

王丹,杨艳超,高红燕,等. CMA-WSP 精细化风速预报在陕西地区的质量检验[J]. 陕西气象,2024(5):24-31.

文章编号:1006-4354(2024)05-0024-08

CMA-WSP 精细化风速预报在陕西地区的质量检验

王丹^{1,2},杨艳超²,高红燕²,何柯俊²,杨 荃²

(1. 中国气象局秦岭和黄土高原生态环境气象重点开放实验室,西安 710016;

2. 陕西省气象服务中心,西安 710014)

摘要:利用陕西 97 个国家气象站和 1 个风电场测风塔代表站的风速观测资料,评估了 CMA-WSP 精细化风速预报能力,以及 CMA-WSP v1.0 升级为 v2.0 之后的预报性能提升情况。结果表明,陕西地区 CMA-WSP 的风速预报能力与风速大小密切相关,10 m 风速偏大(小)的气象站或者时段,准确率偏高(低)的可能性较大,即 CMA-WSP 在风速较大时的预报能力优于风速较小时。通过风速随高度变化的指数方程将 CMA-WSP 100 m 高度附近的风速外推到风机轮毂高度,得到的风速预报能够较好地反映风电场实况风速的逐日变化,相关系数通过了 0.05 的显著性检验。CMA-WSP v1.0 升级 v2.0 之后风速预报质量得到提升,2023 年 5 月 15 日—9 月 30 日 CMA-WSP v2.0 12~36 h 10 m 风速预报在陕西大部分气象站的准确率为 36%~52%,平均绝对误差为 0.7~1.5 m/s,与 2022 年同时期的 v1.0 相比较,大部分气象站的准确率提高了 5%以上,平均绝对误差减小了 0.2 m/s 以上。

关键词:CMA-WSP;风速预报;质量检验;风电场

中图分类号:P425

文献标识码:A

作为我国新能源体系的重要组成部分^[1-2],风电产业的发展对实现“双碳目标”至关重要。风电场的输出功率与风速的三次方成正比^[3],精确准确的风速预报是电力部门优化电网调度日程、保证电网稳定运行以及进行市场竞价的迫切需求^[4-6]。风电场功率预测模型一般要求以风机轮毂高度处(65 m 以上)的逐 15 min 风速预报作为输入数据,但是陕西省天气预报业务中常规的近地层风速预报为 10 m 高度,最高时间分辨率为逐小时,不能直接满足风电场站的需求。2022 年 3 月 15 日,中国气象局向各省级气象部门下发了风能太阳能气象预报系统 v1.0 版本(下简称为 CMA-WSP v1.0)的短期预报产品,预报要素包含了开展风电气象服务所需的距地面 10~120 m 高度风速预报,时间分辨率为 15 min,为各省气

象部门开展风电气象服务提供了重要支撑。2023 年 5 月 15 日 CMA-WSP v1.0 升级为 v2.0,与 v1.0 相比较,v2.0 加密了近地边界层垂直层数,改进了辐照度、10 m 风速和轮毂高度风速的预报性能,预报时效由 126 h 延长至 336 h。

对模式的风速预报进行检验是指导用户使用模式风速产品的重要环节,数值模式因其初值场的不确定性、模式自身存在的缺陷以及大气的混沌性,不可避免地存在预报误差^[7-8]。薛文博等^[9]检验发现上海快速更新同化数值预报系统对实测小于 6 级的风预报偏大,对 6 级及以上的风预报偏小。朱智慧和黄宁立^[10]检验发现 WRF 模式对外海风速的预报效果优于近海。张博和赵滨^[11]等发现 CMA-Meso 模式风向预报的随机性随着风速的增大而减小,即弱风的风向难以成功预报。

收稿日期:2023-11-01

作者简介:王丹(1986—),女,陕西渭南人,硕士,高工,主要从事数值预报应用研究和气象服务。

基金项目:秦岭和黄土高原生态环境气象重点实验室开放基金课题(2022G-22);陕西省重点研发计划(2023-YBSF-235)

陕西省气象部门在对 CMA-WSP 风速预报进行检验的基础上,研发了陕西省风力发电气象条件等级预报产品并进行了业务应用,但是关于 CMA-WSP 在陕西地区的风速预报检验结果还未见成果发表。

本文利用陕西地区的气象站和风电场测风塔观测资料,评估 CMA-WSP 对陕西地区 10、70 m 高度风速的精细化预报能力,以及 CMA-WSP 从 v1.0 升级为 v2.0 之后的预报性能提升情况,该检验结果将为气象部门应用 CMA-WSP 开展风电气象服务及 CMA-WSP 风速产品的进一步改进提供重要参考依据。

1 资料和方法

1.1 资料

所用资料包括:(1)CMA-WSP 省级下发产品的风速预报产品,产品预报高度包括 10 m、垂直 eta 层第 4 层和 100 m,资料时间为 2022 年 5 月 15 日—2023 年 9 月 30 日(期间共有 32 日数据缺失,其中 2022 年 8 月 28 日—9 月 10 日数据缺失较明显),2023 年 5 月 15 日之前为 v1.0 版本(预报时效为 0~126 h),之后升级为 v2.0 版本(预报时效为 0~336 h),起报时间为每日 20:00(北京时间,下同),时间分辨率为 15 min,空间分辨率为 9 km;(2)陕西 97 个国家气象站 10 m 风速的逐 15 min 观测资料,资料时间与 CMA-WSP 风速预报时间一致;(3)陕北某一风电场内测风塔的 10 m、70 m(风机轮毂高度)风速的逐 15 min 观测资料,资料时间为 2022 年 5 月 15 日—2023 年 6 月 30 日。

1.2 方法

检验包括两部分,一是利用 97 个国家气象站观测资料对 CMA-WSP 的 10 m 风速预报进行检验,二是利用 1 个风电场的测风塔观测资料对 CMA-WSP 的 10 m 和 70 m 风速预报进行检验。检验指标包括风速预报的准确率、偏强率、偏弱率、平均绝对误差、预报值与观测值的相关系数(下简称为相关系数)。根据蒲氏风力等级,当预报风速与实况风速在同一等级,表示预报风速正确,当预报风速等级小于(大于)实况风速等级,表示预报风速偏弱(偏强)。

CMA-WSP 省级下发产品没有直接提供 70 m 风速预报,但是 CMA-WSP v1.0 垂直 eta 层第 4 层高度(在陕西地区约为 100 m 高度)和 CMA-WSP v2.0 100 m 高度比较接近风机轮毂高度,因此采用风速随高度变化的指数方程 $V(z)=V_R(\frac{Z}{Z_R})^\alpha$ 将以上高度处的风速预报外推到 70 m 高度,式中 Z_R 为 CMA-WSP v1.0 的垂直 eta 层第 4 层高度或者 CMA-WSP v2.0 的 100 m 高度, V_R 为 Z_R 高度处的风速, Z 为 70 m 高度, $V(z)$ 为 Z 高度处的风速, α 是摩擦系数,取 $\alpha=1/7$ 。此外,采用双线性插值方法^[12]将格点上的风速预报值插值到 97 个国家气象站和 1 个风电场站上。

2 检验结果分析

2.1 气象站资料检验 CMA-WSP 风速预报

2.1.1 逐日检验 以陕西 97 个国家气象站作为检验站,对 CMA-WSP 10 m 风速预报进行检验。由于风力发电公司比较关注 0~24 h 风速预报,而 CMA-WSP 预报产品下发到各省气象部门的时间滞后于起报时间,业务中常常采用 12~36 h 预报制作服务产品。从 2022 年 5 月 15 日—2023 年 9 月 30 日陕西地区 12~36 h 10 m 风速预报的逐日检验结果(图 1)来看,CMA-WSP 风速预报曲线与观测曲线的逐日变化趋势较为相似,相关系数为 0.84(通过了 0.05 的显著性检验),但是预报值较观测值偏大的频次较多,偏强率集中在 35%~75%,偏弱率集中在 6%~30%,在偏弱率和偏强率的影响下,准确率主要在 19%~62%。2022 年 9 月—2023 年 4 月的风速预报准确率(平均绝对误差)明显低(大)于其它时期,与该时期正好经历了秋、冬、春季节,冷空气频繁,风速偏大且波动性较强有关。2023 年 5 月 15 日之后风速预报准确率陡然上升,平均绝对误差陡然下降,与 CMA-WSP 从 v1.0 升级为 v2.0 有关。从 CMA-WSP v1.0 和 v2.0 分别在 2022 年和 2023 年的 5 月 15 日—9 月 30 日的风速预报对比检验来看,准确率的平均值从 36%提高到 43%,平均绝对误差、偏强率和偏弱率的平均值依次从 1.4 m/s、46%和 18%降低到 1.1 m/s、40%和 17%,相关系数的平均值从 0.1 提升到 0.2,减小了预报误

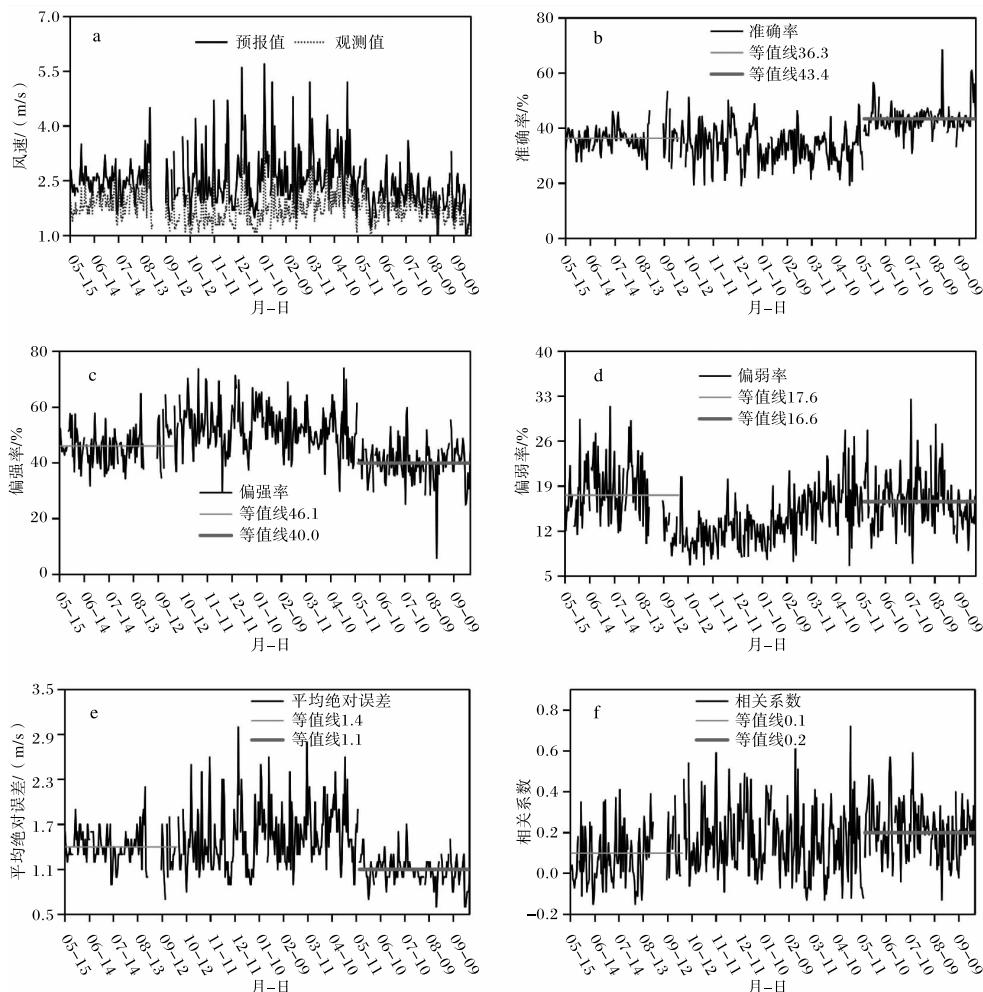


图1 2022-05-15—2023-09-30 陕西 97 个国家气象站风速观测资料对

CMA-WPS 12~36 h 10 m 风速预报的逐日检验

差,改善了预报值较观测值偏高或偏低的现象,提高了预报值与观测值的相关性。

2.1.2 逐站检验 对 2023 年 5 月 15 日—9 月 30 日 CMA-WSP v2.0 的 12~36 h 10 m 风速预报进行逐站检验(图 2)。在陕西大部分地区,风速预报的准确率、偏强率和偏弱率依次为 36%~52%、16%~56% 和 10%~30%;平均绝对误差主要在 0.7~1.5 m/s 之间,其中 62% 的站在 0.7~1.1 m/s 之间(分布在陕北南部、关中西部 and 北部、陕南西部和东部等地区);预报值与观测值的相关性较好,78% 的站相关系数大于 0.2(通过了 0.05 的显著性检验),其中陕北北部和东部、关中西北部等风速较大的部分地区相关系数超过了 0.4。CMA-WSP v2.0 在陕西的预报质量较 v1.0 明显提升,70% 的站预报准确率提高了 5%

以上(部分气象站超过 15%),73% 的站平均绝对误差减小了 0.2 m/s 以上(部分气象站超过 0.5 m/s),60% 的站相关系数增加了 0.1 以上(部分气象站超过 0.4)。但是在 CMA-WSP v1.0 预报质量较高的部分地区质量提升幅度不大甚至出现下降现象,例如,关中盆地北部、陕南浅山河谷的部分地区相关系数降低了 0~0.2,而 CMA-WSP v1.0 在这些地区的相关系数明显偏高。另外,在 CMA-WSP v1.0 偏强率(偏弱率)较高的气象站,多会出现 CMA-WSP v2.0 偏强率(偏弱率)降低、偏弱率(偏强率)升高的现象,改善了预报值较观测值明显偏大或偏小的情况。

CMA-WSP 风速预报质量与实况风速大小密切相关。2022(2023)年 5 月 15 日—9 月 30 日,97 个气象站的 CMA-WSP v1.0(v2.0)10 m

风速预报的准确率、偏强率、偏弱率与实况风速的相关系数分别为 0.15、-0.68、0.73 (0.31、-0.70、0.80), 后 2 个(前 2 个)通过了 0.05 的显著性检验, 可见, CMA-WSP 在 10 m 风速偏大

(小)的地区, 预报偏弱率较高(较低)、偏强率较低(较高), 准确率偏高(偏低)。与 CMA-WSP v1.0 相比较, v2.0 提高了对风资源丰富地区的风速预报能力。

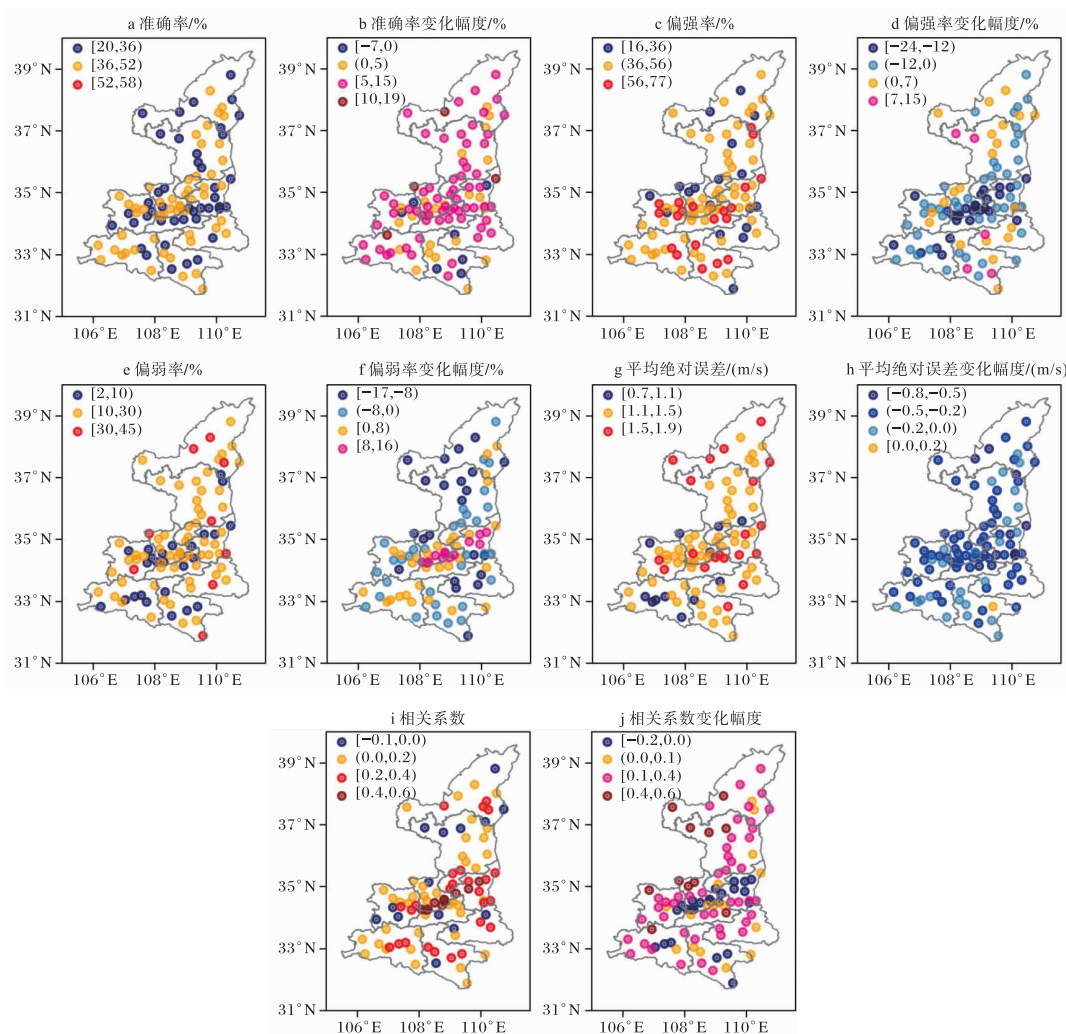


图2 2023-05-15—09-30 陕西 97 个国家气象站风速观测资料对 CMA-WSP 12~36 h 10 m 风速预报的逐站检验(a、c、e、g、i 为对 CMA-WSP v2.0 的检验;b、d、f、h、j 为 CMA-WSP v2.0 较 2022 年同时期 CMA-WSP v1.0 的预报质量变化)

2.1.3 逐 15 min 预报时效检验 从对 CMA-WSP 0~126 h 10 m 风速的逐 15 min 预报时效检验结果来看, CMA-WSP 对 10 m 风速的预报能力有显著的日变化特征(图 3a~图 3d), 准确率、偏弱率和相关系数(偏强率和平均绝对误差)在 20:00—次日 08:00 夜间时段低于(高于)在 08:00—20:00 白天时段, 而陕西地区的夜间平均风速小于白天^[13-14], 可见 CMA-WSP 风速预报在

实况风速偏小(大)时预报误差较大(小)、偏弱率较低(高)、偏强率较高(低), 与前面逐站检验结果一致。比较而言, CMA-WSP v2.0 提高了 v1.0 风速预报的准确率和相关系数, 减小了平均绝对误差(图 3e、图 3f)。准确率的提高(平均绝对误差的减小)在夜间时段主要与偏强率减小有关, 白天时段主要与偏弱率减小有关, 其中夜间时段的提高(减小)幅度更大, 这与 CMA-WSP v1.0 在

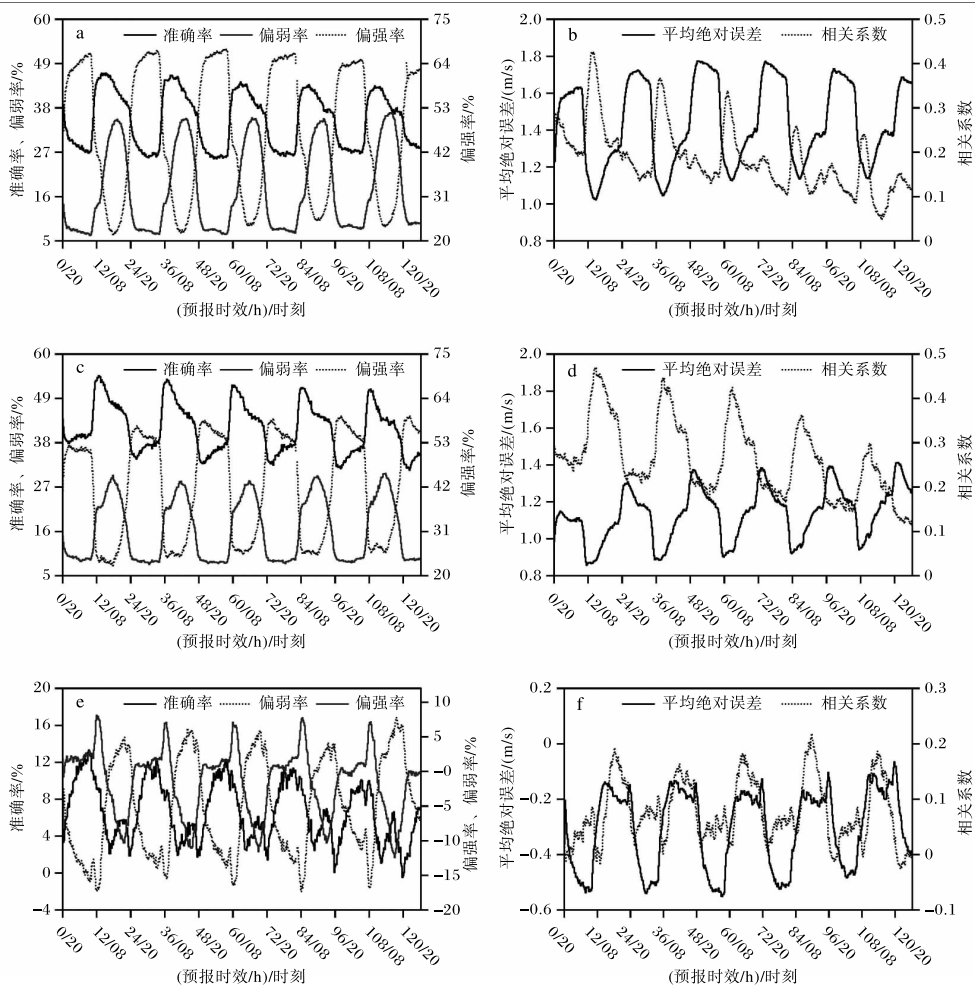


图3 陕西97个国家气象站风速观测资料对CMA-WSP v1.0(a;b)和v2.0(c;d)的0~126 h 10 m风速预报的逐15 min预报时效检验,及v2.0较v1.0的准确率、偏弱率、偏强率(e)和平均绝对误差、相关系数(f)变化幅度

夜间时段的准确率较低(平均绝对误差较大)有关,例如,准确率提高幅度(平均绝对误差减小幅度)的日极大值出现在05:00—06:00(02:00—06:00),与CMA-WSP v1.0的准确率极小值(平均绝对误差极大值)出现时段一致。与准确率和平均绝对误差不同,相关系数的增大幅度在白天时段更显著。另外相关系数的增大幅度在08:00左右明显偏低,甚至出现负值,这可能与该时刻偏强率虽然显著减小,但是偏弱率却显著增大有关,具体原因还有待从模式系统改进方面做深入分析。

从CMA-WSP v2.0 336 h预报时效的风速预报的检验(图4)结果来看,随着预报时效的延长,CMA-WSP v2.0风速预报值与观测值的偏

差越来越大,126 h前后,10 m高度风速预报准确率的日极大(小)值范围由50%~54%(33%~39%)降低到48%~51%(28%~33%),平均绝对误差的日极大(小)值范围由1.1~1.4 m/s(0.8~0.9 m/s)增大到1.4~1.6 m/s(0.9~1.0 m/s),相关系数的日极大值范围由0.30~0.47降低到0.15~0.30。

2.2 测风塔数据检验CMA-WSP风速预报

以陕北某一风电场的1台测风塔作为检验站点,对CMA-WSP风速预报进行检验。该风电场属于风资源丰富地区(例如,2022年5月15日—2023年6月30日,10 m和70 m日平均风速的极大值分别达到7 m/s和10 m/s),10 m风速预报的偏弱率较高,与前面97个气象站的检验结

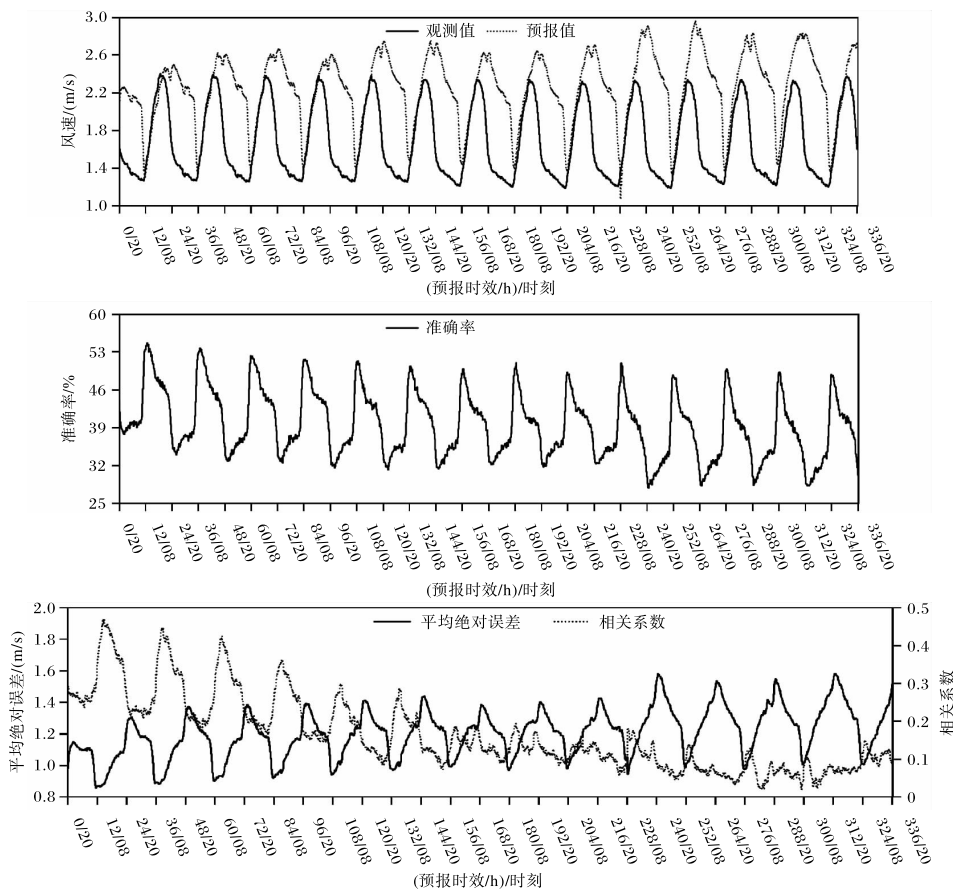


图4 2023-05-15—2023-09-30 陕西 97 个国家气象站风速观测资料对 CMA-WSP v2.0
0~366 h 10 m 风速预报的逐 15 min 预报时效检验

果吻合。从 CMA-WSP 12~36 h 70 m 和 10 m 风速预报在该风电场的逐日检验结果来看(70 m 风速检验结果见图 5, 10 m 风速检验结果图略), 风速预报曲线与观测曲线的逐日变化趋势较为一致, 相关系数分别达到 0.78 和 0.72, 均通过了 0.05 的显著性检验, 其中 70 m 风速预报值与观测值相关性更高, 可见本文利用风速随高度变化的指数方程, 将 CMA-WSP 100 m 高度附近的风速外推到 70 m 高度是合理的。CMA-WSP 70 m (10 m) 风速预报在该风电场的准确率、偏强率、偏弱率、平均绝对误差和相关系数依次为 7%~43%、8%~84%、3%~73%、1.4~6.0 m/s 和 -0.4~0.9(6%~51%、1%~56%、18%~87%、1.0~5.0 m/s 和 -0.4~0.8)。2023 年 5 月 15 日 CMA-WSP 升级之后风速预报误差陡然减小, 从 2023 年 5 月 15 日—6 月 30 日与 2022 年 5 月 15 日—6 月 30 日的检验结果对比来看, 70 m

(10 m) 风速预报的准确率和相关系数的平均值分别提高了 10% 和 0.2(9% 和 0.2), 平均绝对误差和偏强率分别减小了 0.9 m/s 和 17%(0.6 m/s 和 18%), 偏弱率增大了 7%(8%), 可见相关系数提高和偏强率减小对风速预报误差减小的贡献较大。

CMA-WSP 在该风电场的风速预报能力有明显的日变化特征(图 6)。对于 10 m 风速预报, 白天时段的平均绝对误差大于夜间时段, 其中白天的偏弱率较高可能是平均误差较大的原因, 但是夜间的偏弱率仍然较高, 相关系数明显小于白天(图略), 偏强率与白天相当, 难以解释夜间误差偏小的现象。可见, 影响 CMA-WSP 预报误差的因子比较复杂, 不能简单用预报的偏强率、偏弱率以及相关系数来解释, 有可能与模式本身的参数设置有关。与 10 m 风速不同, 70 m 风速预报在夜间时段的平均绝对误差大于白天时段, 这在 2023 年 5 月 15 日之前主要与偏强率的日变化特

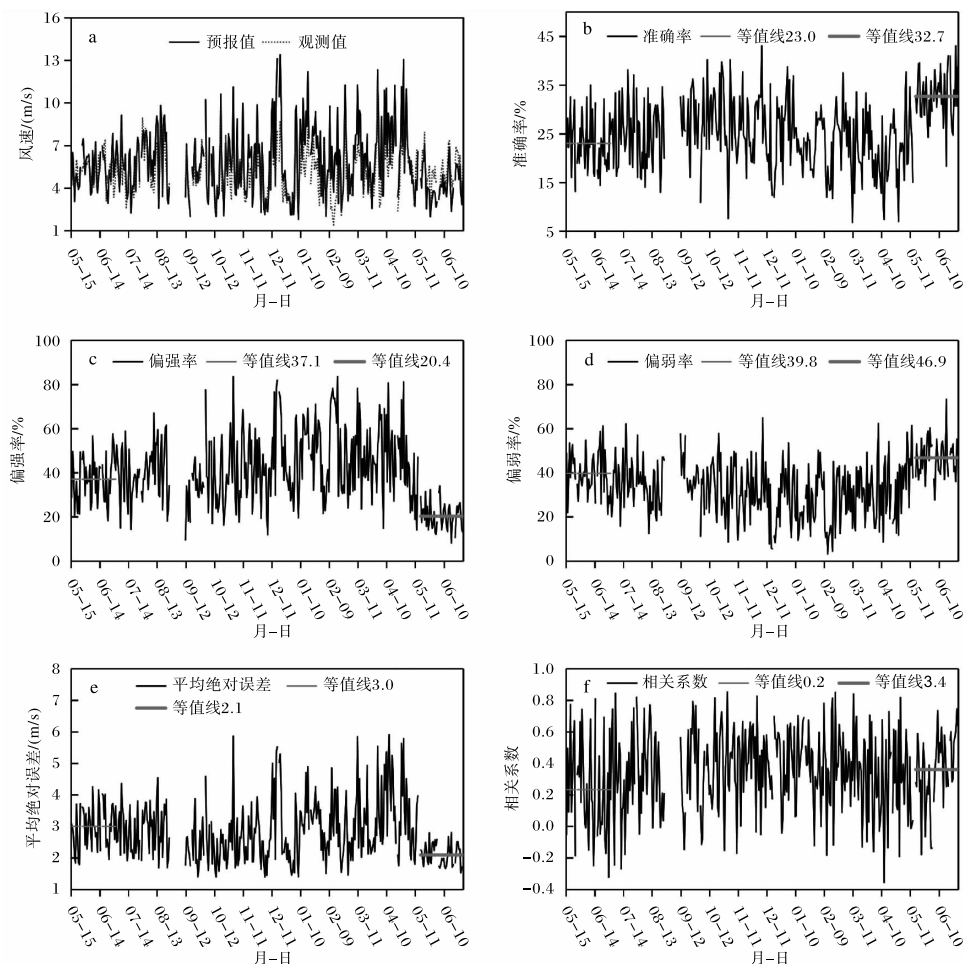


图5 2022-05-15—2023-06-30 测风塔观测数据对 CMA-WSP 12~36 h 70 m 风速预报的逐日检验

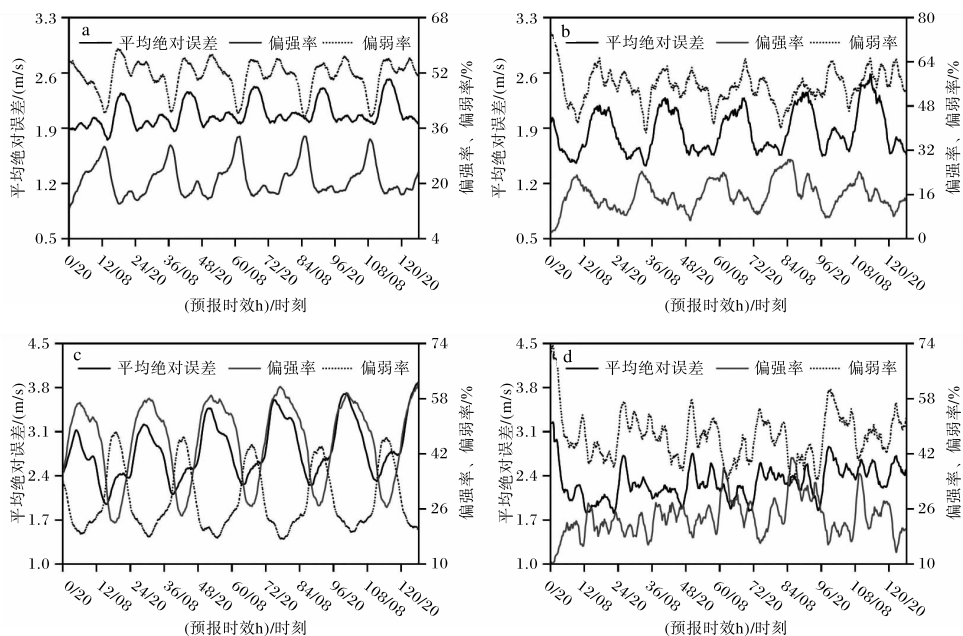


图6 2022-05-15—2023-05-14(a;c)和 2023-05-15—2023-06-30(b;d)测风塔数据对 CMA-WSP 10 m(a;b) 和 70 m(c;d)风速预报的检验

征有关,之后主要与偏弱率的日变化特征有关。

3 结论

本文利用陕西地区 97 个国家气象站和 1 个风电场测风塔代表站的风速观测资料,评估了 CMA-WSP 的精细化风速预报能力,以及 CMA-WSP 从 v1.0 升级为 v2.0 之后的预报性能提升情况,主要结论如下。

(1)CMA-WSP 在风资源丰富地区的风速预报能力优于风资源匮乏地区,陕西的大部分气象站,10 m 风速偏大(小)时,风速预报的偏弱率较高(低),偏强率较低(高),准确率偏高(低),这一特征在 CMA-WSP 升级为 v2.0 后更显著。另外,CMA-WSP 的风速预报能力有明显的日变化特征,97 个气象站在白天的风速预报准确率(平均绝对误差)高于夜间,这与实况风速在白天大于夜间有关。

(2)CMA-WSP v1.0 升级为 v2.0 之后预报能力显著提升。2023 年 5 月 15 日—9 月 30 日 CMA-WSP v2.0 与 2022 年同时期的 v1.0 相比较,陕西大部分气象站的预报准确率提高了 5% 以上(部分气象站超过 15%),平均绝对误差减小了 0.2 m/s 以上(部分气象站超过 0.5 m/s),相关系数增加了 0.1 以上(部分气象站超过 0.4),另外,夜间的准确率提高幅度和平均绝对误差减小幅度高于白天。

(3)通过风速随高度变化的指数方程将 CMA-WSP 100 m 高度附近的风速外推到 70 m 高度,得到的风速预报值与观测值的逐日变化曲线几乎重合,相关系数通过了 0.05 的显著性检验,CMA-WSP v1.0 升级为 v2.0 之后,2023 年 5 月 15 日—6 月 30 日的 70 m 高度风速预报准确率较 2022 年同期提高了 10%,平均绝对误差减小了 0.9 m/s。

参考文献:

- [1] 李俊峰. 风力发电在中国[M]. 北京:化学工业出版社,2005:1-11.
- [2] 张国伟,龚光彩,吴治. 风能利用的现状与展望[J]. 节能技术,2007(1):71-76.
- [3] 黄磊. 基于动态神经网络的风电场输出功率预测及其应用的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2011.
- [4] SFETSOS A. A novel approach for the forecasting of mean hourly windspeed time series[J]. Renewable Energy,2002,27(2):163-174.
- [5] 迟永宁,刘燕华,王伟胜,等. 风电接入对电力系统的影响[J]. 电网技术,2007,31(3):77-81.
- [6] 张鸿雁,丁裕国,刘敏,等. 湖北省风能资源分布的数值模拟[J]. 气象与环境科学,2008,31(2):35-38.
- [7] 张飞民. WRF-3DVAR 对近地层风速预报改进的数值试验[D]. 兰州:兰州大学,2014.
- [8] 何晓凤,周荣卫,孙逸涵. 3 个全球模式对近地层风场预报能力的对比检验[J]. 高原气象,2014,33(5):1315-1322.
- [9] 薛文博,余晖,汤胜茗,等. 上海快速更新同化数值预报系统(SMS-WARR)的近地面风速预报检验评估[J]. 气象,2020,46(12):1529-1542.
- [10] 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.
- [11] 张博,赵滨. 一种集成风向风速的风场空间检验方法[J]. 应用气象学报,2019,30(2):154-163.
- [12] 龙柯吉,师春香,韩帅,等. 中国区域高分辨率温度实况融合格点分析产品质量评估[J]. 高原山地气象研究,2019,39(3):67-74.
- [13] 陈小婷,李培荣,冯典,等. 陕西省风的时空分布及 ERA5 风资料检验评估[J]. 陕西气象,2023(3):23-30.
- [14] 王丹,杨艳超,党超琪,等. CLDAS 10 m 风产品在陕西的质量检验分析[J]. 陕西气象,2022(1):17-21.