

模式地面风速诊断预报方案的优化与应用

张鑫宇¹ 范水勇¹ 窦有俊² 陈敏¹ 刘瑞金¹ 程志刚¹

¹ 北京城市气象研究院, 北京 100089

² 北京象元气象观测技术研究院, 北京 100081

摘要: 地面风速预报值通常由模式最低层风速诊断至 10 m 高度, 因此模式地形的精度对地面风速预报性能具有重要影响。本研究采用 90 m 分辨率的 SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) 数据构建高精度地形, 并结合近地层相似理论, 对数值模式中原有地面风速诊断预报方案进行优化。利用全国万余个参与中国气象局考核的自动站逐小时观测资料进行检验, 结果表明, 就 2023 年 7 月 20 日与 11 月 20 日 00 时 (世界时, 下同) 起报的 24 地面风速预报而言, 采用优化后的方案使得地面风速预报偏差分别降低 10.9% 和 10.0%, 均方根误差均下降近 1%。基于两个月的批量试验进一步表明, 2023 年 7 月和 11 月整月 24 小时的预报偏差分别降低 50.6% 和 50.0%, 优化后的诊断预报方案对模式地面风速预报性能具有稳定的改进效果。

关键词: 数值预报, 高精度地形, 近地层相似理论, 地面风速诊断预报

Optimization and application of model surface wind speed diagnosis and prediction scheme

Zhang Xinyu¹ Fan Shuyong¹ Dou Youjun² Chen Min¹ Liu Ruijin¹ Cheng Zhigang¹

¹ Institute Of Urban Meteorology, CMA, Beijing 100089

² Beijing Xiang yuan Academy of Meteorological Observation Technology, Beijing 100081

Abstract: The surface wind speed forecasts are typically diagnosed from the lowest model level to 10 m height, thus the accuracy of model terrain has a significant impact on the performance of surface wind speed forecasts. In this study, high-resolution terrain data from the Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) with 90 m resolution are used to construct a more accurate representation of terrain. Combined with near-surface similarity theory, the original surface wind speed diagnostic scheme in the numerical model is optimized. Using hourly observations from more than 10,000 automatic weather stations that participate in the assessment of the China

资助项目: 国家自然科学基金项目 (42405155)、中国气象局气象能力提升联合研究专项 (22NLTSQ009) 共同资助

第一作者: 张鑫宇, 主要从事资料同化和数值模拟研究。E-mail: xyzhang@ium.cn

Meteorological Administration, the 24 h surface wind speed forecasts initialized at 00 UTC on 20 July and 20 November 2023 (hereinafter universal time coordinated) are verified. The results show that, compared with the original scheme, the optimized scheme reduces the deviation of regional surface wind speed forecasts by 10.0% (on 20 July) and 10.9% (on 20 November), with a decrease in root mean square error as well. Furthermore, two-month continuous experiments indicate that the optimized scheme reduces the regional deviation of the 24 h surface wind speed forecasts by 50.0% and 50.6% for the entire months of July and November 2023, respectively, demonstrating a significant positive effect on the forecast performance of the numerical model.

Key words: numerical weather prediction, high-precision terrain, near- surface similarity theory, surface wind speed prediction

引言

数值天气预报是提升气象预报精准化与客观化的关键手段,可为气象保障服务提供有力支撑。在重大活动服务保障、公众出行安全和道路交通等领域,地面要素特别是 10 m 风的预报准确性尤为重要(陈超君等, 2012; 邱贵强, 2023)。地面风速预报通常基于数值天气预报模式诊断得到,然而受限于模式分辨率等方面,当前数值模式尚难以刻画大气微、小尺度湍流特征(Winstral et al, 2017)。此外,地面风速作为基于模式地形的诊断预报量,在复杂地形下常因模式地形与实际地形不匹配而产生显著偏差(Carvalho et al, 2012; 薛文博等, 2020)。格点化地理信息难以完全反映周边地形的影响,使得复杂地形区的地面风速预报精度成为区域数值模式发展的重要挑战(Mughal et al, 2017)。

中国气象局北京快速更新循环数值预报系统(CMA-BJ)为华北及全国的气象保障服务提供关键支撑(张鑫宇等, 2021),改善其地面风速预报性能,对提高服务效能具有重要意义。偏差订正方法是提高地面风速预报准确性的常用手段,包括高斯统计预报方法(Monahan, 2013)、回归订正方法(Rozas-Larraondo et al, 2014)、MOS (model output statistics) 预报法(林行等, 2008)、集合订正方法(胡海川等, 2017)和人工智能订正方法(孙全德等, 2019; 王在文等, 2019)等。然而,这类后处理技术高度依赖历史观测样本,难以应用于无观测区域,且对模式网格预报的连续性和稳定性要求较高。相较之下,以睿思系统(RISE, Rapid-refresh Infrastructure nowcasting System Evaluation)为代表的“百米级、分钟级”短时临近预报技术,通过引入复杂地形降尺度方法,有效提升了复杂地形区风场预报的精细化水平,其技术路径可为 CMA-BJ 模式的地面风速诊断优化提供有益参考(陈明轩等, 2025)。

为此,本文从 CMA-BJ 模式地面风速诊断预报方案本身入手,探索通过优化方案提升模式网格内风速预报性能的路径。目前 CMA-BJ 模式基于相似理论和模式最低层风速诊断地面 10 米风速,其预报效果受模式地形与真实地形之间差异的显著影响(智协飞等, 2019; 杨

璐等, 2022)。现有模式采用的地形数据为美国地质调查局 (USGS) 提供的 GTOP030 (分辨率约 900 米), 在复杂小尺度地形刻画方面存在不足 (曾雪兰等, 2008)。尽管模式地形需经平滑处理以匹配网格, 但采用高分辨率原始数据仍有助于提升平滑后地形的代表性 (李俊徽等, 2017)。基于上述分析, 本文拟从两方面对 CMA-BJ 模式的地面风速诊断方案进行优化: 首先, 引入高精度 SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) 地形数据, 使风速诊断所依赖的模式地形更接近实际观测地形, 以降低因地形不匹配引起的预报误差; 其次, 在此基础上对诊断方案中的大气稳定度参数项进行调整, 从而进一步提升模式地面风速的预报准确性。

1. 数据和方法

1.1 数值模式介绍及地面风速预报性能分析

本文基于 CMA-BJ 3.0 版本 (CMA-BJv3.0) 开展研究。CMA-BJv3.0 系统基于 WRF 模式, 采用单重区域设置, 水平分辨率为 3 km, 覆盖全国范围, 格点数为 1945×1498 , 垂直方向分为 61 层, 模式层顶气压为 10 hPa。采用 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 的欧洲中期天气预报中心 (ECMWF) 的全球模式预报场作为模驱动场。主要物理参数化方案包括: YSU 边界层方案 (Yonsei University scheme)、New Thompson 微物理方案、RRTMG 长波和短波辐射方案、New Tiedtke 积云方案、Noah 陆面过程方案。

基于 2023 年 7 月和 11 月每日 00 时 (世界时, 下同) 的 24 h 地面风速预报检验结果, 分析了地面风速预报偏差和均方根误差与测站—模式地形高度差 (绝对值) 之间的统计关系 (图 1)。结果表明, 无论是夏季还是冬季, 随着地形高度差的增加, 地面风速预报的偏差和均方根误差均增大。这表明, 地形高度差是影响模式地面风速预报的关键因素之一, 使用更准确的地形会提高地面风速预报性能。

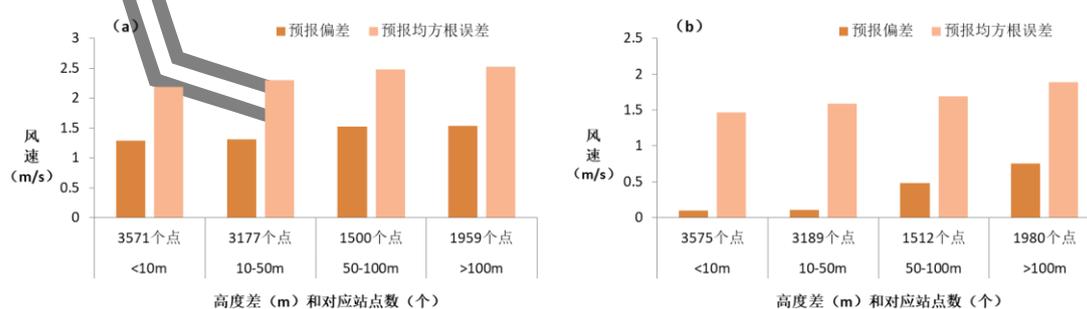


图 1 2023 年 (a) 7 月和 (b) 11 月 00 时 (世界时) 起报的 24 h 地面风速的偏差和均方根误差随测站与模式地形高度绝对偏差的变化

Fig.1 The variation of deviation and root mean square error of 24 h surface wind speed forecasts initialized daily at 00:00 UTC with absolute deviation between station height and model terrain

1.2 地形数据

大多数区域模式所采用的地形数据分辨率最高约为 900 m。近年来,随着遥感技术的发展,地形数据产品的分辨率也在不断提升,其中 SRTM 分辨率已经可以达到约 90 m。SRTM 通过对雷达影像数据进行处理,生成数字地形高程模型,其测量范围覆盖中国全境(汪凌,2000)。该数据产品自 2003 年起公开发布,后经多次修订。目前,可从网络免费获取覆盖中国境内的 90 m 分辨率 SRTM V4.1 修订版数据(赵国松等,2012),该版本采用改进的插值算法(Ling et al, 2007; Reuter et al, 2007),较好地填补了原始数据中的空洞区域。

目前 WRF 模式内置的地形数据有 ToPo10m、ToPo2m 和 ToPo30s(USGS, 1996),其中 ToPo30s 为 900 m 分辨率的全球地形数据,CMA-BJv3.0 采用 ToPo30s 作为默认地形数据(以下简称原有地形),通过预处理模块将其插值到模式网格区域,由于区域数值模式难以有效解析次网格地形,因此模式地形与实际地形之间存在偏差(Wehner et al, 2010)。我国地形呈现西高东低的阶梯状分布。基于全国 1 万余个中国气象局考核自动站(以下简称考核站)的高程信息,计算各站点所在位置的模式地形高度和实际地形高度(以测站高程代替)的差值(图 2b;本文所用地图根据审图号 GS(2017)3320 号地图制作,底图无修改)。统计表明,全国多数区域的模式地形高于实际地形,64.6%的站点所在位置的模式地形更高(即模式地形高度减去测站高度的差值为正)。其中,西南等地区的模式地形偏高尤为显著,而华北平原和东北地区的地形高度差相对较小;从差值分布来看,34.7%的站点所在位置的地形高度差值绝对值在 10 m 以内,80.7%的站点小于 100 m,但在实际地形起伏剧烈的区域,模式地形和实际地形仍存在严重不匹配的情况。

尽管 CMA-BJv3.0 系统目前采用的地形数据已是模式内置产品中的最高精度版本,但相较于 SRTM 数据,其在地形刻画能力上仍存在一定差距(陈俊勇,2005)。为此,本文利用 ENVI 遥感影像处理软件,对下载的 SRTM 数据进行拼接和几何校正,生成 tiff 格式的数字高程模型产品。在此基础上,依据 CMA-BJv3.0 系统的预报区域范围(包括经纬度范围和网格点设置),提取相应区域的 SRTM 数据,并通过插值方法将其采样为覆盖全国的 3 km 分辨率网格地形数据(以下简称高精度地形)。由图 2a 可见,在我国西南部地区,高精度地形能够更细致地反映实际地形的起伏变化。相较于原有地形数据,SRTM 数据由于具有更高的空间分辨率,对复杂地形的描述更为精准,因此在地形变化较为剧烈的区域,两者在地形高度值上呈现明显差异。通过与全国范围内 1 万余个考核站点的观测高度进行对比(图 2b、2c),结果显示高精度地形数据与实际观测值更为吻合,原有地形中偏差较大的区域(图 2b),其地形高度绝对偏差显著减小。

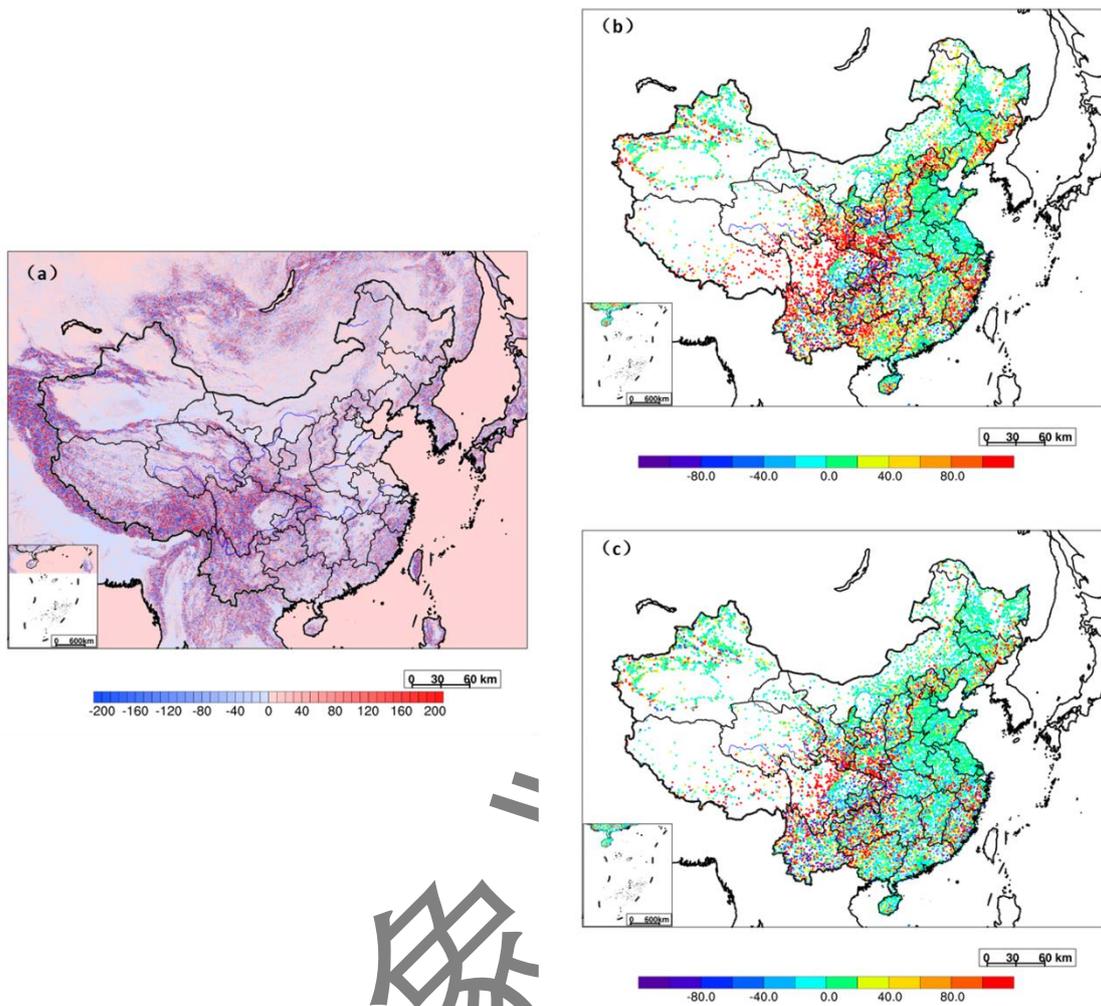


图2 CMA-BJv3.0 预报区域(a)高精度地形与原有地形高度差, (b)原有地形与实际地形高度差, 以及 (c)高精度地形与实际地形高度差

Fig. 2 The height (a) differences between the high-resolution topography and the original topography, the height (b) differences between original topography and the actual topography, the height (c) differences between high-resolution topography and the actual topography of CMA-BJv3.0 system

通过对全国 1 万余个考核站点观测高度与对应点两种地形数据高度的差值进行统计(图 3a), 结果表明, 原有地形高度与观测值偏差在 $[0, 100)$ 和 $[0, 10)$ 范围内的站点数占比分别为 80.7% 和 34.7%, 而采用高精度地形后, 对应偏差范围内的站点占比分别提升至 85.4% 和 40.9%。这表明高精度地形与实际观测高度之间的偏差更小。进一步分析各站点地形高度偏差的统计指标(图 3b), 原有地形高度的偏差、绝对偏差和均方根误差的平均值分别为 40.6、61.8 和 115.2 m, 高精度地形对应的三项指标分别降低为 21.8、49.5 和 102.0 m, 降幅分别达到 46.3%、19.9% 和 11.5%。鉴于地面风速预报是基于模式地形高度以上 10 m 处

的诊断量,采用更为准确的地形静态数据,有助于从源头上改善模式对地面风速的预报性能。上述指标一致表明,相较于原有地形,高精度地形在精度上明显提升。鉴于地面风速预报是基于模式地形以上 10 m 处的诊断预报量,采用更准确的地形静态数据有助于改善模式对地面风速的预报性能。

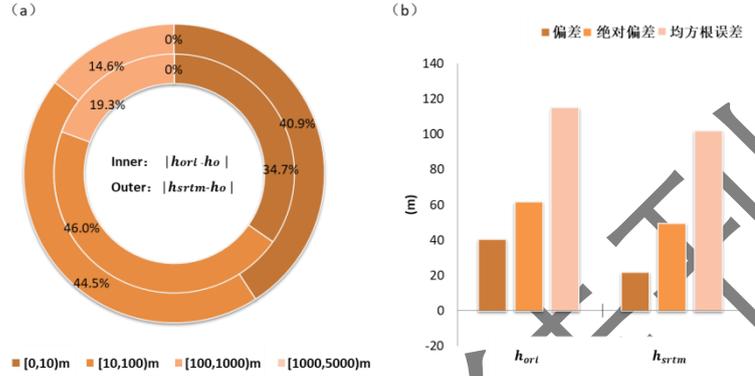


图 3 CMA-BJv3.0 原有地形高度 (h_{ori})、高精度地形高度 (h_{srtm}) 与观测高度 (h_o) 差值的 (a) 阈值分布以及 (b) 统计结果

Figure 3: Threshold distribution (a) and statistical results (b) of the difference between original terrain height (h_{ori}), high-precision terrain height (h_{srtm}) and observed height (h_o)

1.3 地面风速诊断预报方案优化

基于莫宁-奥布霍夫 (Monin-Obukhov, 简称 M-O) 相似理论, 近地层可视通常为常通量层, 风速垂直变化特征符合对数率变化。(苗曼倩等, 1997; Barthelmie, 2001)。

中性层结下, 地面以上高度 h_1 处的风速 U_1 可表示为:

$$U_1 = \frac{U_*}{k} \cdot \ln\left(\frac{h_1}{z_0}\right) \quad (1)$$

式中: k 为常数, z_0 为地面粗糙度长度, U_* 为地面摩擦速度。

非中性条件下需要考虑大气稳定度函数 $\Psi(\tau)$ 对风速垂直变化的影响:

$$U_1 = \frac{U_*}{k} \cdot \left(\ln\left(\frac{h_1}{z_0}\right) - \Psi\left(\frac{h_1}{L}\right) \right) \quad (2)$$

式中: Ψ 是 h_1/L 的函数关系式, L 为奥布霍夫长度可由数值模式计算得出, 由此可得不同高度风速比:

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{\ln\left(\frac{h_2}{z_0}\right) - \Psi\left(\frac{h_2}{L}\right)}{\ln\left(\frac{h_1}{z_0}\right) - \Psi\left(\frac{h_1}{L}\right)} \quad (3)$$

CMA-BJv3.0 系统中基于式 (3) 构建了地面风速诊断预报方案 (简称原始方案):

$$U_{m,10} = U_m \cdot \frac{\ln\left(\frac{10+z_0}{z_0}\right) - \psi\left(\frac{10+z_0}{L}\right) + \psi\left(\frac{z_0}{L}\right)}{\ln\left(\frac{h_m+z_0}{z_0}\right) - \psi\left(\frac{h_m+z_0}{L}\right) + \psi\left(\frac{z_0}{L}\right)} \quad (4)$$

式中: $U_{m,10}$ 和 U_m 分别表示模式地面风速预报值和模式最低层 (高度 h_m) 风速预报值。 $\Psi(\tau)$ 形式如下: :

大气处于不稳定状态时 ($\tau < 0$):

$$\begin{cases} \Psi(\tau) = 2 \ln\left(\frac{1+x}{2}\right) + \ln\left(\frac{1+x^2}{2}\right) - 2\arctan(x) + \frac{\pi}{2} \\ x = (1-16\tau)^{1/4} \end{cases} \quad (5)$$

大气处于稳定状态时 ($\tau \geq 0$):

$$\Psi(\tau) = -6.1 \ln(\tau + \tau(1 + \tau^{2.5})^{0.4}) \quad (6)$$

地面风速预报值是位于模式地形以上 10 m 处的预报值, 而模式地形高度与实际地形高度不匹配是影响地面风速预报性能的主因 (张铁军等, 2018), 为此, 引入高精度地形 (如 SRTM) 对原始方案进行优化, 设地形高度差 $h_{diff} = |h_{srtm} - h_{ori}|$ 。考虑 M-O 相似理论的适用高度范围 (张鑫宇等, 2023), 对 h_{diff} 进行约束:

$$h_{diff} = \begin{cases} \min(h_{diff}, 0.1 \cdot h_{pbl}) & \tau < 0 \\ \min(h_{diff}, h_{pbl}) & \tau \geq 0 \end{cases} \quad (7)$$

其中 h_{pbl} 值为边界层高度, 由模式提供。

根据高精度地形相对原始地形的高低, 分别调整诊断高度, 得到优化后的 10 m 风速诊

$$\text{断公式: } \begin{cases} U_{srtm,10} = U_m \cdot \frac{\ln\left(\frac{h_{diff}+10+z_0}{z_0}\right) - \psi\left(\frac{h_{diff}+10+z_0}{L}\right) + \psi\left(\frac{z_0}{L}\right)}{\ln\left(\frac{h_m+z_0}{z_0}\right) - \psi\left(\frac{h_m+z_0}{L}\right) + \psi\left(\frac{z_0}{L}\right)} & h_{srtm} \geq h_{ori} \\ U_{srtm,10} = U_m \cdot \frac{\ln\left(\frac{10+z_0}{z_0}\right) - \psi\left(\frac{10+z_0}{L}\right) + \psi\left(\frac{z_0}{L}\right)}{\ln\left(\frac{h_{diff}+h_m+z_0}{z_0}\right) - \psi\left(\frac{h_{diff}+h_m+z_0}{L}\right) + \psi\left(\frac{z_0}{L}\right)} & h_{srtm} < h_{ori} \end{cases} \quad (8)$$

上式即为优化后的地面风速诊断预报方案 (简称优化方案), 通过引入高精度地形修正, 可有效改善模式地形与实际地形的偏差对风速预报的影响。

2. 试验方案和效果评估

2.1 试验方案设置

为评估优化后的地面风速诊断预报方案，基于 CMA-BJv3.0 系统设计两组对比试验（表 1）。两组试验采用相同的模式配置，唯一区别在于地面风速诊断预报方案：控制试验（EXPR_ORIG）基于原始地形采用原始方案直接输出地面风速预报；敏感性试验（EXPR_SRTM）则采用高精度地形优化方案重新诊断计算。选取夏季（7 月 20 日）和秋季各一天（11 月 20 日）作为个例，起报时间为 00 时，分析 1~24 h 预报结果，以检验优化方案对地面风速预报的改进效果（图 4）。

表 1 2023 年 CMA-BJv3.0 试验设计
Table 1 Numerical experiments design for 2023

试验序号	试验类型	试验名称	地面风速预报方案	预报时效	诊断预报量
1	控制试验	EXPR_ORIG	原始方案	24 h	$U_{m,10}$
2	敏感性试验	EXPR_SRTM	优化方案	24 h	$U_{srtm,10}$

2.2 空间分布

基于全国 1 万余个考核站观测进行检验（图 4）表明，无论是 2023 年 11 月 20 日（秋季）还是 7 月 20 日（夏季），白天（06 时）除内蒙、东北和西藏存在大风区域外，全国大部分地区的地面风速较小，基本低于 $2.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，使用原始方案（EXPR_ORIG）的 6 h 地面风速预报在内蒙古东部等地表现为负偏差，而全国大部分地区则呈现明显的正偏差，其中夏季的地面风速预报正偏差尤为突出（图 4c, 4d）。采用优化方案（EXPR_SRTM）后，大部分地区的预报正偏差得到显著降低，就整个模式区域而言，EXPR_SRTM 白天的预报效果明显更优。就模式区域平均而言，使用优化方案后，7 月 20 日 06 时（白天）的地面风速预报偏差由 $1.13 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 降至 $0.96 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，11 月 20 日 06 时（白天）则由 $0.60 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 降至 $0.51 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，这表明，使用优化方案能有效提升模式区域白天地面风速的预报精度。

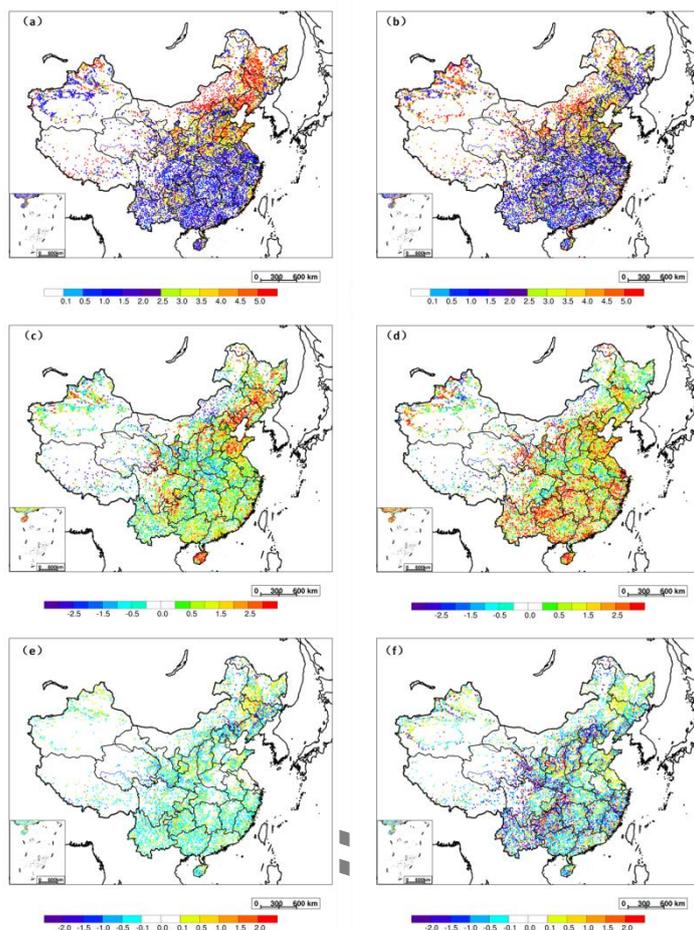


图4 2023年(a, c, e)11月20日和(b, d, f)7月20日06时的(a, b)观测风速, (c~f)00时起报的(c, d)EXPR_ORIG的6 h地面风速预报偏差, 以及(e, f)EXPR_SRTM和EXPR_ORIG的6 h地面风速预报差值
 Fig.4 06UTC (a, b)observations, (c, d)6h-forecast deviations from EXPR_ORIG, (e, f)6h-forecast deviations from EXPR_SRTM to EXPR_ORIG on(a, c, e) November 20 and (a, c, e)July 20 for 2023

夜间(18时)全国大部分地区的地面风速均低于 $1.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (图5), EXPR_ORIG的预报在全国大部分地区呈正偏差, 而 EXPR_SRTM的预报偏差在多数区域与 EXPR_ORIG正负相反, 有效减小地面风速预报正偏差。11月20日18时和7月20日18时地面风速观测平均值为 $1.56 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $1.38 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, EXPR_ORIG对应的18 h预报偏差平均值分别为 $1.35 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $1.32 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 而 EXPR_SRTM则降至 $1.19 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $1.17 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 表明使用优化方案同样能有效提升模式区域夜间地面风速的预报准确性。

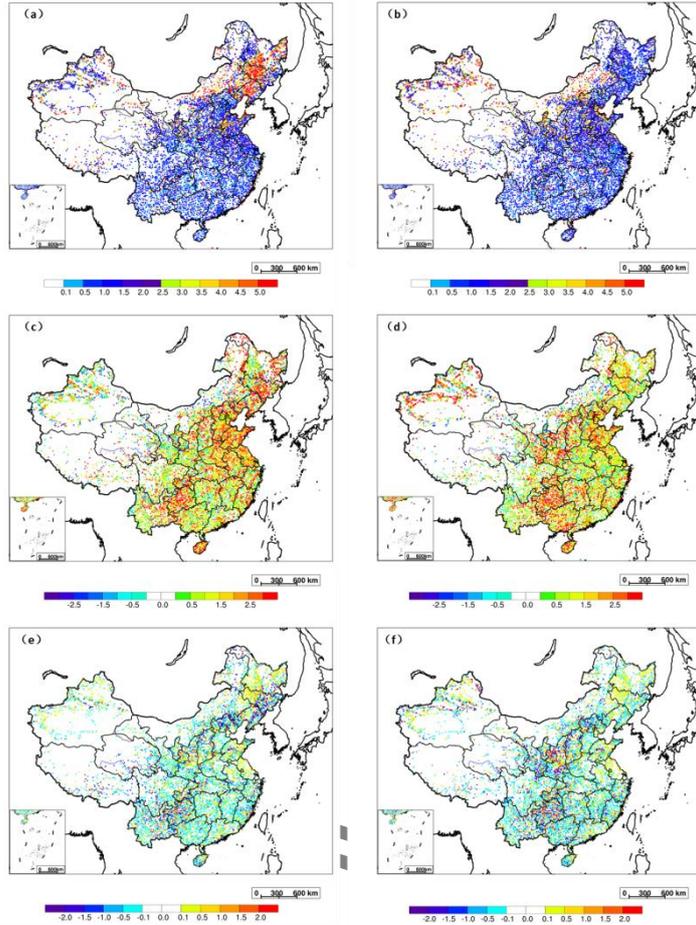


图5 2023年(a, c, e)11月20日和(b, d, f)7月20日18时的(a, b)观测风速, (c~f)00时起报的(c, d)EXPR_ORIG的18 h地面风速预报偏差, (e, f)EXPR_SRTM和EXPR_ORIG的18 h地面风速预报差值
 Fig. 5 18UTC (a, b) observations, (c, d) 18h-forecast deviations from EXPR_ORIG, (e, f) 18h-forecast deviations from EXPR_SRTM to EXPR_ORIG on (a, c, e) November 20 and (a, c, e) July 20

2.3 时间序列

对比分析11月20日和7月20日00时起报的24 h地面风速预报结果(图6), 控制试验(EXPR_ORIG)在两个季节的预报效果统计(偏差、绝对偏差、均方根误差)较为接近, 表明CMA-BJv3.0系统具有稳定的预报性能: 11月20日的24 h预报偏差为 $1.10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 绝对偏差和均方根误差分别为 $1.57 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $2.01 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; 7月20日对应指标分别为 $1.22 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $1.65 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $2.11 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。采用优化方案后, EXPR_SRTM的预报准确性明显提升, 各项误差指标均有所下降。11月20日个例中, EXPR_SRTM的24 h预报偏差降至 $1.00 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 较控制试验降幅近10.0%, 逐小时预报偏差最大降幅为18.6%, 最小降幅亦超过8%; 绝对偏差和均方根误差平均降幅分别为3.4%和1.0%。7月20日个例中, EXPR_SRTM的预报偏差、绝对偏差和均方根误差值分别降至1.09、1.60和 $2.10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 相对降幅分别为10.9%、

2.9%和 0.3%。综合检验结果，优化方案可有效改善地面风速预报，其准确性和有效性得到验证。

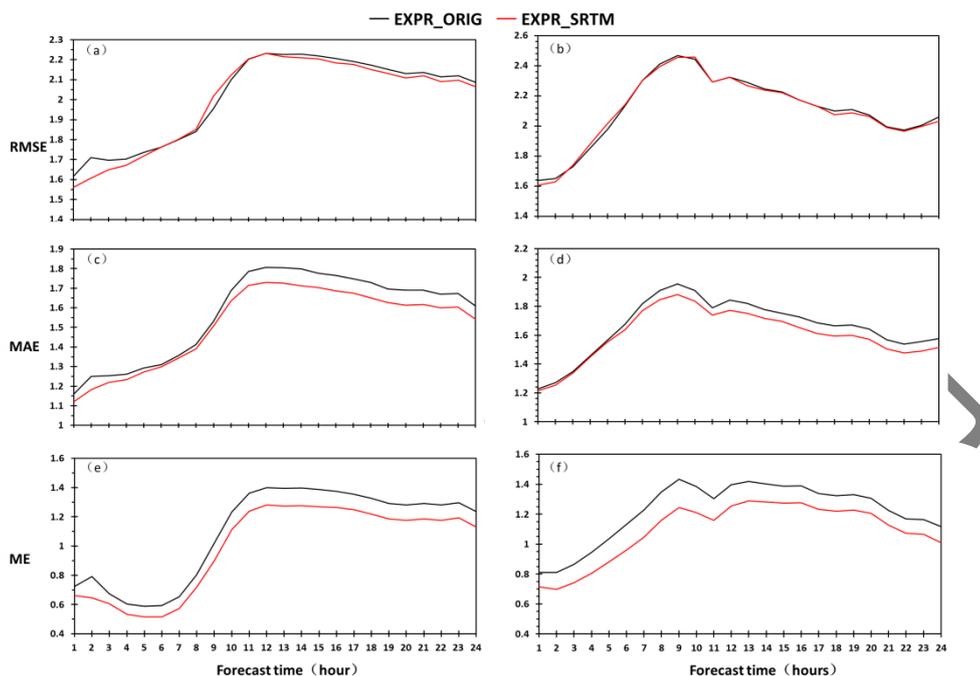


图 6 2023 年(a, c, e)11 月 20 日和(b, d, f)7 月 20 日 00 时 CMA-BJv3.0 不同试验起报的 1~24 h 地面风速的 (a, b) 均方根误差、(c, d) 绝对偏差和(e, f) 偏差

Fig.6 The surface wind speed forecast (a, b) root mean square errors, (c, d) absolute deviations and (e, f) deviations starting from 00UTC on (a, c, e) November 20 and (b, d, f) July 20 for 2023

2.4 地形的影响

应用优化方案后，模式全区地面风速预报偏差和均方根误差明显降低。基于高精度地形与站点观测高度（代表站点位置的**实际地形**）的差异进行统计分析（图 7），按地形高度差分类， $[-\infty, -100)$ 表示高精度地形低于实际地形 100 m 以上； $[-100, -10)$ 表示高精度地形低于实际地形 10~100 m，以此类推。统计表明，高精度地形低于实际地形的站点超过 4700 个，高于实际地形的站点为 5600 多个。

整体而言，当高精度地形低于实际地形时，优化方案的订正幅度更大。原始地面风速预报以正偏差为主，此时，优化方案有效降低地面风速预报偏差，提高了预报准确性。当高精度地形高于实际地形但幅度在 100 m 以内时，优化方案同样具有明显的改善效果；但当高精度地形高于实际地形超过 100 m 时，优化方案反而会增大预报误差；进一步对高精度地形高于实际地形的站点分析发现：地形高度差在 $[0, 10]$ m 范围内，优化方案（EXPR_SRTM）所用高精度地形与实际的平均差值为 4 m，而原始方案（EXPR_ORIG）所用原始地形的平均差值

为 13 m；在[10, 100]m 范围内，两者平均值分别为 40 m 和 64 m；在大于 100 m 范围内，两者分别为 228 m 和 224 m，此时优化方案的地形精度反而略低于原始方案。这表明，优化方案的改进效果取决于高精度地形的准确性，当高精度地形比原有地形更接近实际高度时，优化方案能有效改善地面风速预报性能；反之，若其精度更差，则可能导致预报误差增大。

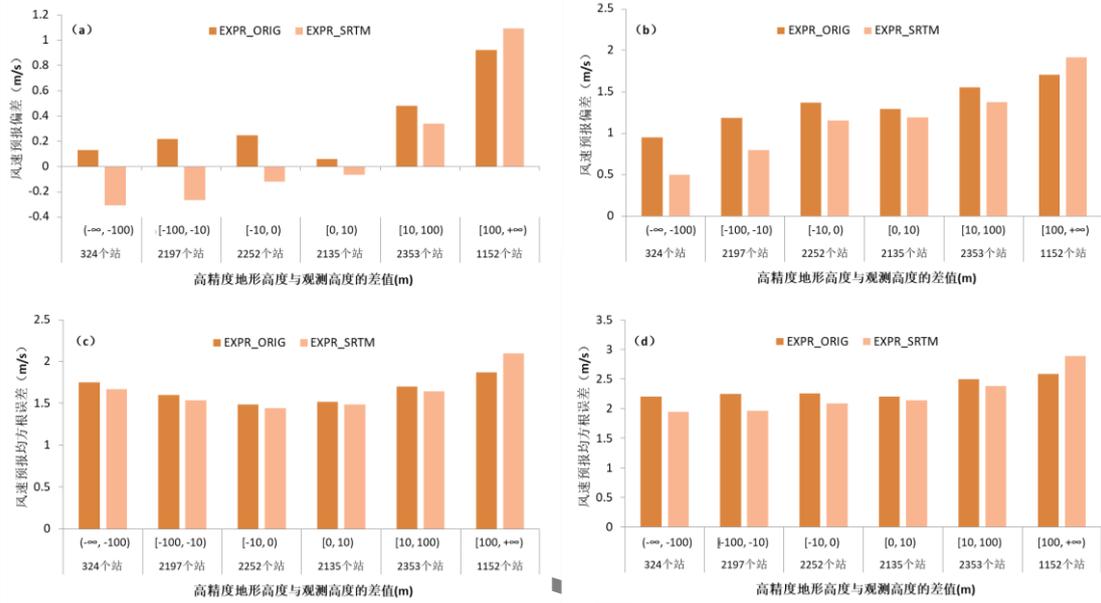


图 7 2023 年(a, c)11 月 20 日和(b, d)7 月 20 日 00 时 CMA-BJv3.0 不同试验起报的 1~24 h 地面风速的 (a, b)偏差和(c, d)均方根误差
 Fig. 7 The surface wind speed forecast (a, b) deviations and (c, d) root mean square errors starting from 00UTC on (a, c, e) November 20 and (b, d, f) July 20 for 2023

上述检验基于全部考核站点，而优化方案的效果直接依赖于地形数据的准确性。由于并非所有站点位置的高精度地形均优于原始地形(即部分站点位置的高精度地形高度与实际观测高度的偏差大于原有地形)，为客观评估优化方案在地形描述改善时的实际效果，进一步筛选出高精度地形高度接近观测高度的站点(近 5800 个)，分别记为 EXPR_ORIG-1(控制试验)和 EXPR_SRTM-1(优化试验)。结果表明，地形描述越准确，优化方案的正面效果越显著。以 18 h 预报偏差为例，11 月 20 日 EXPR_ORIG-1 和 EXPR_SRTM-1 分别为 $1.36 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $1.03 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，7 月 20 日则分别为 $1.37 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $1.04 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。由图 8 可见，对于 24 h 预报，EXPR_SRTM-1 的各项误差指标较 EXPR_ORIG-1 均明显下降。11 月 20 日，预报偏差由 $1.14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 降至 $0.88 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (降幅 22.8%)，绝对偏差由 $1.61 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 降至 $1.42 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (降幅 11.8%)，均方根误差由 $2.07 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 降至 $1.85 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (降幅 10.6%)；7 月 20 日结果类似。这表明，模式地形的准确性是影响地面风速预报的关键因素。

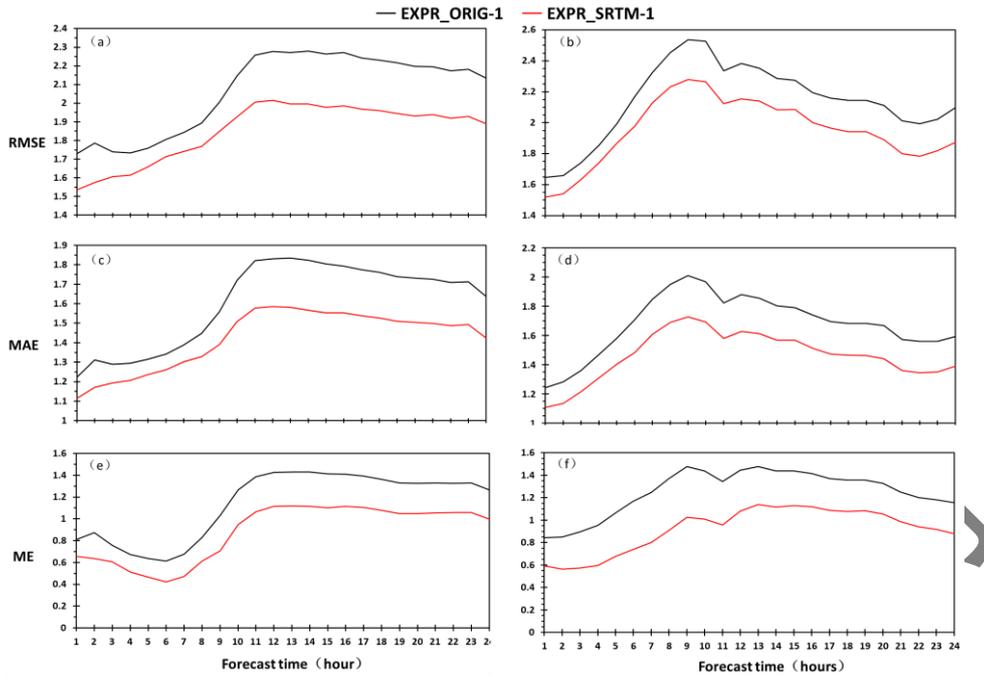


图8 2023年(a, c, e)11月20日和(b, d, f)7月20日的00时CMA-BJv3.0起报的地面风速的(a, b)偏差、(c, d)绝对偏差和(e, f)均方根误差

Figure 8: The surface wind speed forecast (a, b) root mean square errors, (c, d) absolute deviations and (e, f) deviations starting from 00UTC on (a, c, e) November 20 and (b, d, f) July 20 for 2023

2.5 批量试验结果验证

为排除个例分析的偶然性，进一步验证优化方案的稳定性和普适性，采用与表2相同的试验设计，分别选取2023年7月1—31日及11月1—30日两个时段，每日00时起报的24h地面风速预报结果进行批量检验。由图9可见，2023年7月，原始方案(EXPR_ORIG)的24h预报偏差在全国大部分区域为正，其中华南地区正偏差尤为明显(图9a)，采用优化方案(EXPR_SRTM)后，模式全区正偏差明显降低(图9b)；11月，除新疆和内蒙古部分地区外，原始方案预报仍以正偏差为主，优化方案后同样有效改善了预报性能，地面风速预报的正负偏差均有所减小。上述统计结果表明，地面风速诊断预报优化方案具有稳定的改进效果和良好的普适性。

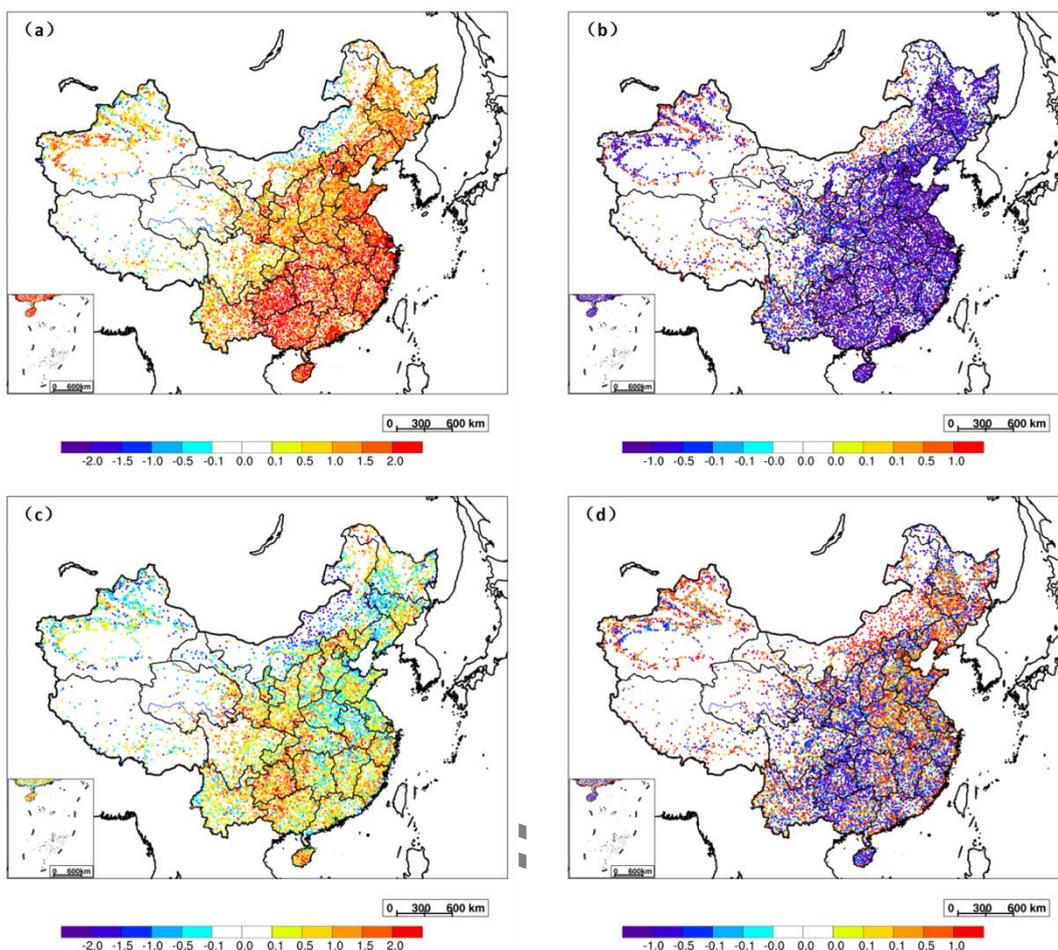


图9 2023年(a, c)7月和(b, d)11月CMA-BJv3.0不同试验24 h地面风速预报检验

(a, b)EXPR_ORIG偏差, (c, d)EXPR_SRTM与EXPR_ORIG差值

Figure 9: The wind speed (a, b) forecast deviation of the EXPR_ORIG in (a, c) July and (b, d) November, and (c, d) different forecast results between the EXPR_SRTM and EXPR_ORIG

基于模式区域内共1万余个考核站,对2023年7月(图10a)和11月(图10b)整月逐日00时起报的24 h地面风速预报进行检验。原始方案(EXPR_ORIG)在两个月的预报中均表现为正偏差,7月尤为显著。就全国平均而言,7月EXPR_ORIG的预报偏差、绝对偏差和均方根误差分别为 $0.22 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $1.45 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $1.53 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$;EXPR_SRTM则分别降至 $0.11 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $1.36 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $1.50 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,降幅达50.6%、1.4%和0.3%;使用优化方案后,11月采用优化方案对应的预报偏差、绝对偏差和均方根误差则分别降低50.0%、6.0%和1.9%。可见,优化方案可以显著降低地面风速预报偏差。

由于部分站点的高精度地形与实际地形的差异反而大于原有地形,为客观评估优化方案在地形描述改善时的实际效果,同样筛选出高精度地形更接近观测高度的站点(近5800个)进行统计。对于这些站点,7月(图10c)EXPR_ORIG-1的预报偏差、绝对偏差和均方根误差

差分别为 1.42、1.48 和 1.54 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，EXPR_SRTM-1 则分别降至 1.03 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、1.18 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 1.43 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，降幅达 27.5%、20.3%和 7.1%；11 月（图 10d）原始方案的预报性能相对较好，EXPR_ORIG-1 的预报偏差、绝对偏差和均方根误差分别为 0.32 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、0.74 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 1.28 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，优化后预报偏差的降幅可高达 90.3%，绝对偏差和均方根误差分别降低了 19.7%和 4.8%。上述结果表明，优化方案可有效提升数值预报系统中地面风速预报准确性，尤其在地形描述更精准的区域，优化方案的改进效果更为显著。

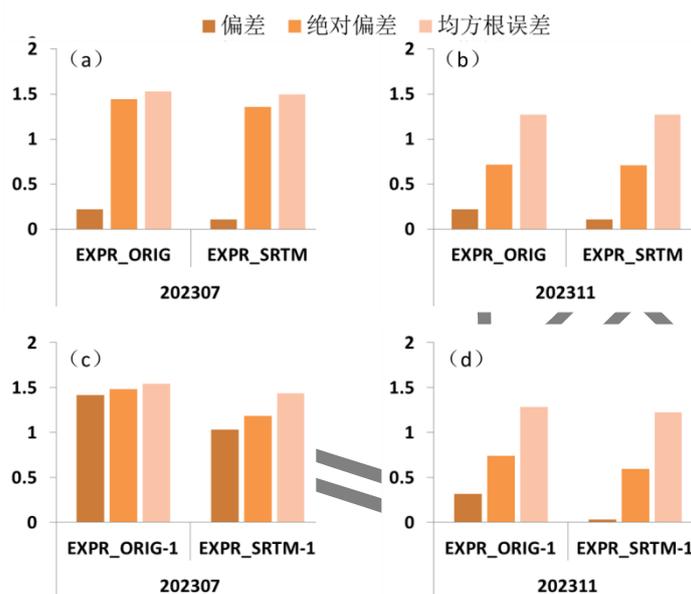


图 10 2023 年 (a, c) 7 月和 (b, d) 11 月 CMA-BJv3.0 不同试验基于 (a, b) 全部检验站点和 (c, d) 高精度地形与观测地形更接近站点的统计结果

Fig. 10 Statistical results based on (a, b) all test sites and (c, d) sites where the high-precision terrain is closer to the observed terrain on (a, c) July and (b, d) November of 2023

3. 结论与讨论

区域数值模式 CMA-BJ 的地面风速预报结果是基于莫宁-奥布霍夫相似理论，通过诊断模式地形以上 10 m 高度处的风速获得。模式地形与实际地形不匹配是影响地面风速预报性能的关键因素。为此，本研究引入高精度地形数据，对原有诊断方案中的地形高度进行修正，并同步调整大气稳定度函数项，形成地面风速诊断预报优化方案。通过对比试验得出以下结论：

(1) 基于 90 m 分辨率 SRTM 数据构建的 3 km 分辨率网格高精度地形，相较于原有模式地形，与全国 1 万余个考核站观测高度的偏差由 40.6 m 降至 21.8 m，高精度地形的准确性明显提升。

(2) 个例分析与连续批量试验(2023年7月、11月)表明,优化方案可有效减小CMA-BJ模式24 h内地面风速预报偏差,显著改善地面风速预报性能。

(3) 从所有参与检验的观测站点中筛选高精度地形更接近实际观测高度的站点进行检验,优化方案的改进效果更为突出,相关站点位置的地面风速预报性能提升幅度更大,进一步证实地形准确性是影响地面风速预报性能的关键因素。更精确的地形描述可以有效提升地面风速预报准确性。

需要指出的是,受限于数据源,高精度地形并非在所有区域均优于原有地形,因此优化方案未能使每个站点的预报均得到改善。但整体而言,优化方案提升了模式全区地面风速预报的整体性能,尤其在地形描述更准确的区域效果显著。因此在地面风速预报优化方案不变的基础上,未来随着模式地形数据精度的不断提高,地面风速网格预报的准确性有望进一步得到提升。

参考文献:

- 陈超君,王东海,李国平,等,2012.冬季高海拔复杂地形下GRAPES-MESO要素预报的检验评估[J].气象,38(6):657-668. Chen C J, Wang D H, Li G P, et al, 2012. A study of the GRAPES Meso prediction verification for high altitude and complex terrain during winter time[J]. Meteor Mon, 38(6): 657-668(in Chinese).
- 陈俊勇,2005.对SRTM3和GTOPO30地形数据质量的评估[J].武汉大学学报(信息科学版),30(11):941-944. Chen J Y, 2005. Quality evaluation of topographic data from SRTM3 and GTOPO30[J]. Geomat Inform Sci Wuhan Univ, 30(11): 941-944(in Chinese).
- 陈明轩,宋林焯,杨璐,等,2025."百米级、分钟级"短临预报技术的进展与展望——以睿思(RISE)发展路径为例[J].气象,51(11):1433-1454. Chen M X, Song L Y, Yang L, et al, 2025. Progress and prospects of "100-meter level, minute-level" short-term nowcasting technology: Taking the development path of RISE as an example[J]. Meteor Mon, 51(11): 1433-1454(in Chinese).
- 胡海川,黄彬,魏晓琳,2017.我国近海洋面10m风速集合预报客观订正方法[J].气象,43(7):856-862. Hu H C, Huang B, Wei X L, 2017. Objective correction method of ensemble forecast of 10 m winds on Chinese offshore[J]. Meteor Mon, 43(7): 856-862(in Chinese).
- 李俊徽,耿焕同,谢佩妍,等,2017.基于WRF-CALMET的精细化方法在大风预报上的应用研究[J].气象,43(8):1005-1015. Li J H, Geng H T, Xie P Y, et al, 2017. Research on application of fineness method based on WRF-CALMET in gale forecasting[J]. Meteor Mon, 43(8): 1005-1015(in Chinese).
- 林行,马艳,杨育强,等,2008.动态统计预报模型及其在2008奥帆赛场风场预报中的应用[J].气象,34(S1):199-205. Lin H, Ma Y, Yang Y Q, et al, 2008. Dynamic statistical forecasting model and its application in wind field forecasting for 2008 Olympic Sailing[J]. Meteor Mon, 34(S1): 199-205(in Chinese).
- 苗曼倩,朱超群,季劲钧,1997.近地层相似理论适用的分析研究[J].气象学报,55(2):210-218. Miao M Q, Zhu C Q, Ji J J, 1997. Study on the applicability of the surface layer similarity theory[J]. Acta Meteor Sin, 55(2): 210-218(in Chinese).
- 邱贵强,于波,陶亦为,等,2023.基于集成学习算法的冬奥会延庆赛区极大风速预报[J].气象,49(6):721-732. Qiu G Q, Yu B, Tao Y W, et al, 2023. Forecasting of extreme wind speed in Yanqing competition zone of the Winter Olympic Games based on ensemble learning algorithm[J]. Meteor Mon, 49(6): 721-732(in Chinese).
- 孙全德,焦瑞莉,夏江江,等,2019.基于机器学习的数值天气预报风速订正研究[J].气象,45(3):426-436. Sun Q D, Jiao R L, Xia J J, et al, 2019. Adjusting wind speed prediction of numerical weather forecast model based on machine learning methods[J]. Meteor

- Mon, 45(3): 426-436(in Chinese).
- 汪凌, 2000. 美国航天飞机雷达地形测绘使命简介[J]. 测绘通报, (12): 38-40. Wang L, 2000. A brief introduction to US shuttle radar topography mission[J]. Bull Surv Mapp, (12): 38-40(in Chinese).
- 王在文, 陈敏, Monache L D, 等, 2019. 相似集合预报方法在北京区域地面气温和风速预报中的应用[J]. 气象学报, 77(5): 869-884. Wang Z W, Chen M, Monache L D, et al, 2019. Application of analog ensemble method to surface temperature and wind speed prediction in Beijing area[J]. Acta Meteor Sin, 77(5): 869-884(in Chinese).
- 薛文博, 余晖, 汤胜茗, 等, 2020. 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, 46(12): 1529-1542. Xue W B, Yu H, Tang S M, et al, 2020. Verification on surface wind speed forecast of Shanghai Meteorological service-WRF ADAS Rapid Refresh System (SMS-WARR)[J]. Meteor Mon, 46(12): 1529-1542(in Chinese).
- 杨璐, 宋林焯, 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]. Meteor Mon, 48(2): 162-176(in Chinese).
- 曾雪兰, 余志, 邓院昌, 等, 2008. SRTM 数字高程模型在 MM5 风场模拟中的应用[J]. 资源科学, 30(5): 662-666. Zeng X L, Yu Z, Deng Y C, et al, 2008. Application of SRTM DEM in the numerical simulation of Wind fields using MM5[J]. Resour Sci, 30(5): 662-666(in Chinese).
- 张铁军, 颜鹏程, 张正英, 等, 2018. 多种订正技术在风电场风速预报订正中的应用[J]. 干旱气象, 36(5): 835-844. Zhang T J, Yan P C, Zhang Z Y, et al, 2018. Application of various technologies in modification of wind speed forecast in wind farms[J]. J Arid Meteor, 36(5): 835-844(in Chinese).
- 张鑫宇, 陈敏, 范水勇, 2023. 基于莫宁-奥布霍夫相似理论的地面站点风速预报偏差订正[J]. 气象, 49(5): 624-632. Zhang X Y, Chen M, Fan S Y, 2023. Correction of wind speed forecast deviations at ground stations based on Monin-Obukhov similarity theory[J]. Meteor Mon, 49(5): 624-632(in Chinese).
- 张鑫宇, 陈敏, 孙娟珍, 等, 2021. WRF-DA 中地面观测资料同化方案的改进与应用[J]. 气象学报, 79(1): 104-118. Zhang X Y, Chen M, Sun J Z, et al, 2021. Improvement and application of the ground observation data assimilation scheme in WRF-DA[J]. Acta Meteor Sin, 79(1): 104-118(in Chinese).
- 赵国松, 杜耘, 凌峰, 等, 2012. ASTER GDEM 与 SRTM3 高程差异影响因素分析[J]. 测绘科学, 37(4): 167-170. Zhao G S, Du Y, Ling F, et al, 2012. Analysis of influencing factors on height differences between ASTER GDEM and SRTM3[J]. Sci Surv Mapp, 37(4): 167-170(in Chinese).
- 智协飞, 吴佩, 俞剑蔚, 等, 2019. GFS 模式地形高度偏差对地面 2m 气温预报的影响[J]. 大气科学学报, 42(5): 652-659. Zhi X F, Wu P, Yu J W, et al, 2019. Impact of topographic altitude bias of the GFS model on the 2 m air temperature forecast[J]. Trans Atmos Sci, 42(5): 652-659(in Chinese).
- Barthelmie R J, 2001. Evaluating the impact of wind induced roughness change and tidal range on extrapolation of offshore vertical wind speed profiles[J]. Wind Energy, 4(3): 99-105.
- Carvalho D, Rocha A, Gómez-Gesteira M, et al, 2012. A sensitivity study of the WRF model in wind simulation for an area of high wind energy[J]. Environ. Modell. Softw., 33: 23-34.
- Earth Resources Observation and Science Center/U.S. Geological Survey/U.S. Department of the Interior. 1996. Global 30 Arc-Second Elevation Data (GTOPO30). [Data set]. Available: <https://doi.org/10.5066/F7DF6PQS>
- Ling F, Zhang Q W, Wang C, 2007. Filling voids of SRTM with Landsat sensor imagery in rugged terrain[J]. Int. J. Remote. Sens., 28(2): 465-471.
- Monahan A H, 2013. The Gaussian statistical predictability of wind speeds[J]. J. Climate., 26(15): 5563-5577.
- Mughal M O, Lynch M, Yu F, et al, 2017. Wind modelling, validation and sensitivity study using weather research and forecasting model in complex terrain[J]. Environ Model Softw, 90: 107-125.
- Reuter H I, Nelson A, Jarvis A, 2007. An evaluation of void-filling interpolation methods for SRTM data[J]. Int. J. Geogr. Inform. Sci., 21(9/10): 983-1008.

- Rozas-Larraondo P, Inza I, Lozano J A, 2014. A method for wind speed forecasting in airports based on nonparametric regression[J]. Wea. Forecasting, 29(6): 1332-1342.
- Wehner M F, Smith R L, Bala G, et al, 2010. The effect of horizontal resolution on simulation of very extreme US precipitation events in a global atmosphere model[J]. Climate Dyn, 34(2-3): 241-247.
- Winstral A, Jonas T, Helbig N, 2017. Statistical downscaling of gridded wind speed data using local topography[J]. J. Hydrometeor, 18(2): 335-348.

气象学报

气象学报