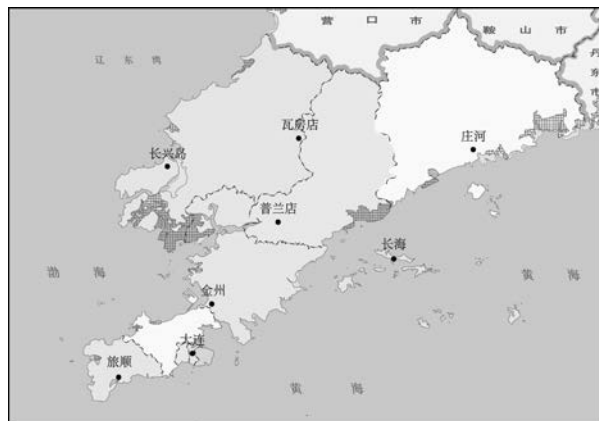


图1 大连地区站点分布图

Fig.1 Distribution of stations in Dalian area

在实际观测中,风的正点记录包含5类。按照观测规范对各类风的定义,2 min平均风、10 min平均风和最大风属平均风类,瞬时风和极大风属瞬时风或阵风类(见表1)。

EC 10 m风预报与各类地面风观测值均存在不同程度的误差,因此有必要探讨实际观测记录的各类风与EC 10 m风预报的对应性,以对应最好的某类风为参照进行分析订正。规定风向预报误差值为预报值减实况值,按照实况对风向和风级进行分类,其中1级含静风。选取平均误差(Mean Error, ME)、平均绝对误差(Mean Absolute Error, MAE)和相关性分析3种方式,对EC 10 m风向与大连地区8个站的上述5类风向进行对比,按照风级、风向、站

表1 正点观测5类风风向的含义、算法及类别

Tab.1 The meanings, algorithms and classifications of the five kinds of wind directions observed on schedule

名称	含义和算法	类别
瞬时风向	风向每秒采样一次, 正点前3 s的平均值	阵风
2 min 平均风向	风向每秒采样一次, 正点前120 s的平均值	平均风
10 min 平均风向	风向每秒采样一次, 先求出以1 s为步长, 每1 min的平均值, 然后再以1 min为步长, 求正点前10 min的平均值	平均风
极大风向	正点前1 h内的最大瞬时风所对应的风向	阵风
最大风向	正点前1 h内的最大10 min平均风所对应的平均风向	平均风

点、预报时限以及起报时次等不同分类进行统计分析,其误差计算公式为:

$$ME_{(i,j,k,p,q,s)} = \frac{\sum_{i=ns}^{ms} \sum_{j=nf}^{mf} \sum_{k=nl}^{nl} \sum_{p=md}^{md} \sum_{q=mv}^{mv} \sum_{s=mt}^{mt} (VF_{(i,j,k,s)}(t) - VC_{(i,j,k,p,q,s)}(t))}{\sum_{i=ns}^{ms} \sum_{j=nf}^{mf} \sum_{k=nl}^{nl} \sum_{p=md}^{md} \sum_{q=mv}^{mv} \sum_{s=mt}^{mt}} \quad (1)$$

$$MAE_{(i,j,k,p,q,s)} = \frac{\sum_{i=ns}^{ms} \sum_{j=nf}^{mf} \sum_{k=nl}^{nl} \sum_{p=md}^{md} \sum_{q=mv}^{mv} \sum_{s=mt}^{mt} |VF_{(i,j,k,s)}(t) - VC_{(i,j,k,p,q,s)}(t)|}{\sum_{i=ns}^{ms} \sum_{j=nf}^{mf} \sum_{k=nl}^{nl} \sum_{p=md}^{md} \sum_{q=mv}^{mv} \sum_{s=mt}^{mt}} \quad (2)$$

$$r = \frac{\sum_{k=nl}^{nl} \sum_{s=mt}^{mt} (VF_{(k,s)}(t) - \overline{VF_{(k,s)}})(VC_{(k,s)}(t) - \overline{VC_{(k,s)}})}{\sqrt{\sum_{k=nl}^{nl} \sum_{s=mt}^{mt} (VF_{(k,s)}(t) - \overline{VF_{(k,s)}})^2} \sqrt{\sum_{k=nl}^{nl} \sum_{s=mt}^{mt} (VC_{(k,s)}(t) - \overline{VC_{(k,s)}})^2}} \quad (3)$$

式中, i 代表测站代码, ns 和 ms 取值均为1~8,当统计单站时, $ns = ms$; j 代表起报时次,分08时和20时两种情况,用代码1~2表示, nf 和 mf 取值均为1~2,数据计算只在“不同起报时次的风向误差比较”中分08和20时次,其余均为两个起报时次,单一起报时次时 $nf = mf$; k 代表归类的预报时限,用代码1~21与预报时限对应, nl 取值为1~21; p 代表风向,代码取值均为1~8,分别代表8个风向,当统计某单一风向时, $nd = md$; q 代表风级,代码取值均为1~11,分别与1~11级对应(极大风速实况最大为11级),当统计某个风级时, $nv = mv$; s 代表某时限中包含的预报时次数, mt 因不同的时限取值不同,时限取值1~7时(相当于72 h内预报), $mt = 4$,时限取值8~20时(相当于078~234 h时次预报), $mt = 2$,时限取值21时(相当于240时次预报), $mt = 1$; $VF_{(i,j,k,s)}(t)$ 为某站、某起报时次、某预报时限和某时刻EC 10 m预报风向, $VF_{(k,s)}(t)$ 为8站某预报时限和某时刻EC 10 m预报风向, $\overline{VF_{(k,s)}}$ 为8站某预报时限所有相对应的 t 时刻预报风向的平均值,

$VC_{(i,j,k,p,q,s)}(t)$ 为与某站某时刻EC 10 m预报对应时间的5类实况风向中的某类(风向、风级分类以实况为准), $VC_{(k,s)}(t)$ 为8站某预报时限和某时刻EC 10 m预报对应时间的5类实况风向中的某类, $\overline{VC_{(k,s)}}$ 为8个站某预报时限所有相对应的 t 时刻的某类实况风向的平均值, t 的取值为2016年1月1日—2018年12月31日逐日02时、05时、08时、11时、14时、17时、20时和23时。本文资料起止时间简写为2016—2018年。

考虑到风向的圆周性,为避免 0° 和 360° 之间的间断引起风向统计结果偏离实际,在对风向进行误差统计时,将 $VF_{(i,j,k,s)}(t) - VC_{(i,j,k,p,q,s)}(t)$ 风向差 θ 控制在绝对值 180° 的范围内,对差值进行如下转换:

$$\begin{aligned} \text{当 } \theta < -180^\circ \text{ 时, } \theta &= \theta + 360^\circ \\ \text{当 } \theta > 180^\circ \text{ 时, } \theta &= \theta - 360^\circ \end{aligned} \quad (4)$$

在相关系数计算某风向的平均风向时,参与计算的风向先减去标准风向值(例如北风为 0° ,南风为 180°),并转换差值使 $-180^\circ < \theta < 180^\circ$,得出平均风向后再与标准风向相加,这样得到的平均风向才符合实际。例如 359°N 和 0°N ,直接计算平均风向为 179.5°S ,经上述处理转换后得到 -0.5°N ;全风向的平均风向则直接计算平均。

3 结果分析

3.1 EC 10 m 风向预报与实况比较

表2给出了2016—2018年期间EC 10 m风产品对大连地区8个站的风向分析、预报与各类实况风向的ME、MAE和相关系数 r 。表中“00 h”表示08或20时起报的000时次、003时次、006时次和009时次分析和预报,简称“00 h时限”;“12 h”表示08或

20时起报的012时次、015时次、018时次和021时次12~21 h预报,简称“12 h时限”(其他“24 h”、“36 h”……等以此类推,下同)。这样归类可将53个时次缩减为21个时限,便于比较和缩减表列数。文中用

H表示时次、h表示时限加以区分。

表2可以看出,ME阵风类风向小于平均风类风向,但各类风的风向ME差别不大,即使在ME相差最大的00 h时限,误差也均在 $3.6^{\circ}\sim 5.0^{\circ}$ 之间,相差

表2 2016—2018年EC 10 m 00~240 h时限风向与大连8个站各类观测风向之间的ME、MAE和相关系数

Tab.2 The ME, MAE and correlation coefficients between various observation wind directions of the eight stations in Dalian and the EC 10 m 00 ~ 240 h time wind directions from 2016 to 2018

名称	类别	00	12 h	24 h	36 h	48 h	60 h	72 h	84 h	96 h	108 h	120 h
瞬时风	ME/ $^{\circ}$	3.6	4.3	4.3	4.5	4.9	4.8	4.4	5.1	4.4	3.5	3.3
	MAE/ $^{\circ}$	38.3	39.6	40.9	42.3	43.5	45	46.2	47.5	49.4	51.2	52.7
	r	0.32	0.32	0.32	0.31	0.31	0.30	0.30	0.29	0.27	0.26	0.25
2 min 平均风	ME/ $^{\circ}$	3.8	4.4	4.5	4.6	5	5.1	4.5	4.9	4.3	3.3	3.3
	MAE/ $^{\circ}$	36.1	37.6	38.9	40.3	41.6	43.2	44.5	45.8	47.8	49.6	51.3
	r	0.33	0.36	0.35	0.35	0.35	0.34	0.32	0.31	0.30	0.27	0.26
10 min 平均风	ME/ $^{\circ}$	4.4	4.8	4.9	4.9	5.3	5.5	5	5.1	4.7	3.8	3.7
	MAE/ $^{\circ}$	35.1	36.7	38.1	39.5	40.9	42.4	43.9	45.1	47.2	49	50.7
	r	0.35	0.41	0.40	0.37	0.36	0.36	0.34	0.32	0.30	0.29	0.28
正点极大风	ME/ $^{\circ}$	3.7	4.2	4.3	4.3	4.6	4.8	4.5	4.6	4.5	3.4	2.9
	MAE/ $^{\circ}$	36	37.3	38.6	40	41.3	42.9	44.2	45.5	47.5	49.2	51
	r	0.37	0.41	0.40	0.39	0.38	0.36	0.36	0.34	0.32	0.30	0.30
正点最大风	ME/ $^{\circ}$	5	5.5	5.5	5.6	5.9	6	5.5	5.6	5.3	4.3	3.9
	MAE/ $^{\circ}$	34.6	36	37.4	38.8	40.1	41.7	43.2	44.4	46.5	48.3	50
	r	0.41	0.45	0.43	0.43	0.41	0.40	0.38	0.37	0.34	0.33	0.32
名称	类别	132 h	144 h	156 h	168 h	180 h	192 h	204 h	216 h	228 h	240 h	
瞬时风	ME/ $^{\circ}$	3	2.6	2.7	2.9	2.1	2.3	1.8	0.7	-0.1	1.8	
	MAE/ $^{\circ}$	55.2	57.3	59.6	61.8	64.3	66.9	69.3	71.3	72.9	73	
	r	0.22	0.21	0.19	0.18	0.15	0.14	0.14	0.12	0.11	0.08	
2 min 平均风	ME/ $^{\circ}$	2.8	2.5	2.8	3	2.2	1.9	1.8	0.8	-0.3	2.2	
	MAE/ $^{\circ}$	54	56	58.4	60.8	63.4	66	68.7	70.7	72.3	72.5	
	r	0.24	0.23	0.20	0.20	0.17	0.15	0.14	0.14	0.13	0.09	
10 min 平均风	ME/ $^{\circ}$	3.2	2.5	3	3.4	2.4	2.7	2	1.2	0	2.4	
	MAE/ $^{\circ}$	53.5	55.6	57.9	60.5	63.1	65.6	68.4	70.6	72	72.2	
	r	0.26	0.25	0.23	0.21	0.19	0.18	0.16	0.15	0.15	0.09	
正点极大风	ME/ $^{\circ}$	2.5	2.2	2.2	2.5	1.3	2.4	1.8	0.1	0	0.5	
	MAE/ $^{\circ}$	53.6	55.9	58.3	60.9	63.3	65.8	68.4	71	72.4	72.2	
	r	0.28	0.27	0.24	0.23	0.21	0.19	0.18	0.15	0.15	0.10	
正点最大风	ME/ $^{\circ}$	3.5	3.1	3.3	3.1	2.1	2.8	2.4	0.8	0.1	1.9	
	MAE/ $^{\circ}$	52.7	54.9	57.4	60.3	62.8	65.5	68.1	70.6	71.9	71.8	
	r	0.31	0.29	0.27	0.25	0.22	0.20	0.19	0.17	0.17	0.10	

最大仅 1.4° ,因而认为各类风的风向ME基本相当。MAE则与ME相反,平均风类的风向误差小于阵风类,正点最大风的风向预报误差最小,各类风的风向MAE均随着预报时限的延长而增大,但各类风之间相差依然不大,相差最大的00 h时限仅 3.7° 。从相关系数分析来看,最大风在各时限下 r 均大于其他类风,其次是极大风,瞬时风在各时限下的 r 均最小。随着预报时限延长,EC 10 m风与实况风向的 r 多呈减小趋势,但均通过了置信度 $\alpha=0.05$ 和 $\alpha=0.01$ 的显著性检验。综合来看,EC模式预报的风向与正点最大风对应关系最好,这与该模式预报的风速情况一致^[28]。

3.2 基于正点最大风的误差统计与分析

与正点最大风实况相比,00~240 h时限内EC 10 m风对大连地区8个站的风向预报ME均在 $0.1^{\circ}\sim 6^{\circ}$ 之间,预报略偏向实况风的来向左侧,108 h时限后ME呈显著减小的趋势。除00 h时限外,各预报时限下MAE均在 36° 或以上,且随着预报时限的延长而增大,228~240 h时限接近 72° 。ME很小而MAE较大,说明EC预报具体到个例风向偏差比较

显著,但左、右偏离程度较为接近。

3.2.1 不同风向间的风向误差

图2为2016—2018年EC 10 m风对大连地区8站各风向分析预报的误差情况。图中可以看出,EC对各风向预报的ME差异比较明显,但84 h以前平均ME呈略增大趋势,整体差异很小,各风向的ME趋势也大致相同,96 h之后平均ME有增有减且各时限差异较大,稳定性下降。从8个站平均来看,北风和东北风为负差,84 h内误差为 $-4.4^{\circ}\sim -1.4^{\circ}$;其他为正差,东风误差最大,84 h内误差大于 20° ;其次是东南风,误差也大于 10° 。从MAE来看,东风与东北风的误差最大,多在 50° 以上;其次是东南风和西风,在 40° 上下;所有MAE随预报时限延长而明显增大。

3.2.2 不同风级的风向误差

从图3给出的2016—2018年EC预报的大连地区8个站不同风级的风向ME和MAE情况可以看出,ME和MAE随预报时限延长偏离 0° 越来越明显,但ME变化相对很小,说明误差具体到个例不但会随着预报时限延长而增大,而且其正、负离散程度也在逐渐增大。从ME来看,当实况风力小于4

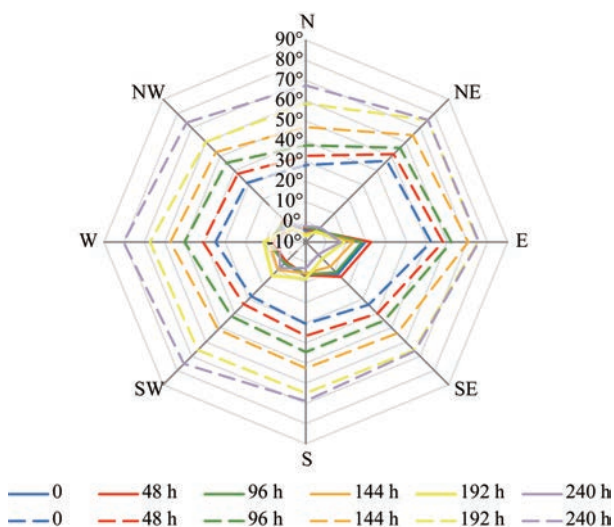


图2 2016—2018年EC 10 m 00~240 h时限风向与大连8个站不同风向的ME(实线)与MAE(虚线)

Fig.2 The ME(solid line) and MAE(dashed) between EC 10 m 00~240 h time wind directions and actual wind directions of different wind directions of the eight stations in Dalian from 2016 to 2018

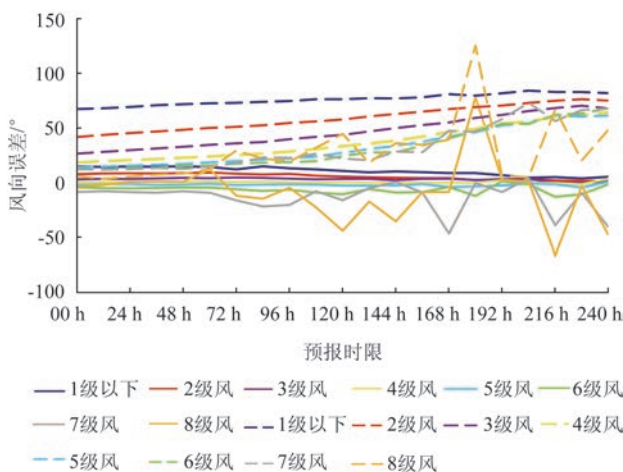


图3 2016—2018年EC 10 m 00~240 h时限风向与大连8个站不同风级的风向ME(实线)和MEA(虚线)

Fig.3 The ME(solid line) and MAE(dashed) between EC 10 m 00~240 h time wind directions and the actual wind directions of different wind scales of the eight stations in Dalian from 2016 to 2018

级时,各时限预报均为正差,预报的风向偏向实况风来向的左侧,风越小偏左的程度越大;风级越大误差越向负值方向偏离,即随着风级增大,预报的风向向实况风来向的右侧偏离的程度增大;00~96 h时限ME差异不明显,108 h时限以后呈逐渐减小趋势;由于7~8级次数较少,其统计规律与6级以下个别时限有一定差异。MAE则随预报时限延长呈逐渐增大的趋势,且风级越小误差越大,1级误差普遍在70°以上,其中,216~228 h时限最大可达82.6°,随着风级增大,预报偏差的幅度逐渐减小。

箱线图能更直观地反映出不同风级间风向预报的偏差程度。以24 h时限为例(见图4),图中明显可以看出风级越大,预报风向偏离实况风向的离散度越小,中位值(50%线)由正值逐渐向负值偏

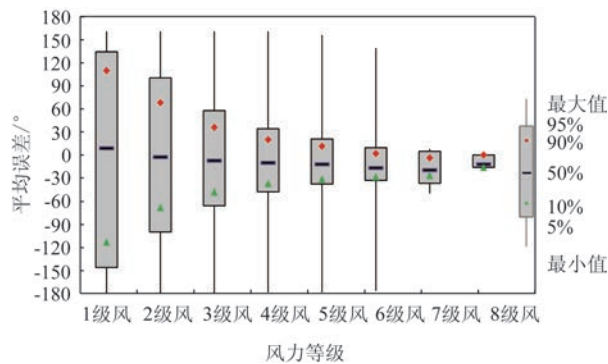


图4 2016—2018年EC 10 m 24 h时限预报大连8个站不同风级的风向ME箱线图

Fig.4 The wind direction ME box plots for different wind scales of the eight stations in Dalian forecasted by EC 10 m 24 h time wind product from 2016 to 2018

离,其中1~3级为正差(由19°逐渐减小至2°),4~7级为负差(由-1°增大至-11°),但8级的中位值为-3°,这可能与8级实况个例少且统计意义相对较差有关。此外,从各级风的线端值来看,1~6级均可能出现达到或接近180°的极端偏差,7~8级风向预报则比较稳定。

3.2.3 不同风向与风级的风向误差

表3列出了2016—2018年EC 10 m风分析、预报不同风向和风级下,大连地区8个站风向的ME。表中可以看出,1级和2级除北风为负差外,其他风向均为正差;与冷空气对应密切的西风—东北风在3级及以上基本均为负差,而与暖空气对应密切的东风—西南风在3级及以上多对应为正差,但西风和西北风在6级及以上时又出现了正差现象,而西南风在5级和6级时对应负差。部分风向在风力偏大时,表现与多数风级规律有所不同,可能与大风次数偏少且统计意义相对较差有关。

综合来看,北风在所有风级中都是负差;3级以上的东北风对应较大的负差;而东风、东南风和南风在所有风级中都是正差,且东风和东南风几乎每个风级都对应较大的正差;其他风向则是1~2级时为正差,风力增大后逐渐转为负差,或随着风力增加略有反复。总之,风向的预报误差与各风向和风级均密切相关。

3.2.4 风向误差的日变化

由于大气运动存在明显的日变化,一些影响风速大小的因子,如动量下传等也存在明显的日变化。统计发现EC 10 m风速对大连地区的预报ME具有明显的日变化^[28],EC 10 m风向预报误差在大

表3 2016—2018年不同风级与风向叠加下EC 10 m 00~240 h时限风向与大连8个站风向的ME

Tab.3 The ME between EC 10 m 00~240 h time wind directions and the actual wind directions of the eight stations in Dalian under the superposition of different wind scales and different wind directions from 2016 to 2018

风向/°	1级	2级	3级	4级	5级	6级	7级	8级
N	-12.4	-1.9	-4.2	-4.4	-3.8	-3.8	-9.9	—
NE	1.2	6.3	-8.2	-13.8	-13.6	-11	-13.1	—
E	25.7	20.3	18.5	21.6	14.3	26	—	—
SE	19.8	15.3	13.5	11.3	10.7	3.5	—	—
S	15.2	5.7	5.4	8.2	11.5	1.7	—	—
SW	24.3	6.6	1.1	0.1	-1.8	-9.6	—	—
W	33.1	10.8	-8.8	-7.5	-4.9	2.6	15	—
NW	15.4	5.2	-0.3	-0.5	-1.3	1.3	-1.9	0.3

连地区是否也存在着类似的日变化?统计2016—2018年,EC 10 m 003~024 H时次预报与大连地区8个站每日不同风级和风向的ME,可以看出各风级(由于7~8级出现次数少,有些时次没有,故不对其日变化进行单独统计分析,下同)的风向ME日变化非常明显(见图5a)。夜间误差整体大于白天,其中,17—20时是全天风向误差最小的时段。夜间1~4级均为正差,5~6级负差逐渐增多,白天则正、负差概率均等,其中,17时是全天负差最明显的时段。误差的日变化与风级大小也较为密切,风越小则全天的误差振幅越大,1级及以下日夜振幅可达14.8°,6级振幅仅4.8°。

从不同风向对应的风向ME日变化来看(见图5b),白天ME整体小于夜间,且负差的情况多对应白天时段,17时仍旧是全天负差最明显的时段。东风和东南风的日变化趋势相较于其他风向有所不同,11—14时正差达最大,20时为全天最小时段,而其他风向白天则多呈正差减小并转为负差的趋势。不同的风向日变化振幅差异明显,西风在一日之内误差振幅最大,为35.2°,北风和南风振幅相对其他风向较小,分别为9.4°和11°。

3.2.5 不同站点间的差异

表4给出了24 h时限EC预报各站点的风向ME与风级对应情况。表中可以看出随着风级的增大,

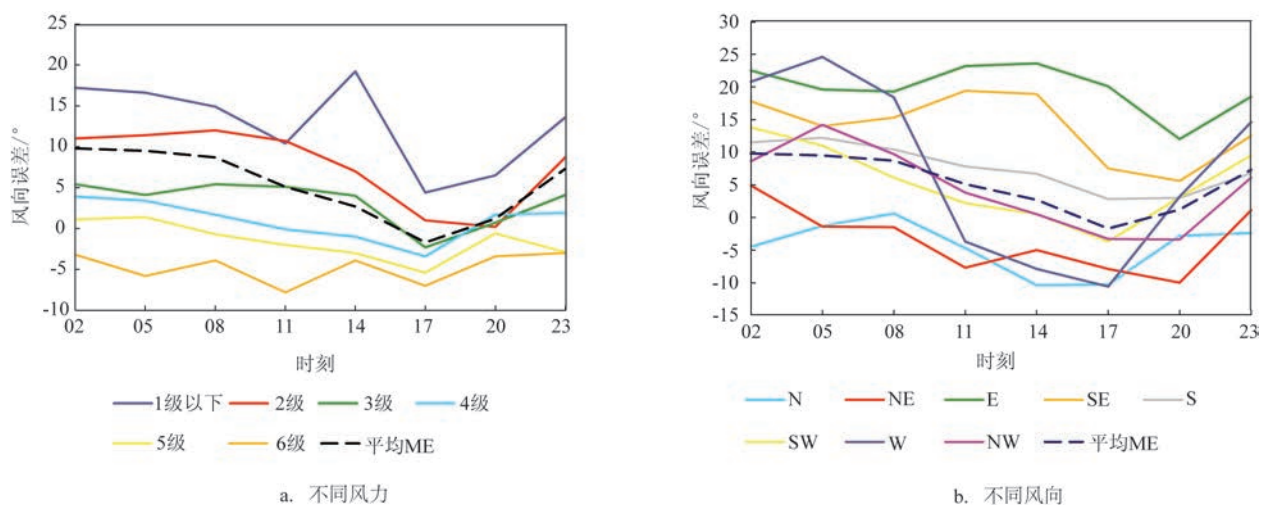


图5 2016—2018年EC 10 m风产品预报大连8个站的风向ME日变化

Fig.5 Daily change of wind direction ME by EC 10m wind product of the eight stations in Dalian from 2016 to 2018

表4 2016—2018年EC 10 m 24 h时限风向与大连各站不同风级的风向ME(单位:°)

Tab.4 The ME for different wind scales between actual wind directions of different stations in Dalian and EC 10 m 24 h time wind direction from 2016 to 2018 (unit:°)

站点	1级	2级	3级	4级	5级	6级	7级	8级
大连	11.9	1.5	-5.8	-6.1	-3	2.3	—	—
旅顺	2.4	3	-4.2	-11.1	-9.2	-10.6	—	—
金州	3.8	1.6	2.1	1.1	1.3	1.1	-3.6	—
长海	8.4	6.1	5.7	6.1	5.3	-3	-21	—
瓦房店	25	10.3	2.2	-0.4	-4.6	-11.8	-16	-3
普兰店	18.9	25.4	22.7	14.9	6	5.7	16.5	10
庄河	14.6	11.5	7.7	1.6	-10.6	-5	-4	—
长兴岛	7.8	3.5	-1.4	-1.5	-5.4	-9.9	-13.1	—

多数站的误差从较大的正差变为负差或较小的正差。普兰店站所有风级均为正差,其他各站正、负差均存在,大连站3级转为负差,但风级增大到6级时又转为正差。各站点的ME与实际风向未显示出很好的对应关系(见表5),但东风的误差明显大于其他风向,其次是西风、东北风和东南风,北风的误差最小。南风 and 东南风除大连站为较小的负差外,其他均为正差,东风除长兴岛外其他站均为正差。对于某个单一站来说,不同风向ME的差异非常明

显,其中瓦房店站东风误差为 25.2° ,而西风则是 -19.7° 。对于同一风向,不同站点间的差异也很显著,其中东北风、东风和西风两站之间最大误差均超过 50° 。

3.2.6 08时与20时EC 10 m风产品预报效果比较

表6为08时与20时起报时间下,EC 10 m风与最大风向在各时限的误差统计情况。为了更准确地比较出08时与20时EC对风向的预报效果,除ME与MAE外,对各时限下EC与实况风向的均方

表5 2016—2018年EC 10 m 24 h时限风向与大连各站不同风向的风向ME(单位:°)

Tab.5 The ME for different wind directions between actual wind directions of different stations in Dalian and EC 10 m 24 h time wind direction from 2016 to 2018 (unit:°)

站点	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
大连	-7.9	0.8	8.4	-3.6	-0.7	6.5	10.1	-5.7
旅顺	-7.9	-6.5	8.6	12.4	4.4	-8.5	-13.9	-5.8
金州	-0.4	-9.7	11.4	14.5	10.7	-4.4	-9.3	-14.9
长海	-3.1	33.8	25.8	4	10.9	14.6	10.4	2.1
瓦房店	1.7	-17.6	25.2	19.3	5.7	-13.4	-19.7	7.7
普兰店	-0.1	22.5	38.1	29.8	22.5	17.3	11	17.4
庄河	-6.9	-7.8	20.4	16.7	10.8	0.7	33.3	12.9
长兴岛	-14.7	-14.7	-13.3	5.2	4.1	7.9	17.9	7.2

表6 2016—2018年不同起报时间下EC 10 m 00~240 h时限大连8个站风向ME、MAE和RMSE(单位:°)

Tab.6 The ME, MAE and RMSE between actual wind directions of the eight stations in Dalian and EC 10 m 00~240 h time wind direction at different initial forecast times from 2016 to 2018 (unit:°)

起报时间	类别	00	12h	24h	36h	48h	60h	72h	84h	96h	108h	120h
08时	ME	3.3	4	3.6	4.1	4.1	4.1	5	5.2	4.5	4.6	4.2
	MAE	31.8	33	34.5	36	37.3	38.8	41.7	42.9	45.1	46.6	48.5
	RMSE	46.9	48.4	50.1	52.1	53.8	55.6	59.1	60.3	63	64.4	66.5
20时	ME	6.7	7	7.5	7.1	7.7	7.8	6.1	6	6	4	3.5
	MAE	37.4	39	40.3	41.6	42.9	44.5	44.6	46	47.8	49.9	51.5
	RMSE	54	55.9	57.5	58.7	60.3	62	62	63.7	65.9	68	69.6
起报时间	类别	132 h	144 h	156 h	168 h	180 h	192 h	204 h	216 h	228 h	240 h	
08时	ME	4.5	3.3	3.5	3.2	2.1	3.6	2.8	2.2	-0.4	5.3	
	MAE	51.3	53.3	56	59.2	61.8	64	67.4	69.5	70.6	73.6	
	RMSE	69.4	71.3	74.3	77.3	79.5	82.2	85.4	87.1	88.3	69.4	
20时	ME	2.5	3	3.1	3.1	2.2	2.1	2.1	-0.6	0.6	-1.5	
	MAE	54	56.6	58.8	61.3	63.8	66.9	68.7	71.7	73.2	70.1	
	RMSE	72.5	75.1	77.1	79.5	82	85	86.6	88.9	90.4	87.6	

根误差(Root Mean Square Error, RMSE)也进行了比较。表中可以看出除228~240 h时限外,MAE与RMSE均随着预报时限延长呈整体增大趋势。除240 h时限外,其余时限下08时预报的风向MAE与RMSE均略小于20时。20时预报的各时限MAE与08时平均相差 3.2° ,RMSE平均相差 3.6° 。08时各时限预报ME平均为 3.7° ,20时平均为 4.1° ,其中00~96 h时限08时ME均小于20时,但108~240 h时限08时多大于20时。综合3种误差统计情况来看,EC 10 m风产品两个起报时次的风向预报存在着一定的差异,08时预报的风向略好于20时。

4 结论

本文基于大连8个站各类风的观测实况,与ECMWF细网格10 m风产品进行了检验及相关性分析,发现正点最大风与预报对应最好。通过预报与最大风向的比较检验发现,EC 10 m风对风向的预报效果与最大风的风级、风向以及地域(站点)等都具有密切的相关性,其ME具有明显的日变化特征。具体结论如下:

(1)通过对EC 10 m风与大连地区5类实况风向的ME、MAE和 r 比较与分析发现,各类风的风向ME差别较小,即使在ME相差最大的00 h时限,误差相差最大也仅 1.4° 。正点最大风MAE最小且各时限 r 均最大,综合来看,EC模式对大连地区风向的分析、预报与正点最大风实况最为接近。5种风的风向误差随预报时限延长ME呈减小的趋势,而MAE均不断增大。

(2)与正点最大风实况相比,00~240 h时限内EC 10 m风对大连地区8个站风向的分析和预报ME均为 0.1° ~ 6° 的正差,预报略偏向实况风的来向左侧,但MAE则均在 36° 以上,说明EC预报具体到个例时风向预报偏差大多比较显著,但左、右偏离程度较为接近。

(3)EC 10 m风与正点最大风的风向误差对于不同的风向和风级等差异明显。从全区8个站风向与风级的ME比较来看,北风在所有风级中都是负差;3级以上的东北风对应较大的负差;而东风、东南风和南风在所有风级中都是正差,且东风和东南风几乎每个风级都对应较大的正差。东风的ME最

大;东风与东北风的MAE最大,多在 50° 以上。当实况风力小于4级时,各时限ME均为正差,风级越小正差越大,4级及以上均为负差,风级越大负差越大,而MAE则是风级越小误差越大。对于单站来说,ME在风级上虽有差异,但在变化趋势上与全区平均基本相同,其中普兰店站所有风级均为正差,大连站则是3~5级为负差。

(4)ME在不同风级和风向上均存在明显的日变化。夜间误差整体大于白天,17—20时是全天误差最小的时段。对比08时和20时两个起报时次的风向ME、MAE和RMSE,总体来看08时各时限的预报风向略好于20时。

本文的统计对比结果是基于大连地区风的观测实况得出的,也是今后进行ECMWF本地化风向误差订正的必要的基础工作。风速小预报偏差大的原因既可能与微风时风向稳定性较差有关,也可能与辽东半岛的局地性海陆风有关。但风速偏大时ME向负差转变、不同风向的偏差原因以及ME日变化的原因等还有待进一步研究和探讨。此外,如何应用本文所揭示的规律和特征进行风向预报的误差订正,有必要在今后进一步研究。

参考文献:

- [1] Pinson P, Hagedorn R. Verification of the ECMWF ensemble forecasts of wind speed against analyses and observations[J]. Meteorological Applications, 2012, 19(4): 484-500.
- [2] Miller P W, Black A W, Williams C A, et al. Maximum wind gusts associated with human-reported nonconvective wind events and a comparison to current warning issuance criteria[J]. Weather and Forecasting, 2016, 31(2): 451-465.
- [3] Patlakas P, Drakaki E, Galanis G, et al. Wind gust estimation by combining a numerical weather prediction model and statistical post-processing[J]. Energy Procedia, 2017, 125: 190-198.
- [4] 顾婷婷, 李晓丽, 刘丹妮, 等. 舟山跨海大桥一次强冷空气过程的精细化风场模拟[J]. 高原气象, 2018, 37(4): 1074-1082.
Gu T T, Li X L, Liu D N, et al. Simulation of highly resolved wind field on a severe cold air case over Zhoushan sea-crossing bridge [J]. Plateau Meteorology, 2018, 37(4): 1074-1082.
- [5] 谢文锋, 王刚, 张有洋. 台风“山竹”登陆前后广东沿海珠三角机场阵风预报方法研究[J]. 气象研究与应用, 2019, 40(4): 28-32.
Xie W F, Wang G, Zhang Y Y. Gust forecast methods in the Pearl River Delta airports along the east of Guangdong Province before and after typhoon Mangkhut landing[J]. Journal of Meteorological Research and Application, 2019, 40(4): 28-32.
- [6] 陈子健, 陈学恩, 刘涛. 不同参数化方案试验对南黄海典型台风

- 中心最低气压和最大风速数值模拟影响[J]. 中国海洋大学学报, 2019, 49(3): 28-35.
- Chen Z J, Chen X E, Liu T. The effect of different parameterization schemes for the maximum wind speed and the lowest sea-level pressure of the typical typhoon for southern yellow sea area[J]. Periodical of Ocean University of China, 2019, 49(3): 28-35.
- [7] 潘留杰, 张宏芳, 朱伟军, 等. ECMWF模式对东北半球气象要素场预报能力的检验[J]. 气候与环境研究, 2013, 18(1): 111-123.
- Pan L J, Zhang H F, Zhu W J, et al. Forecast performance verification of the ECMWF model over the northeast hemisphere [J]. Climatic and Environmental Research, 2013, 18(1): 111-123.
- [8] 吴俞, 冯文, 李勋, 等. ECMWF细网格 10m 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), 2015, 40(9): 204-212.
- Wu Y, Feng W, Li X, et al. On forecast test of ECMWF 10 m wind field products in South China Sea[J]. Journal of Southwest China Normal University (Natural Science Edition), 2015, 40(9): 204-212.
- [9] 蔡晓杰, 戴建华, 朱智慧, 等. 上海沿岸海域风场质量控制与预报检验[J]. 气象科技, 2019, 47(2): 214-221.
- Cai X J, Dai J H, Zhu Z H, et al. Quality control and forecast verification of wind field in coastal waters of Shanghai[J]. Meteorological Science and Technology, 2019, 47(2): 214-221.
- [10] 孙逸涵, 何晓风, 周荣卫. 不同背景场近地层风速的预报效果检验[J]. 资源科学, 2013, 35(12): 2481-2490.
- Sun Y H, He X F, Zhou R W. Evaluation of forecasting results of wind speed based on different background fields in the surface Layer[J]. Resources Science, 2013, 35(12): 2481-2490.
- [11] 曾瑾瑜, 韩美, 吴幸毓, 等. 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, 2015, 39(7): 75-85.
- Zeng J Y, Han M, Wu X Y, et al. Test and application of WRF, EC and T639 Models in strong wind forecasting in Fujian Coast in winter half year[J]. Marine Sciences, 2015, 39(7): 75-85.
- [12] 刘彬贤, 陈宏, 左涛, 等. 基于 EC 集合预报的渤海灾害性大风风速预报方法研究[J]. 海洋预报, 2018, 35(2): 19-26.
- Liu B X, Chen H, Zuo T, et al. EC ensemble forecast on severe gale speed in the Bohai Sea[J]. Marine Forecasts, 2018, 35(2): 19-26.
- [13] 夏晓玲, 尚媛媛, 郑奕. 贵州省数值预报风速产品检验及订正[J]. 中低纬山地气象, 2019, 43(6): 30-36.
- Xia X L, Shang Y Y, Zheng Y. Verification and revision of numerical models for wind speed forecast in Guizhou Province[J]. Mid-Low Latitude Mountain Meteorology, 2019, 43(6): 30-36.
- [14] 代冰冰, 王杰, 孙亚林. 丽江机场地面风场特征及气象保障分析[J]. 高原山地气象研究, 2016, 36(1): 86-90.
- Dai B B, Wang J, Sun Y L. Analysis on surface wind field characteristics and meteorological safeguard service of Lijiang airport[J]. Plateau and Mountain Meteorology Research, 2016, 36(1): 86-90.
- [15] 马宇琪. 影响洛阳机场能见度的气象要素统计分析[J]. 科技资讯, 2019, 17(30): 234-235.
- Ma Y Q. Statistical analysis of meteorological factors affecting visibility of Luoyang airport[J]. Science & Technology Information, 2019, 17(30): 234-235.
- [16] 毕波, 赵建伟, 杨航. 大理机场风特征分析及对飞行的影响[J]. 中低纬山地气象, 2019, 43(1): 50-54.
- Bi B, Zhao J W, Yang H. Analysis of the wind characteristics of Dali airport and its influence on flight[J]. Mid-Low Latitude Mountain Meteorology, 2019, 43(1): 50-54.
- [17] 徐伟, 张蕾, 漆梁波, 等. 地面风对上海城市热岛影响的观测分析[J]. 气象, 2019, 45(9): 1262-1277.
- Xu W, Zhang L, Qi L B, et al. Observation analysis of the influence of surface wind on urban heat island in Shanghai[J]. Meteorological Monthly, 2019, 45(9): 1262-1277.
- [18] 张婉莹, 孙秀博, 李岚, 等. 辽宁沿海高速公路浓雾气候特征及气象影响因子[J]. 气象与环境学报, 2020, 36(1): 67-73.
- Zhang W Y, Sun X B, Li L, et al. Climate characteristics and meteorological impact factors of heavy fog along Liaoning coast expressway[J]. Journal of Meteorology and Environment, 2020, 36(1): 67-73.
- [19] 王博妮, 张雪蓉, 孙明, 等. 江苏地区雨雾天气特征及成因研究[J]. 气象与环境学报, 2020, 36(1): 58-66.
- Wang B N, Zhang X R, Sun M, et al. Characteristics and formation mechanism of precipitation fog events in Jiangsu province[J]. Journal of Meteorology and Environment, 2020, 36(1): 58-66.
- [20] 吴战平, 白慧, 陈早阳, 等. 贵阳市两次空气污染过程的气象条件分析[J]. 干旱气象, 2019, 37(5): 827-835.
- Wu Z P, Bai H, Chen Z Y, et al. Analysis of meteorological conditions of two air pollution processes in Guiyang[J]. Journal of Arid Meteorology, 2019, 37(5): 827-835.
- [21] 李淑婷, 李霞, 钟玉婷, 等. 2017-2018 年阿克达拉 O₃ 浓度特征及气象因子分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2020, 14(1): 115-122.
- Li S T, Li X, Zhong Y T, et al. Variation characteristics and meteorological factors of surface ozone concentration in Akedala in recent two years[J]. Desert and Oasis Meteorology, 2020, 14(1): 115-122.
- [22] 曾晓青, 薛峰, 姚莉, 等. 针对模式风场的格点预报订正方案对比[J]. 应用气象学报, 2019, 30(1): 49-60.
- Zeng X Q, Xue F, Yao L, et al. Comparative study of different error correction methods on model output wind field[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2019, 30(1): 49-60.
- [23] 吴曼丽, 王瀛, 袁子鹏, 等. 基于自动站资料的海上风客观预报方法[J]. 气象与环境学报, 2013, 29(1): 84-88.
- Wu M L, Wang Y, Yuan Z P, et al. An objective forecast method on sea wind based on data from automatic weather stations[J]. Journal of Meteorology and Environment, 2013, 29(1): 84-88.

- [24] 吕明华, 闫江雨, 姚仁太, 等. 风向的统计方法研究[J]. 气象与环境学报, 2012, 28(3): 83-89.
Lv M H, Yan J Y, Yao R T, et al. Study on the statistical method of wind direction[J]. Journal of Meteorology and Environment, 2012, 28(3): 83-89.
- [25] 胡海川, 黄彬, 魏晓琳. 我国近海洋面 10 m 风速集合预报客观订正方法[J]. 气象, 2017, 43(7): 856-862.
Hu H C, Huang B, Wei X L. Objective correction method of ensemble forecast of 10 m winds on Chinese offshore[J]. Meteorological Monthly, 2017, 43(7): 856-862.
- [26] 任晨辰, 段明铿. ECMWF 全风速场集合预报结果的偏差订正与预报不一致性分析[J]. 大气科学学报, 2019, 42(3): 360-369.
Ren C C, Duan M K. Calibration and inconsistency analysis of ECMWF wind speed ensemble forecasts[J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2019, 42(3): 360-369.
- [27] 石岚, 徐丽娜, 郝玉珠. 基于风速高相关分区的风电场风速预报订正[J]. 应用气象学报, 2016, 27(4): 506-512.
Shi L, Xu L N, Hao Y Z. The correction of forecast wind speed in a wind farm based on partitioning of the high correlation of wind speed[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2016, 27(4): 506-512.
- [28] 杨景泰, 隋玉秀, 肖剑, 等. 大连地区 ECMWF 细网格 10 m 风场与观测实况对比与检验[J]. 气象与环境学报, 2021, 37(1): 73-81.
Yang J T, Sui Y X, Xiao J, et al. Comparison and verification of 10-m wind field based on ECMWF fine grid and observations in Dalian[J]. Journal of Meteorology and Environment, 2021, 37(1): 73-81.

Comparison and validation of ECMWF fine-grid wind direction and observation data in Dalian area

SUI Yuxiu¹, YANG Jingtai¹, CHANG Huilin¹, BIAN Ruobin², ZHAO Huarui¹, XIAO Jian³, CAO Bo³

(1. Dalian Meteorological Service Center, Dalian 116001 China; 2. Lushunkou Meteorological Office of Dalian, Dalian 116041 China; 3. Aviation University of Air Force, Jinzhou 121000 China)

Abstract: The five categories of wind direction data of eight national meteorological observation stations in Dalian area is compared with the 10-m fine-grid wind data of the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF or EC) from January 2016 to December 2018. The results show that the mean error (ME) of the five categories of actual wind directions is not much different, while the mean absolute error (MAE) tends to increase with the extension of the forecast time. For the punctual maximum wind of all the analysis and forecast time, MAE is the smallest and the r is the largest. Therefore, the EC 10-m wind direction forecast is the closest to the punctual maximum wind. Through statistical analysis of the ME and MAE between the EC 10-m wind and the actual punctual maximum wind direction in Dalian, it can be concluded that the ME of EC wind direction forecast is between 0.1° and 6° with a slightly bias to the left of the actual wind, and the MAE for all the analysis and forecast time is above 36° . The wind direction error varies significantly with wind directions, wind scales and stations, and the east wind shows the largest error. The ME is positive at all times when the actual scale of wind force is less than 4, and the smaller the wind scale is, the greater the positive ME will be. The ME is negative at all times when the actual scale of wind force is equal to or above 4, and the greater the wind scale is, the more negative it deviates and the smaller the MAE will be. The ME shows significant diurnal variations in different wind scales and directions. The ME at night is larger than that during the day with the smallest error between 17:00—20:00. Comparing the wind direction ME, MAE and Root Mean Square Error for the forecasts with the starting time of 08:00 and 20:00, it is found that the forecast wind direction at 08:00 is better than that at 20:00 in general.

Key words: wind direction; punctual maximum wind; diurnal variations