

基于ERA5的自适应方法GFS短中期风速预报订正研究

徐静颖¹, 邢益航¹, 杨德石¹, 尚 明², 施晨晓³, 白 磊^{1,4*}

¹海南大学生态学院, 海南 海口

²河北工程大学地球科学与工程学院, 河北 邯郸

³海南省气象信息中心, 海南 海口

⁴海南智慧低空气象大数据研究中心, 海南 海口

收稿日期: 2025年12月23日; 录用日期: 2026年1月22日; 发布日期: 2026年1月27日

摘 要

复杂地形与快速边界层演变使近地面风速预报出现系统性偏差与时效相关误差。面向湖南区域短中期业务需求, 本文在WRF (GFS驱动)基线之上, 采用ERA5风矢量气压层订正(ERA5-UV): 以ERA5的U、V分量替换GFS的共用气压层风场。在气象站经纬度, 按预报时效分段(12 h、1~3 d、4~6 d、7~10 d)与UTC时段块逐小时与最近整点观测配对, 使用RMSE、ME、按提前量的相对改进率与UTC各个时段变化偏差进行评估; WRF (ERA5-only)作为敏感性对照。结果显示, 订正并非普适: 最佳窗口集中在中期前段(4~6 d), 基准平均RMSE由1.42降至1.28 m·s⁻¹, 白天与傍晚(06~11、18~23 UTC)降幅约14%~19%, ME同步向零收敛; 中期后段(7~10 d)仍有局部改进, 但不稳定。短临与短期总体收益有限: 虽逐小时技巧多为正(约0.2~0.4), 但少数时次/站点的显著退化被RMSE平方放大, 导致分段聚合RMSE可能劣化。空间上存在显著异质性, 订正效果受站点局地条件制约(如1~3 d三站平均近零, 实为OBS57985约+10%与OBS57853约-12%的抵消)。综上, ERA5风矢量气压层订正方案适用于中期窗口并在特定时段更稳健; 订正方案的业务应用宜充分考虑站点差异和适用时间窗口, 不宜采用统一的订正策略。

关键词

短期风速预报, WRF模式, ERA5气压层订正, 预报偏差订正

Bias Correction of GFS Short- to Medium-Range Wind Speed Forecasts via an ERA5-Based Adaptive Approach

Jingying Xu¹, Yihang Xing¹, Deshi Yang¹, Ming Shang², Chenxiao Shi³, Lei Bai^{1,4*}

*通讯作者。

文章引用: 徐静颖, 邢益航, 杨德石, 尚明, 施晨晓, 白磊. 基于 ERA5 的自适应方法 GFS 短中期风速预报订正研究[J]. 气候变化研究快报, 2026, 15(1): 205-215. DOI: 10.12677/ccrl.2026.151025

¹School of Ecology, Hainan University, Haikou Hainan²School of Earth Science and Engineering, Hebei University of Engineering, Handan Hebei³Hainan Meteorological Information Center, Haikou Hainan⁴Hainan Intelligent Low-Altitude Meteorological Big Data Research Centre, Haikou Hainan

Received: December 23, 2025; accepted: January 22, 2026; published: January 27, 2026

Abstract

Complex terrain and rapid boundary-layer evolution introduce systematic bias and lead-time-dependent errors in near-surface wind forecasts. Targeting short- to mid-range operations over Hainan, we evaluate an ERA5 wind-vector pressure-level correction (“ERA5-UV”) built on a WRF (GFS-driven) baseline by replacing the GFS common-level U and V fields with those from ERA5. At station coordinates, forecasts are paired hourly with the nearest top-of-the-hour observations and evaluated by forecast segments (12 h, 1~3 d, 4~6 d, 7~10 d) and UTC diurnal windows using RMSE, mean error (ME), relative improvement by lead, and UTC-hour-resolved bias. WRF (ERA5-only) serves as a sensitivity control. The correction is not universal. Its most effective window is 4~6 d, where the segment-mean RMSE decreases from 1.42 to 1.28 m·s⁻¹, and reductions of ≈14%~19 % occur during 06~11 and 18~23 UTC, with ME moving toward zero. In 7~10 d, improvements persist locally but are less stable. Benefits are limited in nowcasting and 1~3 d: although hourly skill is often positive (≈0.2~0.4), a few hours/sites degrade markedly, and RMSE aggregation amplifies these penalties. Strong spatial heterogeneity is evident; performance depends on site conditions (e.g., the 1~3 d three-site mean near zero reflects offsetting changes of +10% at OBS57985 and -12% at OBS57853). Overall, ERA5-UV is most suitable for the mid-range window and specific UTC periods; operational use should account for site variability and applicable time windows rather than applying a uniform correction.

Keywords

Short-Term Wind Speed Forecasting, WRF Model, ERA5 Pressure-Level Correction, Forecast Bias Correction

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Open Access

1. 引言

近地层风速预报是风能利用和电力调度的关键环节，但在复杂地形的边界层条件下，数值模式常存在系统性偏差和时效相关误差，导致风电场功率预报不确定性增加[1][2]。短期风速预报在风能利用和气象服务中具有关键作用，对电网调度、安全生产以及极端天气预警等方面至关重要。高时空分辨率的数值模式(如 WRF)已广泛用于短期和中期风速预测，以 WRF 为代表的中尺度模式能够再现总体风速变化，但在极端风速和日变化阶段表现不足，偏差主要来源于边界层参数化、下垫面处理以及驱动资料误差[3]-[5]。但模式本身存在系统偏差和不确定性，导致近地面风速模拟存在显著误差[6]。

欧洲中期天气预报中心第五代再分析产品(ECMWF Reanalysis v5, ERA5)在风场位相和垂直风廓线结构上优于美国国家环境预报中心全球预报系统(Global Forecast System, GFS)的模式预报，因而常被用于模

式订正与动力降尺度[7][8]。已有研究表明,利用 ERA5 订正边界或压力层风场能在一定程度上削弱系统性误差[9]。ERA5 再分析资料具有更丰富的观测同化、更高的时空分辨率与更一致的多层风场信息,在风向位相、垂直风矢量结构及时变一致性方面普遍优于模式直接驱动资料(如 GFS)[7]-[9]。基于此,近年来的实践工作常通过两类方式将 ERA5 信息引入区域模式:第一种是以 ERA5 替换或融合部分气压层的风矢量,直接修正初/边界场的动力分量;第二种是在积分过程中对自由大气实施分析强迫/四维资料同化(FDDA, analysis nudging),在保持模式内部物理闭合的同时,缓解由驱动场误差引发的系统性偏差与相位漂移[10][11]。已有研究表明,这类“风矢量层订正/分析强迫”能有效压低近地层风速的系统性高估,提升时序振幅与位相的一致性,并在多地形条件下呈现稳定收益[10][11]。

基于上述背景,本文面向湖南区域短中期业务需求,短中期风速预报问题,提出并评估一套两阶段订正框架,以提高 WRF 模式短期风速预报的精度。通过 WRF (GFS-only),作为主基线;WRF (ERA5-only),作为敏感性对照,在 WRF (GFS-only)的基础上用 ERA5-UV 偏差订正预报(基于 ERA5 风矢量的订正),评估三者随预报提前量的误差演变和全时序误差特征,验证所提出订正方法在短/中期风速预报中的有效性和潜在应用价值。

2. 数据与方法

2.1. 数据来源

本研究的模拟区域(图 1)覆盖湖南南部(约 109.8°~114.2°E, 24.4°~28.0°N),东西向与南北向尺度分别约为 420 km 和 400 km。该区域地处南岭山地过渡带,地形复杂,海拔从平原丘陵(<300 m)显著抬升至山脊(>1500 m),山脉总体呈西南-东北走向。下垫面类型以常绿阔叶/混合林和耕地自然镶嵌为主,局地分布少量城市建设用地。用于评估的观测数据来源于中国地面气象观测业务系统。本研究选取了研究区内三个代表性气象站(57853、59072、57985),其局地地形特征代表了湖南风能资源开发的主要地理单元。观测资料为经过质量控制的逐小时 10 m 风速,作为评估模式模拟和订正效果的“基准真值”。

本研究的数值模拟试验采用了 NCEP GFS 预报产品与 ECMWF ERA5 再分析资料。模式驱动数据(GFS):采用 NCEP 0.25°分辨率的 GFS 全球预报产品[13]。该资料作为基准试验(RAW)的初始场(IC)和边界条件(BC)输入,驱动 WRF 模式。订正与对比数据(ERA5):采用 ECMWF 0.25°分辨率的 ERA5 逐小时再分析资料[12]。其多层风场(U、V)被用于对 GFS 初始场进行订正,或作为敏感性试验的独立驱动场。

本研究基于再分析资料、数值模式预报产品以及现场观测数据,对湖南省三个典型气象站的逐小时风速进行了系统评估与订正。图 1 中本研究所选研究域覆盖约 109.8°~114.2°E、24.4~28.0°N(约 420 km × 400 km)。地形从低海拔平原与丘陵(<200~300 m)到山地与山脊(>1500 m)变化明显,山脉总体呈西南-东北走向。土地利用以常绿阔叶/混合林和耕地自然镶嵌为主,局地分布少量城市建设用地、草地与稀疏植被。这三个气象站地处南岭山地过渡带,地形复杂多样,代表了湖南风能资源开发的主要地理单元。

本研究所用的大气再分析资料为 ECMWF 的 ERA5 产品[12],其提供全球逐小时、多层的风场等气象变量,用于驱动/订正模式初始场。ERA5 提供逐小时的全球大气、陆面和海洋多变量数据,本研究提取其 0.25°×0.25°分辨率的风场产品,并将其用于对数值模式初始场和边界场的订正。预报模式驱动资料采用 NCEP 提供的 GFS 资料[13],作为模式的初始场与边界条件输入。本研究以 GFS 预报产品为基础驱动 WRF 模式,并通过 ERA5 的 26 个共用气压层风场变量(U、V)进行订正,以改善初始风场质量。

观测数据来源于中国地面气象观测业务系统,该系统在研究区及周边设有多部自动气象站,提供逐小时 10 m 风速观测资料。为保证代表性与一致性,将模拟数据插值到气象站经纬度上,构建逐小时风速时间序列,同时气象站数据作为评估模式模拟和订正效果的参考基准。

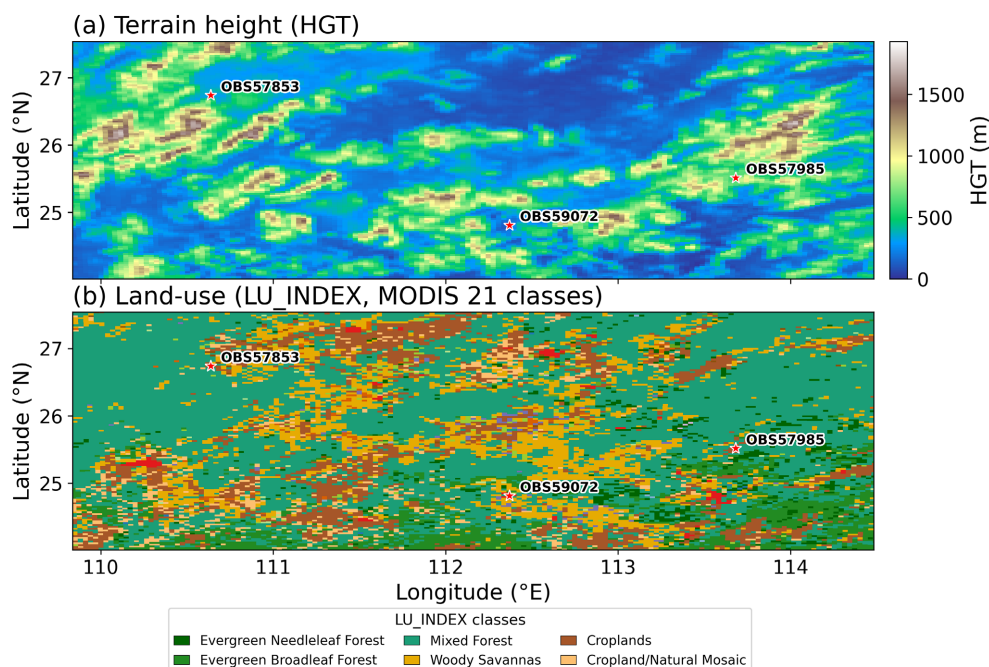


Figure 1. Study area topography, land cover, and station locations. (a) Terrain height (HGT; m); (b) Land-use categories (LU_INDEX; MODIS 21 classes). Star markers denote the automatic weather stations used for evaluation: OBS57853, OBS59072, and OBS57985. The legend retains only classes whose areal share within the current map extent is $\geq 1\%$ (evergreen needleleaf forest, evergreen broadleaf forest, mixed forest, savannas, croplands, and cropland/natural vegetation mosaic)

图 1. 研究区地形、下垫面及观测站分布。(a) 地形高度(HGT, 单位: m); (b) 土地利用类型(LU_INDEX, MODIS21 类)。五角星标示本研究用于评估的地面自动站, 分别为 OBS57853、OBS59072 和 OBS57985。图例仅保留当前视窗内面积占比 $\geq 1\%$ 的类别(常绿针叶林、常绿阔叶林、混合林、稀树草原、农田、农田/自然镶嵌)

2.2. 方法

2.2.1. WRF 模式配置

本研究采用 WRF (Weather Research and Forecasting, v4.3.3)模式进行数值模拟。模式采用三层嵌套(d01, d02, d03), 水平分辨率依次为 9 km、3 km 和 1 km, 网格比为 1:3。垂直方向设置 50 层。模拟区域中心位于湖南南部(约 26°N, 112°E)。

物理参数化方案组合如下: WSM6 微物理方案、RRTMG 长波与短波辐射方案、YSU 行星边界层(PBL)方案、RevisedMM5Monin-Obukhov 近地面层方案以及 Unified Noah 陆面模式(4 层土壤)。积云对流参数化方案采用 Tiedtke 方案, 且仅在最外层(d01)启用。

模拟时段为 2025 年 7 月 1 日 00:00 至 2025 年 7 月 11 日 00:00 (UTC)。模式逐小时输出 U10/V10 风场分量并合成为 10 m 风速。模拟未启用地形风后处理(topo_wind:off)。

2.2.2. 试验设计

如图 2 所示, 本研究设计了三个平行的数值试验, 旨在评估 ERA5 风场订正对 GFS 驱动模拟的改进效果(图 2)。

1. 基准试验(WS-GFS): 采用 GFS 驱动 WRF 方案。模式由 NCEP GFS0.25°分析资料驱动, 每日 00UTC 起报, GFS 资料时间分辨率为 3 小时。WRF 边界条件(BC)每 6 小时更新一次, 并设置 5 个网格的边界缓冲区。此试验结果作为未经订正的基准场(GFS 驱动的 WRF)。

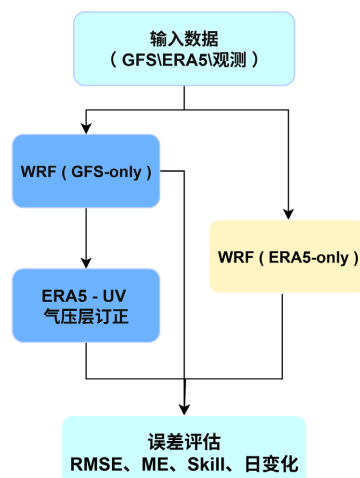


Figure 2. Technical workflow for wind-speed forecast bias correction
图 2. 风速预报订正技术路线图

2. 风场订正试验(WS-CORR): 此方案在 GFS 驱动场的基础上, 引入 ERA5 再分析资料对初始场(IC)的风场进行订正。具体而言, 提取 GFS 在 26 个标准气压层(1000, 975, 950, ..., 20, 10 hPa)的 U、V 风场分量, 并利用 ERA5 在对应时次与层级的风场数据对其实施差值订正。为保证水汽、温度等热力场的物理一致性, 该订正过程仅针对风场分量, 其余变量保持 GFS 原始值不变。

3. 敏感性试验(WS-ERA5): 为评估驱动资料的整体差异, 设置 WRF(ERA5)对照试验。该试验以 ERA5 作为完整的初始场和边界条件(IC/BC)直接驱动 WRF。

所有试验的输出均插值到站点位置, 并与观测时次对齐。地面站观测资料在配对前均经过基础质量控制(QC), 剔除了缺测码与异常值。

2.3. 评估方法

为全面评估预报性能, 本研究采用多维度指标体系, 包括均方根误差(RMSE)、平均绝对误差(MAE)以及偏差(Bias)。

为定量衡量 ERA5 订正方案相较于基准场的增益, 引入相对技巧评分(SkillScore, SS)作为核心指标, 定义为:

$$SS = 1 - \frac{RMSE_{corr}}{RMSE_{gfs}} \quad (1)$$

其中, $RMSE_{corr}$ 为订正方案 ERA5-UV 或对照组 ERA5-only 的 RMSE, $RMSE_{gfs}$ 为基准方案(RAW)的 RMSE。 $SS > 0$ 表示订正方案优于基准(即改进), $SS < 0$ 则表示退化。在图表中, 该值常以百分比公式形式给出。

本研究从两个关键维度评估误差随时效的演变:

1. 按预报时段(Forecast Segment): 为评估不同预报阶段的整体性能, 我们将预报时程划分为四个时段进行分段统计(对应表 1): 短临(Nowcasting, 前 12 h)、短期(Short-range, 1~3 d)、中期 I (Mid-range I, 4~6 d)和中期 II (Mid-range II, 7~10 d)。

2. 按日变化时次: 为诊断预报技巧对日变化周期的依赖性, 本研究绘制了 RMSE 改进热力图(如图 6)。该图按预报提前时次(LeadHour)独立计算:

1. 针对每个站点和每个提前时次 h ($h = 0, \dots, 23$), 汇集评估期内所有落在该时次 h 的预报样本(不区

分日期)。

2. 将样本与 ± 31 分钟内的最近整点观测值配对。
3. 独立计算每个时次 h 的 RMSE, 热力图中的公式:

$$\Delta \text{RMSE}(h)[\%] = 100 \times \frac{(1 - \text{RMSE}_{\text{corr}}(h))}{(1 - \text{RMSE}_{\text{gfs}}(h))} \quad (2)$$

其中 $\text{RMSE}_{\text{corr}}(h)$ 和 $\text{RMSE}_{\text{gfs}}(h)$ 的子集上独立计算得到。正值(暖色)表示订正方案在该时次相对 RAW 的 RMSE 降低(改进), 负值(冷色)表示退化。

3. 结果

3.1. ERA5-UV 气压层订正评估

图 3 是基于 2025 年 7 月 1 日至 10 日期间湖南三个风电场站点的 10 m 风速观测数据与三种 WRF 数值模拟方案进行了定量评估。总体上, 基准方案 ws-gfs 在所有站点均表现出显著的系统性高估偏差, 平均误差 ME 达 $0.76 \sim 0.96 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 均方根误差 RMSE 介于 $1.28 \sim 1.70 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 之间, 预报性能最差。ERA5 驱动场订正方案在三个站点均实现了稳健改进, RMSE 相对基准方案分别降低 4.7%、4.7% 和 6.4%, 证明了在驱动场层面融合 ERA5 风场信息的有效性和普适性。ERA5 驱动 WRF 方案的表现则呈现明显的空间异质性特征, 在 OBS57985 站取得最优效果, RMSE 大幅降低 18.8% 且系统偏差几乎消除($\text{ME} = 0.26 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$), 但在 OBS57853 站的表现反而略逊于 ERA5 订正方案。

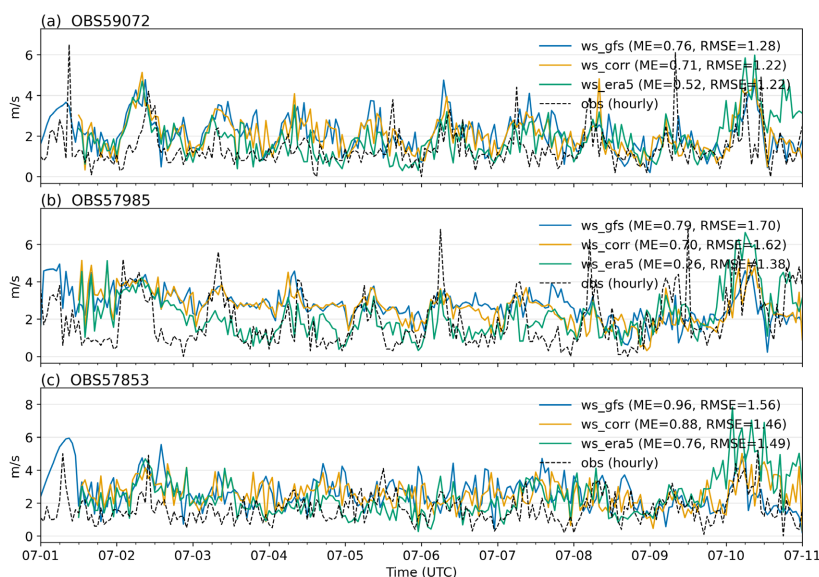


Figure 3. Hourly 10-m wind-speed time-series for three schemes: (a) OBS59072, (b) OBS57985, (c) OBS57853. The black dashed line shows hourly observations; blue: WRF driven by GFS (ws_gfs); orange: WRF with ERA5 wind-vector correction applied to the shared GFS pressure levels (ws_corr); green: WRF driven by ERA5 (ws_era5). All curves denote 10-m wind speed ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$). The legend reports ME and RMSE ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) computed over the evaluation period after pairing to the nearest whole hour (± 31 min). Model values at each station are formed from U10/V10 (vector combination). The three forecasts are concatenated into continuous series using daily anchors, selecting for each hour the forecast with the minimum lead time

图 3. 三方案的逐小时 10 m 风速时间序列对比图。(a) OBS59072, (b) OBS57985, (c) OBS57853。黑色虚线为逐小时观测; 蓝色为 WRF (GFS 驱动, ws_gfs); 橙色为在 GFS 共用气压层以 ERA5 风矢量订正的 WRF (ws_corr); 绿色为 WRF (ERA5 驱动, ws_era5)。所有曲线为 10 m 风速($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)。图例中的 ME 与 RMSE 为在评估期内与观测按最近整点(± 31 min)配对后的整体统计(单位 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)。模型值在各台站经纬度处由 U10/V10 合成获得; 三套预报通过按日锚点的“最小提前量”方式拼接成连续序列

3.2. 时段平均技巧

表 1 评估 ws_corr (在 GFS 基础上用 ERA5 对共用气压层订正)相对于 ws_gfs 的效果; ws-era5 仅作对照组, 单位均为 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ($\text{ME} > 0$ 表示高估)。表 1 以逐小时配对数据为基础(与观测按相同时刻汇总), 先在各时段块内分别计算 ME 与 RMSE, 再在对应分段内对所有样本日与全部台站求算术平均(三站合并结果)。缺失值/留空表示该分段不覆盖对应时段块(如 Nowcasting 仅覆盖 12-17 与 18-23)。两种预报方案(ws_gfs 和 ws_corr)在所有预报时段均表现出系统性高估 10 m 风速的特征, 平均偏差(ME)显著大于零且随预报时效延长呈递减趋势: ws_gfs 的 ME 从短临预报(12 h)的 $1.43 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 降至中期预报 II (7~10 d)的 $0.41 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, ws_corr 呈现相同规律($1.55 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 降至 $0.41 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)。均方根误差(RMSE)分析显示两种方案的优劣存在明显的时效依赖性: 短期预报(12 h 至 3 d)阶段 ws_gfs 表现更优(如 1~3 d 时段 RMSE 为 $1.50 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 低于 ws_corr 的 $1.55 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$), 而中长期预报(4~10 d)阶段订正方案优势显现(4~6 d 时段 ws_corr 的 RMSE 为 $1.28 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 显著低于 ws_gfs 的 $1.42 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)。误差呈现显著的昼夜不均性特征, 夜间误差远大于白天: 以 1~3 d 预报为例, ws_gfs 在白昼时段(UTC 00~11 时, 对应 CST 08~19 时)的 RMSE 为 $1.18\sim1.45 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 而夜间(UTC 12~23 时)增至 $1.64\sim1.73 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 系统偏差同样表现为白昼 $0.90\sim0.95 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、夜间 $1.44\sim1.46 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 表明模式在模拟夜间稳定边界层时存在系统性缺陷。订正方案的日变化表现因预报时段而异: 短期白昼时段 ws_gfs 最优(如 1~3 d 的 00~05 时 RMSE 为 $1.18 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 优于 ws_corr 的 $1.36 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$), 但中长期夜间时段 ws_corr 优势显著(4~6 d 的 18~23 时 RMSE 为 $1.41 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 远低于 ws_gfs 的 $1.63 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)。综上, 建议短期预报采用原始 ws_gfs 方案, 中长期预报采用 ERA5 订正方案, 以实现不同预报时效下的最优精度配置。

Table 1. Diurnal distribution of wind-speed forecast errors across lead-time categories. The four categories are nowcasting (12 h), short-range I (1~3 d), mid-range I (4~6 d), and mid-range II (7~10 d). The four hourly blocks are 00~05, 06~11, 12~17, and 18~23 UTC. ME denotes mean error (model - observation), where $\text{ME} > 0$ indicates overestimation; RMSE denotes root-mean-square error. Units are $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$. ws_gfs: WRF wind-speed forecasts driven by GFS; ws_era5: WRF wind speeds driven by ERA5 (reference); ws_corr: GFS-driven WRF wind speeds corrected using ERA5 (pressure-level wind-vector correction)

表 1. 不同预报时段的风速预报误差日内分布。四个预报时段包括短临预报(12 h)、短期预报(1~3 d)、中期预报 I (4~6 d)和中期预报 II (7~10 d); 四个时段块为 00~05 时、06~11 时、12~17 时和 18~23 时(UTC)。ME 为平均误差(模式-观测), $\text{ME} > 0$ 表示模式高估; RMSE 为均方根误差, 单位均为 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。ws_gfs 为 GFS 驱动 WRF 的风速预报; ws_era5 为 ERA5 驱动 WRF 的风速数据(参考); ws_corr 为经 ERA5 订正的 GFS 驱动 WRF 风速预报

预报时段	预报模型	ME				RMSE			
		00~05 UTC	06~11 UTC	12~17 UTC	18~23 UTC	00~05 UTC	06~11 UTC	12~17 UTC	18~23 UTC
Nowcasting (12 h)	ws_corr	-	-	1.62	1.47	-	-	1.91	1.62
Nowcasting (12 h)	ws_era5	-	-	1.09	1.15	-	-	1.4	1.34
Nowcasting (12 h)	ws_gfs	-	-	1.39	1.46	-	-	1.56	1.65
Short-range (1~3 d)	ws_corr	0.96	0.94	1.4	1.45	1.36	1.48	1.67	1.68
Short-range (1~3 d)	ws_era5	0.69	0.48	0.9	0.68	1.21	1.55	1.39	1.13
Short-range (1~3 d)	ws_gfs	0.9	0.95	1.46	1.44	1.18	1.45	1.73	1.64
Mid-range I (4~6 d)	ws_corr	0.68	0.52	0.98	1.22	1.08	1.17	1.44	1.41
Mid-range I (4~6 d)	ws_era5	-0.07	-0.17	0.05	0.31	0.79	1.03	1.09	0.67
Mid-range I (4~6 d)	ws_gfs	0.68	0.71	1.05	1.42	1.06	1.45	1.53	1.63
Mid-range II (7~10 d)	ws_corr	0.17	0.08	0.87	0.53	1.2	1.45	1.46	1.2
Mid-range II (7~10 d)	ws_era5	0.45	0.39	0.8	1.19	1.41	1.66	1.52	1.76
Mid-range II (7~10 d)	ws_gfs	0.18	0.15	0.65	0.65	1.18	1.55	1.4	1.33

3.3. 逐小时技巧评估

基于表 1 的时段块聚合 RMSE 与图 4 的逐小时预报技巧对比分析发现, ERA5 气压层订正方案(ws_corr)相对于 GFS 基线(ws_gfs)及 ERA5 对照(ws_era5)的预报性能呈现出显著的时效依赖性和评估指标敏感性特征。两种评估方法在 ws_corr 最佳适用窗口的判定上存在明显差异,表 1 显示订正方案在中期前段(4~6 d)表现最优,其平均 RMSE ($1.28 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)较 ws_gfs ($1.42 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)显著降低,而在短期(1~3 d)白昼时段表现欠佳,如 00~05 时 RMSE 从 $1.18 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 升至 $1.36 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。图 4 却呈现相反趋势,ws_corr 在短期(1~3 d)几乎所有小时均保持稳定正技巧(Skill > 0),中期前段虽技巧仍为正但稳定性有所下降。这可能由于 RMSE 对极端误差的平方敏感性:ws_corr 在短期预报中虽在绝大多数小时表现优异,但存在少数极端误差事件,这些离群值经平方效应放大后显著抬升时段块平均 RMSE。整体上,两数据源在其他时效的评估上高度一致。短临预报(12 h)阶段 ws_corr 收益有限,图 4 在 12~16 时多呈现负技巧,表 1 在 12~17 时 RMSE ($1.91 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)远高于 ws_gfs ($1.56 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$);中期后段(7~10 d)订正效果波动加剧,图 4 呈现剧烈正负技巧振荡,表 1 在 12~17 时段同样显示退化(RMSE 从 $1.40 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 升至 $1.46 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)。此外,ws_corr 与 ws_era5 的对比(图 4)显示 ws_corr 在短期至中期前段稳定优于 ws_era5,尤其在中期后段,ws_era5 呈现极端波动和频繁深度负技巧,而 ws_corr 虽有波动但风险相对可控,充分证明将 ERA5 作为订正项优化 GFS 远优于直接使用 ERA5 驱动的策略。综上,中期前段(4~6 d)是 ws_corr 最可靠的改进窗口,短期(1~3 d)需权衡高技巧与极端误差风险,短临及中期后段则不稳定,但整体上订正方案显著优于纯 ERA5 方案。

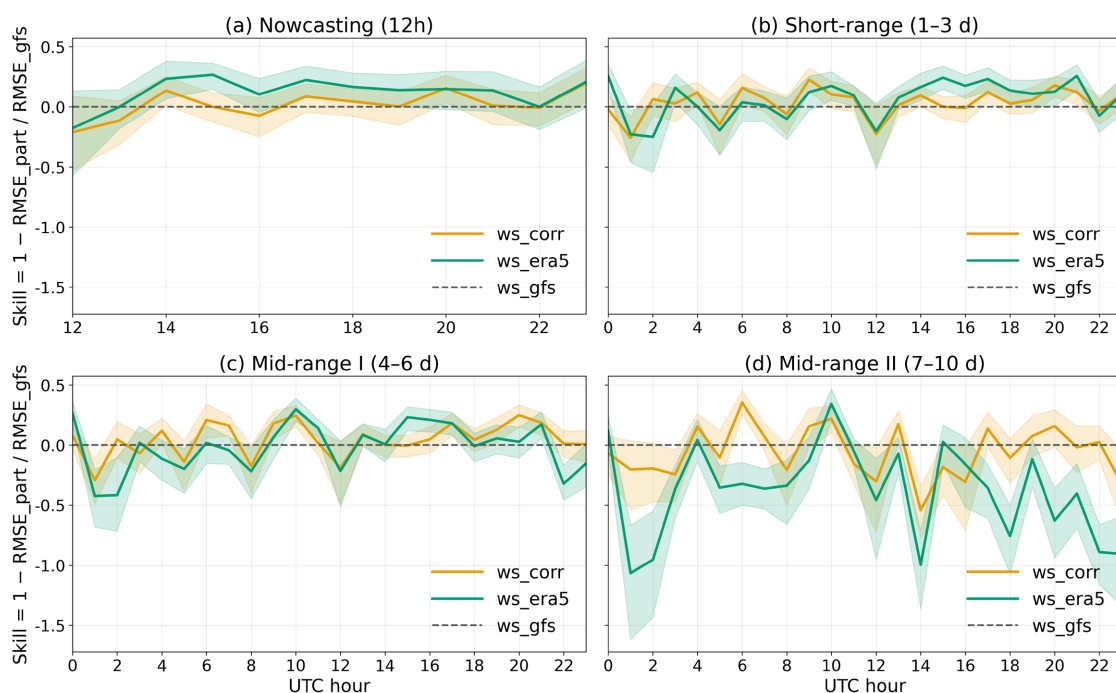


Figure 4. Hourly skill, aggregated over the three stations, shown as a four-panel plot. Skill is defined as $1 - \text{RMSE}_{\text{part}}/\text{RMSE}_{\text{gfs}}$; positive values indicate improvement over the GFS-only baseline. Panels: (a) Nowcasting (12 h; only forecast leads initialized for 12~23 UTC are counted), (b) Short-range (1~3 d), (c) Mid-range I (4~6 d), and (d) Mid-range II (7~10 d). Curves: ERA5 wind-vector pressure-level correction (ws_corr, orange) and ERA5-only control (ws_era5, green). The gray dashed line marks zero improvement relative to the GFS baseline.

图 4. 三站逐小时技巧值四联图。Skill = $1 - \text{RMSE}_{\text{part}}/\text{RMSE}_{\text{gfs}}$, 正值表示相对于 GFS-only 的改进。(a) Nowcasting (12 h, 仅统计 12~23 UTC 的起报提前量); (b) Short-range (1~3 d); (c) Mid-range I (4~6 d); (d) Mid-range II (7~10 d)。曲线分别为 ERA5 气压层订正方案(ws_corr, 橙色)与 ERA5-only 对照(ws_era5, 绿色); 灰色虚线为 GFS 基线的零改进线

图 5 给出了四个预报时期内、三站逐 UTC 小时的 RMSE 相对变化($\Delta\text{RMSE} = 100 \times (1 - \text{RMSE}_{\text{ws_corr}}/\text{RMSE}_{\text{ws_gfs}})$)。正值表示相对 GFS-only 的误差降低。每个面板最右侧一列为该时期对所有小时的列均值;最底部一行是三站的行均值。订正方案的平均改进率呈现明显的非线性变化。图 5(a)短临预报(12 h)阶段改进有限(+4%),且热力图呈红蓝交错的状态,如 22 时在 OBS59072 站达+56%改进但在 OBS57853 站却出现-102%的退化;图 5(b)短期预报(1~3 d)整体平均改进率为 0%,热力图以红色主导,但内部仍潜藏极端负值,如 01 时 OBS59072 站-91%、02 时 OBS59072 站-50%;图 5(c)中期前段(4~6 d)整体逐小时平均接近 0 或略负,但在 06~11 UTC 与 18~23 UTC 的块内改进最稳定且幅度最大;图 5(d)中期后段(7~10 d)平均改进-17%,热力图已呈马赛克化,充斥+51% (OBS57985 站 09 时)与-292% (OBS57853 站 12 时)等极端值,方案完全失去稳定性。在日变化上,订正方案的有效时段随预报时效发生系统性迁移。图 5(a)退化集中于 14~16 时,改进集中于 17~22 时;图 5(b)大部分时段有效,但 01~05 时、08 时为主要退化时段;图 5(c)出现模式逆转,白天时段(00~03 时、05~08 时)转为稳定退化区,改进时段被压缩至傍晚至次日深夜时段(09~11 时、17~21 时)等零星时段;图 5(d)延续此模式,上午(00~03 时、05 时、08 时)持续退化,晚上(12 时)和夜间(14~16 时)出现新的严重退化点(三站平均-98%、-58%)。除此,图 5(b)虽整体平均为 0%,但实际源于 OBS57985 (站点平均+10%)和 OBS59072 (站点平均+2%)的改善,而 OBS57853 站表现最差(站点平均-12%);然而在图 5(c)、图 5(d)中,OBS57853 站的站点平均分别为-14%和-43%,呈现持续恶化趋势,证明订正方案有效性高度依赖具体站点而非普适。

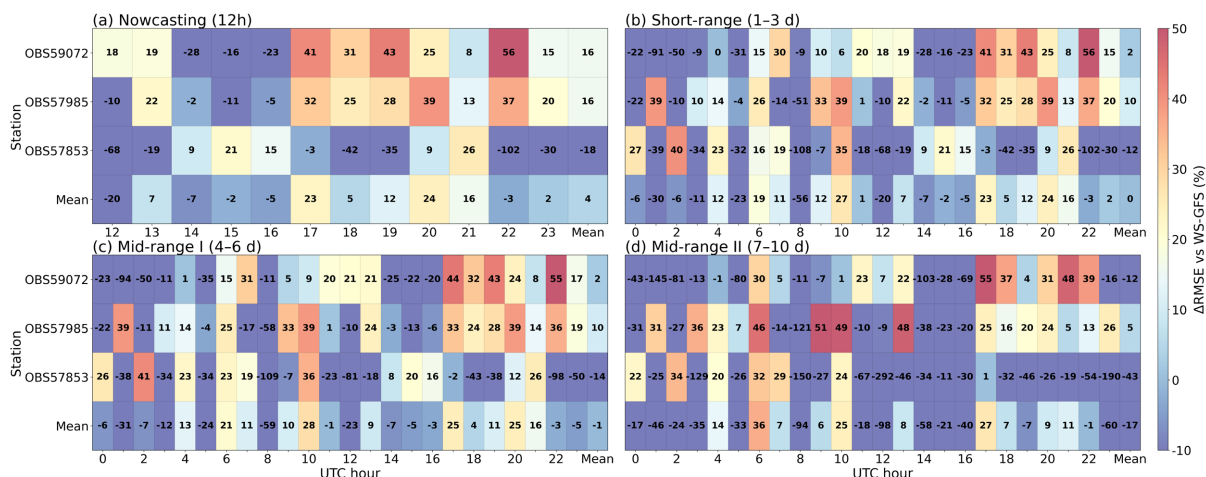


Figure 5. ΔRMSE (%) heat maps by UTC hour—ERA5-UV pressure-level correction (ws_corr) relative to the GFS baseline (ws_gfs). The four subpanels are grouped by forecast period: (a) Nowcasting (12~23 UTC), (b) Short-range (1~3 d), (c) Mid-range I (4~6 d), and (d) Mid-range II (7~10 d). In each panel, rows are the three stations (OBS59072, OBS57985, OBS57853) and columns are UTC hours; cell values are ΔRMSE (%), with a color scale from -10% to 50%. ΔRMSE is defined as $100 \times (1 - \text{RMSE}_{\text{ws_corr}}/\text{RMSE}_{\text{ws_gfs}})$; positive values indicate an RMSE reduction (improvement) relative to ws_gfs, negative values indicate an increase (degradation). The bottom “Mean” row averages across stations within the panel, and the rightmost “Mean” column averages across all UTC hours for that period

图 5. 逐 UTC 小时的 ΔRMSE (%) 热力图。ERA5-UV 气压层订正(ws_corr)相对 WS-GFS 基线(ws_gfs)。四个子图按预报时期分组: (a) Nowcasting (12~23 UTC)、(b) Short-range (1~3 d)、(c) Mid-range I (4~6 d)、(d) Mid-range II (7~10 d)。每个面板按行给出三个站点(OBS59072、OBS57985、OBS57853),按列给出 UTC 小时;格内数字为 ΔRMSE (%),色标范围-10%至 50%。 ΔRMSE 定义为 $100 \times (1 - \text{RMSE}_{\text{ws_corr}}/\text{RMSE}_{\text{ws_gfs}})$: 正值表示相对 WS-GFS 的 RMSE 降低(改进),负值表示 RMSE 升高(退化)。每个面板底部的“Mean”行是对三站的行均值,最右侧“Mean”列是对该时期所有 UTC 小时的列均值

4. 结论

本研究评估了在 GFS 驱动 WRF 的基础上,引入 ERA5 风场进行气压层订正对湖南复杂地形区 10 m

风速预报的改进效果。通过与 GFS 驱动的基准方案进行多维度对比,揭示了订正方案在预报时效、日变化时段和空间站点上高度复杂的有效性特征,主要结论如下:

(1) 订正效果存在显著的时效窗口依赖性,最佳适用窗口集中于中期前段(4~6 天)。与 GFS 基准相比,订正方案并非在所有预报时效内均表现为正向改进。基于预报时期 RMSE 的评估表明,订正方案的最佳适用窗口位于中期前段(4~6 天)。在这一时段,订正方案成功地将基准的平均 RMSE 从 $1.42 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 降至 $1.28 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,并在白天下午(06~11 UTC)和凌晨(18~23 UTC)两个误差高发时段实现了 14%至 19%的显著 RMSE 降幅,有效缓解了基准方案的系统性高估。然而,在短临(12 h)和短期(1~3 天)预报时段,订正方案表现不佳,在多个时段块(如短期 00~05 UTC)的 RMSE 甚至高于基准,呈现明显的短期退化现象;进入中期后段(7~10 天)后,订正方案相对较好。

(2) 订正方案在短期预报时段的表现高度依赖于评估指标选择。逐小时技巧评估显示,该时段是订正效果最稳定且幅度最大的阶段,几乎所有小时技巧均为正值(0.2 至 0.4),与时段块 RMSE 显示的退化结论完全相反。这种矛盾源于订正方案在短期内虽然在绝大多数小时能提供稳定的小幅改进,但在少数时段(如 01 UTC)和站点组合上潜藏着产生极端负面误差的风险。这些极端退化值被 RMSE 指标的平方效应急剧放大,导致时段块聚合 RMSE 的评估结果不佳。

(3) 订正效果在空间上呈现显著异质性,有效性高度依赖于站点的局地特征。逐站逐时技巧分析证实,订正方案的有效性不具备空间普适性,而是强烈依赖于特定站点,这可能与局地复杂地形的相互作用有关。这种空间异质性在短期(1~3 天)预报时段尤为明显:尽管三站平均改进率接近 0%,但实际包含了在 OBS57985 站温和改进(+10%)与在 OBS57853 站显著退化(-12%)的截然相反表现。随着预报时效延长至中期后段(7~10 天),方案的空间不稳定性急剧增加,热力图呈现马赛克化特征,充斥着极端正值(+51%)与极端负值(-292%)的剧烈波动,表明订正方案在长时效预报中已完全失效。因此,该订正方案的业务应用必须充分考虑站点差异和局地边界条件,不宜采用统一的订正策略。

基金项目

国家自然科学基金(No. 32260294);海南大学科研基金资助项目(KYQD(ZR)-22083)海南省自然科学基金(No. 425RC692)。

参考文献

- [1] 李玉鹏,王东海,尹金方. 蒙西地区不同边界层参数化方案的近地层风场预报效果评估[J]. 中山大学学报: 自然科学版, 2018, 57(4): 16-29.
- [2] 陈浩,张南,杨珊珊,等. 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, 2025, 44(4): 543-553.
- [3] Jiménez, P.A. and Dudhia, J. (2012) Improving the Representation of Resolved and Unresolved Topographic Effects on Surface Wind in the WRF Model. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, **51**, 300-316. <https://doi.org/10.1175/jamc-d-11-084.1>
- [4] Hu, X., Klein, P.M. and Xue, M. (2013) Evaluation of the Updated YSU Planetary Boundary Layer Scheme within WRF for Wind Resource and Air Quality Assessments. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **118**, 10,490-10,505. <https://doi.org/10.1002/jgrd.50823>
- [5] Shin, H.H. and Hong, S. (2011) Intercomparison of Planetary Boundary-Layer Parametrizations in the WRF Model for a Single Day from Cases-99. *Boundary-Layer Meteorology*, **139**, 261-281. <https://doi.org/10.1007/s10546-010-9583-z>
- [6] Maciel-Tiburcio, A., Martínez-Alvarado, O. and Rodríguez-Hernández, O. (2025) Evaluating Bias Correction Methods for Wind Power Estimation Using Numerical Meteorological Models. *Renewable Energy*, **247**, Article 122927. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2025.122927>
- [7] Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., et al. (2020) The ERA5 Global Reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **146**, 1999-2049.

-
- [8] Gandoin, R. and Garza, J. (2024) Underestimation of Strong Wind Speeds Offshore in ERA5: Evidence, Discussion and Correction. *Wind Energy Science*, **9**, 1727-1745. <https://doi.org/10.5194/wes-9-1727-2024>
- [9] Olauson, J. (2018) ERA5: The New Champion of Wind Power Modelling? *Renewable Energy*, **126**, 322-331. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.03.056>
- [10] Stauffer, D.R. and Seaman, N.L. (1990) Use of Four-Dimensional Data Assimilation in a Limited-Area Mesoscale Model. Part I: Experiments with Synoptic-Scale Data. *Monthly Weather Review*, **118**, 1250-1277. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1990\)118<1250:uofdda>2.0.co;2s](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1990)118<1250:uofdda>2.0.co;2s)
- [11] Stauffer, D.R. and Seaman, N.L. (1994) Multiscale Four-Dimensional Data Assimilation. *Journal of Applied Meteorology*, **33**, 416-434. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1994\)033<0416:mfdma>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1994)033<0416:mfdma>2.0.co;2)
- [12] 孟宪贵, 郭俊建, 韩永清. ERA5 再分析数据适用性初步评估[J]. 海洋气象学报, 2018, 38(1): 91-99.
- [13] Hagedorn, R., Hamill, T.M. and Whitaker, J.S. (2008) Probabilistic Forecast Calibration Using ECMWF and GFS Ensemble Reforecasts. Part I: Two-Meter Temperatures. *Monthly Weather Review*, **136**, 2608-2619. <https://doi.org/10.1175/2007mwr2410.1>