

中国地区高时空分辨率地表变量再分析产品风速误差分析

徐静颖¹, 吴晶², 邢益航¹, 杨德石¹, 焦悦¹, 尚明³, 白磊^{1,4*}

¹海南大学生态学院, 海南 海口

²兰州中心气象台, 甘肃 兰州

³河北工程大学地球科学与工程学院, 河北 邯郸

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6月27日; 录用日期: 2025年7月23日; 发布日期: 2025年7月30日

摘要

伴随全球气候变化研究的不断拓展, 当前风速研究普遍采用气候再分析数据作为基础工具, 本文以2009年中国大陆2000余个气象站点的逐小时风速观测值为基础数据, 对1948~2018年间东亚区域地表气象要素的70年再分析产品(Eastern Asian Reanalysis for surface meteorological variables, EAR70)和ERA5数据进行了对比评估, 考察了其在年、月、日和小时尺度上的风速模拟性能与误差分布。年尺度分析表明, 2009年中国风速呈现“中部低、南北高”的格局, 西北、东北及沿海地区风速较高, 部分站点风速超过6 m/s, 具备较大风能开发潜力, 而四川盆地等区域风速偏小; 月尺度分析表明, EAR70在中国东部存在系统性高估偏差, 偏差集中于河北、河南、江苏一带, 尤以冬季最显著, 夏季偏差相对较小; 日统计结果显示, EAR70的日最小风速模拟结果明显优于ERA5, 而在日最大风速上, ERA5模拟值离散程度小, 误差波动较小; 小时尺度分析表明, EAR70在夜间至清晨风速模拟较为准确, 日间风速模拟的稳定性以ERA5为优, ERA5覆盖多数区域, 尤其是中东部地区, 风速模拟精度较高, 较EAR70误差更低。

关键词

风速模拟, EAR70, ERA5, 偏差分析, 多尺度评估

Wind Speed Assessment of Surface Reanalysis Product with High Resolution in China

Jingying Xu¹, Jing Wu², Yihang Xing¹, Deshi Yang¹, Yue Jiao¹, Ming Shang³, Lei Bai^{1,4*}

¹School of Ecology, Hainan University, Hainan Haikou

*通讯作者。

文章引用: 徐静颖, 吴晶, 邢益航, 杨德石, 焦悦, 尚明, 白磊. 中国地区高时空分辨率地表变量再分析产品风速误差分析[J]. 气候变化研究快报, 2025, 14(4): 831-841. DOI: 10.12677/ccrl.2025.144082

²Lanzhou Central Meteorological Observatory, Lanzhou Gansu

³School of Earth Science and Engineering, Hebei University of Engineering, Handan Hebei

⁴Hainan Intelligent Low-Altitude Meteorological Big Data Research Centre, Hainan Haikou

Received: Jun. 27th, 2025; accepted: Jul. 23rd, 2025; published: Jul. 30th, 2025

Abstract

With the continuous expansion of global climate change research, climate reanalysis data have become a fundamental tool in wind speed studies. This study evaluates the wind speed simulation performance and associated error distributions of the 70-year reanalysis product for surface meteorological variables over East Asia (EAR70, 1948~2018) and the ERA5 dataset, using hourly wind speed observations from over 2000 meteorological stations across mainland China in 2009 as reference data. At the annual scale, wind speeds in China exhibit a spatial pattern of “low in the central region and high in the north and south”, with relatively higher wind speeds in the northwest, northeast, and coastal regions. Some stations recorded wind speeds exceeding 6 m/s, indicating significant wind energy potential, whereas regions such as the Sichuan Basin experienced lower wind speeds. Monthly analysis shows a systematic overestimation by EAR70 in eastern China, with the largest positive biases observed in Hebei, Henan, and Jiangsu, especially in winter, while summer exhibits relatively smaller errors. Daily statistics indicate that EAR70 outperforms ERA5 in simulating daily minimum wind speeds, whereas ERA5 provides more consistent results with lower variability in daily maximum wind speed simulations. At the hourly scale, EAR70 demonstrates higher accuracy during nighttime and early morning hours, while ERA5 shows better stability and lower errors in simulating daytime wind speeds. Overall, ERA5 exhibits superior simulation accuracy across most regions, especially in central and eastern China, when compared to EAR70.

Keywords

Wind Speed Simulation, EAR70, ERA5, Deviation Analysis, Multi-Scale Assessment

Copyright © 2025 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

风速是重要的气象要素，风速受大气环流和地表特征的影响，具有很大的不确定性，对其进行准确的描述，对气象、水文、生态、环境和能源等领域的研究具有重要意义。众多研究表明，在过去几十年里，我国年均风速整体处于下降趋势，且强风区风速降幅大于弱风区[1][2]，探讨了20世纪60年代以来我国不同时段的风速变化情况，发现我国1969~2000年风速降幅较大，而2000年以后降幅减小。在空间上，我国西北、东北、华北、长江流域等地区风速也存在不同程度的下降趋势[3]-[6]，在西南地区[7]，1969~2000年平均风速为降低趋势，而2001~2009年为升高趋势。基于站点的观测风速资料由于受到站点分布和观测环境的影响[8]-[10]，其精度具有一定的局限性。数值模式包含一系列参数化方案，可以详细刻画地球大气的物质和能力演变过程。采用数值模式可以很好地模拟出极大风速和急流的风场特征和强度[11][12]，而且高分辨率的数值模式对复杂地形地区和山脉区域的风场具有很好的改进[13][14]，同时可以对更小尺度的风场运动特征进行模拟体现[13]。

风速是评估风能资源及其开发潜力的关键参数, 准确的风速再分析数据对于风能研究和风电场选址具有重要意义。随着全球气候变化的深入研究, 气候再分析数据逐渐成为风速模拟与评估的重要工具。当前, EAR70 和 ERA5 是两个广泛应用的再分析产品, 它们在不同时间尺度和空间范围内的风速模拟表现存在一定差异。为了评估这两个数据集在中国大陆地区的适用性和精度, 本研究从年、月、日和小时四个尺度出发, 分析了 2009 年 EAR70 与 ERA5 风速数据与地面观测数据之间的偏差, 探讨其风速模拟误差的空间分布、季节性变化及时段性特征。通过这项分析, 我们旨在揭示两者在风速模拟中的优势与不足, 提供更为准确的风能资源评估依据, 为未来风能开发和气候研究提供数据支持。

2. 数据与方法

2.1. 数据来源

2.1.1. 东亚区域地表变量再分析

东亚区域地表气象要素再分析 70 年(Eastern Asian Reanalysis for surface meteorological variables in 1948~2018, EAR70)是由北京中科资环信息技术研究研制的长序列高分辨率地表变量再分析产品。该数据使用 WRF 模式作为同化平台, 全球大气再分析数据(1979~2018 年)使用 ERA-Interim 再分析数据, 1958~1980 年使用 JRA55 再分析数据, 1948~1959 使用 NCEP/NCAR 再分析数据作为大气驱动数据和四维同化基础数据。对于陆面过程, 初始场同化遥感积雪深度、ECI 的被动微波土壤湿度产品, 陆面模式土壤温度湿度数据(GLDAS 和 CLDAS)。EAR70 地表变量再分析数据, 时间分辨率 1 小时, 时间覆盖 1948~2018(共计 71 年), 空间分辨率 5 km, 空间覆盖东亚地区。

2.1.2. ERA5 全球大气再分析数据

新一代的再分析数据 ERA5 数据的 2009 年逐小时风速数据进行对比评估, ERA5 是 ECMWF 最新一代的再分析数据集, 相比之前的 ERA-interim, 在时空分辨率上有所提升, 空间分辨率达到 31 km, 集合的技术和方法均有所改进, 同化融合的数据种类和数据量也大大增加, 对气象变量的适用性效果也有所提升[15]-[18]。

2.2. 方法

通过双线性插值方法将 EAR70 和 ERA5 数据插值到站点上进行匹配和分析。计算在小时、日尺度上 EAR70 和站点观测数据的平均误差(Mean Error, ME)、均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE)等指标进行比较。计算公式如式(1)、式(2)式, 在公式中, n 为样本个数, x 为评估数据, o 为要素观测值。

$$ME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - o_i) \quad (1)$$

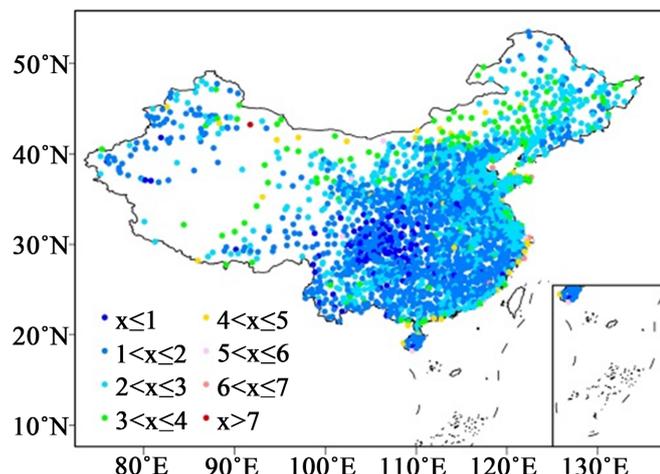
$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - o_i)^2} \quad (2)$$

3. 结果

3.1. 年尺度风速空间格局

图 1 展示了 2009 年中国大陆地区年平均风速的空间分布特征, 风速整体呈“中部低、南北高”的分布格局, 西北与东北地区以及部分海岸带风速显著偏高, 而中南部地区风速普遍较低。年均风速不足 2 m/s 的区域多集中在盆地、丘陵等封闭地形如四川江南地区。2~4 m/s 的区域广泛分布于长江中下游、华南及华北大部分区域, 是国内核心风区分布带; 风速大于 5 m/s 的高值区主要分布于新疆北部、

内蒙古西部及沿海地区，局部区域风速超过 6 m/s，具备优良风能开发潜力。中国大陆风速分布不均，高原边缘、平原开阔地及沿海地带风速相对较高，山地及盆地内部的风速显著降低，风能资源空间分布差异显著。



注：该图基于自然资源部标准地图服务网站下载的审图号为 GS(2016)1549 号的标准地图制作，底图无修改。

Figure 1. The distribution of average wind speed in mainland China in 2009

图 1. 2009 年中国大陆地区平均风速分布情况

3.2. 月尺度偏差时空分布

图 2 展示了 EAR70 再分析数据在中国大陆地区对地面风速的月尺度偏差分布情况。从整体分布来看，EAR70 在中国东部地区普遍存在风速高估现象，偏差最大区域主要集中在河北、河南及江苏地区，表现为全年持续的正偏差，东经 105°E~125°E、北纬 30°N~40°N 之间为高估最显著的核心区域。相比之下，中国西部尤其是青藏高原和西南山区区域偏差相对较小，但局部地区可能因地形复杂存在高频不规则偏差，局地偏差可超过 ± 2.0 m/s。从季节变化角度分析，EAR70 的风速偏差表现出明显的季节性特征：12 月至 2 月期间风速偏差达到全年峰值，东部及华北地区风速显著高估，部分区域偏差值可达 2.5~3.0 m/s；春季观测到的偏差量级比冬季稍低，空间差异格局与冬季雷同；夏季(6 月至 8 月)为全年偏差最小阶段，大部分区域偏差值在 ± 0.5 m/s 之间，特别是华南与西南区域同实测数据高度吻合，显示出 EAR70 在夏季的再分析性能较好；秋季(9 月至 11 月)偏差再次增强，和春季模式相仿，EAR70 在中国东部地区存在系统性高估问题，尤其在冬、春季节最为显著，而夏季的模拟效果相对更佳，区域间差异亦较为明显。

3.3. 日尺度误差空间分布

图 3 展示了 EAR70 与 ERA5 再分析数据在 2009 年日最大与最小风速的平均误差时间序列，两类风速极值推算结果均呈现规律性偏离，且两者差异显著，EAR70 在日最大风速的误差主要分布在 -0.5 ~ 0.5 m/s，稳定性优势明显。而 ERA5 则在多个时段出现持续低估，误差幅度介于 -1.0 至 0 m/s 之间，夏季时段的误差波动尤为剧烈，呈现出较强的季节性不稳定特征，在最小风速方面，两个数据集均展示出连贯的高估倾向，其中 EAR70 误差大多集中在 0.3 ~ 0.8 m/s，稍逊于 ERA5 的 0.5 ~ 1.4 m/s 范围，EAR70 误差曲线的波动频次较 ERA5 折线更低，日际变化显著，影响连续性，EAR70 在最大风速的再现能力上更具稳定性，而且在最小风速估计中相对更为接近观测值。

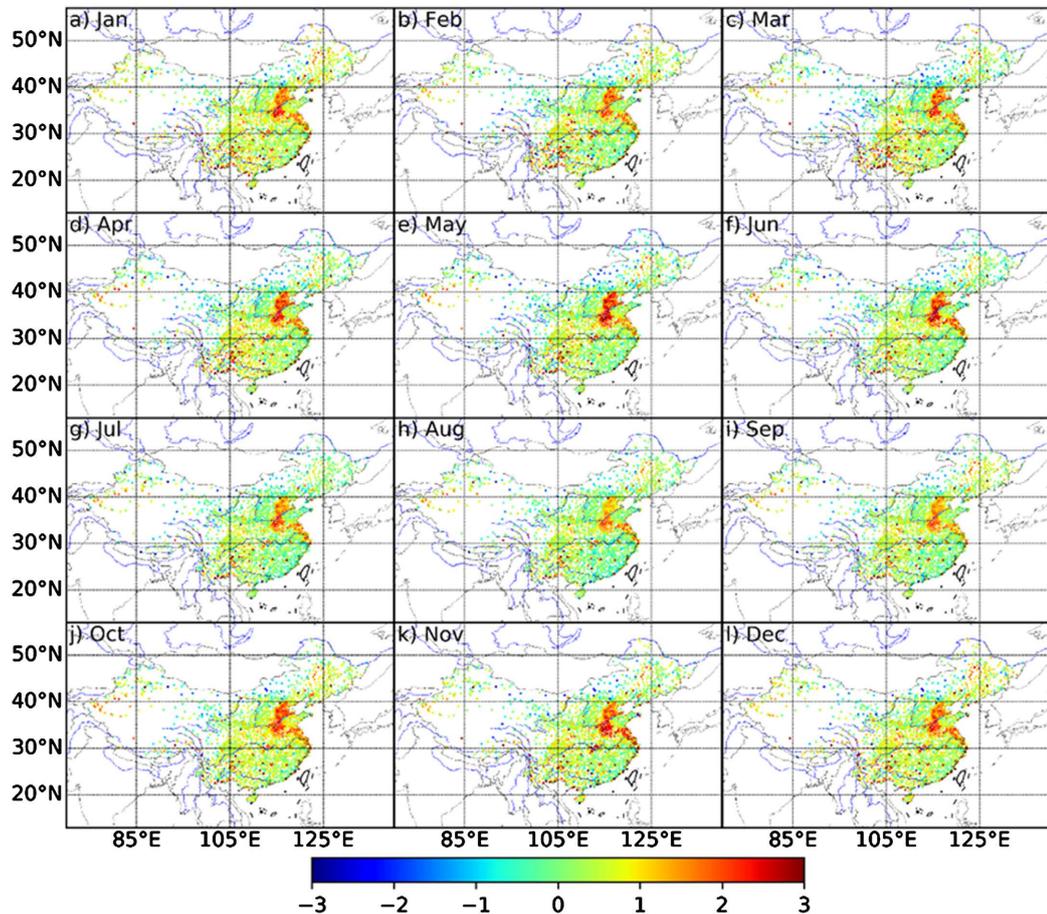


Figure 2. Monthly scale deviation of surface wind speed from EAR70 reanalysis data in mainland China
图 2. 中国大陆地区 EAR70 再分析数据地面风速的月尺度偏差

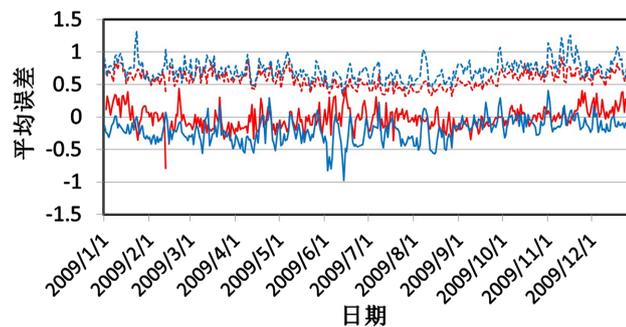
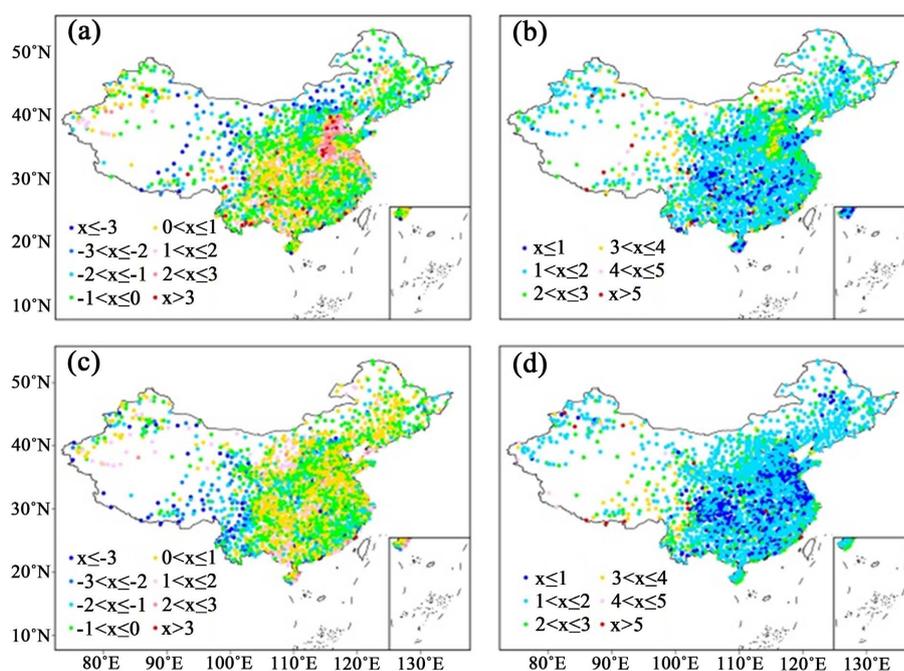


Figure 3. Daily maximum and minimum wind speed average errors. (Note: Red represents EAR70, blue represents ERA5; solid lines represent daily maximum wind speed average errors, and dashed lines represent daily minimum wind speed average errors.)

图 3. 日最大最小风速平均误差(注: 红色为 EAR70, 蓝色为 ERA5; 实线为日最大风速平均误差, 虚线为日最小风速平均误差)

图 4 呈现了 EAR70 与 ERA5 两组再分析数据在中国区域的日最大风速相对于地面观测数据的平均误差与均方根误差的空间分布情况。从平均误差数据分析, EAR70 的平均误差在空间上存在较大的差异性, 表现出明显的区域性高估与低估, 北京周边、冀中南、豫东局部及江苏沿海存在明显高估聚集现象, 平均风速误差约 1~3 米/秒, 局部地区超过 3 m/s, 低估区域主要出现在华北、东北部分地区、西北内陆以

及南疆地区,但点位相对零星,平均误差在 1~3 m/s,局部地区 <-3 m/s。从中国中部到西部,再到东北局部都分布着中等偏差区,说明该区域模拟较为接近实际观测,ERA5 的平均误差展现出更轻微的系统偏差,大部分站点误差集中在 $-1\sim 1$ m/s,高估现象明显减弱,华南部分近岸区域及四川局地偶见分布,ERA5 较 EAR70 在空间分布上更均匀、偏差更小,整体偏差水平较弱,具备更好的系统一致性。再从均方根误差分析,EAR70 的误差分析表明,华北部分地区与江苏沿海存在显著均方根误差集中现象,均方根误差 2~4 m/s,西北、西南及沿海少数站点的误差值超过 5 m/s,内蒙古、甘肃等地均方根误差在 2~4 m/s,均方根误差 <2 m/s 的区域分布广泛,主要出现在西北高原、东北部分区域和中部地区。ERA5 的均方根误差总体低于 EAR70,尤其是华中、华东地区表现更优,平方根误差维持在 2 m/s 内,但在甘肃、西藏一带,均方根误差水平依然较高,证实 ERA5 在此地的模拟精度尚不理想,可能与地形复杂性有关,就风速模拟准确性来看,ERA5 在多数地区胜过 EAR70,误差改善最明显的是中东与东北这两个区域。



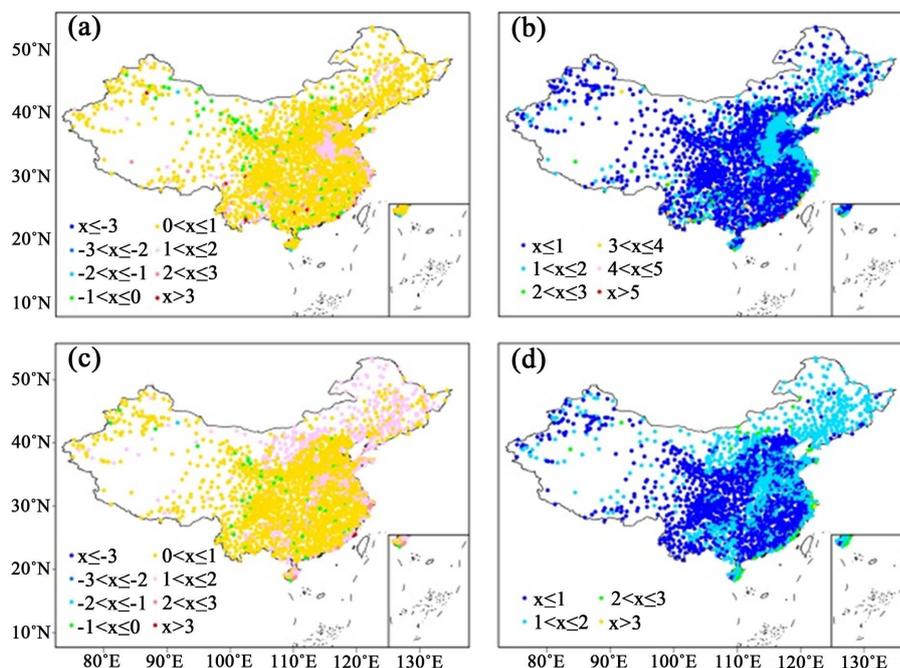
注: 该图基于自然资源部标准地图服务网站下载的审图号为 GS(2016)1549 号的标准地图制作, 底图无修改。

Figure 4. Spatial distribution of daily maximum wind speed average errors and root mean square errors for EAR70 and ERA5. (Note: (a) EAR70 average error; (b) EAR70 root mean square error; (c) ERA5 average error; (d) ERA5 root mean square error.)

图 4. EAR70 和 ERA5 日最大风速平均误差和均方根误差空间分布。(注: (a) EAR70 平均误差; (b) EAR70 均方根误差; (c) ERA5 平均误差; (d) ERA5 均方根误差)

图 5 展示了 EAR70 和 ERA5 两种再分析产品数据在中国地区日最小风速相对于站点观测的平均误差及均方根误差的空间分布特征。首先从平均误差来看,EAR70 数据的平均误差分布整体表现为轻微偏高,图 5(a)显示,平均误差主要集中在 0~1 m/s 范围内,误差较小、分布均衡,不过在河北、河南、江苏及云南等区域平均误差的偏高情况较为明显,平均误差在 1~2 m/s,特别是云南和广东个别站点的平均误差超过 3 m/s,地理分析表明,干旱及高海拔区域(如上述四地)易产生偏低误差,绝大多数地区偏差在 $-1\sim 1$ m/s,体现出 EAR70 对不同地形和气候区的良好适应性,ERA5 在平均误差分布上虽与 EAR70 较为接近,但在内蒙古和东北等区域的偏差显著偏高,平均误差普遍比 EAR70 高出 1 m/s 左右;但是在河北、河南等中部地区,ERA5 在平均误差反而略低于 EAR70。再来看均方根误差分布,图 5(b)中 EAR70 同样展现

出稳定且优秀的表现, 大部分地区误差控制在 1 m/s 以内, 东部平原结合南方区域尤为亮眼, 表现尤为优异, 即便东北与华北部分区域误差稍高, 均方根误差约 1~2 m/s, 但整体仍维持在较低水平, 图 5(d) 呈现的 ERA5 均方根误差明显不如 EAR70, 西北、青藏高原等四区域的误差显著偏高, 均方根误差集中在 1~2 m/s, 普遍较 EAR70 上升 1 m/s 许。EAR70 在日最小风速的模拟中, 表现出较高的精度与一致性, 且在不同区域条件下都显示出更强的环境兼容性与可靠性, 模拟结果优于 ERA5。



注: 该图基于自然资源部标准底图服务网站下载的审图号为 GS(2016)1549 号的标准地图制作, 底图无修改。

Figure 5. Spatial distribution of daily maximum wind speed average errors and root mean square errors for EAR70 and ERA5. (Note: (a) EAR70 average error; (b) EAR70 root mean square error; (c) ERA5 average error; (d) ERA5 root mean square error.)

图 5. EAR70 和 ERA5 日最大风速平均误差和均方根误差空间分布。(注: (a) EAR70 平均误差; (b) EAR70 均方根误差; (c) ERA5 平均误差; (d) ERA5 均方根误差)

3.4. 小时尺度误差演变

图 6 展示了 2009 年逐小时风速的平均误差分布情况, 图 6(a) 为 EAR70 再分析数据, 图 6(b) 反映 ERA5 的误差分布。图 6(a) 显示 EAR70 在全年大部分时间段都存在明显的系统性高估, 以午间至黄昏期间(约 12:00~18:00) 全年多数时间均存在显著的正向偏差, 而夜间和清晨部分时段则表现为轻微的低估, 相比之下图 6(b) 显示的 ERA5 整体误差幅度较小, 颜色梯度更贴近零基准, 说明 ERA5 模拟精度更高。虽然 ERA5 在 6~8 月清晨 06:00~09:00) 显示略微偏低, 但整体误差模式呈现更好的均匀性与稳定性, EAR70 在日间(08:00~18:00) 表现出显著高估现象, 尤其在 3~5 月春季及 9~11 月秋季的日中时分, 误差普遍超出 1.5 m/s。在夜间(00:零点到六点: EAR70 误差趋于减小, 周期性出现偏低波动, 表明其夜间风速模拟结果更贴合实测数据, ERA5 的日误差变化相比之下波动性更小, 中午时段虽也有轻微高估, 但极少超过 1.0 m/s, 清晨及深夜误差多在 0.5 m/s 幅度内上下波动, 仿真精度更高。EAR70 在春秋两季(3~5 月、9~11 月) 误差最为显著, 中午偏差集中于 1.0~1.8 m/s 之间, 表明其在不稳定层结条件下对风速垂直混合的模拟存在较大偏差, 夏季(6~8 月) 和冬季(12~2 月) 偏差略有缓和, 但整体偏差仍呈现系统性偏高, 而 ERA5 则在全年各月表现均较稳定, 仅在夏季 6~7 月 08:00~10:00 间出现局部小范围低估(-0.5 m/s 左右), 其他时段误差基本保持在

-0.5~0.5 m/s 内, 系统偏差的季节性差异微弱。从总体分析, 两种再分析结果均存在明显的系统偏差现象, 且呈现出显著的日变化特征与季节性差异, EAR70 结果从正午开始: 00~23:00 时段存在明显高估现象, 某些时刻误差极值达 1.5 m/s 以上, 而 ERA5 在相同时段误差多在 0~1 m/s, 由此可见 ERA5 的风速模拟精度较 EAR70 更高, 下午至夜间误差明显低于 EAR70, EAR70 误差具有更强的日周期性波动, 而 ERA5 的变化趋势相对平缓, 误差空间分布较为均匀, 有更高的准确性与稳定性, 误差波动较小。

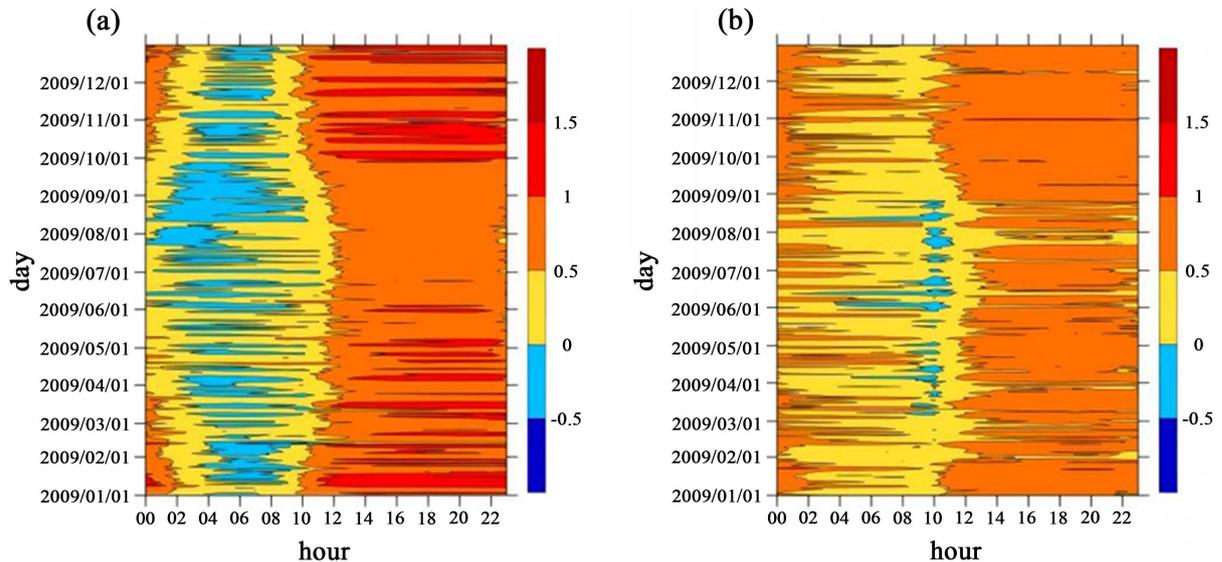


Figure 6. Distribution of average hourly wind speed errors for EAR70 (a) and ERA5 (b) in 2009

图 6. 2009 年逐小时风速 EAR70 (a)和 ERA5 (b)平均误差分布情况

图 7 描绘了风速误差的逐小时平均分布格局, 在 0 时至 6 时阶段, ERA5 的风速模拟结果显示 0.3~0.6 m/s 的平均误差, EAR70 的误差水平更低, 仅为 0.1~0.5 m/s 左右, 风速模拟偏差更小; 其中在 4~6 时, EAR70 误差最低, 接近 0 m/s, 而 ERA5 则维持在约 0.3~0.4 m/s, 此时段两者误差差距最大, 显示出 EAR70 在清晨时段的模拟结果误差更小。但从上午 10 时起, EAR70 的误差快速抬升, 并在 12 时后显著高于 ERA5, 平均误差值维持在 0.7~0.9 m/s 的高位, ERA5 的误差水平较为恒定, 始终维持在 0.6~0.65 m/s 水平, 在午后至傍晚(14~21 时)阶段, EAR70 与 ERA5 的误差差异达 0.15~0.2 m/s, 说明 EAR70 在白天风速模拟方面表现欠佳, 准确性不如 ERA5, EAR70 在夜间到清晨时段风速模拟表现更优, 而 ERA5 在白天具有更好的整体稳定性和较小的平均误差。

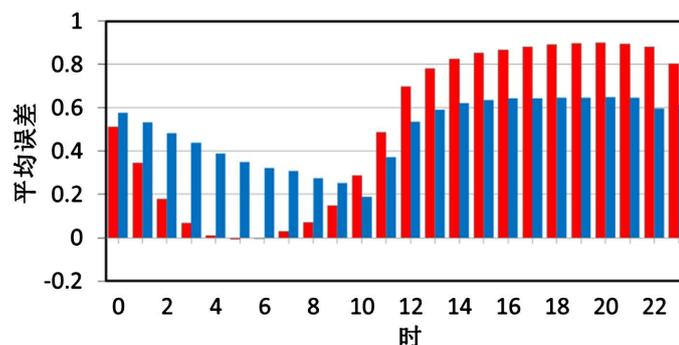
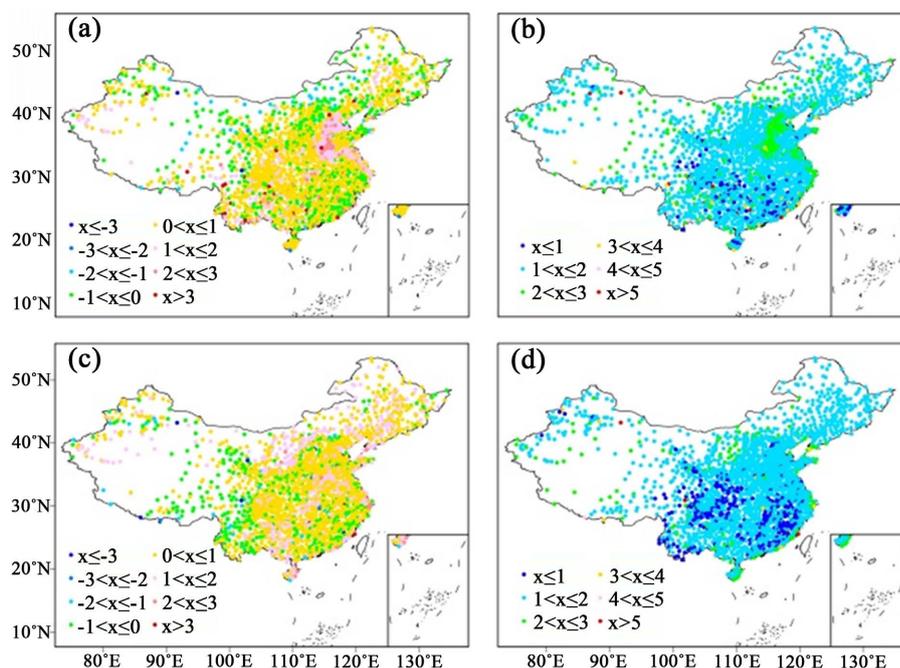


Figure 7. Hourly average wind speed errors (Red represents EAR70, Blue represents ERA5)

图 7. 各小时风速平均误差(红色为 EAR70, 蓝色为 ERA5)

图 8 分别用两组子图(图 8(a), 图 8(b)为 EAR70, 图 8(c), 图 8(d)为 ERA5)展示了中国区域内再分析风速数据与地面观测之间的平均误差和均方根误差空间分布。



注：该图基于自然资源部标准地图服务网站下载的审图号为 GS(2016)1549 号的标准地图制作，底图无修改。

Figure 8. Spatial distribution of average wind speed average errors and root mean square errors for EAR70 and ERA5. (Note: (a) EAR70 average error; (b) EAR70 root mean square error; (c) ERA5 average error; (d) ERA5 root mean square error)

图 8. EAR70 和 ERA5 平均风速平均误差和均方根误差空间分布。(注：(a) EAR70 平均误差；(b) EAR70 均方根误差；(c) ERA5 平均误差；(d) ERA5 均方根误差)

首先从平均误差分布来看，图 8(a)显示了 EAR70 在全国范围内存在明显的系统性高估现象，例如在河北省、河南省和江苏省等地大面积站点出现误差大于 1 m/s，甚至局部地区的平均误差超过了 3 m/s，EAR70 在我国四川、重庆、黑龙江、吉林等地具有较好的模拟性能，绝大多数站点平均误差值处于 -1~1 m/s 范围内，存在轻微的系统偏差。从整体上看，EAR70 误差均值在东、西方向上形成高 - 低对比的空间格局，图 8(c)可见，ERA5 平均误差的空间分布格局较为均匀，全国站点数据显示平均误差多在 1 米每秒上下浮动，东部地区和沿海地区存在轻微高估，虽然有局部地区的平均误差超过 2 m/s，但未见明显区域性极端偏差，表明 ERA5 在全国范围内的平均风速模拟系统偏差较小，对华北/华东/东北等地的模拟表现尤为突出。

再从均方根误差分布来看，图 8(b)表明，河北、河南及山西等省份的均方根误差值整体偏高，尤其在广东、湖南等地局部地区均方根误差超过 5 m/s，但是在西南地区(重庆、贵州、江西等地)的均方根误差值主要分布在 1~2 m/s，模拟结果较为稳定，表现出一定的局地适应性，图 8(d)中显示的 ERA5 均方根误差整体水平更低，各测站均方根误差主要分布在 0~2 m/s 之间，两图结果交叉对比，ERA5 的高误差区域空间分布更紧凑，呈现较低的空间集聚。

ERA5 在中国大陆大部分区域表现出比 EAR70 更小的平均误差与均方根误差，该区域在中东部的模拟表现既精准又稳定，EAR70 对中西部风速的评估结果普遍偏大，并伴随更大的误差波动。

4. 结论

本研究从年、月、日和小时四个尺度出发，分析了 2009 年 EAR70 与 ERA5 风速数据与地面观测数

据之间的偏差, 探讨其风速模拟误差的空间分布、季节性变化及时段性特征, 可得到以下结论:

1) 2009 年的年尺度观测数据显示, 中国大陆年均风速呈中部低南北高的带状分布, 西北东北沿海三区域的风速明显偏大, 局部超过 6 m/s, 风能资源禀赋突出; 以四川盆地为代表的地区风速不高, 长江中下游、华南和华北风速为 2~4 m/s, 形成主要风速带, 沿海、平原开阔区域与高原边缘的风速明显偏高, 风能资源呈现明显空间分异。

2) 逐月数据分析得出, EAR70 对中国东部风速的模拟值整体偏高, 最大正偏差集中体现在河北、河南及江苏境内, 正偏差现象贯穿全年, 数据分析表明, 105°E~125°E 与 30°N~40°N 是高估最明显的核心地理单元, 在青藏高原及西南山区观测到的偏差值普遍偏低, 部分复杂地形区存在非标准化偏差, 季节差异分析表明, 偏差最大值见于冬季, 夏季的误差最小, 说明 EAR70 夏季模拟效果更优, EAR70 在中东部存在明显的偏差现象, 冬春两季表现最为明显, 夏季误差较小。

3) 日尺度分析数据显示, EAR70 的日风速极值误差维持在较低水平, 日偏差不超过 0.5 m/s, 而 ERA5 输出结果在多个时段风速估值不足, 夏季误差范围明显扩大, 从日最小风速数据看, EAR70 的误差数据落在 0.3~0.8 m/s, 显著优于 ERA5 的 0.5~1.4 m/s 误差区间, 具有更小的误差范围及更强的地形适应表现。空间格局分析可见, 东部地区存在明显的 EAR70 误差, 华北主要城市群误差较大, 然而整体误差小于 ERA5, 多数地理区域中 ERA5 的风速模拟结果高度一致, 中东部误差最低, ERA5 数据与 EAR70 在误差分布上呈现较高一致性, 不过蒙东及东北部误差明显偏高, EAR70 的对应误差值普遍比其低 1 m/s。

4) 小时尺度的分析证实, 预报初始 4~6 小时期间, EAR70 的风速估算较为可靠, 最大误差绝对值仅为 0.5 m/s, 风速模拟最低误差仅 0.1~0.5 m/s, 较 ERA5 误差更低, 预报进程至 10 小时阶段, EAR70 误差出现显著上升, 12 小时预报后的误差尤为突出, 介于 0.7~0.9 m/s, ERA5 误差始终维持在较平稳水平, 始终处于 0.6~0.65 m/s 的水平, 夜间时段的起报阶段, EAR70 模拟效果更好, 白天预报时段中, ERA5 的中后期误差显著降低, 模式输出更少波动, 聚焦于中国中东部的核心地带, ERA5 展现出更低的系统偏差和更优的模拟精度, 综合表现超过 EAR70。

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] Xu, M., Chang, C., Fu, C., Qi, Y., Robock, A., Robinson, D., *et al.* (2006) Steady Decline of East Asian Monsoon Winds, 1969-2000: Evidence from Direct Ground Measurements of Wind Speed. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **111**, 906-910. <https://doi.org/10.1029/2006jd007337>
- [2] Guo, H., Xu, M. and Hu, Q. (2011) Changes in Near-Surface Wind Speed in China: 1969-2005. *International Journal of Climatology*, **31**, 349-358. <https://doi.org/10.1002/joc.2091>
- [3] 何毅, 杨太保, 陈杰, 等. 1960-2013 年南北疆风速变化特征分析[J]. 干旱区地理, 2015, 38(2): 249-259.
- [4] 金巍, 任国玉, 曲岩, 等. 1971-2010 年东北三省平均地面风速变化[J]. 干旱区研究, 2012, 29(4): 648-653.
- [5] 刘苏峡, 邱建秀, 莫兴国. 华北平原 1951 年至 2006 年风速变化特征分析[J]. 资源科学, 2019, 31(9): 1486-1492.
- [6] 李悦佳, 贺新光, 卢希安, 等. 1960-2015 年长江流域风速的时空变化特征[J]. 热带地理, 2018, 38(5): 660-667.
- [7] 张志斌, 杨莹, 张小平, 等. 我国西南地区风速变化及其影响因素[J]. 生态学报, 2014, 34(2): 471-481.
- [8] 吴利红, 骆月珍, 孙莉莉. 浙江省近 34 年年平均风速序列均一性检验研究[J]. 气象科技 2008(5): 661-665.
- [9] 唐晓波, 严启兴, 杨丽丽. 恶劣探测环境对风速传感器启动风速的影响[J]. 气象科技, 2016, 44(2): 341-343.
- [10] 田东霞, 郭建侠, 陈挺, 等. 障碍物对风速风向影响的观测试验[J]. 气象科技, 2014, 42(5): 881-887.
- [11] Davis, C., Wang, W., Dudhia, J. and Torn, R. (2010) Does Increased Horizontal Resolution Improve Hurricane Wind

-
- Forecasts? *Weather and Forecasting*, **25**, 1826-1841. <https://doi.org/10.1175/2010waf2222423.1>
- [12] Storm, B., Dudhia, J., Basu, S., Swift, A. and Giammanco, I. (2008) Evaluation of the Weather Research and Forecasting Model on Forecasting Low-Level Jets: Implications for Wind Energy. *Wind Energy*, **12**, 81-90. <https://doi.org/10.1002/we.288>
- [13] Rife, D.L. and Davis, C.A. (2005) Verification of Temporal Variations in Mesoscale Numerical Wind Forecasts. *Monthly Weather Review*, **133**, 3368-3381. <https://doi.org/10.1175/mwr3052.1>
- [14] Liu, Y., Warner, T., Liu, Y., Vincent, C., Wu, W., Mahoney, B., *et al.* (2011) Simultaneous Nested Modeling from the Synoptic Scale to the LES Scale for Wind Energy Applications. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, **99**, 308-319. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2011.01.013>
- [15] 朱景, 袁慧珍. ERA 再分析陆面温度资料在浙江省的适用性[J]. 气象科技, 2019, 47(2): 289-298.
- [16] 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.
- [17] Belmonte Rivas, M. and Stoffelen, A. (2019) Characterizing Era-Interim and ERA5 Surface Wind Biases Using ASCAT. *Ocean Science*, **15**, 831-852. <https://doi.org/10.5194/os-15-831-2019>
- [18] 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>