暴雨灾害
Torrential Rain and Disasters
中国科技核心期刊
中国科技论文统计源期刊

偏差订正技术在冬奥会崇礼赛区复杂地形风速预报中的应用

陈浩 张南 杨珊珊 王玉虹 崔园园 杨晓亮

Application of deviation correction technology in wind speed forecasting of complex terrain in Chongli competition area of Winter Olympics

CHEN Hao，ZHANG Nan，YANG Shanshan，WANG Yuhong，CUI Yuanyuan，YANG Xiaoliang

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12406/byzh.2025-003

您可能感兴趣的其他文章 Articles you may be interested in

频率匹配技术在暴雨预报中的应用及改进分析

On the application and improvement of the frequency matching method to rainstorm forecasts

暴雨灾害. 2021, 40(4): 352-361 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2021.04.003

山西复杂地形下CMA-MESO 3km系统降水预报检验及订正

Assessment and correction of precipitation forecast with the CMA-MESO 3 km model under the complex terrain in Shanxi Province

暴雨灾害. 2023, 42(4): 384-394 https://doi.org/10.12406/byzh.2022-218

ECMWF模式强降水预报偏差订正方法研究及应用

Research and application of bias correction method for heavy rainfall forecast of ECMWF model

暴雨灾害. 2021, 40(4): 430-436 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2021.04.011

基于多模式预报的四川盆地强降水订正方法

Correction method of heavy rainfall in the Sichuan Basin based on multi-model forecasting

暴雨灾害. 2024, 43(1): 54-62 https://doi.org/10.12406/byzh.2023-008

改进最优集合预报方法对北京极端气温和风速预报的检验

Verification of improved analog ensemble methods for forecasting extreme temperature and wind speed in Beijing

暴雨灾害. 2022, 41(4): 467-476 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2022.04.011

基于地形订正技术的安徽冰雹灾害风险区划

Risk zoning of hail disaster in Anhui Province based on terrain correction technology

暴雨灾害. 2023, 42(5): 606-612 https://doi.org/10.12406/byzh.2023-021

关注微信公众号，获得更多资讯信息

陈浩,张南,杨珊珊,等.2025.偏差订正技术在冬奥会崇礼赛区复杂地形风速预报中的应用[J].暴雨灾害,44(4):543−553. CHEN Hao, ZHANG Nan, YANG Shanshan, et al. 2025. Application of deviation correction technology in wind speed forecasting of complex terrain in Chongli competition area of Winter Olympics [J]. Torrential Rain and Disasters,44(4):543−553 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2025−003

偏差订正技术在冬奥会崇礼赛区复杂地形风速预报中的应用

陈浩[1, 2, 3], 张南[3], 杨珊珊[4], 王玉虹[3], 崔园园[3], 杨晓亮[1, 2]

(1. 中国气象局雄安大气边界层重点开放实验室, 雄安新区 071800; 2. 河北省气象与生态环境重点实验室, 石家庄 050021; 3. 河北省气象台, 石家庄 050021; 4. 石家庄市气象局, 石家庄 050081)

摘　要: 为提高复杂地形下近地面风速预报效果, 首先利用 2022 年北京冬奥会张家口崇礼赛区 60 个国家和区域气象观测站风场观测资料, 针对 2021 年 9 月—2022 年 1 月, 获取 1—12 h 预报时效内风场背景场逐小时平均偏差。然后, 用逐小时平均偏差场, 采用统计偏差订正方法, 对河北省气象局 50 m 分辨率融合分析与临近预报系统 (INCA-50 系统) 背景场进行偏差订正, 并使用订正后的背景场得到风场预报结果。最后, 通过风场综合对比和个例检验验证偏差订正后精细化风场的预报效果。结果表明: (1) 偏差订正后风速相比 INCA-50 系统格点预报产品系统性偏差明显降低, 12 h 预报时效内风速绝对误差降低幅度最高达 36%, 站点平均绝对误差改善率达 30%。(2) 个例应用检验结果表明, 偏差订正方法可以有效弥补观测站点稀疏的不足, 偏差订正后可有效改善 INCA-50 系统风速预报结果偏大的问题, 预报风速与观测风速更接近。

关键词: 风速预报; 复杂地形; 偏差订正; 崇礼赛区

中图法分类号: P457.5　　**文献标志码**: A　　**DOI:** 10.12406/byzh.2025−003

Application of deviation correction technology in wind speed forecasting of complex terrain in Chongli competition area of Winter Olympics

CHEN Hao[1, 2, 3], ZHANG Nan[3], YANG Shanshan[4], WANG Yuhong[3], CUI Yuanyuan[3], YANG Xiaoliang[1, 2]

(1. *China Meteorological Administration Xiong'an Atmospheric Boundary Layer Key Laboratory*, *Xiong'an New Area* 071800; 2. *Key Laboratory of Meteorology and Ecological Environment of Hebei Province*, *Shijiazhuang* 050021; 3. *Hebei Meteorological Observation*, *Shijiazhuang* 050021; 4. *Shijiazhuang Meteorological Bureau*, *Shijiazhuang* 050081)

Abstract: To enhance the forecasting accuracy of near-surface wind speed under complex terrain conditions, this paper firstly utilizes wind field observation data from 60 national and regional meteorological observation stations in the Chongli Zone of Zhangjiakou for the 2022 Beijing Winter Olympics, to obtain the hourly average deviation of wind field background field within the forecast time limit of 1-12 h from September 2021 to January 2022. Then, using the statistical deviation correction method, the hourly average deviation field is used to correct the deviation of the Hebei Provincial Meteorological Bureau 50 m resolution fusion analysis and proximity forecasting system (INCA-50 system) background field, and obtain the wind field forecast results by using the corrected background field. Finally, the forecast effect of refined wind field after deviation correction is verified by comprehensive comparison of wind field and case test. The results are as follows. (1) Compared with INCA-50 grid forecast products, the systematic deviation of wind speed after deviation correction is obviously reduced, and the absolute error of wind speed is reduced by up to 36% within 12 h forecast time limit, and the improvement rate of average absolute error of stations is up to 30%. (2) The test results of an example show that, the deviation correction method can effectively make up for the shortage of sparse observation stations. After the deviation correction, the problem that the wind speed prediction result of INCA-50 system is too large can be effectively improved, and the predicted wind speed is closer to the observed

收稿日期: 2025−01−09; **定稿日期**: 2025−04−29

资助项目: 河北省气象局订单式项目 (21kyd02); “雄安大气边界层立体监测和精细化模拟”青年创新团队项目 (CMA2023QN14); 河北省青年科学基金项目 (D2024304006); 石家庄市科技局项目 (2412409303); 省级财政业务建设项目 (13000024P00846410102R)

第一作者: 陈浩, 主要从事数值模式研发及预报方法研究。E-mail: 18830663303@163.com

通信作者: 杨晓亮, 主要从事灾害性天气预报技术与方法研究。E-mail: hbsqxt087@sina.com

© Editorial Office of *Torrential Rain and Disasters*. OA under CC BY−NC−ND 4.0

wind speed.

Key words: wind speed forecast; complex terrain; bias correction; Chongli competition area

引言

近地面风既是民航起降、风能评估、户外体育赛事举办的关键影响因子 (秦宇焘, 2016; 李施颖等, 2020; 丁杰等, 2022; 刘郁珏等, 2022), 也是影响雾霾生消、气温变化、中小尺度天气系统演变的重要因子。目前, 数值预报模式存在的初始条件偏差及其自身不完备性, 使其无法捕捉到大气运动的小尺度特征 (Winstral et al., 2017; Chen et al., 2018)。随着我国经济社会快速发展, 传统风场预报已很难满足各行各业对气象服务的需求, 特别是复杂地形下风场精准预报一直是预报业务与服务中的难点, 也是气象领域研究的重点 (程雪玲等, 2015; 李艳等, 2015)。

解决复杂地形下风场精准预报中存在的问题, 偏差订正方法是一种较为有效的手段。因为通过偏差订正方法可以得到预报技巧更高的产品, 目前已有专家学者使用该技术开展了复杂地形下风场模拟研究, 涌现出较多研究成果 (周荣卫和何晓凤, 2018; 杨璐等, 2019; 李洪兵等, 2021)。另外, 得益于综合气象观测数据和多源资料融合分析网格实况产品的支撑, 基于融合风场的偏差订正技术应用随之逐步拓展。复杂地形条件下, 环流局地性强, 致使局地风场波动较大 (张珊等, 2023; 杨晓亮等, 2024), 而动力降尺度方法 (Lee and Lundquist, 2017) 因为能够获得更高分辨率的要素产品, 用其可更清晰地描述高度非均匀山区底层风场的瞬变性和波动性 (张飞民, 2014)。然而, 该方法对计算资源的要求较高 (Wagenbrenner et al., 2016; 刘郁珏等, 2019), 其很难达到精细化预报业务的需求。近年来, 随着偏差订正技术的逐步改进, 时空分辨率更高、质量更好的多源风场融合预报产品在国外不断被推出。已有研究表明, 高分辨率的融合预报是提高复杂地形下风场预报效果的有效途径之一 (Curry et al., 2012; Winstral et al., 2017)。国内, 也已有人尝试利用偏差订正技术解决观测站点稀疏问题 (于丽娟等, 2017; 张海鹏等, 2020), 为精细化预报服务提供技术支撑 (张玉涛等, 2020, 傅一笑等, 2023; 龙柯吉等, 2024)。目前, 基于精细化预报偏差订正的风场研究, 针对的主要是低海拔地区的低风速区域, 而针对山地大风预报的研究较少 (Huang et al., 2015), 且其研究多是针对站点所进行的偏差订正 (Kirchmeier et al., 2014), 存在明显的空间局限性 (Winstral et al., 2017)。因此, 目前迫切需要对基于整个模式格点的偏差订正方法展开可行性研究 (曾晓青等, 2019; 杨璐等, 2022)。

第 24 届冬季奥林匹克运动会 (以下简称冬奥会) 于 2022 年 2 月在中国北京成功举办。其中, 冬奥会张家口赛区位于内蒙古高原和华北平原过渡带, 属于坝上坝下过渡型山区, 山谷沟壑纵横, 地形复杂多样 (李嘉睿等, 2022; 姬雪帅等, 2023)。针对冬奥会张家口赛区对大风预报的服务需求, 冬奥会前河北省气象台将快速更新多尺度分析和预报集成子系统 (RMAPS-INCA) (解小寒等, 2018; 王玉虹和 Bica-Benedikt, 2022) 1 km 分辨率模式预报降尺度到更精细的网格点上, 并利用冬奥会赛区稠密的观测资料进行模式预报, 建立了 50 m 空间分辨率、10 min 时间分辨率的风场预报系统 (以下简称 INCA-50 系统)。INCA-50 系统提升了复杂地形下风场的预报效果, 但对近地面风速模拟仍存在较大系统性偏差 (刘郁珏等, 2019)。降低预报中的系统偏差能够有效提高并正确评估预报质量 (韩雨盟等, 2024), 消除系统偏差作为提升预报效果的有效手段 (Neilley and Hanson, 2004), 可以通过先消除背景场的系统偏差再将其作为 INCA-50 系统的背景场来提升预报效果。因此, 本文基于 50 m 空间分辨率的 INCA-50 系统, 首先, 利用冬奥会张家口崇礼赛区 60 个国家和区域气象观测站风场观测资料, 针对 2021 年 9 月—2022 年 1 月, 获取 1—12 h 预报时效内风场背景场逐小时平均偏差; 然后, 利用逐小时平均偏差场, 采用统计偏差订正方法, 对 INCA-50 系统背景场进行偏差订正, 再使用订正后的背景场得到风场预报结果; 最后, 通过风场综合对比检验、个例检验等分析, 验证偏差订正后精细化风场的预报效果, 以期提升复杂地形下近地面风速的预报能力。

1 研究区域及资料与方法

1.1 研究区域与资料来源

基于冬奥会的预报服务需求, 将研究区域设定为张家口市崇礼赛区 (图 1a 中红色框区域), 范围为 (115.382 6°—115.506 2°E、40.877 9°—40.970 7°N), 涵盖了冬奥会张家口云顶赛区 (图 1b 中黑色框区域) 和古杨树赛区 (图 1b 中红色框区域)。INCA-50 系统空间分辨率为 50 m, 时间分辨率为 10 min, 研究区域可划分为 207×209 的网格。

本文使用的资料包括: (1) 河北省气象局提供的 2021 年 9 月—2022 年 1 月 INCA-50 系统 10 m 风场

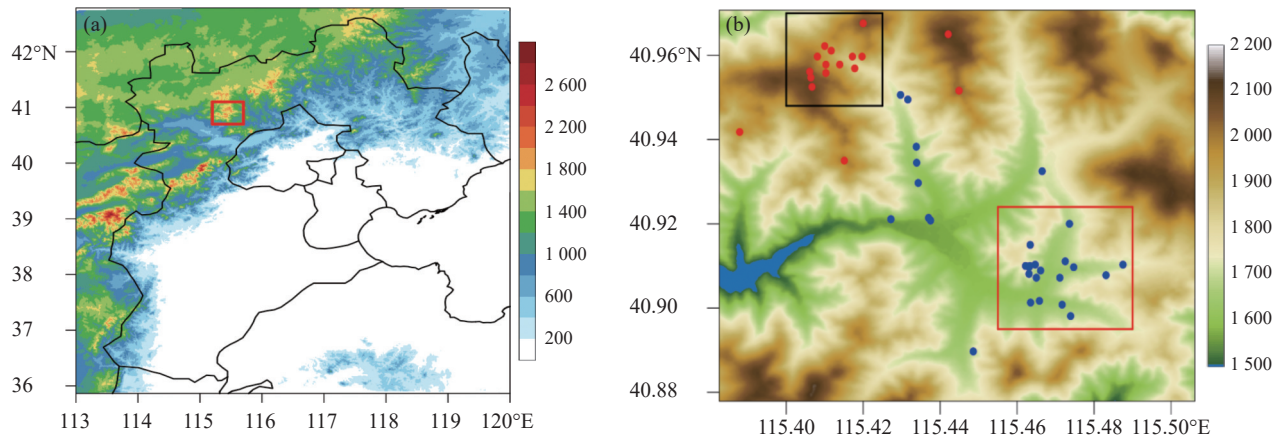


图 1 河北省及崇礼赛区研究区域 (红色框) 海拔高度 (填色, 单位: m) (a), 崇礼赛区内云顶赛区 (黑色框, 下同)、古杨树赛区 (红色框, 下同) 国家和区域站点 (彩色圆点; 红色和蓝色站点分别表示海拔高度大于等于和小于 1 800 m) 和海拔高度 (填色, 单位: m) (b) 分布

Fig. 1 (a) Altitude of Hebei Province (color-filled, unit: m) and Chongli competition area of the 2022 Beijing Winter Olympics (red box), (b) spatial distribution of national and regional meteorological observation stations (colored dots, red and blue stations represent altitudes≥and<1800 m) of Yunding competition area (black box, the same below) and Guyangshu competition area (red box, the same below), and altitude (color-filled, unit: m)

格点预报; (2) 河北省气象局及张家口市气象局联合布设在上述研究区域参与融合和用于格点偏差订正的 60 个国家和区域气象观测站 (以下简称为国家和区域站) (图 1b) 实时观测地面风速风向。需要说明的是, 上述 60 个国家和区域站除少数分布在高海拔的云顶赛区外, 其他均分布在赛场周边, 其海拔高度相对较低, 受地形影响较大。

1.2 研究方法

1.2.1 订正方案设计

INCA-50 系统风场临近预报是基于融合分析外推和模式预报的加权结果。0—6 h 临近预报的权重从 1 线性递减至 0, 超过 6 h 时效的预报为纯数值模式预报, 当预报时效 (t_a) 小于 6 h 时, 系统风场计算公式如下

$$V_{\mathrm{INCA}}(t_a) = gV_{\mathrm{ANA}}(t_0) + (1-g)V_{\mathrm{INCA-1km}}(t_a) \tag{1}$$

其中, $V_{\mathrm{INCA}}(t_a)$为预报时效为t_a时的风场预报值, a 为预报时间, 取值为 1~12 h; $V_{\mathrm{ANA}}(t_0)$为风场分析场值; $V_{\mathrm{INCA-1km}}(t_a)$为 t_a 预报时效 INCA-1 km 系统降尺度到 INCA-50 系统格点上的数值; g 为权重系数, 其计算公式如下

$$g(t_a) = \max\left(1 - \frac{t_a}{t_v}, 0\right) \tag{2}$$

其中, v 代表预报时间, 为 6 h; t_v 代表 6 h 时效时的模式预报权重。由式 (2) 可知, 当预报时效等于 3 h 时, 模式预报权重系数为 0.5, 其风场计算公式为

$$V_{\mathrm{INCA}}(t_3) = 0.5V_{\mathrm{ANA}}(t_0) + 0.5V_{\mathrm{INCA-1km}}(t_3) \tag{3}$$

当预报时效等于 6 h 时, 权重系数则增加为 1, 此时风场计算公式则为

$$V_{\mathrm{INCA}}(t_6) = V_{\mathrm{INCA-1km}}(t_6) \tag{4}$$

由此可见, 6—12 h 风场预报全部为 1 km 分辨率 INCA 系统降尺度到 INCA-50 系统的结果。可见基于地形降尺度及观测资料融合技术对风场预报能力的提升主要体现在 0—6 h 时效内, 对 6 h 之后风场预报性能无改进, 对近地面风速仍存在较大系统性偏差, 预报性能改进不足。然而, 降低预报中的系统偏差能有效提高并正确评估预报质量, 消除系统偏差是提升预报效果的有效手段。基于此, 采用预报偏差订正方法, 仍然可以降低系统偏差, 提升预报效果。

1.2.2 INCA-50 系统偏差订正方案

INCA-50 系统风场订正使用了实况风场降尺度方法及偏差订正方法, 系统偏差订正流程如图 2 所示, 其中 B3017 站为国家和区域站云顶山顶站。首先, 对 1 km 分辨率 INCA 系统进行降尺度, 利用该方法订正模式本身 1 km 分辨率的 10 m 风; 然后, 根据实况风场值进行格点背景场订正, 实现对背景场质量的改善; 其次, 利用反距离权重法对 50 m 分辨率的 10 m 风场进行插值, 得到 INCA-50 系统格点风速; 最后, 根据实况观测所在位置, 抽取对应位置背景场风速, 融合观测风场值改善背景场值。

偏差订正是改善风场预报效果的有效方法。获取不同预报时效下预报风速 (v_{f}) 与观测风速 (v_{o}) 的比值, 即为偏差订正系数 (c), 计算公式如下

$$c = \frac{v_{\mathrm{f}}}{v_{\mathrm{o}}} \tag{5}$$

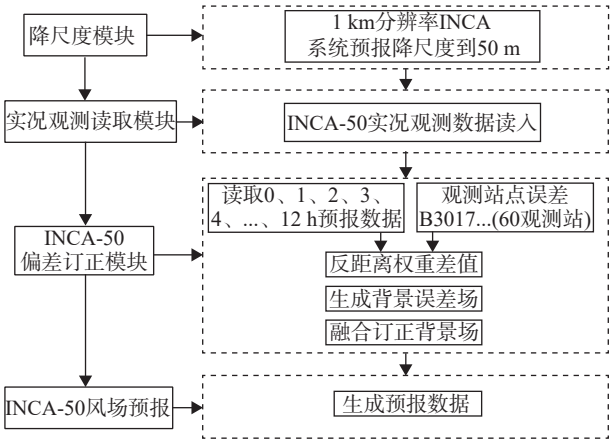


图 2 INCA-50 系统偏差订正方案流程图

Fig. 2 Flowchart of INCA-50 system deviation correction

利用反距离权重法，将 c 插值到 INCA-50 格点场上。每个观测站点k，都能从 INCA-50 格点场中找出一个最能反映格点数据与观测数据的差值 L_k，针对 INCA-50 每个格点，就水平距离在 5 km 以内最近的n个站点，将最近n个站点的差值进行加权融合，站点的距离越近，其权重越大，其差值的置信度越高。对于 INCA-50 单个格点(i, j)，它与第k个自动站的距离为r_{ijk}，则最终获取格点上偏差订正系数为 d，即

$$d = \frac{\sum_{k-1}^{n} \frac{L_k}{r_{ijk}^2}}{\sum_{k-1}^{n} \frac{1}{r_{ijk}^2}} \tag{6}$$

需要说明的是，崇礼赛区观测站点分布不均，不同海拔高度站点受复杂地形、热力等因素影响不同，只利用个别站点计算偏差系数对整个区域内预报准确率的提升有限，这就需要针对不同站点分别计算偏差订正系数。同时，INCA-50 系统预报时效为 12 h，随着预报时效延长，各站点风场预报偏差值逐渐增大。针对不同预报时效考虑偏差订正系数，更有利于改进偏差订正效果。因此，基于降尺度方法及偏差订正算法，针对区域内所有站点进行分预报时效的偏差订正，形成 INCA-50 系统偏差订正风场。订正风场计算公式如下

$$V_{\mathrm{INCA}}(t_i) = g d_i V_{\mathrm{ANA}}(t_0) + (1-g) d_i V_{\mathrm{INCA-1km}}(t_i) \tag{7}$$

基于此方案，利用 INCA-50 系统区域不同海拔高度上 60 个国家和区域站风场实况观测资料与 INCA-50 预报相结合，采用偏差订正方法，得到研究区 60 个站点 2021 年 9 月—2022 年 1 月每个站点 1—12 h 不同预报时效的偏差订正系数，表 1 展示了其中 5 个站点。将不同时效的偏差订正系数插值到格点后，得到偏差订正系数格点场。对降尺度后的风场，利用偏差订正系数进行优化，得到优化后的背景场，之后与实况观测进行融合订正，以此来提升复杂地形下风场预报能力。

2 结果与分析

利用 1.2.2 节中 INCA-50 系统偏差订正方案，回算 2021 年 9 月—2022 年 1 月的模式风场预报产品，获得 1—12 h 不同预报时效偏差订正系数，对比分析 2022 年 2 月冬奥会赛事期间 INCA-50 系统偏差订正前、后风速平均误差及风速平均绝对误差。在此基础上，针对不同海拔高度站点风速平均绝对误差和误差改善率进行分析，并应用 2022 年 2 月 13 日崇礼大风降温天气个例对风场进行分析检验。

2.1 各预报时效偏差订正系数

利用偏差订正方法，获取复杂地形下 INCA-50 系统预报的研究区域内 60 个国家和区域站 1—12 h 的风速与观测风速的偏差值，将各站点平均偏差系数通过距离反比插值方法，插值到格点场上，得到每个格点上的系统偏差订正系数。图 3 给出 INCA-50 系统崇礼赛区格点场 1、3、6、8、10、12 h 时效风速预报的偏差订正系数，可见随着预报时效延长，偏差订正系数逐渐增大。订正系数越大，表明风速值偏差比例越大。1 h 预报偏差订正系数在 0~1.5 之间，

表 1 2022 年北京冬奥会张家口崇礼赛区观测站点 1—12 h 不同预报时效偏差订正系数

Table 1 Correction coefficient for different forecast timeliness of 1-12 h at observation stations in Chongli, Zhangjiakou for the 2022 Beijing Winter Olympics

站名	1 h	2 h	3 h	4 h	5 h	6 h	7 h	8 h	9 h	10 h	11 h	12 h
云顶山顶站	0.46	0.63	0.96	1.23	1.52	2.11	2.59	3.01	3.21	3.57	3.80	3.91
云顶山腰站	0.21	0.44	0.63	0.87	1.02	1.45	1.82	2.03	2.26	2.46	2.61	2.88
太舞滑雪场	0.17	0.39	0.58	0.75	0.94	1.32	1.79	1.86	1.97	2.01	2.11	2.24
云顶1号站	0.38	0.52	0.72	0.89	1.06	1.38	1.80	2.13	2.32	2.54	2.71	2.83
云顶2号站	0.32	0.47	0.64	0.88	1.10	1.30	1.72	2.04	2.21	2.51	2.68	2.78

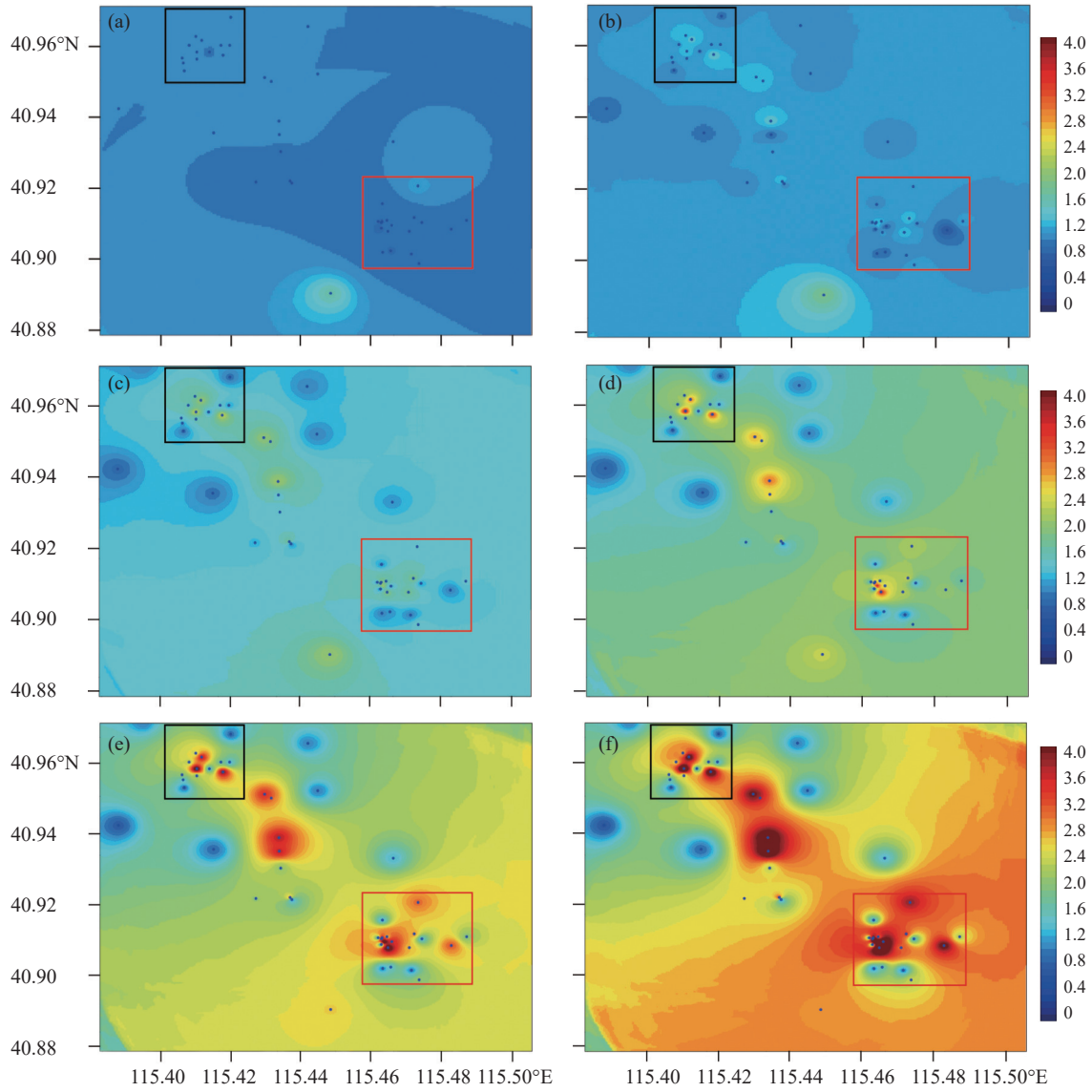


图 3 2022 年北京冬奥会期间 INCA-50 系统崇礼赛区格点场不同预报时效 1 h (a)、3 h (b)、6 h (c)、8 h (d)、10 h (e)、12 h (f) 风速预报的偏差订正系数 (填色) 和观测站点 (黑色圆点) 空间分布

Fig. 3 Deviation correction coefficient (color-filled) of wind speed forecast with different forecast timeliness in grid field at (a)1 h, (b) 3 h, (c) 6 h, (d) 8 h, (e) 10 h and (f) 12 h, and spatial distribution of observation stations in the INCA-50 system Chongli competition area during the 2022 Beijing Winter Olympics

大部分区域都在 1 以下 (图 3a), 3 h 预报时效时偏差订正系数有所增大, 且增大区域位于观测站点附近 (图 3b)。6 h 预报时效时偏差订正系数在 1.5~2.0 之间 (图 3c)。8 h 预报时效有些站点偏差订正系数已经达到 3.0 以上 (图 3d)。10 h 预报时效订正系数继续增长, 当预报时效达到 12 h 时, 偏差订正系数则主要在 2~4 范围内 (图 3e、f)。从偏差订正系数的空间分布看, 偏差系数大的区域集中在站点密集区域, 主要以云顶赛区和古杨树赛区为主。

2.2 站点误差及改善率

在 2022 年 2 月冬奥会赛事期间, 基于偏差订正方案, 计算得到 INCA-50 系统崇礼赛区 60 个国家和区域站 1—12 h 时效的风速预报产品, 同时计算得到风速平均误差、平均绝对误差等指标, 与未进行偏差订正的风场预报产品进行对比。图 4 给出 INCA-50 系统风场改进前、后崇礼赛区站点 1—12 h 时效预报风速的平均误差 (ME)、平均绝对误差 (MAE) 对比及其改善率 (RAI)。其中, RAI 是指原误差与订正后误差的差值 (即误差的降低值) 同原误差的比值, 其值大小反映了误差改进的程度。由图 4 可见, 未改进前 INCA-50 风速预报系统性误差较大, 1—6 h 误差随预报时效增加而增大, 6 h 以后预报误差稳定在 3.3 $m\cdot s^{-1}$ 左右。经偏差订正后, 1—6 h 误差逐渐增大至 2.0 $m\cdot s^{-1}$, 1 h 预报时效预报误差从

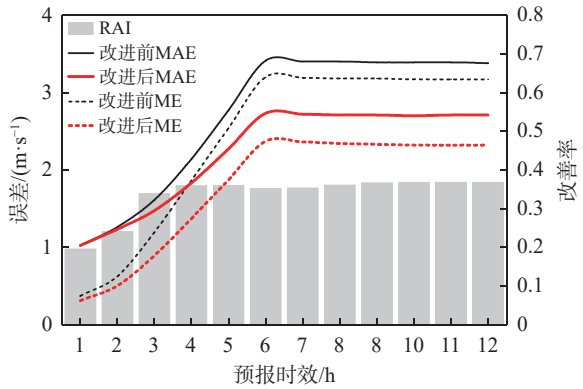


图 4 2022 年北京冬奥会期间 INCA-50 系统各站点 1—12 h 时效预报风速改进前、后平均误差 (ME)、平均绝对误差 (MAE) 和改善率 (RAI) 对比

Fig. 4 The ME, MAE and RAI for 1-12 h wind speed forecasts at individual INCA-50 stations before and after bias correction during the 2022 Beijing Winter Olympics

0.37 m·s^{-1} 降低至 0.31 m·s^{-1}, 3 h 预报时效预报误差从 1.19 m·s^{-1} 降低至 0.89 m·s^{-1}, 6 h 预报时效预报误差从 3.20 m·s^{-1} 降低至 2.37 m·s^{-1}, 6—12 h 稳定在 2.3 m·s^{-1}。预报时效内 ME 最高降低 38%, MAE 最高降低 36%, MAE 改善率在预报时效内从 20% 逐渐增加, 稳定维持在 35% 左右。可见, 对 INCA-50 系统预报风速进行偏差订正改进后, 不仅风速的系统性误差明显减小, 而且风速误差及绝对误差也有显著降低。

另外, 从 2022 年北京冬奥会期间偏差订正前、后 INCA-50 系统崇礼赛区各站点 1—12 h 时效预报风速的平均 ME 空间分布图 (图 5) 可见, 误差较大区域主要集中在云顶赛区附近 (黑色框) 及古杨树赛区 (红色框) 附近, 误差值在 0~4.0 m·s^{-1} 之间 (图 5a)。经偏差订正后 (图 5b) 可见, 上述冬奥会两个赛区所有站点 1—12 h 风速预报 ME 大幅降低, 云顶赛区各站点预报风速误差从 0~4.0 m·s^{-1} 下降至 0~2.5 m·s^{-1}, 古杨树赛区各站点预报风速误差从 2.5~4.0 m·s^{-1} 下降至 1.5~3.0 m·s^{-1}。

2.3 不同海拔高度站点误差及改善率

选取 2022 年北京冬奥会云顶赛区 3 个高海拔站点, 即云顶 1、3、7 号站 (海拔分别为 1 923.7 m、2 075.8 m、2 014.0 m), 以及古杨树赛区 3 个低海拔站点, 即云顶山腰站、太舞滑雪场站、冬季两项 3 号站 (海拔高度分别为 1 736.0 m、1 662.0 m、1 698.0 m), 对比偏差订正前、后 INCA-50 系统 1—12 h 时效各站点风速预报的 MAE 及其 RAI (图 6)。可见, 云顶 1、3、7 号站 (图 6a—c) 以及云顶山腰站 (图 6d)、冬季两项 3 号站 (图 6e) 经过偏差订正后, INCA-50 系统预报风速的 MAE 降低明显, 其 RAI 均超过 20%。其中, 云顶山腰站预报风速的 MAE 12 h 以内由 4.6 m·s^{-1} 降低为 3.0 m·s^{-1}, 云顶 1、3、7 号站, 冬季两项 3 号站 MAE 12 h 以内降为 2.8 m·s^{-1} 以下。太舞滑雪场站 (图 6f) 经过偏差订正后, MAE 变化不明显, 这可能与太舞滑雪场站周边在冬奥会前存在造雪行为导致形成局地小气候有关 (孔凡超和连志鸾, 2022)。站点误差检验表明, 除去太舞滑雪场站等个别站点, 偏差订正后不同海拔高度站点误差均有不同程度降低, 预报效果优于未进行偏差订正时, 站点预报与实况更吻合。

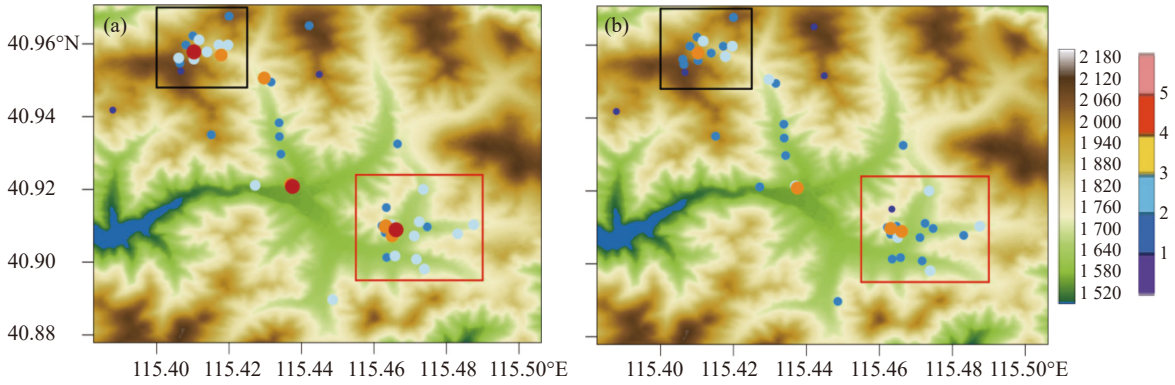


图 5 2022 年北京冬奥会期间偏差订正前 (a)、订正后 (b) INCA-50 系统各站点 1—12 h 时效预报风速的平均 ME (彩色圆点, 单位: m·s^{-1}; 误差越大, 圆点面积越大) 和海拔高度 (填色, 单位: m) 分布

Fig. 5 Spatial distribution of average ME (colored dots, unit: m·s^{-1}. The larger the deviation, the larger the dot) of 1-12 h time limited wind speed at each station of the INCA-50 system (a) before and (b) after deviation values, and altitude (color-filled, unit: m) during the 2022 Beijing Winter Olympics

2.4 个例应用检验

受冷空气影响, 2022 年 2 月 13 日张家口出现降雪及大风降温天气, 部分时段能见度仅 200 m 左右。由于当时天气恶劣, 原定 2 月 13 日上午举行的冬奥会自由式滑雪女子坡面障碍技巧资格赛被推迟。为验证上述偏差订正技术在大风天气的订正效果, 选

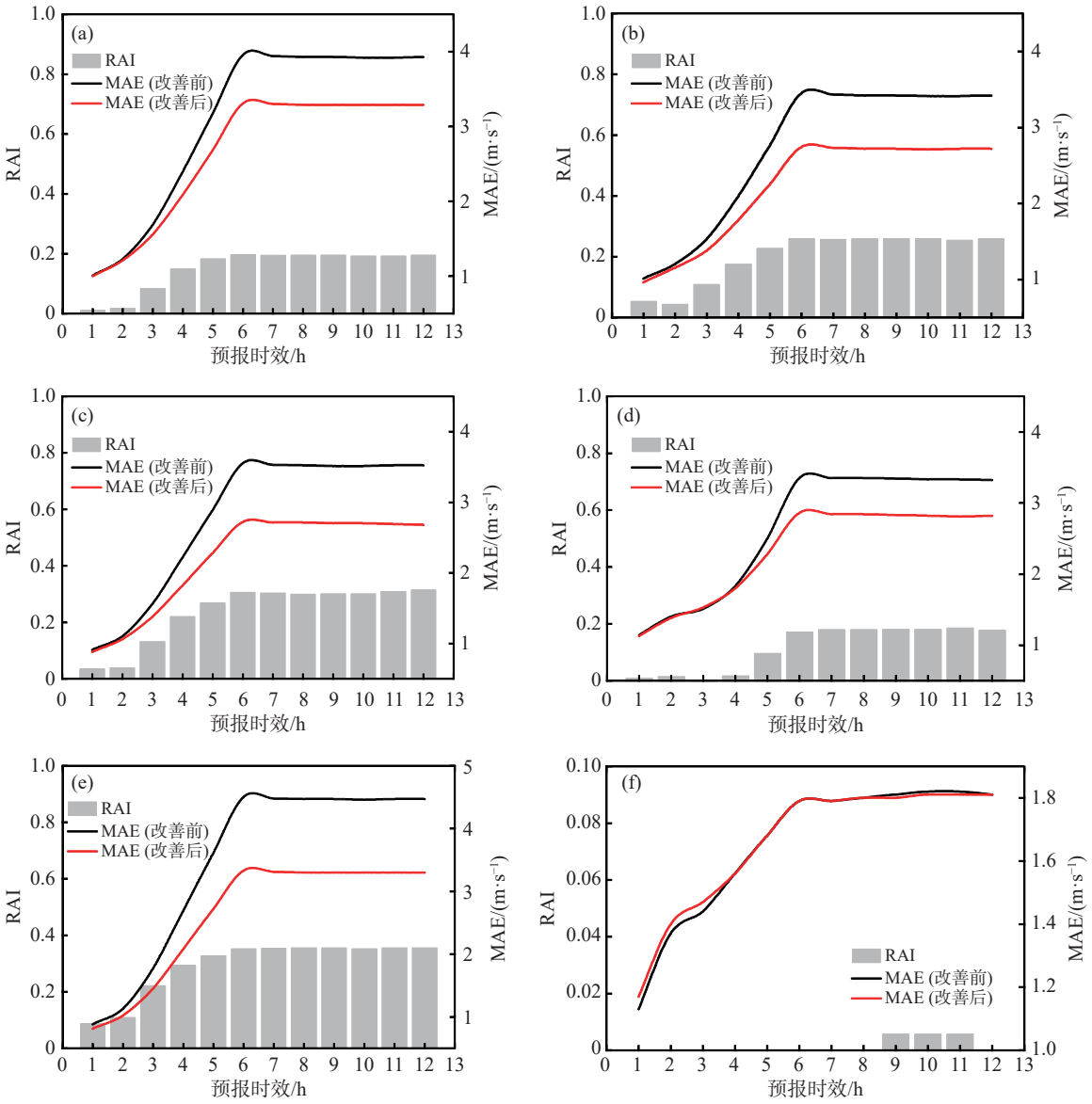


图 6 2022 年 2 月 INCA-50 系统云顶 1 (a)、3 (b)、7 (c) 号站以及云顶山腰站 (d)、冬季两项 3 号站 (e) 和太舞滑雪场站 (f) 1—12 h 时效风速预报的平均绝对误差 (MAE) 及其改善率 (RAI)

Fig. 6 The MAE and RAI of 1-12 h time limited wind speed forecasts for the INCA-50 system in February 2022 for (a) Yunding 1, (b) Yunding 3, (c) Yunding 7 stations, (d) Yunding mountainside station, (e) Biathlon 3 station and (f) Taiwu Ski Resort station

择 2 月 13 日的降雪降温大风过程对 INCA-50 系统崇礼赛区 60 个国家和区域站风场进行偏差订正试验。受当日大风天气影响, 13 日 10—14 时云顶山顶站平均风速为 7.2 m·s^{-1}, 最大风速达 9.0 m·s^{-1} (出现在 12 时前后)。因此, 选取 2 月 13 日 12 时预报检验 INCA-50 系统偏差订正方案的改进效果。

图 7 给出 2022 年 2 月 13 日 12 时崇礼赛区国家和区域站观测风场与 2 月 13 日 9 时起报的 3 h 及 6 h 预报偏差订正前、后 INCA-50 系统预报的 10 m 风场, 可见云顶山顶站实况风速 7.6 m·s^{-1}, 偏差订正前该站预报风速 9.3 m·s^{-1}, 订正后该站预报风速降为 7.2 m·s^{-1}。云顶山腰站实况风速 4.2 m·s^{-1}, 偏差订正前该站预报风速 7.1 m·s^{-1}, 订正后该站预报风速降为 4.6 m·s^{-1}, 与实况更吻合 (图 7a)。INCA-50 系统偏差订正后风速范围在 0.5~7.0 m·s^{-1} 之间, 偏差订正前崇礼赛区风速范围在 1.2~10.3 m·s^{-1}, 赛区风速明显降低 (图 7b—c)。3—6 h 预报时效预报误差逐渐增长, 且相同预报时效偏差订正后预报误差降低明显 (图 7b—e)。由此可见, 偏差订正技术对 INCA-50 系统风速预报效果的改善较为明显, 崇礼赛区整体风速有所降低, 与实况风场更为匹配。

为更加直观检验偏差订正的效果, 图 8 给出 2 月 13 日 12 时偏差订正前、后 INCA-50 系统云顶山顶站 (图 8a)、云顶山腰站 (图 8b)、云顶山底站 (图 8c)

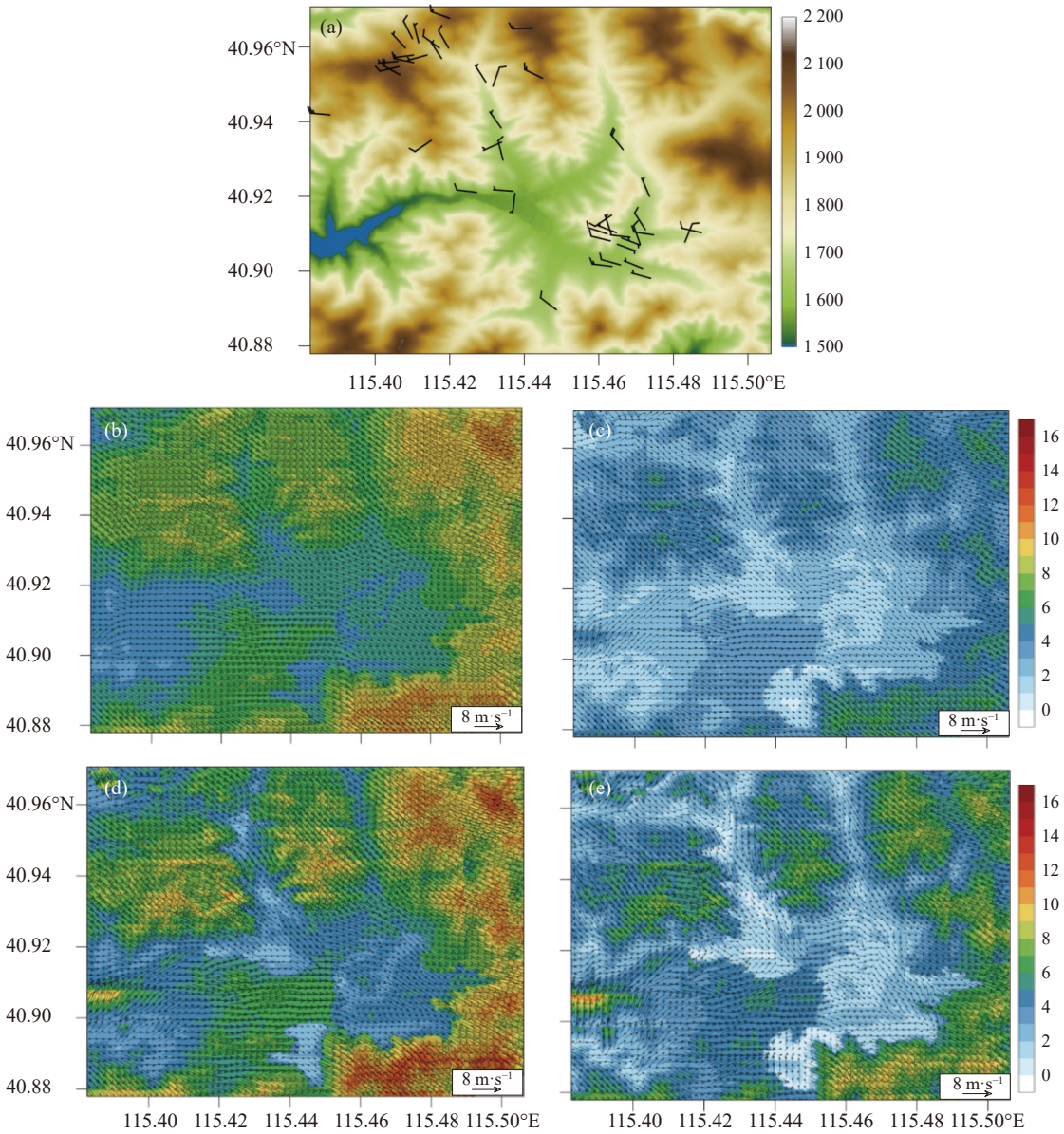


图 7 2022 年 2 月 13 日 12 时崇礼赛区实况观测风场 (风向杆) 和海拔高度 (填色, 单位: m) (a), 2 月 13 日 09 时起报的订正前 (b、d)、订正后 (c、e) 3 h、6 h 的 10 m 风场 (风向杆, 单位: m·s^{-1})

Fig. 7 (a) Live observation wind field (wind direction pole) at 12:00 BT on February 13, 2022 and altitude (color-filled, unit: m), 10 m forecast wind (wind direction pole, unit: m·s^{-1}) of 3 h and 6 h (b, d) before and (c, e) after correction reported at 9:00 BT on February 13 in Chongli competition area and altitude (color-filled, unit: m)

与跳台滑雪场山底站 (图 8d) 10 m 风速预报值以及各站点相应的风速观测值, 可见偏差订正前站点风速预报明显偏大, 云顶山腰站 6—12 h 预报风速达到 4.4~6.1 m·s^{-1}, 而对应时间段实况风速在 1.0~1.9 m·s^{-1} 范围内, 偏差订正后对应时间段预报风速在 1.2~2.1 m·s^{-1} 之间。未经偏差订正的风速预报总体呈偏大趋势, 经过偏差订正后的站点风场预报与实况更吻合。综上, 偏差订正技术有效降低了 INCA-50 系统预报风速的偏差, 其预报风速与实况风速更为吻合, 风速预报效果得到明显改善。

云顶山顶站是高海拔站, 大风发生概率较大, 对冬奥赛事赛程安排有较大影响, 所以针对该站五级以上大风, 对照中华人民共和国气象行业标准《风预报检验方法》(QX/T 229—2014) 进行风速预报评分检验, 表 2 给出云顶山顶站 2022 年 2 月不同预报时效下五级以上大风风速偏差订正前、后评分, 可见经风场统计偏差订正后, 该站五级以上大风预报评分, 1—8 h 时效预报相对偏差订正前预报评分都有很大提高, 1—5 h 时效风速预报评分均维持在 0.4 以上。而 9—12 h 时效预报评分相对偏差订正前基本持平, 10—11 h 时效风速预报评分略有降低。这主要是由于订正前 INCA-50 系统风场预报在时效超过 6 h 之

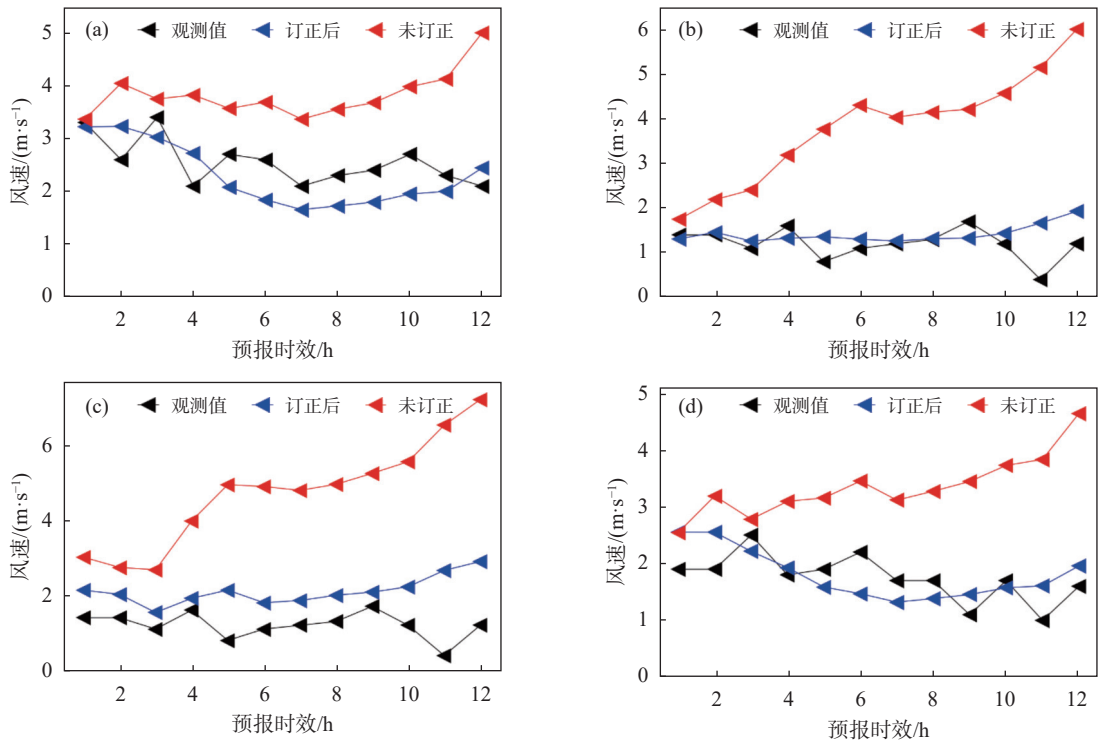


图 8 2022 年 2 月 13 日 12 时云顶山顶站 (a)、云顶山腰站 (b)、云顶山底站 (c)、跳台滑雪场山底站 (d) 偏差订正前、后不同预报时效 10 m 风速预报值及各站点相应的风速观测值

Fig. 8 Corresponding wind speed observations and wind speed forecast value with different forecast timeliness of 10 m at (a) Genting Shanding station, (b) Genting Mountain Side station, (c) Genting Mountain Bottom station and (d) Ski Jump Mountain bottom station before and after the deviation correction at 12:00 BT on February 13, 2022

表 2 2022 年 2 月偏差订正前、后 INCA-50 系统云顶山顶站不同预报时效下五级以上大风风速准确率评分

Table 2 Accuracy score of wind forecast above level 5 of INCA-50 system under different forecast timeliness for cloud top station before and after deviation correction in February 2022

预报时效/h	偏差订正前	偏差订正后
1	0.65	0.71
2	0.59	0.64
3	0.52	0.53
4	0.39	0.43
5	0.28	0.39
6	0.20	0.33
7	0.19	0.31
8	0.19	0.28
9	0.19	0.20
10	0.19	0.18
11	0.19	0.18
12	0.19	0.20

后其预报偏差较大, 导致 7—12 h 预报时效偏差订正值相对较高, 较高的偏差订正值导致该预报时间段内风速下降明显, 因此针对大风天气存在过订正情况, 这也导致 10—11 预报时效五级以上大风评分较偏差订正前有所降低。综上, 偏差订正技术对五级以上大风预报效果改进明显, 但随着预报时效延长, 改进效果减弱。

3 结论与讨论

本文利用 2022 年北京冬奥会张家口崇礼赛区 60 个国家和区域站风场观测资料与 INCA-50 系统 10 m 风场格点预报资料, 针对 2021 年 9 月—2022 年 1 月, 获取 60 站 12 h 预报时效内逐小时风速偏差; 然后, 利用偏差订正技术, 应用插值方法计算得到风场格点场偏差订正系数对系统背景场进行优化, 得到复杂地形下融合风场的偏差订正优化结果; 最后, 对其订正优化结果进行综合对比和个例应用检验。得到的主要结论如下:

(1) 偏差订正后, INCA-50 系统对风速预报系统性误差和预报误差大大降低, 预报时效内风速平均误差 (ME) 最高降低 38%, 平均绝对误差 (MAE) 最高降低 36%, MAE 改善率在预报时效内从 20% 逐渐增加, 稳定维持在 35% 左右。太舞滑雪场站改进前、后, MAE 变化不明显。云顶一号站、云顶山腰站、冬季两项 3 号站等 MAE 有明显降低; 偏差订正后, MAE 在 12 h 预报时效以内基本维持在 2.6 $m \cdot s^{-1}$ 以下。

(2) 2022 年 2 月 13 日大风个例分析表明，经过偏差订正后，高精度风场系统性偏差进一步降低。INCA-50 系统预报值与站点实况观测对比直观的反映出降尺度后未进行偏差订正预报风速相对偏大，而经过偏差订正后预报风速与实况更为吻合。偏差订正技术对大风预报效果改进明显，随着预报时效延长，改进效果减弱。

本方法综合考虑了观测实况融合与复杂地形下高精度风场偏差订正相结合的方法，针对不同站点，不同预报时效的偏差订正对预报结果改善有明显效果。复杂地形下高精度风场偏差订正方案对所在区域的自动站观测数据有较高的质量及时效要求，且只针对当前数值预报背景场的系统性偏差有效。采用不同预报模式或者更换不同的模式背景场，则需要重新计算，以获取不同预报时效偏差订正系数，并针对预报时效进行重新匹配。由于订正前 INCA-50 系统 6—12 h 风速预报较实况明显偏大，导致 6—12 h 偏差订正结果降低明显，经过偏差订正后 6—12 h 预报对大风速天气造成过订正，导致预报结果偏小。未来将针对大风天气过订正问题，进一步开展不同风力等级的格点偏差系数统计研究。

参考文献 (References):

程雪玲,胡非,曾庆存.2015.复杂地形风场的精细数值模拟[J].气候与环境研究,20(1):1−10. Cheng X L, Hu F, Zeng Q C. 2015. Refined numerical simulation of complex terrain flow field [J]. Climatic and Environmental Research,20(1):1−10 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006−9585.2014.13225

丁杰,吴国伟,陈家庆,等.2022.基于 CCMP 再分析风场资料的南海海洋风能资源评估研究[J].海洋技术学报,41(5):83−90. Ding J, Wu G W, Chen J Q, et al. 2022. Research on evaluation of ocean wind energy resources in the South China Sea based on CCMP reanalysis of wind field data [J]. Journal Of Ocean Technology,41(5):83−90 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1003−2029.2022.05.009

傅一笑,王雨,花家嘉,等.2023.基于 ECMWF 集合预报系统降水预报的空间后处理方法及其应用效果评估[J].暴雨灾害,42(3):324−333. Fu Y X, Wang Y, Hua J J, et al. 2023. A spatial postprocessing method based on rain clusters matching and application effect evaluation [J]. Torrential Rain and Disasters,42(3):324−333 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2022−262

韩雨盟,陈静,彭飞,等.2023.全球集合预报位温系统偏差和随机误差结合的模式倾向扰动方法[J].气象学报,81(4):592−604. Han Y M, Chen J, Peng F, et al. 2023. A model tendency perturbation method that combines systematic bias of potential temperature and random errors in global ensemble prediction [J]. Acta Meteorologica Sinica, 81(4):592−604 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb2023.20220203

姬雪帅,石文伯,郭宏,等.2023. 2019 年 6 月 17 日河北张家口线状对流中的龙卷环境场与雷达特征[J].沙漠与绿洲气象,17(1):77−82. Ji X S, Shi W B, Guo H, et al. 2023. Tornado environmental field and radar echo characteristics during linear convection in Zhangjiakou of Hebei Province on June 17, 2019 [J]. Desert and Oasis Meteorology, 17(1):77−82 (in Chinese). doi:10.12057/j.issn.1002−0799.2023.01.011

孔凡超,连志鸾.2022.崇礼云顶冬奥赛场夜间增温事件的统计特征及其形成机制研究[J].大气科学,46(1):191−205. Kong F C, Lian Z L. 2022. Statistical characteristics and formation mechanisms of night warming events at Yunding Winter Olympic Stadium in Chongli [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,46(1):191−205 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006−9895.2107.21057

李洪兵,邵爱梅,李兰倩.2021.基于谱逼近和地面资料同化的降尺度模拟研究[J].高原气象,40(4):919−931. Li H B, Shao A M, Li L Q. 2021. Dynamic downscaling simulation using spectral nudging and three-dimensional assimilation of surface observation [J]. Plateau Meteorology,40(4):919−931 (in Chinese). doi:10.7522/j.issn.1000−0534.2020.00068

李嘉睿,符娇兰,陶亦为,等.2022.冬奥会张家口赛区气温与风的特征分析[J].气象,48(2):149−161. Li J R, Fu J L, Tao Y W, et al. 2022. Temperature and wind characteristic analysis in Zhangjiakou Olympic Area for the Winter Olympic Games [J]. Meteorological Monthly,48(2):149−161 (in Chinese) doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2022.010301

李施颖,吴薇,黄晓龙.2020.四川省 CLDAS 和 ECMWF 再分析数据风速产品评估[J].高原山地气象研究,40(4):70−76. Li S Y, Wu w, Huang X L. Li S Y, Wu w, Huang X L. 2020. Wind speed evaluation of CLDAS and ERA5-Land in Sichuan [J]. Plateau and Mountain Meteorology Research,40(4):70−76 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1674−2184.2020.04.012

李艳,成培培,路乾雄,等.2015.典型复杂地形风能预报的精细化研究[J].高原气象,34(2):413−425. Li Y, Cheng P P, Lu Q X, et al. 2015. Wind power forecasting over the typical complex terrains [J]. Plateau Meteorology,34(2):413−425 (in Chinese) doi:10.7522/j.issn.1000−0534.2013.00181

龙柯吉,康岚,肖递祥,等.2024.基于多模式预报的四川盆地强降水订正方法[J].暴雨灾害,43(1):54−62. Long K J, Kan L, Xiao D X, et al. 2024. Correction method of heavy rainfall in the Sichuan Basin based on multi-model forecasting [J]. Torrential Rain and Disasters, 43(1):54−62 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2023−008

刘郁珏,黄倩倩,张涵斌,等.2022.基于大涡模拟的冬奥赛区风环境精细化评估[J].应用气象学报,33(2):129−141. Liu Y J, Huang Q Q, Zhang H B, et al. 2022. Refined assessment of wind environment over Winter Olympic competition zone based on large eddy simulation [J]. Journal of Applied Meteorological Science,33(2):129−141 (in Chinese). doi:10.11898/1001−7313.20220201

刘郁珏,苗世光,刘磊,等.2019.修正 WRF 次网格地形方案及其对风速模拟的影响[J].应用气象学报,30(1):70−81. Liu Y J, Miao S G, Liu L, et al. 2019. Effects of a modified sub-grid-scale terrain parameterization scheme on the simulation of low-layer wind over complex terrain [J]. Journal of Applied Meteorological Science,30(1):70−81 (in Chinese). doi:10.11898/1001−7313.20190107

秦宇焘.2016.基于 WRF 模式的低空风场及风切变数值模拟[D]. 天津:中国民航大学. Qin Y T. 2016. The numerical simulation bout low level wind field & wind shear with WRF [D]. Tianjin:Civil Aviation University of China (in Chinese)

王玉虹,Bica Benedict. 2022.不同天气背景下京津冀降水临近外推预报[J].

应用气象学报,33(3):270−281. Wang Y H, Bica B. 2022. Precipitation extrapolation nowcasting in Beijing-Tianjin-Hebei under different weather backgrounds [J]. Journal of Applied Meteorological Science, 33(3):270−281 (in Chinese). doi:10.11898/1001−7313.20220302

解小寒,王勇,郭倩.2018.具有复杂地形适应能力的 INCA 短临预报系统介绍[J].气象科技进展,8(3):70−76. Xie X H, Wang Y, Guo Q. 2018. Introduction to the INCA Nowcasting System with complex terrain adaptability [J]. Meteorological Science and Technology,8(3):70−76 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.2095−1973.2018.03.006

杨璐,陈敏,陈明轩,等.2019.高时空分辨率三维风场在强对流天气临近预报中的融合应用研究[J].气象学报,77(2):243−255. Yang L, Chen M, Chen M X, et al. 2019. Fusion of 3D high temporal and spatial resolution wind field and its application in nowcasting of severe convective weather [J]. Acta Meteorologica Sinica,77(2):243−255 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb2019.010

杨璐,宋林烨,荆浩,等.2022.复杂地形下高精度风场融合预报订正技术在冬奥会赛区风速预报中的应用研究[J].气象,48(2):162−176. Yang L, Song L Y, Jing H, et al. 2022. Fusion prediction and correction technique for high-resolution wind field in Winter Olympic Games area under complex terrain [J]. Meteorological Monthly,48(2):162−176 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2021.092902

杨晓亮,杨敏,金晓青,等.2024. “23.7”河北罕见特大暴雨过程降水演变与中尺度特征分析[J].暴雨灾害,43(1):1−12. Yang X L, Yang M, Jin X Q, et al. 2024. Analysis of precipitation evolution and mesoscale characteristics for a severe torrential rain event in Hebei from 29 July to 2 August 2023 [J]. Torrential Rain and Disasters,43(1):1−12 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2023−191

于丽娟,尹承美,林应超,等.2017.中国区域近地面风速动力降尺度研究[J].干旱气象,35(1):23−28. Yu L J, Yin C M, Lin Y C, et al. 2017. Study of dynamical downscaling on near surface wind speed over China [J]. Journal of Arid Meteorology,35(1):23−28 (in Chinese). doi:10.11755/j.issn.1006−7639(2017)−01−0023

曾晓青,薛峰,姚莉,等.2019.针对模式风场的格点预报订正方案对比[J].应用气象学报,30(l):49−60. Zeng X Q, Xue F, Yao L, et al. 2019. Comparative study of different error correction methods on model output wind field [J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology,30(l):49−60 (in Chinese). doi:10.11898/1001−7313.20190105

张飞民.2014. WRF-3DVAR 对近地层风速预报改进的数值试验[D]. 兰州:兰州大学. Zhang F M. 2014. The improvement experiments on near surface wind forecasting with WRF-3DAR [D]. Lanzhou: Lanzhou University (in Chinese)

张海鹏,智协飞,吉璐莹.2020.中国区域降水偏差订正的初步研究[J].气象科学,40(4):467−474. Zhang H P, Zhi X F, Ji L Y. 2020. A preliminary study on calibration in precipitation forecast over China [J]. Journal of the Meteorological Sciences,40(4):467−474 (in Chinese). doi:10.3969/2019jms.0022

张珊,王宗敏,黄刚,等.2023.基于 WRF-LES 的崇礼复杂地形局地风场模拟研究[J].高原气象,42(1):197−209. Zhang S, Wang Z M, Huang G, et al. 2023. Local wind simulation over complex terrain of Chongli using WRF-LES [J]. Plateau Meteorology,42(1):197−209 (in Chinese). doi:10.7522/j.issn.1000−0534.2022.00011

张玉涛,佟华,孙健.2020.一种偏差订正方法在平昌冬奥会气象预报的应用[J].应用气象学报,31(1):27−41. Zhang Y T, Tong H, Sun J. 2020. Application of a bias correction method to meteorological forecast for the Pyeongchang Winter Olympic Games [J]. Journal of applied meteorological science,31(1):27−41 (in Chinese). doi:10.11898/1001−7313.20200103

周荣卫,何晓凤.2018.新疆哈密复杂地形风场的数值模拟及特征分析[J].高原气象,37(5):1413−1427. Zhou R W, He X F. 2018. Numerical simulation and character analysis of wind field in complex terrain in Hami Xinjiang [J]. Plateau Meteorology,37(5):1413−1427 (in Chinese). doi:10.7522/j.issn.1000−0534.2018.00021

Curry C L, Derek V D K, Monahan A H. 2012. Statistical downscaling of historical monthly mean winds over a coastal region of complex terrain. I. Predicting wind speed [J]. Climate Dynamics,38(7-8):1281−1299. doi:10.1007/s00382−011−1173−3

Chen M X, Quan J N, Miao S G, et al. 2018. Enhanced weather research and forecasting in support of the Beijing 2022 Winter Olympic and Paralympic Games [R]. World Meteorological Organization Bulletin,67(2):58−61

Huang H Y, Capps S B, Huang S C, et al. 2015. Downscaling near-surface wind over complex terrain using a physically-based statistical modeling approach [J]. Climate Dynamics,44(1-2):529−542. doi:10.1007/s00382−014−2137−1

Lee J C Y, Lundquist J K. 2017. Observing and simulating wind-turbine wakes during the evening transition [J]. Boundary-Layer Meteorology, 164(3):449−474. doi:10.1007/s10546−017−0257−y

Kirchmeier M C, Lorenz D J, Vimont D J. 2014. Statistical downscaling of daily wind speed variations [J]. Journal of Applied Meteorology & Climatology,53(3):660−675. doi:10.1175/JAMC−D−13−0230.1

Neilley P P, Hanson K A. 2004. Are model output statistics still needed? [C]// 20th Conference on weather analysis and forecasting/16th conference on numerical weather prediction. Seattle: Numerical Weather Prediction

Winstral A, Jonas T, Helbig N. 2017. Statistical downscaling of gridded wind speed data using local topography [J]. Journal of Hydrometeorology,18(2):335−348. doi:10.1175/JHM−D−16−0054.1

Wagenbrenner N S, Forthofer J M, Lamb B K, et al. 2016. Downscaling surface wind predictions from numerical weather prediction 447 models in complex terrain with WindNinja [J]. Atmospheric Chemistry and Physics,16(8):5229−5241. doi:10.5194/acp−2015−761

(责任编辑　唐国瑛)