

基于偏差分析的风力预报订正释用技术

於敏佳 刘菡 李晓丽 胡潇杰 吴姗姗 徐逸雯

(舟山市气象局, 舟山 316000)

摘要: 本文利用浙江舟山嵊泗、定海、普陀、岱山四个站点的10 m风实况资料, 深入分析2019—2020年的欧洲中期天气预报中心(ECMWF) 10 m风格点预报产品偏差, 并构建了订正模型, 使用2021年的数据对订正模型进行独立检验, 得到如下结论: ①站点0~33 h逐3 h的预报实况误差绝对值较为稳定。②站点前后时次平均风预报实况误差, 存在一元线性关系, 且系数稳定。③站点平均风极大风关系与地形遮蔽、风力大小、下垫面等有关, 一元二次模型能更精确地反映两者关系。④指标站平均风预报实况绝对误差分别精减至1.16 m/s、0.86 m/s、0.94 m/s、0.94 m/s, 改进百分比分别为12%、62%、17%、10%, 极大风平均绝对误差分别为2.12 m/s、2.58 m/s、2.69 m/s、2.86 m/s。总体上应用成效较好, 可应用于实际业务。

关键词: 偏差分析, 平均风订正, 平均风极大风关系, EC模式

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2022.06.012

Correction and Interpretation Technology for Wind Speed Forecast Based on Deviation Analysis

Yu Minjia, Liu Han, Li Xiaoli, Hu Xiaojie, Wu Shanshan, Xu Yiwen

(Zhoushan Meteorological Bureau, Zhoushan 316000)

Abstract: Based on the 10 m wind data of Shengsi, Dinghai, Putuo and Daishan stations of Zhoushan, Zhejiang province, this paper analyzes the EC (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) 10 m wind forecast product deviation of 2019—2020. The revised model is constructed accordingly, and the data of 2021 are used to independently test the model. The research results show that: ① the absolute values of the actual every 3-h forecast errors at the stations from 0 to 33 hours are relatively stable. ② The errors of mean wind forecast at different times have a univariate linear relationship with stable coefficient. ③ The relationship between the mean and extreme wind at the stations is associated the terrain shielding, wind force and underlying surface. The unitary quadratic model can reflect the relationship more accurately. ④ The average absolute errors of mean wind at the index stations are reduced to 1.16 m/s, 0.86 m/s, 0.94 m/s and 0.94 m/s respectively; the improvement percentage are 12%, 62%, 17% and 10%, respectively; and the average absolute errors of extreme wind are 2.12 m/s, 2.58 m/s, 2.69 m/s and 2.86 m/s respectively. In general, the application effect of the correction and interpretation technology is satisfactory and can be applied to operational wind speed forecast.

Keywords: deviation analysis, mean wind correction, relationship between the mean and extreme wind, EC model

0 引言

舟山地处中纬度地带, 区位优势明显, 是“丝绸之路经济带”和“21世纪海上丝绸之路”交汇点。然而舟山四季灾害频发, 年平均8~9级大风日数129.2天, 10~11级大风日数12.7天, 12级以上大风日数0.8天^[1]。当地的安全生产发展和公众的生命财产安全等都

深受大风制约, 因此, 深入研究风力预报技术, 提供精准的风力预报产品, 具有十分重要的意义。

关于风力预报的订正释用技术, 目前我国已有较多的科技人员进行了深入研究。胡海川等^[2]利用概率密度匹配方法对我国近海10 m风预报进行修正; 杨程等^[3]基于偏最小二乘回归进行了区域换式风速预报订正技术研究; 杨晓君等^[4]将BP人工神经网络引入到渤海海风的预报订正; 赵文婧等^[5]应用相似误差订正方法订正短期风速预报; 陈豫英等^[6]采用多元线性和逐步回归的MOS统计方法进行风的精细化释用; 刘鸿升等^[7]设计了最大值-阈值综合集成法进行偏北大风的数值预报释用; 李江萍等^[8]初步探讨了统计降尺度法在数值预报产品释用中的应用; 钱燕珍等^[9]将支持向量机(SVM)回归方法应用于近海和登陆热带气旋的强度预报, 对GFS数值预报产品进行了释用。以上方法, 都取得了一定的订正释用效果, 但对于模式预报

收稿日期: 2021年7月13日; 修回日期: 2021年11月23日

第一作者: 於敏佳(1990—), Email: 1175158455@qq.com

通信作者: 刘菡(1989—), Email: 396664033@qq.com

资助信息: 浙江省气象局科技计划项目(2021YB29); 舟山市科技计划项目(2021C31028)

偏差分析尚可更深入研究, 本文将基于模式预报偏差分析, 对舟山沿海风力预报进行订正释用。

1 资料与方法

1.1 资料介绍

10 m风格点预报产品采用浙江省气象局的Fruit细网格产品, 该产品是对中国气象局下发的ECMWF产品全要素的整合和缩容产品, 模式起报时间是20时(北京时, 下同), 资料覆盖0 S—60 N, 60 N—150 N, 时间分辨率为3 h, 预报时效0~240 h, 空间分辨率为 $0.125^{\circ} \times 0.125^{\circ}$ 。选取时间段为2019年1月1日至2021年4月1日, 每日20时起报场预报数据, 其中2019年和2020年两年数据为建模样本, 2021年数据为独立检验样本。

10 m风站点实况资料来自嵊泗国家基准站、定海国家基本站、普陀和岱山国家一般站, 站点基本信息见表1。这些站点剪代表性强、数据完整, 且经过人工异常值剔除、缺测记录消除, 数据较为真实可靠。

表1 各实况指标站点经纬度表
Table 1 Latitude and longitude of each index station

站名	区站号	经度/ $^{\circ}$ E	纬度/ $^{\circ}$ N
嵊泗	58472	122.45	30.73
岱山	58484	122.20	30.24
定海	58477	122.12	30.03
普陀	58570	122.30	29.95

1.2 订正释用技术

目前, 在风力预报方面, 较为成熟的方法是以天气形势为基础, 参考各家模式的风力要素预报, 结合预报员的主观预报经验, 最终得出风力预报。而在各家的风力要素预报中, 尤以EC模式的预报最为稳定和准确, 平时业务中对EC的参考比重也较大。经过多年的对比释用, 发现EC风要素预报与平均风较为对应, 而站点的平均风又与极大风存在对应关系。因此, 可以通过先订正平均风, 再套用平均风与极大风之间的关系, 来进行风力预报的订正释用。

1.3 订正释用效果评价方法

本文采用平均绝对误差的统计指标参数来评价订正释用效果, 具体对2021年1月1日至4月1日, 20时起报场, 3~33小时预报时效内逐3 h, 共计1001个预报时次进行检验评估, 具体公式如下:

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |Y_i - \hat{Y}_i| \quad (1)$$

其中, Y_i 、 \hat{Y}_i 分别是站点实况极大风、订正释用极大风, N 为样本数量s。

2 订正模型的建立

2.1 平均风偏差分析

受遮蔽较小的站点, 其模式预报的风力与实况平均风较为接近, 如嵊泗站, 而定海站这类受山体、城市楼房等地形影响较大的站点, 其预报和实况平均风也相差较大。另外, 同一时次, 有些相邻的站点虽对应同一格点, 但实况平均风却仍大不相同。以上, 都是在同一时次上相邻站点或者各个站点之间的预报实况误差比较。那么, 对于同一站点, 在不同时次的预报实况偏差进行研究, 又存在怎样的关系? 如图1, 对四个指标站点两年的0~72 h逐3 h预报实况平均绝对误差分析, 嵊泗、岱山、定海3个站点0~33 h逐3 h的预报实况平均绝对误差具有较好的稳定性, 定海存在一定的误差震荡, 但也在0.5 m/s之间, 0~33 h各时次的误差绝对值存在一定的稳定性, 经计算嵊泗、定海、岱山、普陀四站点的误差绝对值稳定为1.32 m/s, 2.30 m/s, 1.09 m/s, 1.09 m/s, 33 h之后的误差震荡加剧, 超过0.5 m/s, 不稳定。

在平时的预报业务中, 预报员可以掌握已出实况时次的预报绝对误差与绝对误差稳定值的比值, 是否可通过前时次的预报绝对误差与绝对误差稳定值的比值, 来推算后时次绝对误差与绝对误差稳定值的比值? 这两者是否存在一定的关系? 对嵊泗、定海、岱山、普陀4个站点, 2019—2020年(剔除缺测异常后共706天), 每天12个时次的预报实况绝对误差与绝对误差稳定值的比值, 进行前后时次的绝对误差与绝对误差稳定值的比值关系深入研究, 如图1, 四个站点0~33 h逐3 h的前后时次预报实况绝对误差与绝对误差稳定值的比值, 存在的一元线性关系, 以 $Y = AX + B$ 为模型进行拟合, 经查表检验, 拟合得出的各站点全部时次的方程显著性检验值 F 均远大于临界值 $F(1, 706) = 3.85$, 拟合方程显著。

对拟合公式的系数进一步分析(表2), 一元线性拟合公式中系数 A 和 B 也较为稳定, 系数 A 尤为稳定, 这表明前后时次的预报实况误差存在稳定关系, 可根据前一时次的预报实况绝对误差与绝对误差稳定值的比值, 采用同一拟合公式, 进行后一时次的预报实况绝对误差与绝对误差稳定值的比值预测, 进而修正风力预报值。

2.2 平均风偏差分析检验

基于站点前后时次预报实况绝对误差与绝对误差稳定值的比值存在线性关系, 且系数基本稳定这一分析结论, 对2021年1月1日至4月1日(共91天)各指标站点, 0~33 h逐3 h的EC预报风力进行平均风修正,

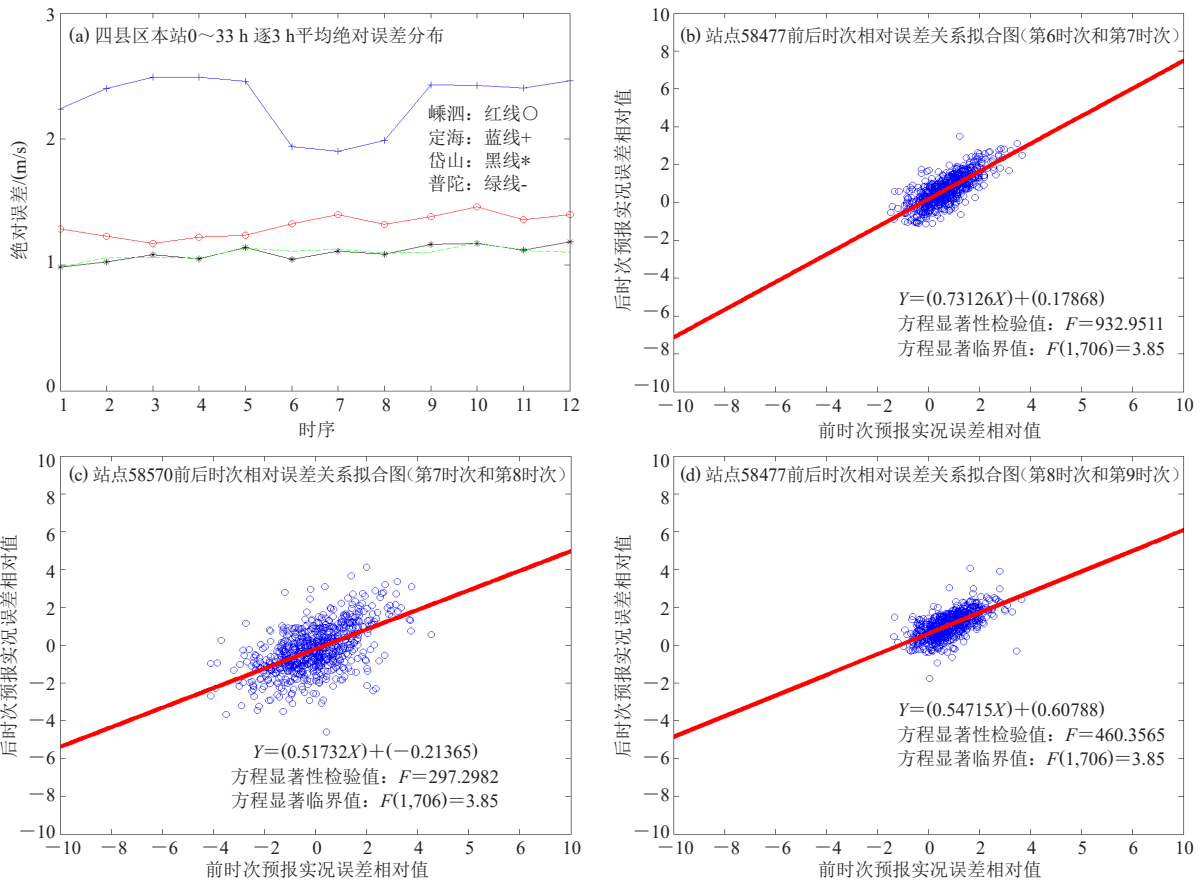


图1 站点0~33 h逐3 h平均绝对误差示意图 (a), 站点前后时次误差示意图 (b, c, d)

Fig. 1 Diagram of 0~33 h site mean absolute error by every 3-h (a); diagram of site error at different times(b, c, d)

表2 站点拟合系数表
Table 2 Site fitting coefficient

前后预报时次	嵊泗		定海		岱山		普陀	
	系数B	系数A	系数B	系数A	系数B	系数A	系数B	系数A
00 h和03 h	-0.13	0.43	0.27	0.79	0.33	0.48	0.16	0.53
03 h和06 h	-0.10	0.41	0.31	0.75	0.31	0.45	0.14	0.55
06 h和09 h	-0.09	0.41	0.29	0.75	0.30	0.44	0.08	0.55
09 h和12 h	-0.13	0.40	0.30	0.74	0.29	0.44	0.16	0.55
12 h和15 h	-0.20	0.41	0.21	0.75	0.19	0.41	0.12	0.53
15 h和18 h	-0.23	0.42	0.20	0.75	0.12	0.44	0.07	0.53
18 h和21 h	-0.21	0.41	0.22	0.74	0.10	0.45	0.03	0.53
21 h和24 h	-0.20	0.43	0.28	0.70	0.13	0.45	0.04	0.53
24 h和27 h	-0.19	0.44	0.28	0.71	0.14	0.45	0.04	0.52
27 h和30 h	-0.18	0.44	0.28	0.71	0.14	0.45	0.04	0.53
30 h和33 h	-0.17	0.45	0.28	0.71	0.15	0.46	0.04	0.53

以验证偏差分析结论, 如图2和表3所示, 利用此偏差分析结论对于EC预报风力具有一定的修正效果, 嵊泗、定海、岱山、普陀四个站点的平均预报实况绝对误差由1.33 m/s、2.29 m/s、1.14 m/s、1.06 m/s分别精减至1.16 m/s、0.86 m/s、0.94 m/s、0.94 m/s, 改进百分比分别为12%、62%、17%、10%, 因此, 基于偏差分析

结论的平均风预报修正总体上优于EC本身的模式预报, 实际业务中, 可利用已出现时次的预报实况绝对误差与绝对误差稳定值的比值推算下一时次, 进而修正模式风力预报, 且对于定海站这类本身受地形影响明显而模式风力预报自身就存在较大误差的站点, 具有非常明显的修正效果。

2.3 平均风和极大风关系探究

对于平均风和极大风关系探究, 陈锦冠^[10]和汪宏宇^[11]等专家研究发现两者大致满足线性关系。在大尺度运动中, 当不考虑摩擦力和地形时, 空气质点的运动遵从地转风规则, 这是进行风力预报的基础。但实际上, 有地形作用且摩擦力并不为零。

地形方面, 风速的大小除与水平气压梯度有直接关系外, 与地形也有较大关系, 舟山群岛地形复杂, 各观测站点多有地形影响, 而地形的作用主要有山体阻挡使风力减小, 狭管效应、爬坡使风力增大等, 而地形不管以哪种形式对风力产生影响, 具体表现在站点风力测量中都为在相同气压梯度下, 不同风向的站点风速大小是不同的, 因此可分16风向进一步细化研

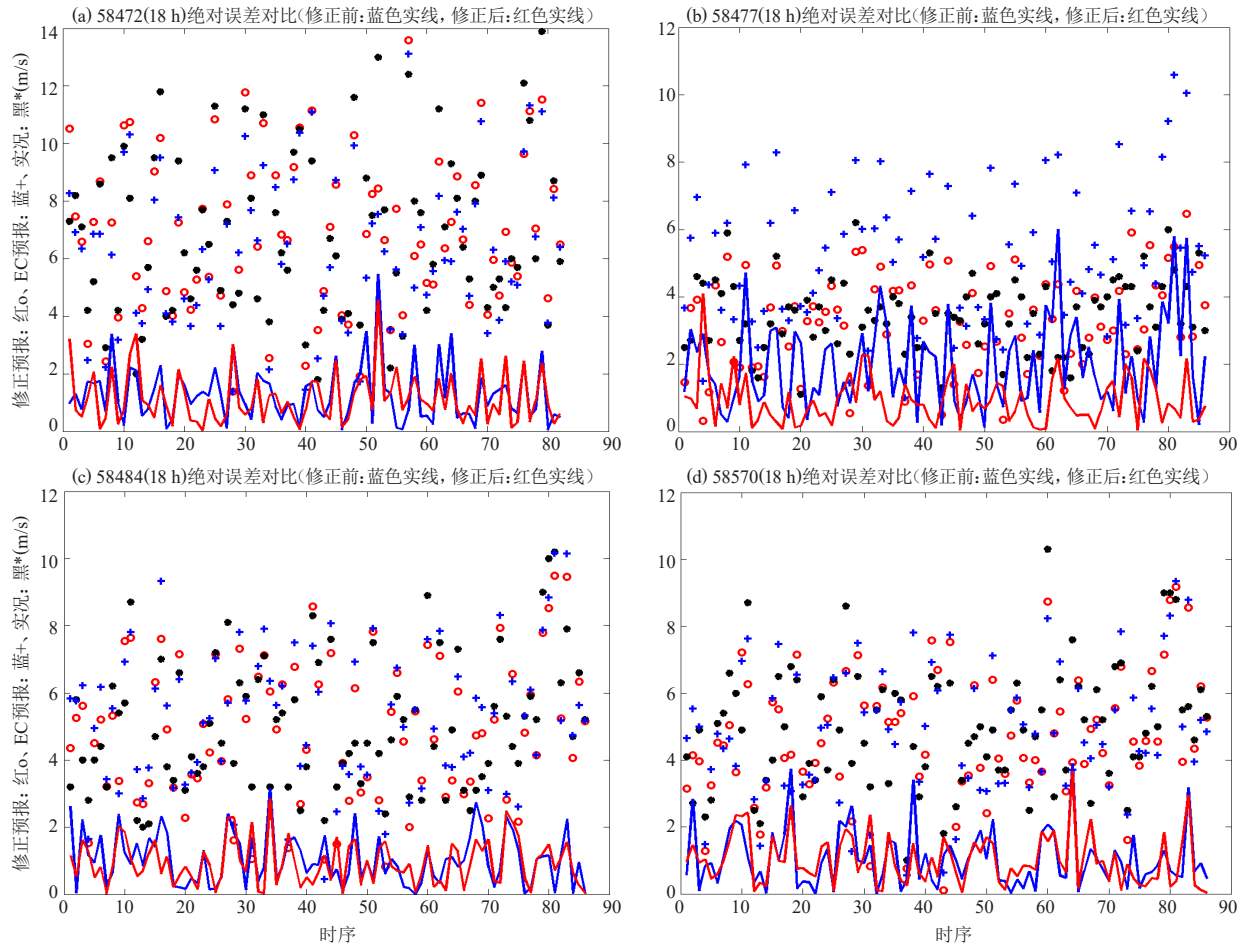


图2 站点修正前后绝对误差对比图
Fig. 2 Comparison of absolute errors before and after correction

表3 站点修正前后绝对误差对比表
Table 3 Site absolute errors before and after correction

时效	嵊泗 (58472)			定海 (58477)			岱山 (58484)			普陀 (58570)		
	EC预报	修正预报	修正率	EC预报	修正预报	修正率	EC预报	修正预报	修正率	EC预报	修正预报	修正率
3 h	1.26	1.24	2%	2.39	0.75	68%	1.22	0.94	23%	1.15	0.83	27%
6 h	1.32	1.11	16%	2.37	0.64	73%	0.98	0.76	23%	0.89	0.88	2%
9 h	1.03	0.90	12%	2.50	0.82	67%	1.10	0.86	22%	1.03	1.04	-1%
12 h	1.29	1.18	8%	2.62	0.83	68%	1.17	0.90	23%	1.27	1.04	18%
15 h	1.24	1.04	16%	1.84	1.20	35%	0.92	0.88	4%	1.00	1.02	-2%
18 h	1.28	1.14	11%	1.99	0.91	54%	1.03	0.93	9%	1.04	1.01	3%
21 h	1.55	1.28	17%	2.00	0.81	60%	1.18	1.03	12%	0.93	0.77	17%
24 h	1.43	1.25	12%	2.53	1.16	54%	1.30	1.22	6%	1.12	0.98	13%
27 h	1.49	1.33	11%	2.44	0.77	68%	1.40	1.02	27%	1.15	0.85	26%
30 h	1.35	1.10	19%	2.29	0.75	67%	1.05	0.83	22%	0.88	0.90	-1%
33 h	1.35	1.17	13%	2.24	0.83	63%	1.15	0.96	16%	1.14	1.04	8%
平均	1.33	1.16	12%	2.29	0.86	62%	1.14	0.94	17%	1.06	0.94	10%

究, 如图3, 同一站点各风向关系式明显不同。另外, 随着风力的增大, 极大风和平均风之间的差距也在加大, 而一元线性关系并不能反映这个变化趋势, 因此, 分风向的一元二次模型能更好地描绘平均风极大

风关系。

摩擦力方面, 近地面层摩擦力来自于粗糙的地面以及近地面层空气的粘性力, 而空气粘性力主要是由湍流活动引起, 近地面层湍流与低层温度层有关, 也

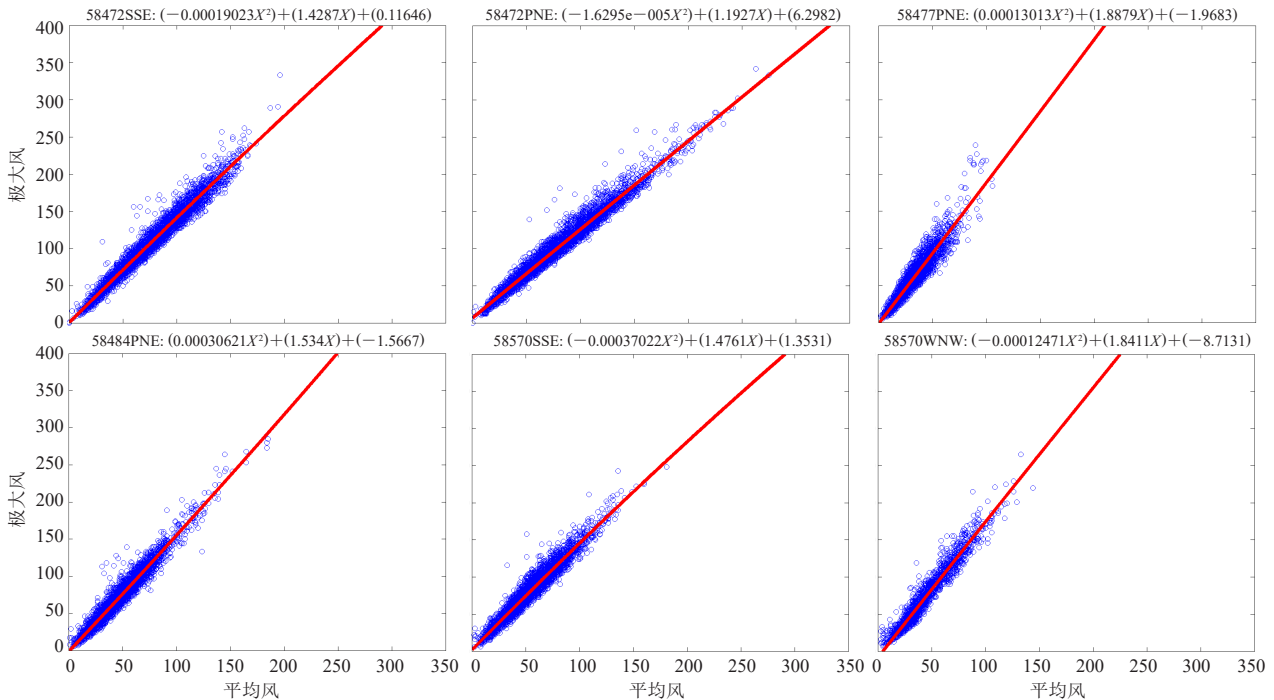


图3 四个县区本站东北、南到东南、西到西北风向平均风与极大风关系图 (横纵坐标单位均为0.1 m/s)
 Fig. 3 The relationship between the mean and extreme wind of NE, SSE and WNW wind direction at four county stations (0.1 m/s in both horizontal and vertical coordinates)

即与大气稳定度相关，因此需要分下垫面。对比2012年1月至2020年1月嵊泗、岱山、普陀、定海四个县区本站和舟山浮标站的实况平均风与极大风之差，如图4，发现四个县区本站极大风与平均风16风向的平均差分别为2.51 m/s, 2.37 m/s, 2.37 m/s, 2.51 m/s, 基本一致，而舟山浮标站的平均差却仅为0.91 m/s，因此，在空旷的海上，平均风与极大风相差较小，下垫面的不同，平均风与极大风的关系也不同。因此，平均风与极大风的关系与地形、风力大小、站点下垫面有关。

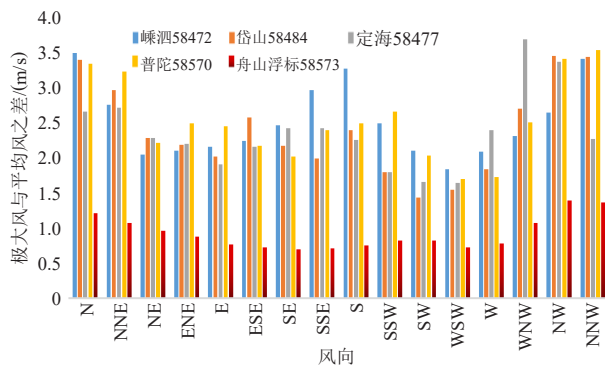


图4 四个县区本站与舟山浮标站各风向平均风与极大风关系对比图
 Fig. 4 Comparison of the relationship between the mean and extreme wind of four county stations and Zhoushan buoy station in 16 directions

3 订正模型的预报检验

3.1 整体检验

对嵊泗国家基准、普陀国家基本站、岱山、定海国家一般站这4个站点进行了统计检验评估，计算结果如表4，4个站点各预报时次的误差4 m/s以下占比86%，3 m/s以下占比63%，平均绝对误差分别为2.12 m/s、2.58 m/s、2.69 m/s、2.86 m/s，总体上订正释用效果较好。

表4 站点各预报时次误差评价表
 Table 4 Error evaluation for each forecast time at four county stations

预报时效/h	误差/(m/s)			
	嵊泗58472	定海58477	岱山58484	普陀58570
3	2.44	3.58	3.69	4.23
6	2.81	2.87	3.38	4.02
9	2.56	3.93	4.08	2.83
12	1.35	1.35	1.31	1.58
15	2.35	3.22	3.18	4.37
18	1.45	2.27	1.48	1.69
21	2.52	3.28	3.35	4.02
24	1.79	1.57	1.56	1.28
27	2.74	3.68	3.75	4.37
30	1.80	1.27	1.54	1.45
33	1.54	1.40	1.45	1.62
平均	2.12	2.58	2.69	2.86

3.2 寒潮个例检验评估

2021年1月6—9日,受寒潮影响,舟山沿海6日半夜起北到西北风9级,7日白天出现10级北到西北风,夜里减弱到9级,8日白天7级阵风8~9级北到西北风维持。嵊泗(58472)、定海(58477)、岱山(58484)三个县区本站分别都在7日9时出现了22.5 m/s、14.5 m/s、18.8 m/s的过程极大风,普陀站(58570)在8日13时出现了17.1 m/s的过程极大风。如图5,经订正释用后嵊泗、定海、岱山、普陀四站点的过程极大风力分别为22.6 m/s、12.3 m/s、15.9 m/s、15.3 m/s,与实况分别相差0.1 m/s、2.2 m/s、2.9 m/s、1.8 m/s,对于过程极大风力的把握,具有一定的准确度。对逐时次的

极大风预报进行对照,可发现个别时次极大风误差还是比较大的,如定海站(58477)7日23时,平均风订正值和实况值非常吻合,但极大风偏差达到4 m/s,实况平均风与极大风之差达到了8~9 m/s,再如普陀6日08时,订正平均风误差也较小,但极大风偏差3 m/s,实况平均风与极大风之差达到了9~10 m/s,分析发现,个别时次的较大偏差是由于实况平均风和极大风的差距明显加大造成的,目前不分系统的各风向平均风极大风拟合关系还不能较好的反映个别时次的风力阵性差异,对于受冷空气影响时,平均风与极大风之差在个别时次有明显加大的现象,需进一步分系统进行细分研究。

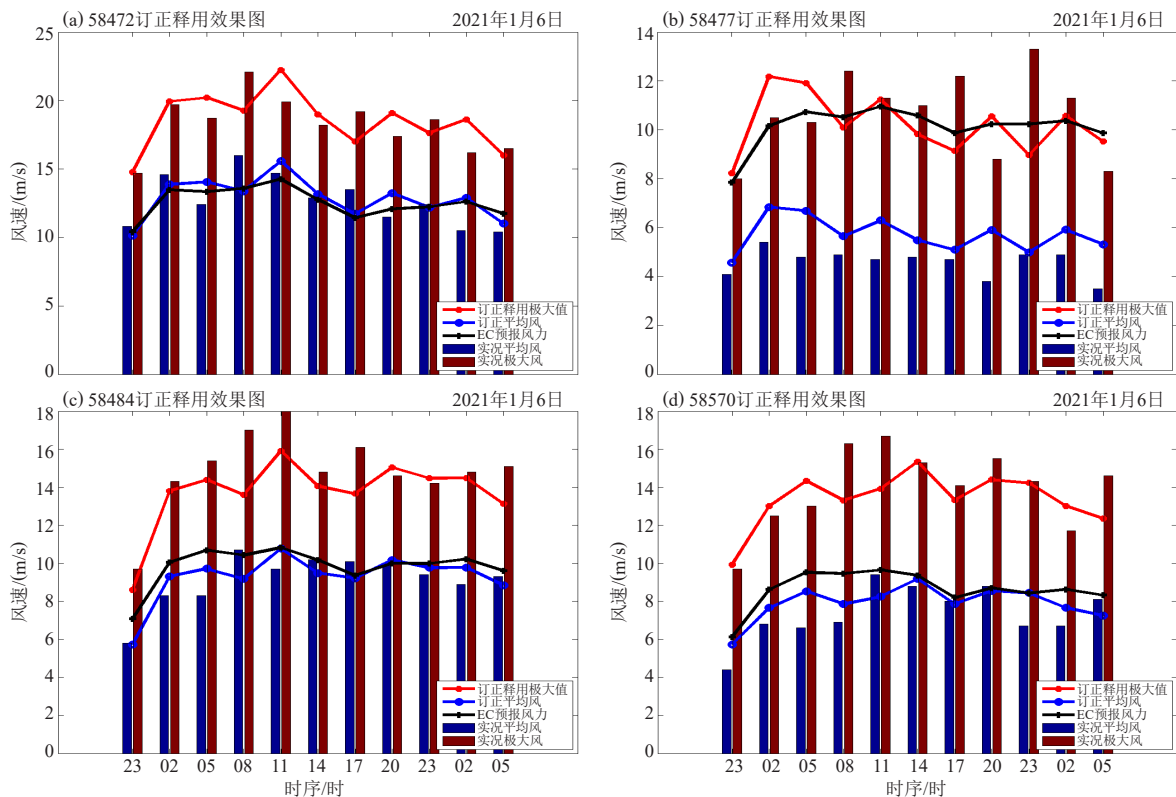


图5 四个县区本站EC预报风力、订正平均风、释用极大风、实况平均风与极大风对比图

Fig. 5 Comparison Chart of EC forecast wind speed, corrected mean wind, interpreted extreme wind, actual mean wind and extreme wind in four counties on 6 January 2021

3.3 台风个例检验评估

2020年8月3日到5日,受台风“黑格比”影响,舟山沿海出现了11级的大风过程,嵊泗、定海、岱山、普陀四个县区本站分别出现了27.4 m/s, 19.3 m/s, 21.4 m/s, 22.7 m/s的过程极大风。如图6,四站点订正释用的极大风力分别为22.5 m/s, 17.6 m/s, 20.0 m/s, 21.7 m/s,其中定海站、岱山站、普陀站的误差分别仅有1.7 m/s, 1.4 m/s, 1.0 m/s,效果较好,而嵊泗站误差较大,具体表现在8月4日20时,由于平均风和

极大风之差达到10~11 m/s,显著增大,目前所得出的不分系统的平均风和极大风关系不适用,因此,出现了订正释用极大风的较大偏差。从以上两个个例来看,极大风的较大偏差主要是由于冷空气、台风等系统的风力的阵性更强,不分系统的平均风和极大风关系存在一定的不适应性。

总的来讲,不分系统的平均风和极大风关系在一般情况下,能较好得反映平均风和极大风关系,但对于台风、寒潮等系统的风力阵性差异还没有很好的把

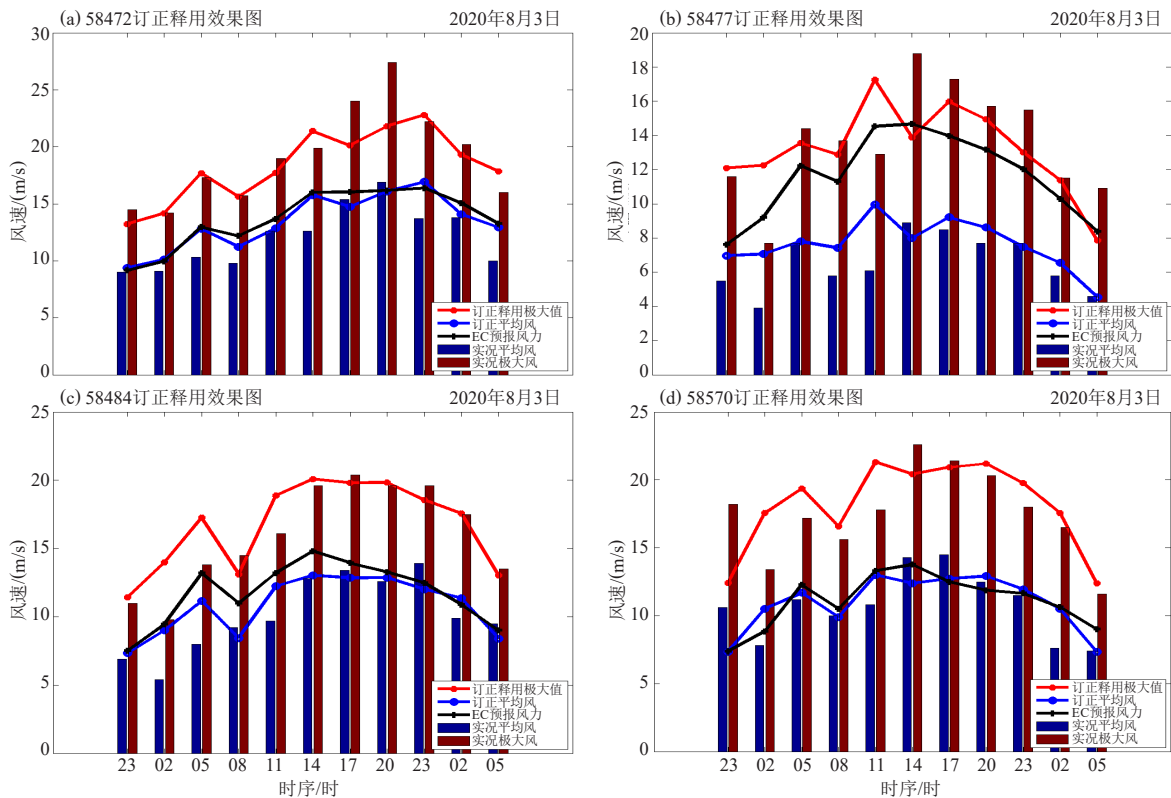


图6 四个县区本站EC预报风力、订正平均风、释用极大风、实况平均风与极大风对比图

Fig. 6 Comparison Chart of EC forecast wind speed, corrected mean wind, interpreted extreme wind, actual mean wind and extreme wind in four counties on 3 August 2020

握。因此今后将在这方面开展更细致的研究，能进一步提高台风、低压、冷空气等系统的订正水平，提高风力要素预报的准确性。

4 结论与讨论

本文介绍了一种基于模式偏差分析的风力预报订正释用技术，该技术在有效修正模式平均风预报的基础上，利用站点平均风和极大风关系，进行订正释用，取得了一定的应用成效。

得出以下结论：

1) 站点0~33 h逐3 h的预报实况误差绝对值较为稳定，经计算嵊泗、定海、岱山、普陀四站点的绝对误差稳定为1.32 m/s, 2.30 m/s, 1.09 m/s, 1.09 m/s。

2) 站点0~33 h逐3 h的前后时次平均风预报实况绝对误差与绝对误差稳定值的比值，存在一元线性关系，且系数较为稳定，可根据已出的前时次平均风预报实况误差，用同一公式推算下一时次的预报实况误差，进而订正EC风力预报。

3) 基于偏差分析结论的平均风预报修正总体上优于EC本身的模式预报，四个指标站点的平均预报实况绝对误差分别精减至1.16 m/s、0.86 m/s、0.94 m/s、0.94 m/s，改进百分比分别为12%、62%、17%、10%，

具有一定的订正效果，可应用于实际业务。

4) 对四个指标站点的极大风进行统计检验评估，平均绝对误差分别为2.12 m/s、2.58 m/s、2.69 m/s、2.86 m/s，总体上基于偏差分析的订正释用效果较好。

站点平均风极大风关系受地形、风力大小、下垫面等因素影响。同一站点，各个风向的地形遮蔽不同，平均风极大风关系不同；风力越大，平均风与极大风的插值越大，一元二次模型能更好地反映此特征；与陆地相比，海面风力的阵性明显较弱，平均风和极大风相差较小，陆地平均风与极大风对应关系不适用于海面。针对冷空气、台风等风力阵性较强的系统，还需进一步分系统研究其平均风极大风关系。

参考文献

- [1] 王雷, 黄辉, 何文岳. 舟山群岛海域航线气象预报. 气象科技, 30(4): 241-245.
- [2] 胡海川, 赵伟, 董林. 概率密度匹配方法在我国近海海面10 m风速预报中的应用. 热带气象学报, 37(1): 91-101.
- [3] 杨程, 姜瑜君, 余贞寿, 等. 基于偏最小二乘回归的区域换式风速预报订正技术研究. 气象, 45(5): 676-684.
- [4] 杨晓君, 张楠, 陈宏, 等. 基于神经网络算法的渤海海风预报方法研究. 干旱气象, 2019, 37(1): 146-152.
- [5] 赵文婧, 李照荣, 王小勇, 等. 相似误差订正方法在风电短期风速预报中的应用研究. 热带气象学报, 37(1): 73-81.

(下转120页)

些对流单体不断生消,维持了近6个小时(图略)。

这次过程中东风波波槽前的强降水与地形相关性显著,携带西太平洋水汽的偏北气流与萌渚岭-九嶷山系相遇夹角大,且山脉坡度大,强降水中心主要出现在萌渚岭-九嶷山北麓,另外,都庞岭走向与边界层暖湿气流方向基本一致且地面风弱,都庞岭附近降水较弱。可见山脉走向与暖湿气流来向的夹角对强降水的分布有一定影响,偏东风和东南风与西北风的地形辐合线的出现,使得降水云团的移动迟缓,配合迎风坡效应,低层暖湿气流加强抬升,降水增幅明显。

6 结论与讨论

1) 2016年8月12日这次过程是近十年来影响湘南地区范围最广、强度最强、受灾最强的一次东风波暴雨天气过程。强降水期间,南亚高压逐渐由西部型转东部型,500 hPa上副热带高压西伸发展成带状分布控制我国中东部,其南侧形成强盛的偏东风波动,并在偏东风气流中诱生出低涡。主要降雨区位于诱生低涡经过的区域和低涡中心向北延伸的东风波槽前东北气流区,西南季风的卷入使得垂直风切变加大,东风波系统得以较长时间维持。

2) 此次暴雨水汽输送通道主要有两个,低涡附近降水以孟加拉湾输送过来的西南方向的水汽为主,东风波槽前降水以西太平洋输送过来的偏东方向的水汽为主。此次过程中涡度场对东风波槽的位置和强度有很好的指示作用,诱生低涡在进入广西之前其中心与正涡度中心对应较好。东风波槽前的降水强度与正涡度中心强度的变化有直接关系,诱生低涡附近的降水强度与西南风强度关系密切。

3) 此次过程强雨区一处位于低涡西侧的能量锋区偏高 θ_{se} 区附近,另一处位于东风波槽前 θ_{se} 大值区中,当槽前正涡度平流大值与 θ_{se} 大值区耦合时,降水强度将明显增大,这对强降水预报预警有很好的指示

作用。此外东风波引起的暴雨与地形相关性高,有利地形下,山脉走向与暖湿气流来向的夹角大、出现地形辐合线等中尺度系统,降水增幅明显,湘南山区雨量超过100 mm的站点均位于地面辐合线附近,海拔高度在400 m以上。本文中对地形的影响仅做定性分析,南岭山脉山冈盆地交错分布,地形复杂,对海拔高度、山脉坡度、下垫面水体、林区等与降水关联程度并未作详细的讨论,将在未来工作中进行重点研究。

参考文献

- [1] Riehl, 程纯枢, 译. 热带气象学. 科学出版社, 1958.
- [2] 吴阳, 周毅. 影响我国的东风波特征分析. 海洋通报, 2005, (3): 88-91.
- [3] 沈杭锋, 林宏伟, 娄小芬, 等. 两次东风带高空冷涡强对流天气对比分析. 气象, 2021, 47(11): 1380-1390.
- [4] 刘丽君, 冯文, 陈德明. 东风急流影响下海南非热带气旋暴雨两个例分析. 暴雨灾害, 2010, 29(04): 328-333.
- [5] 马卫民, 李靖, 孙一妹, 等. 西太平洋低纬地区东风波个例分析. 海洋预报, 2014, 31(1): 63-70.
- [6] 骆凯, 赵运峰, 刘维鑫, 等. 2016年8月广西地区一次东风波暴雨过程诊断分析. 气象与减灾研究, 2017, 40(3): 216-222.
- [7] 黄天文, 陈辛动, 焦飞, 等. 影响肇庆地区两次东风波结构与雨带变化的分析. 广东气象, 2012, 34(4): 26-29.
- [8] 卢山, 邓文剑. 源自东风波台风“灿都”发展过程的结构特征分析. 热带气象学报, 2013, 29(1): 93-98.
- [9] 钱燕珍, 张程明, 王蕾, 等. 一次东风波发展成登陆热带风暴的结构特征分析. 热带气象学报, 2015, 31(1): 95-102.
- [10] 胡振菊, 黎璐, 黄小玉, 等. 一次典型东风波极端暴雨的中尺度特征及地形影响分析. 干旱气象, 2022, 40(1): 73-83.
- [11] 蒋丽敏, 李青松, 龙志宇. 影响湘南地区的东风波特征分析. 广东气象, 2021, 43(5): 23-27.
- [12] 夏秋萍, 张滨. 一次东风波引起的特大暴雨天气过程分析. 海洋预报, 2011, 28(3): 68-73.
- [13] 王忠东, 曹楚, 符生辉. 影响浙闽沿海的两次东风波过程对比分析. 广东气象, 2011, 33(2): 20-25.
- [14] 曹楚, 王忠东. 一次东风波暴雨过程诊断分析. 气象科技, 2011, 39(3): 308-314.
- [15] 顾思南, 陈从夷, 刘建勇, 等. 一次东风波大暴雨过程诊断分析. 气象科技, 2013, 41(4): 726-735.
- [16] 朱乾根, 林锦瑞, 寿绍文, 等. 天气学原理和方法. 北京: 气象出版社, 2000.
- [17] 王坚红, 曾喻, 彭模, 等. 中国南部沿海暴雨东风波特征及SST影响机制研究. 大气科学学报, 2017, 40(3): 333-345.
- [18] 付炜, 叶成志, 王东海, 等. 一次南岭山脉前汛期强对流天气过程诊断分析. 暴雨灾害, 2018, 37(6): 511-521.

(上接103页)

- [1] 陈豫英, 陈晓光, 马金仁, 等. 风的精细化MOS预报方法研究. 气象科学, 2006, 26(2): 210-216.
- [2] 刘鸿升, 余功梅. 偏北大风的数值预报释用方法研究. 气象科学, 2002, 22(1): 100-106.
- [3] 李江萍, 王式功. 统计降尺度法在数值预报产品释用中的应用. 气象, 2008, 34(6): 41-45.
- [4] 钱燕珍, 孙军波, 陈佩燕, 等. 用数值预报释用方法做近海及登陆热带气旋强度预报. 气象, 2013, 39(6): 710-718.
- [5] 陈锦冠, 林少冰. 10分钟平均最大风速与极大风速评估方程的建立. 气象, 2001, 27(10): 38-41.
- [6] 汪宏宇, 龚强, 杨洪斌. 基于测风塔数据的最大风速与极大风速关系研究. 气象与环境科学, 2019, 42(3): 110-117.