

基于概率密度匹配方法的 WRF 模式阵风 风速误差订正

钱磊 邱学兴 郑淋淋

(安徽省气象台,合肥 230031)

摘要 为提高数值模式对阵风风速预报能力,采用概率密度匹配方法(Probability Density Function Matching Method,简称 PDF 方法)对 WRF 模式地面极大风速预报数据开展误差订正。结果表明:①基于 PDF 方法订正后的阵风预报效果明显优于 WRF 预报结果,当实况极大风力 ≤ 5 级时,两种预报结果均与实况较为一致;当实况极大风力 ≥ 6 级时,WRF 预报相比实况明显偏小,而 PDF 方法订正结果则与实况较为接近;②对比不同地形条件下两种预报结果发现,在实况风力整体偏弱的平原地区,WRF 预报和 PDF 订正结果对极大风的预报效果均较好;在风力偏强的山区和沿江河谷地区,PDF 订正结果的预报效果相比 WRF 预报则有明显提升;③对 2017 年安徽省 81 个国家站逐日极大风速的预报效果检验发现:预报误差和过去五年整体拟合误差基本相当,说明基于 2012—2016 年历史数据建立的概率密度分布函数可以代表安徽各站多年的实况和 WRF 预报极大风速的联合分布特征,利用 PDF 方法进行逐日极大风速预报具有一定的可靠性。

关键词: 阵风风速预报;概率密度匹配方法;WRF 模式

中图分类号: P456 **DOI:** 10.19517/j.1671-6345.20180022 **文献标识码:** A

引言

大风灾害作为安徽的重大灾害性天气之一,几乎每年都会造成人员伤亡和重大经济损失^[1],所以加强大风灾害的预报对保障人民生命财产安全至关重要。许多学者结合各种方法和观测资料,在大风预报方面进行了诸多尝试^[2-4],取得了众多研究成果。近年来,伴随着数值模式不断发展成熟,MM5、WRF 等中尺度气象模式开始广泛应用于近地面风速预报中,气象学者们也在对中尺度模式风速预报的检验评估方面做了大量工作。朱智慧和黄宁立^[5]利用 WRF 模式对上海沿海 3 个浮标站的 2 min 平均风速进行了检验,发现 WRF 风速预报准确率较高,且对 6 级以下风速预报的效果要优于 6 级以上的效果。汪君和王会军^[6]以及李茜等^[7]进一步分析评估了不同季节、不同地形条件下 WRF 模式对实况 10 min 平均风速的短期预报效能,均发现模式存在预报风速偏大、对冬季风速的预报效果要好于夏季、对平坦下垫面地区的预报效果好于山区等特征。

龚强等^[8]对 MM5 模式的风速预报结果进行了检验,发现 MM5 模式也存在风速预报偏小的问题。此外,气象学者们还针对不同模式的风速预报结果进行了对比分析。阎丽凤等^[9]对 MM5、WRF-RUC 和 T639 模式在山东沿海 9 个精细化海区代表站的日最大风速预报进行了检验,发现各模式普遍存在小风天气预报偏大、大风天气预报偏小的特点。曾瑾瑜等^[10]对比了 WRF、EC 和 T639 3 种数值模式对福建省冬半年沿海和岛屿自动站逐时极大风速的预报,发现模式预报风速相比实况极大风速偏小,并且预报平均误差由沿海向内陆逐渐减小。由上可以看出:由于数值模式存在本身参数化方案不完善、地形数据不精确以及分辨率较低等问题,其对近地面风速特别是瞬时风速的预报能力还有待提高,因此还很有必要对数值预报产品进行订正和解释应用。

数值预报产品的解释应用指的是通过将动力和统计方法相结合,对数值预报的结果进行分析订正,从而建立预报模型,给出要素预报的客观结果^[11]。目前基于经验数据的动力统计预报方法已在风速预

<http://www.qxkj.net.cn> 气象科技

安徽省气象局预报员专项项目(kY201713)和国家自然科学基金项目(41705029)联合资助

作者简介:钱磊,男,1990年生,硕士,助理工程师,主要从事中小尺度气象学研究,Email:qianlei063@foxmail.com

收稿日期:2018年1月11日;定稿日期:2019年1月31日

报方面得到了广泛使用,陈豫英等^[12]采用多元线性和逐步回归方法对 MM5 模式的站点输出产品进行释用,实现了对宁夏 25 个测站 48 h 逐时风速、风向的预报。王在文等^[11]采用基于基本的支持向量机非线性回归方法,制作了逐 3 h 的 10 m 风场预报产品,并发现其预报效果较多元回归的 MOS 方法更具优势。陈录元等^[13]依据逐步相似过滤法和最小相似离度原理,利用 T213 数值预报产品对环渤海地区 4~10 d 逐日最大风速进行了预报,结果发现该方法在风力不强的情况下具有一定参考价值。胡波等^[14]分别采用了直接经验映射法和间接经验映射法,结合 WRF 输出风场数据实现了对舟山海岛阵风的预报。

概率密度匹配法(Probability Density Function Matching Method,简称 PDF 方法)的主要思想在于通过调整资料气象要素值,使其和地面观测气象要素的概率密度分布一致,从而达到订正资料系统误差的目的^[15]。该方法由于具有计算简单、在订正系统误差方面具有优越性等特点,现在国际上被广泛应用于卫星资料订正^[15-17]。然而却少有人利用该方法进行模式预报产品订正,其主要原因在于缺少预报产品所对应的同时段实况观测数据。那么是否可以通过对模式预报风速和实况观测的阵风风速历史数据建立联合概率密度分布函数,并以此为模板对阵风风速进行预报呢?本文选用安徽省 81 个国家站的历史逐日极大风速(即阵风)和 WRF 模式输出的逐日 10 m 风极大风速资料建立各单站联合概率密度分布函数,并以此为基准对 WRF 输出的极大风速产品进行订正,探讨该方法对单站逐日极大风速预报的适用性。

1 资料与方法

1.1 实况数据

本文所用的实况逐日极大风速数据为安徽省气象信息中心经过质量控制后的观测数据。由于硬件存储设备的限制,且实况极大风速数据量庞大,信息中心仅保存了最近几年的实况资料。此外,本文所参考的本地化 WRF 模式是从 2012 年开始稳定运行的,故本文所用的安徽省 81 个国家站的实况逐日极大风速数据时段为 2012—2017 全年,其中逐日极大风速是通过逐日 08:00 至次日 08:00 段内所有的瞬时风速记录取其最大值所得到的。需要特别说

明的是,这里选取的逐日极大风速数据是在无对流出现时所记录的,在对流性天气(包括飑线、超级单体、雷暴等)出现时记录的极大风数据不在本文的统计范围之内。

1.2 模式数据

本文所用的模式数据包括 2012—2017 全年的 3 km 分辨率的 WRF 模式输出的逐日 10 m 风极大风速预报数据(和实况数据一样,也不包括对流天气条件下的数据)。WRF 模式分别以 NCEP-GFS $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 实时分析和预报数据为初始场和边界条件,逐日 20:00(北京时,下同)起报向后积分 72 h,逐小时输出一次,其中边界层参数化方案采用 YSU 方案,陆面过程参数化方案采用 Monin-Obukhov 方案。WRF 模式输出的逐日 10 m 风极大风速先采用双线性插值到安徽全省 81 个国家站,再对各站点逐日 08:00 至次日 08:00 段内逐小时瞬时风速预报数据求其最大值作为该站点当日 10 m 风极大风速预报产品。

1.3 预报方法介绍

对于 PDF 方法,本文计算方法如下:对 2012—2016 年间全省逐个国家站的逐日实况极大风速数据和 WRF 模式预报的 10 m 风极大风速数据进行统计,并建立实况数据和模式数据的联合概率密度分布函数作为该站点进行极大风速预报的参考。在建立联合概率密度分布函数时:首先将实况极大风速和模式模拟风速的值域均设置为 $0 \sim 40$ m/s;然后以 0.25 m/s 作为单个风速区间大小,将实况和模拟风速值域分别分为 160 个风速区间,由此形成一个规格为 160×160 的实况—模拟风速的联合分布网格;最后通过统计单站历史逐日实况和模拟极大风速在风速的联合分布网格中各个风速区间内所出现的记录数,并分别除以单站的历史总记录数,从而得到单站的实况数据和模式数据的联合概率密度分布函数。选择对逐个站点建立概率密度分布函数而非建立全省统一的函数的原因是安徽地形复杂多变且地形对风速的空间分布具有重要影响,导致全省各地区极大风速值分布具有明显的局地性特征^[18]。在对逐个站点进行极大风速预报时,以模式输出的逐日 10 m 风极大风速作为自变量,对比概率密度分布函数中模式风速所对应的概率密度值,选其最大值所对应的历史实况风速值作为该站点的逐日极大风速预报数据。鉴于以往研究中所发现的模式预

报风速相比实况极大风速明显偏小的现象^[10],当模式风速对应的概率密度值出现多个极大值时,则选其对应的历史实况风速的最大值作为该站点的逐日极大风速预报数据。以天柱山站(方位(30.73°N, 116.45°E),海拔 968.2 m)为例,图 1 为 2012—2016 年天柱山站逐日实况极大风速和 WRF 预报风速的联合概率密度分布。当模式预报风速为 5 m/s 时(即图 1 中红点位置),其对应的最大概率密度值为 3.5%(即图 1 中黑点位置),则 3.5% 所对应的历史实况极大风速值为 8.3 m/s(即图 1 中蓝点位置),即为 PDF 的极大风速预报结果。

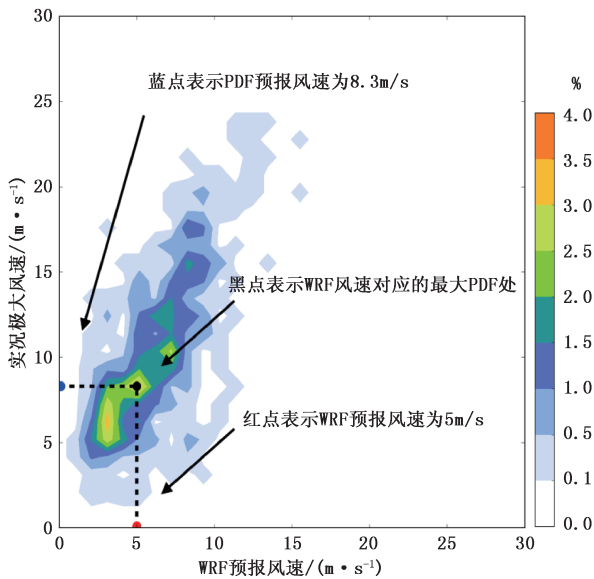


图 1 2012—2016 年天柱山站逐日实况极大风速和 WRF 预报风速的联合概率密度分布(阴影)

(纵横坐标轴分别表示 WRF 预报风速和实况极大风速,红点表示 WRF 风速为 5 m/s 的位置,蓝点表示 PDF 方法预报风速为 8.3 m/s 的位置,黑点表示 WRF 风速对应的最大概率密度值的位置,图中阴影总面积大小为 1)

1.4 检验方法介绍

参考中国气象局《城镇气象要素预报的风预报质量检验办法(试行)》,对风速评分按逐级风力作为一个评分等级的规则进行分级,将风速等级划分为 0~12 级共 13 个等级,分别检验 TS 评分、漏报率和空报率。同时参考风速预报分级检验方法,即如果预报风力和实况风力处于同一等级时,则视该等级风力预报正确;如果预报风力小于实况等级,则视其为漏报;如果预报风力大于实况等级,则视其为空报。按照此规则,当出现空报时说明该等级风力预

报偏强,出现漏报时则说明预报偏弱。

2 结果分析

2.1 6 级以上极大风速预报的拟合结果分析

根据以往对中尺度模式风速预报的检验评估结果,模式风速预报的准确性具有明显的季节性特征即冬季效果好于夏季^[6-7],故本文利用 2012—2016 年安徽省 81 个国家站的历史逐日极大风速资料和 WRF 模拟的逐日 10 m 风极大风速资料按冬半年(11 月到次年 4 月)和夏半年(5—10 月)分别建立联合概率密度分布函数,采用 PDF 方法对这五年间各站点的日极大风速进行回报,并与 WRF 的模拟结果做对比检验分析。

表 1 给出了冬半年的对比检验结果,其中 WRF_DMO 表示 WRF 模式的预报结果,WRF_PDF 表示在 WRF 模式预报结果的基础上经过 PDF 方法订正过的预报结果。由表 1 可以看出 PDF 方法对 6 级以上极大风的预报效果相比 WRF 有明显提升,其 TS 评分达 44.3 分,相比 WRF 结果上涨超过 25 分,与此同时其漏报率也下降了 50 个百分点;而 WRF 对 6 级以上极大风的预报 TS 评分仅为 16.8 分,且其漏报率超过 80%,说明 WRF 对 6 级以上极大风的预报能力偏弱且预报风速偏小。对比 8 级以上极大风的预报检验结果,发现 PDF 方法的 TS 评分相比针对 6 级以上极大风的预报评分略有下降,且其空报率也有所上涨,说明随着极大风速的增长,PDF 方法对极大风的预报能力也随之减弱,且其预报风速相比实况风速偏强;而 WRF 对 8 级以上极大风则几乎没有预报能力,并且其漏报率超过 99%,说明随着极大风速增长,WRF 预报风速偏小的特征会越来越明显。

进一步对比夏半年的检验结果,发现无论是 PDF 方法还是 WRF 预报,其针对 6 级和 8 级以上极大风的预报 TS 评分相比冬半年均有下降(表 2)。究其原因,夏半年大风天气的影响系统比较复杂且大风发生的局地性特征偏强,而中尺度模式由于其自身参数化方案不完善等原因在模拟复杂系统影响下的天气方面仍有缺陷,导致其对夏季大风天气的预报能力不足;而冬半年出现的大风天气则多与大范围冷空气活动有关,模式预报难度相对偏小,从而导致了 PDF 方法和 WRF 对冬半年大风天气的预报效果均好于夏半年。

表 1 2012—2016 年冬半年 6 级以上极大风的预报检验结果

	6 级以上 TS 评分	6 级以上 漏报率	6 级以上 空报率	8 级以上 TS 评分	8 级以上 漏报率	8 级以上 空报率
WRF_DMO	16.82	82.26	23.58	0.72	99.28	33.33
WRF_PDF	44.29	32.26	43.87	37.55	25.99	56.75

表 2 同表 1, 但为 2012—2016 年夏半年

	6 级以上 TS 评分	6 级以上 漏报率	6 级以上 空报率	8 级以上 TS 评分	8 级以上 漏报率	8 级以上 空报率
WRF_DMO	8.96	90.64	32.22	1.32	98.68	20.00
WRF_PDF	36.57	42.21	50.10	33.65	41.06	56.05

前面对比分析了 PDF 方法和 WRF 在对 6 级以上极大风的预报能力,但预报风力和实况风力的分布情况以及二者间的差异多少并未体现出来。因此,本文将极大风力 ≥ 6 级和极大风力 ≤ 5 级分别定义为大风和小风,并以 2012—2016 冬半年为例,分别在实况出现大风(极大风力 ≥ 6 级)和小风(极大风力 ≤ 5 级)这两种情况下,对预报风力和实况风力的分布进行一致性对比检验,以便于进一步分析 PDF 方法和 WRF 预报结果与实况间的差异。需要注意的是,本文这里之所以采用 6 级风而没有像中国气象局所规定的采用 8 级风作为区分大小风的标准,是因为本文所收集的逐日极大风速数据中并不包含在对流性天气条件下(包括飚线、超级单体、雷暴等)出现的大风天气,而非对流性大风(例如冷空气大风等)的极大风速相对对流性大风(例如雷雨大风等)要明显偏弱。为避免按照 8 级风的标准来定义大风天气,从而导致大风天气样本太少的情况出现,本文选择用 6 级风作为区分大小风的标准。

图 2a 给出了 2012—2016 冬半年实况出现大风时 WRF_DMO 预报风力和实况风力的分布情况,可以看到 WRF_DMO 预报风力值主要分布在 4~6 级,其中 5 级所占的比重接近 50%,预报风力在 6 级以上的记录很少;而实况风力则主要分布在 6~8 级,其中 6 级所占比重超过了 70%。进一步计算了大风出现时各级实况风力与 WRF_DMO 预报风力的差值(图 2c),发现风力差多集中分布在 1~2 级,累积所占比重接近 80%,说明在实况出现大风时 WRF_DMO 的预报风力相比实况明显偏小 1~2 个

风级。分析 PDF 预报方法的检验结果,可以看到实况出现大风时,WRF_PDF 预报风力的分布区间主要为 5~7 级,其中 6 级所占比重接近 40%(图 2b)。虽然与实况结果相比 WRF_PDF 预报风力在 6 级所占的比重也明显偏少,但从 6 级以上风力的分布情况来看,WRF_PDF 预报结果与实况较为相似。同样计算实况风力与 WRF_PDF 预报风力的差值,可以看出相比 WRF_DMO 预报风力明显偏小的现象,WRF_PDF 预报风力则与实况结果较为接近,其风力差值主要分布在 ± 1 区间内,其中风力相等所占的比重接近 50%(图 2d)。进一步对比实况出现小风时 WRF_DMO 和 WRF_PDF 预报风力的分布情况,可以看到 WRF_DMO 对小风的预报效果相比大风要明显偏好。虽然其预报结果在各级风力的分布比重上与实况略有差异(图 3a),但二者间的风力差仍主要集中在 0~1 级(图 3c),说明 WRF_DMO 在预报小风时其预报风力相比实况整体接近,略微偏小。对比 WRF_PDF 预报结果,可以看出其对小风的预报效果同样好于大风,但不像 WRF_DMO 那样改进明显。相比 WRF_DMO,WRF_PDF 预报小风时其结果在各级风力的分布比重上与实况更为接近(图 3b),且二者风力相等所占的比重超过了 50%(图 3d)。对比夏半年结果,发现结论基本一致(图略)。综上所述可以看出:与 WRF 模式本身的预报结果相比,利用 PDF 方法得出的预报风力与实况结果更为接近,特别是在实况出现 6 级以上(包括 6 级)大风的情况下,PDF 方法相比 WRF 模式本身其预报效果具有明显改进。

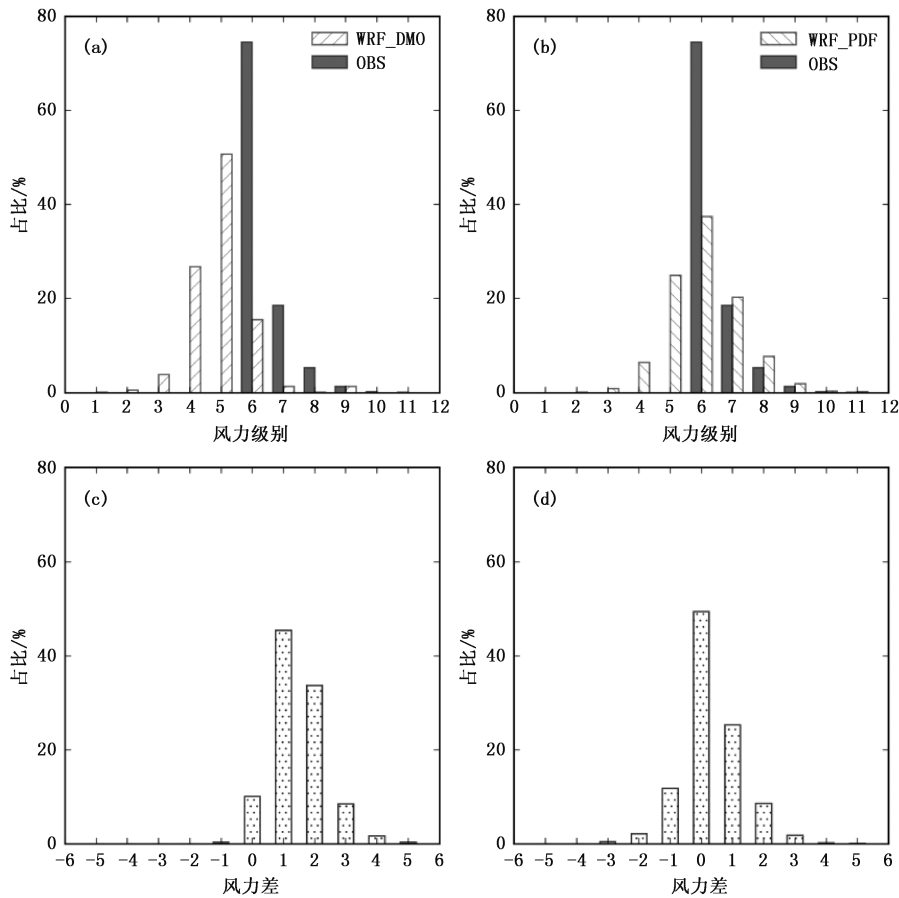


图 2 2012—2016 冬半年实况出现大风(极大风力 ≥ 6 级)时安徽省各级风力实况(OBS)和 WRF_DMO(a)与 WRF_PDF(b)预报风力所占的比重,实况和 WRF_DMO(c)与 WRF_PDF(d)预报风力的差值所占的比重

2.2 不同地形对拟合结果的影响分析

以往研究表明,地形对风速的空间分布具有重要影响^[18]。安徽地处华东西部,其地形包含淮北平原、江淮丘陵、大别山区和皖南山区,并有淮河和长江自西南向东北贯穿其中,地形地貌十分复杂。那么,不同地形条件对实况和预报风力的分布情况及其差异又会产生什么样的影响呢?图 4 给出了安徽省地形高度以及 81 个国家站的分布情况,可以看出除了天柱山站(方位(30.73°N,116.45°E),海拔 968.2 m)、黄山光明顶站(方位(30.13°N,118.15°E),海拔 1840.4 m)、九华山站(方位(30.48°N,117.78°E),海拔 647.3 m)和岳西站(方位(30.87°N,116.37°E),海拔 434.2 m)4 个站的海拔高度超过 400 m 外,其他各站点的海拔高度基本都在 200 m 以下,所以地形高

度对这些测站的实况风速所造成的差异可以忽略不计。但是,这并不意味着除了高海拔山区站以外的所有站点的实况和 WRF 模拟风速分布都是相似的。沿江河谷地带(包括太湖、望江、枞阳、安庆、宿松和东至这 6 个站),由于其地处皖南山区和大别山区的交界处,形成了一个类似“两边高,中间低”的峡谷地形,有利于因狭管效应而引发的大风天气出现。故本文根据安徽省地形分布情况,将全省 81 个国家站分成高海拔山区(包括天柱山、黄山光明顶、九华山和岳西 4 个站)、沿江河谷地带(包括太湖、望江、枞阳、安庆、宿松和东至这 6 个站)和平原地带(除高海拔山区和沿江河谷地带外的所有站)3 种地形,并分析了不同地形对各站实况和预报风力分布特征的影响。

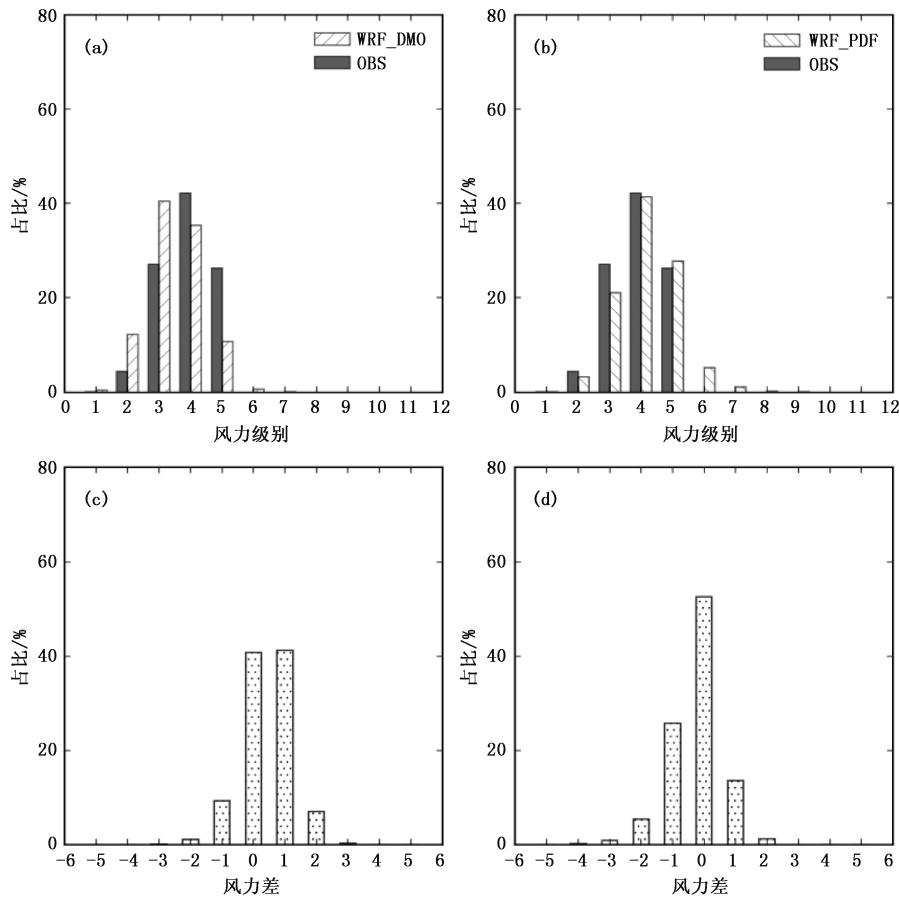


图 3 2012—2016 年冬半年实况出现小风(极大风力 ≤ 5 级)时安徽省各级风力实况(OBS)和 WRF_DMO(a)与 WRF_PDF(b)预报所占的比重,实况和 WRF_DMO(c)与 WRF_PDF(d)预报风力的差值所占的比重

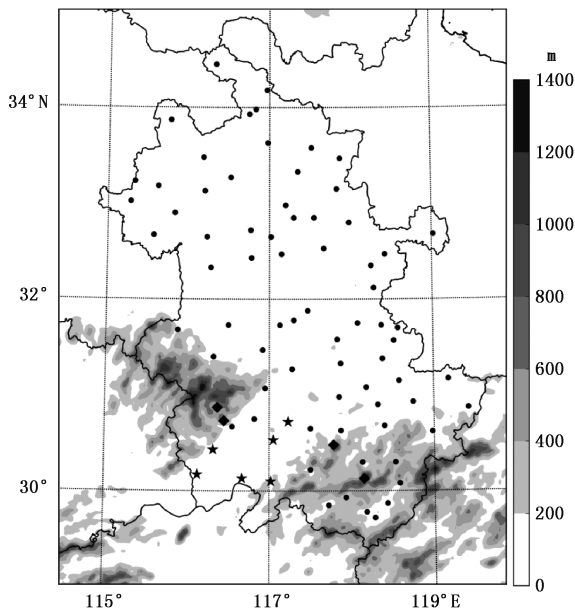


图 4 安徽省地形高度(阴影)和 81 个国家站位置分布(其中用●、◆和★分别表示属于平原地带、高海拔山区和沿江河谷地带的国家站点)

研究结果表明:对于平原地带的国家站,其实况极大风力整体偏弱,其风力区间主要位于 3~5 级,很少出现 6 级以上的阵风记录;对比 WRF_DMO 和 WRF_PDF 预报风力的分布情况,发现 WRF_DMO 预报风力处于 0~3 级风力区间内的记录数较实况结果明显偏多,处于 4 级以上风力区间内的记录数则明显偏少(图 5a),而 WRF_PDF 预报风力分布情况则与实况结果基本一致(图 5b);进一步对各级实况风力与预报风力的风力差分布情况,发现 WRF_DMO 预报风力相比实况结果明显偏弱 1 个风力级别(图 5c),而 WRF_PDF 则有超过半数的预报风力与实况结果相等(图 5d)。

对于位于高海拔山区和沿江河谷地带的国家站,可以看到其实况极大风力相比平原地带明显偏强,风力主要分布在 4~7 级的风力区间内;从 WRF_DMO 预报风力的分布情况来看,WRF_DMO 的预报风力主要分布在 0~6 级的风力区间内,对 6 级以上的大风几乎没有预报能力(图 6a、图 7a);进一步

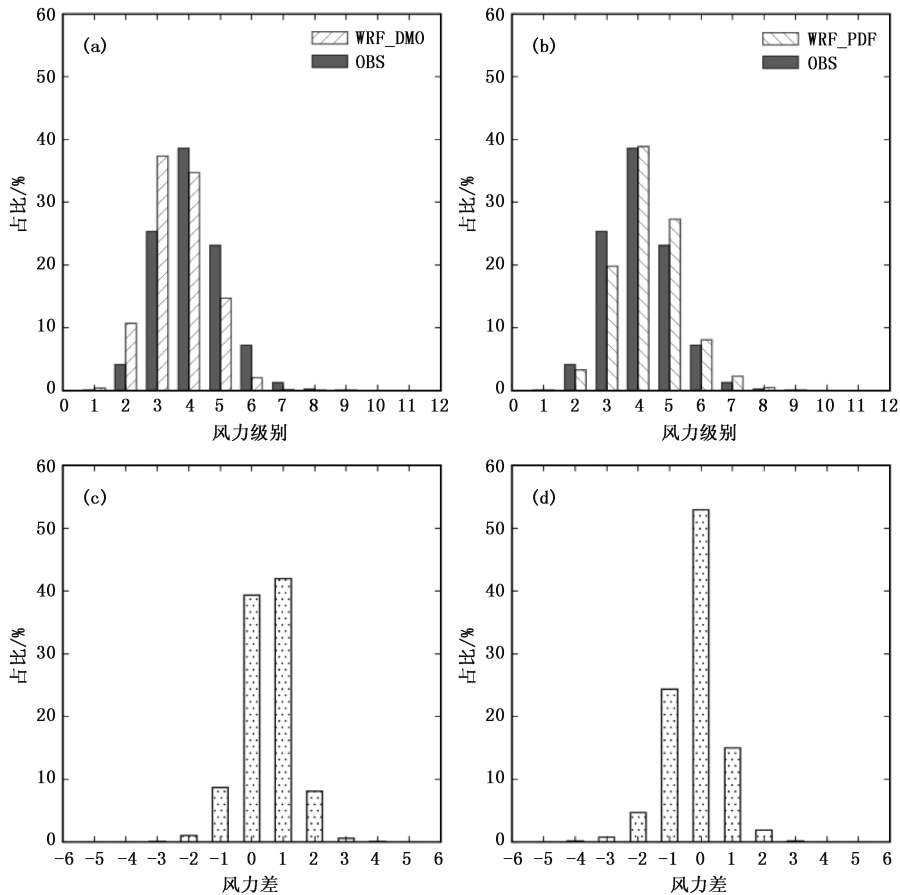


图 5 2012—2016 冬半年安徽省平原地带所有国家站各级风力实况(OBS)和 WRF_DMO(a)与 WRF_PDF(b)预报所占的比重,实况和 WRF_DMO(c)与 WRF_PDF(d)预报风力的差值所占的比重

对比高海拔山区和沿江河谷地带 WRF_DMO 的风力预报效果,发现虽然 WRF_DMO 预报风力相比实况均明显偏弱,但对于高海拔山区风力的预报偏弱程度(偏弱 2~3 级(图 6c))要甚于沿江河谷地带(偏弱 1~2 级(图 7c))。相比之下,无论是对高海拔山区还是沿江河谷地带,WRF_PDF 预报风力的分布均与实况较为接近(图 6b、图 7b),且预报与实况的风力差也集中分布在 ± 1 级区间内(图 6d、图 7d)。上述分析表明,WRF_DMO 对极大风力的预报效果整体偏弱,且受地形条件影响较为明显,具体表现为在实况风力整体偏弱的平原地带表现偏好,而在风力偏强的高海拔山区和沿江河谷地带则表现偏差;而 WRF_PDF 对极大风力的预报效果整体较好,且受到地形条件影响的程度偏弱。

2.3 2017 年阵风风速预报的检验

由前面的分析可知,运用 PDF 方法可以在一定程度上有效地对 2012—2016 这五年间的逐日极大

风进行回报。然而基于这 5 年数据所建立的联合概率密度函数是否具有代表性?是否能够表示安徽各站多年的实况和 WRF 模拟极大风速的联合分布特征?

2017 年安徽省共经历各类大风天气过程(包括冷空气大风和雷雨大风)接近 30 余次,其中冷空气大风天气过程主要集中在 2—3 月,以 2 月 19—22 日的过程最为明显,部分地区 24 h(08:00 至次日 08:00)极大风力高达 10 级。为了进一步验证各站概率密度函数的代表性和 PDF 方法的有效性,本文对 2017 年全省逐日极大风速按冬半年和夏半年进行划分,分别利用 PDF 方法对其进行预报,并对其预报结果进行检验。表 3 和表 4 分别给出了 2017 年冬半年和夏半年 6 级以上极大风的检验结果。可以看到,PDF 方法对 2017 年 6 级以上极大风具有一定的预报能力,虽然相比 2012—2016 年 WRF_PDF 的预报评分偏低(这主要与 2017 年对流性大

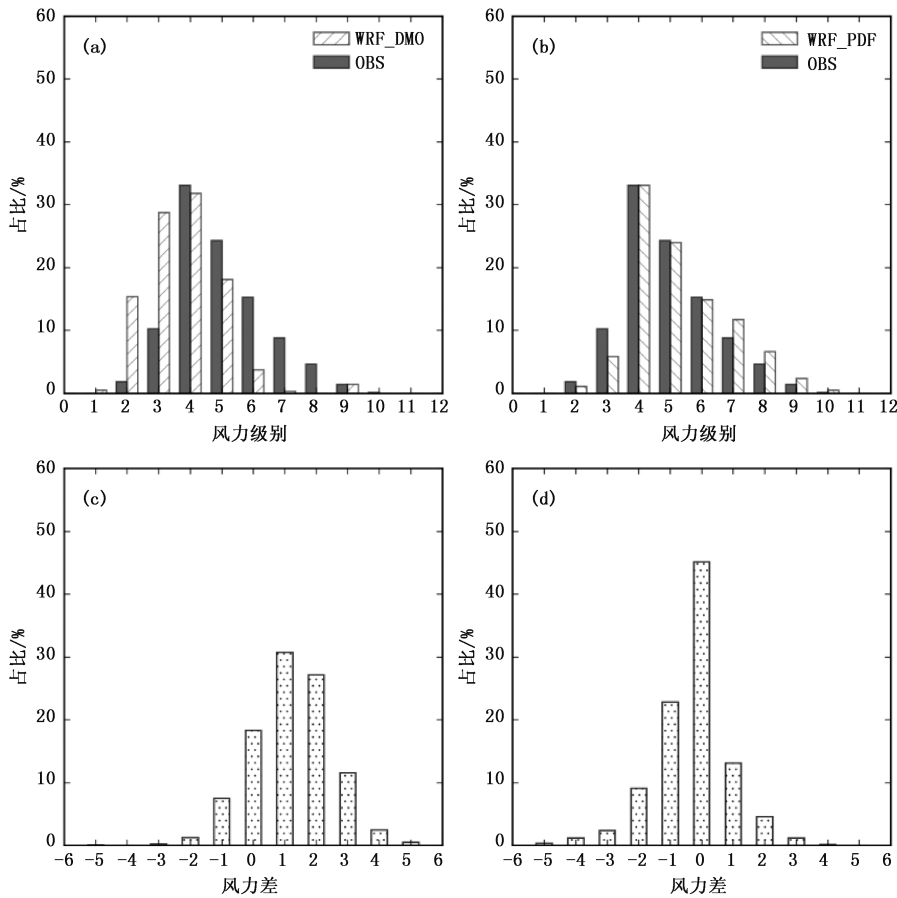


图 6 2012—2016 年冬半年安徽省高海拔山区所有国家站各级风力实况和 WRF_DMO(a)与 WRF_PDF(b)预报所占的比重,实况和 WRF_DMO(c)与 WRF_PDF(d)预报风力的差值所占的比重

风过程即雷雨大风天气偏多,而系统性大风过程即冷空气大风天气偏少有关),但 PDF 方法相比 WRF 原始模拟效果仍具有明显改进。进一步对 2017 年冬半年 WRF_PDF 预报风力和实况结果做一致性检验,发现当实况出现小风时,WRF_PDF 预报风力与实况结果分布较为一致,且二者各级风力差均集中在 ± 1 级区间内,风力相等所占的比重接近 50%,而 WRF_DMO 预报风力则相比实况偏弱 1~2 级(图 8a,c);当实况出现大风时,WRF_PDF 风力较实况偏小 1 个风力级,但二者风力差位于 ± 1 级区

间内所占的比重仍接近 80%,而 WRF_DMO 预报风力相比实况则普遍偏小 2 级左右,且其 8 级以上极大风完全没有预报能力(图 8b,d)。而夏半年结果则与冬半年基本一致(图略)。上述分析表明,利用 PDF 方法对 2017 年逐日极大风的预报效果与之前对 2012—2016 年的回报效果大体相当,说明基于历史数据建立的概率密度函数可以代表安徽各站多年的实况和 WRF 模拟极大风速的联合分布特征,即利用 PDF 方法进行逐日极大风速预报具有一定的可靠性。

表 3 2017 年冬半年 6 级以上极大风的预报检验结果

	6 级以上 TS 评分	6 级以上 漏报率	6 级以上 空报率	8 级以上 TS 评分	8 级以上 漏报率	8 级以上 空报率
WRF_PDF	40.81	43.60	40.38	17.06	75.68	63.64
WRF_DMO	22.49	76.98	9.37	0.00	100.00	

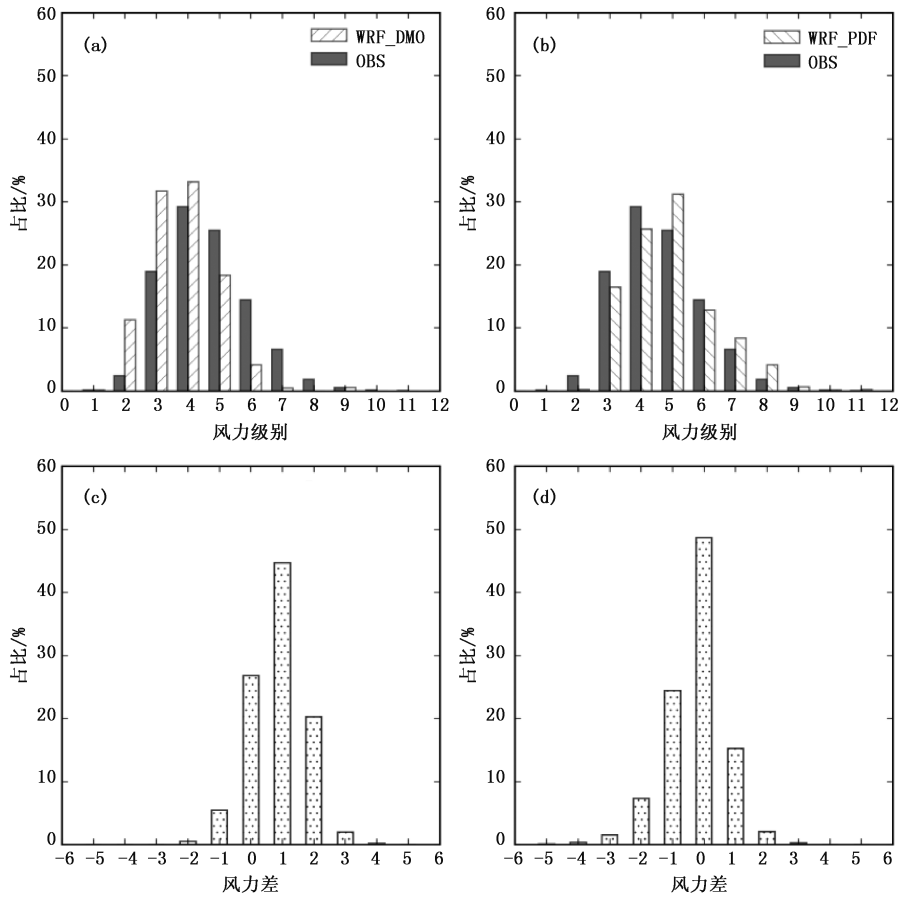


图 7 2012—2016 冬半年安徽省沿江河谷地带所有国家站各级风力实况(OBS)和 WRF_DMO(a)与 WRF_PDF(b)预报所占的比重,实况和 WRF_DMO(c)与 WRF_PDF(d)预报风力的差值所占的比重

表 4 同表 3, 但为 2017 年夏半年

	6 级以上 TS 评分	6 级以上 漏报率	6 级以上 空报率	8 级以上 TS 评分	8 级以上 漏报率	8 级以上 空报率
WRF_PDF	32.71	53.13	48.01	17.69	70.45	69.41
WRF_DMO	11.74	87.80	24.62	0.00	100.00	

3 结论与讨论

本文利用 2012—2016 年安徽省 81 个国家站的历史逐日实况和 WRF 预报极大风速资料建立联合概率密度函数,并以此为基准对 WRF 输出的极大风速产品进行订正。在此基础上分别对 2012—2016 年以及 2017 年全省各站的逐日极大风速进行回报,并与 WRF 直接输出结果进行对比检验分析。结果表明:

(1)利用 PDF 方法对 6 级和 8 级以上极大风的预报效果相比 WRF 均有明显改善,但随着极大风

力不断增强,WRF_PDF 和 WRF_DMO 两种预报结果的效果均随之变差;从季节性差异来看,以上两种方法对极大风的预报效果均表现为冬半年效果好于夏半年。

(2)通过对比 WRF_PDF 和 WRF_DMO 两种预报风力与实况结果的分布情况,可以发现当实况出现大风时 WRF 模拟结果相比实况明显偏小,而 PDF 方法预报结果则与实况较为接近;当实况出现小风时两种预报结果均与实况较为一致。

(3)不同地形条件下 WRF_PDF 和 WRF_DMO 的预报效果不同,在实况风力整体偏弱的平原地区,

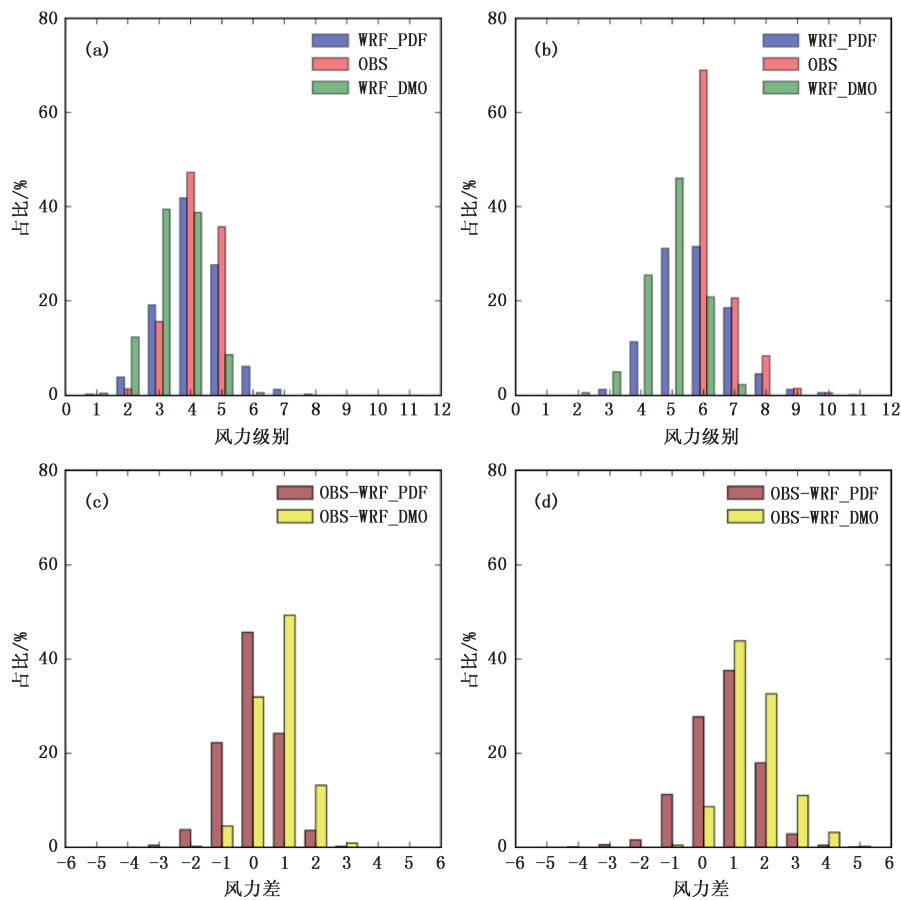


图 8 2017 年冬半年安徽省各级风力实况、WRF_DMO 和 WRF_PDF 预报所占的比重(a,b);实况与 WRF_PDF (棕色柱)和 WRF_DMO(黄色柱)预报风力的差值所占的比重(c,d)
(图 a,c 实况出现小风;图 b,d 实况出现大风)

WRF 原始预报和利用 PDF 方法对极大风的预报效果均较好;在风力偏强的山区和沿江河谷地区, WRF_DMO 预报风力明显偏弱,效果较差,而 WRF_PDF 的预报效果相比 WRF_DMO 则有明显提升。

(4)通过对比 PDF 方法对 2012—2016 全年拟合结果和 2017 年全省逐日极大风的预报结果,发现二者效果大体相当,说明基于 2012—2016 年历史数据建立的概率密度函数可以代表安徽各站多年的实况和 WRF 预报极大风速的联合分布特征,故利用 PDF 方法进行逐日极大风速预报具有一定的可靠性。

虽然利用 PDF 方法对极大风的预报能力相比 WRF 原始模拟有了明显提高,但其对实况 8 级以上大风的预报能力仍显偏低,这可能与 PDF 方法中所使用的历史样本数据偏少有关。由于 PDF 方法主要依赖由大量历史数据所建立起的实况和 WRF 联

合概率密度分布函数进行预报,所以历史样本的数量和可靠性是制约 PDF 方法预报能力的一大关键。故在未来的研究中,可以考虑通过搜集更长时间尺度的历史实况和 WRF 模拟数据,从而增加 8 级以上大风的的历史样本数量,进而提高预报能力。此外,由于中尺度模式对对流性天气预报能力有限,所以 PDF 方法对强对流产生的大风预报能力有限。

致谢:感谢安徽省气象信息中心为本文提供观测数据。

参考文献

[1] 周后福,张永芹,孙金贺,等. 淮北夏半年大风预报方法的建立及检验[J]. 气象与环境学报, 2013, 29(6): 37-41.
 [2] 朱男男,刘一玮,孙密娜. 一次罕见黄渤海大风天气成因分析[J]. 气象科技, 2017, 45(6):1070-1076.
 [3] 胡波. 一种概率方法在沿海海岛台风阵风预报中的应用试验[J]. 气象科技, 2016, 44(2):246-251.
 [4] Fei Y, Hongli J, Yuan X, et al. 利用非线性回归技术建立洛

- 阳机场大风预报方法[J]. 气象与环境科学, 2010, 33(4): 53-58.
- [5] 朱智慧, 黄宁立. 上海沿海 WRF 模式风速预报的检验和释用[J]. 大气科学研究与应用, 2012(2):69-76.
- [6] 汪君, 王会军. WRF 模式对江苏如东地区风速预报的检验分析[J]. 气候与环境研究, 2013, 18(2):145-155.
- [7] 李茜, 孙娴, 程路. 基于 WRF 模式与相似 Kalman 滤波法订正后的风速预报效果分析[J]. 水电能源科学, 2014, 32(6): 197-201.
- [8] 龚强, 袁国恩, 汪宏宇, 等. 应用 MM5 模式对地面大风过程的模拟试验[J]. 气象, 2005, 31(4): 53-57.
- [9] 阎丽凤, 盛春岩, 肖明静, 等. 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, 2013, 33(3): 340-346.
- [10] 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[C]//第 31 届中国气象学会年会 S2 灾害天气监测、分析与预报, 2014.
- [11] 王在文, 郑祚芳, 陈敏, 等. 支持向量机非线性回归方法的气象要素预报[J]. 应用气象学报, 2012, 23(5):562-570.
- [12] 陈豫英, 陈晓光, 马金仁, 等. 风的精细化 MOS 预报方法研究[J]. 气象科学, 2006, 26(2):210-216.
- [13] 陈录元, 尚可政, 周海, 等. 环渤海地区 4~10 天风速预报中相似预报法的应用[J]. 气象科技, 2012, 40(2): 219-225.
- [14] 胡波, 杜惠良, 俞燎霓. 几种不同方法在舟山海岛阵风预报试验中的对比分析[J]. 海洋预报, 2016, 32(3):43-50.
- [15] 宇婧婧, 沈艳, 潘旻, 等. 概率密度匹配法对中国区域卫星降水资料的改进[J]. 应用气象学报, 2013, 24(5):544-553.
- [16] Turk F J, Ebert E E, Oh H J, et al. Validation of an operational global precipitation analysis at short time scales [C]// 12 th Conf on Satellite Meteorology and Oceanography, Amer Meteor Soc, 2003.
- [17] Wang W, Xie P. A Multiplatform-merged (MPM) SST analysis [J]. Journal of Climate, 2007, 20(9):1662-1679.
- [18] 王传辉, 周建平, 周顺武, 等. 近 32a 安徽省风速、风向分布特征[J]. 干旱气象, 2016, 33(2):236-243.

Error Correction of WRF Model Gust Speed Based on Probability Density Function Matching Method

Qian Lei Qiu Xuexing Zheng Linlin

(Anhui Meteorological Observatory, Hefei 230031)

Abstract: In order to improve the forecasting ability of WRF mode against the gust wind speed, the probability density function matching method (PDF) is used to correct the wind speed errors of wind speed forecasting data from WRF model. The results show that: (1) The gust wind force forecasting based on the PDF method is significantly better than the WRF output. When the observed daily maximum wind speed force \leq level 5, two forecasting results are both consistent with the observation. When observed daily maximum wind speed force \geq level 6, comparing with the observed and the wind speed forecasting based on the PDF method, the output from WRF is weaker. (2) By comparing two forecasting results above different topographic conditions, it is found that the effects of the WRF and PDF methods on gust wind in the plain area where the observed wind force is weak are both good. However, in the mountain and valley areas where the observed wind force is strong, the effect of WRF forecast is obviously poor but the effect of the PDF method is improved compared with WRF. (3) By testing forecasting effect on the daily maximum wind speed of 81 national stations in Anhui Province in 2017, it is showed that the forecast error is basically the same as that of the past 5 years, which shows that the probability density distribution function based on the historical data from 2012 to 2016 can represent the joint distribution characteristics of the observed and WRF simulated maximum wind speed from 81 national stations in Anhui Province for many years. So it is reliable by using the PDF method to forecast daily maximum wind speed.

Keywords: gust wind speed forecast; probability density distribution function; WRF model