

台湾海峡区域格点分析风场极大值订正技术研究

冯志明^{1,2,3,4} 潘宁^{1,2*} 高聪晖^{1,2,4}

1 福建省灾害天气重点实验室、中国气象局海峡灾害天气重点开放实验室, 福州 350008

2 福建省气象台, 福州 350008

3 连江县气象局, 福州 350500

4 平潭台湾海峡海洋气象福建省野外科学观测研究站, 平潭 350400

摘要 中国气象局陆面数据同化系统 (CLDAS) 和高分辨率 CLDAS (HRCLDAS) 实况格点分析资料弥补了海面风观测稀疏的不足, 然而其风速极大值与实际存在偏差, 例如在狭管效应显著的台湾海峡区域普遍存在低估现象, 其中 CLDAS 低估更严重, 不能满足气象服务需求。因此本文提出一种基于地面站点观测风速二次融合的格点风场极大值订正技术, 即采用反距离权重法将站点风速极大值观测周围一定影响半径区域内的站点风速观测插值到区域内的风场格点上, 并综合考虑区域内风场误差和空间平滑程度以确定最优影响半径。利用 2021-2023 年 CLDAS 和 HRCLDAS 数据开展台湾海峡区域分区域 (闽东、闽中及闽南渔场) 风场极大值订正试验, 结果表明: 风场极大值订正技术能有效改进 CLDAS 和 HRCLDAS 对台湾海峡区域格点风速极大值低估情况, 且 HRCLDAS 改进效果更优。HRCLDAS 相较 CLDAS 出现小值最优影响半径频率增加。极值订正后, CLDAS 和 HRCLDAS 逐小时平均绝对误差 (MAE) 降低率大多达到 70-85% 和 90-95%; 不同月份 MAE 降低率均超过 60%, 其中 10 月至次年 1 月订正效果最优, MAE 降低率分别超过 85% 和 90%; 订正后误差空间分布与海岸线平行, 自西向东减少, 位于福建沿海及台湾海峡区域浮标站点区域 MAE 极值订正后降低至 1 m s^{-1} 以下。2305 号台风“杜苏芮”和 2023 年 1 月 23-25 日典型冷空气大风过程的评估结果进一步表明, 风场极大值订正技术对不同类别的大风过程均有效。

关键词 台湾海峡区域 极值风速 订正方法 CLDAS 最优影响半径

文章编号: 2024079B

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2506.24079

收稿日期: 2025-06-13 **网络预出版日期**

作者简介 冯志明, 男, 1993 年生, 工程师, 主要从事天气预报技术方法研究, Email: fzm-marco@163.com

通讯作者 潘宁, 正高级工程师, 主要从事天气预报技术方法研究, Email: pancathy@163.com

资助项目 国家重点研发计划项目 2022YFC3004205, 福建省气象局青年科技专项项目 2024Q01, 福建省气象局研究型业务类科研专项项目 2024YJ03

Funded by National Key Research Project of China (Grant 2022YFC3004205), Youth Science and Technology Special Project of Fujian Meteorological Bureau (Grant 2024Q01), Research Special Project for Research - Oriented Operations of Fujian Meteorological Bureau (Grant 2024YJ03)

Research on Correction Techniques for the Maximum Wind Speeds of the Gridded Analysis Data in the Taiwan Strait Region

FENG Zhiming^{1,2,3,4}, PAN Ning^{1,2}, Gao Conghui^{1,2,4}

1 Fujian Key Laboratory of Severe Weather, and Key Laboratory of Straits Severe Weather, China Meteorological Administration, Fuzhou 350008

2 Fujian Meteorological Observatory, Fuzhou 350008

3 Lianjiang Meteorological Bureau, Fuzhou 350500

4 Pingtan Marine Meteorological Observation and Research Station for the Taiwan Strait of Fujian Province, Pingtan 350400

Abstract The China Meteorological Administration Land Surface Data Assimilation System (CLDAS) and the High Resolution CLDAS (HRCLDAS) provide gridded analysis datasets that compensate for the sparsity of in situ wind observations over sea. However, bias exists between their maximum wind speed estimates and observations, particularly in the Taiwan Strait region where the venturi effect is pronounced, leading to underestimations of maximum wind speeds. Notably, CLDAS exhibits a more severe underestimation, which may not satisfy the meteorological service requirements. To address the issue, this paper proposes a maximum wind speed correcting method based on the doubled fusion of wind speed in situ observations from automatic weather stations and buoy stations. It employs the inverse distance weighting (IDW) algorithm to interpolate the wind speed observations of stations to the grid points within the region centered by the location of the maximum speed, which optimal influence radius is determined by considering both wind field errors and spatial smoothness. By using this method, an experiment was conducted to correct the maximum wind speeds of the CLDAS and HRCLDAS in different sub - regions (Mindong, Minzhong and Minnan Fishing Grounds) of the Taiwan Strait region during 2021-2023. The results indicate that the correction method can effectively mitigates the underestimations of maximum wind speeds of gridded analysis data in the Taiwan Strait region for both CLDAS and HRCLDAS, with HRCLDAS showing a more significant improvement. Compared with CLDAS, the frequency of the optimal influence radius for small values increases in HRCLDAS. After correction, the hourly mean absolute errors (MAEs) for the CLDAS and HRCLDAS are mostly decreased by 70-85% and 90-95%. The reduction rates of MAEs exceed 60% in different months, especially exceeding 85% and 90% for CLDAS and HRCLDAS from October to January, respectively. Additionally, the spatial distribution of MAEs is parallel to the coastline, decreasing from west to east, with MAEs near the buoys along the Fujian coast reduced to below 1 m s^{-1} after correction. Furthermore, it is demonstrated that the correcting method is effective for different kinds of strong wind caused by Typhoon Doksuri (2023) and a typical cold tide occurred from January 23rd to 25th, 2023.

keywords Taiwan Strait region, Maximum wind speed, Correction technique, CLDAS, Optimal influence radius

1 引言

海面风作为海洋气象服务的重要要素之一，是造成海上大风、风暴潮、巨浪等海洋气象灾害的主要原因。海面风的有效监测预警与渔业生产、航海运输、海事安全和全球船舶气象导航应用等行业息息相关。目前海面风的常规监测主要依靠气象观测站、浮标站、船舶等，具有准确度高、时效性强等特点，但是由于沿岸测站分布不均匀，海上站点稀疏，无法获得海面风场的整体分布。近年来，随着更加精细化的海洋气象服务发展，常规气象观测已难以满足市场需求，与此同时，数值模式、卫星遥感、资料同化水平飞速发展，高时空分辨率的多源数据融合和再分析风场格点产品应运而生，弥补了海面风现场观测稀疏的不足。

国外的融合再分析技术起步较早，目前比较成熟的再分析产品有欧洲中期天气预报中心（ECMWF）的第5代全球大气再分析数据（ERA5）（Hersbach., et al., 2020），美国大气环境中心（NCEP）/国家大气管理局（NCAR）的再分析数据（NCEP/NCAR R1）（Kanamitsu., et al., 1997）以及日本的55年再分析数据（JRA55）（Kobayashi., et al., 2014）等。中国的融合再分析技术起步较晚，但也已取得长足的进步。中国气象局于2014年建成业务化的亚洲区域中国气象局陆面数据同化系统（CMA Land Data Assimilation System, CLDAS）（师春香等，2019）。相较于再分析资料，CLDAS产品侧重于同化地面观测要素，进而获得更为精确的陆面相关变量。其驱动场中的地面10米高度（10m）风场为融合风场，该数据集融合地面、卫星等多种观测资料，采用多重网格变分同化（STMAS）、最优插值（OI）、地形校正等技术研制而成，空间分辨率为5km。2016年初，国家气象信息中心开展中国区域1km分辨率陆面数据同化系统研制工作，并于1年后建成CMA高分辨率陆面数据同化系统（HRCLDAS），其中10m风速的核心融合算法部分沿用了CLDAS系统的业务算法（韩帅等，2018）。Jiang等（2021）对比了HRCLDAS与ERA5风场在中国海南岛及南海区域的适用性，发现HRCLDAS误差更小。渠鸿宇等（2022）基于中国近海31个浮标站，对比HRCLDAS与ERA5海面风场在我国近海的准确度，发现两者均具有较高的可信度，其中HRCLDAS对于2008号台风“巴威”过程大风峰值强度表现更优。这在一定程度上说明了我国观测格点分析风场资料的可靠性，但是我国海域辽阔，在一些地理环境复杂的海区可信度如何还需要进一步验证。

台湾海峡位于中国东南部海域，地理位置独特，狭管效应明显，具有大风日数多、风速强等特点。台湾海峡致灾大风风速分布具有明显季节性特征，出现概率呈双峰型分布，峰值在10月和1月，谷值在5月（夏丽花等，2017）。除了冷空气和温带气旋外，台湾海峡极端大风常由台风造成。林小红等（2019）利用1987–2016年福建沿海台风大风资料统计发现台湾海峡西岸台风大风以7–9级为主，极端大风在10–14级，台湾海峡西岸中部受台风大风影响最严重。CLDAS和HRCLDAS等多源数据融合的实况格点分析产品基于全局最

优的同化融合技术，因而这些产品的局地风速极大值可能被平滑，检验表明台湾海峡区域风速极大值确实存在低估现象。由于气象极值在气象服务中具有重要性，因此有必要对风速实况格点分析场的极大值进行订正，以更好地满足气象服务保障需求。本研究利用2021-2023年CLDAS和HRCLDAS及台湾海峡区域站点观测等风速数据，筛选站点风速极大值最优影响半径，建立二次融合站点风速观测的格点分析场风速极大值订正技术。

2 资料与方法

2.1 风场资料

本研究中所用到的资料包括：

(1) 2021-2023年逐小时的福建沿海岸基和岛基自动站及台湾海峡海上浮标风速观测，在剔除掉缺测数据后从中筛选出匹配福建沿海和台湾海峡大风检验站点数据，每个时次约530个站点数据。由于不同测站高度不同，本文中采用幂指数公式对不同高度观测进行订正标准化到10m高度，再进行风速融合。具体公式如下：

$$V_2 = V_1 \left[\frac{Z_2}{Z_1} \right]^\alpha$$

式中， V_2 为高度 Z_2 处的风速（m/s）； V_1 为高度 Z_1 处的风速（m/s）， α 即表征风随高度变化的风切变指数，这里的高度采用海平面以上高度。

(2) 2021-2023年逐小时的CLDAS和HRCLDAS地面风场格点分析产品数据，覆盖亚洲区域（ $0^\circ \sim 65^\circ \text{N}$ ， $60^\circ \sim 160^\circ \text{E}$ ），本研究使用CLDAS和HRCLDAS产品的台湾海峡区域数据。

2.2 极大值订正算法

本研究提出的格点风场极大值订正算法以每个时次风速观测极大值站点为原点，选取其周围一定影响半径 R （以经纬度为间隔）的圆形区域，将该区域内所有站点观测风速插值到相同范围的分析格点上，替代原先格点的风速，进行二次融合，从而订正格点风速极大值。考虑到距离风速极大值站点越近的格点实际风速可能越大，因此本研究选取的二次融合方法为反距离权重插值法，其中权重与距离的倒数成反比。风场极大值订正算法中影响半径 R 是关键参数，它能控制在风速观测极大值周围选取多少站点的观测风速用于订正格点分析场，因此该算法的核心在于寻找最优影响半径，使得订正后的格点风速极大值更接近站点观测，同时影响半径内格点风场的整体性能没有降低，且空间过渡合理，影响区域边界无明显突变。此外，由于海陆粗糙度差异，陆上风速随离海岸距离增加而迅速减小，因此为防止订正后影响区域内的陆上格点风速出现高估，我们设定了订正的方向性，利用

海陆边界数据信息区分陆地和海洋区域格点，订正时保持影响区域内的陆地格点风速不变。

由于台湾海峡区域较大，可能存在多个风速极大值，因此根据台湾海峡区域海区区划，将台湾海峡区域划分为闽东渔场、闽中渔场及闽南渔场三块区域(图 2a)，分别对其风速极大值计算最优影响半径订正后再进行融合。同时为了防止区域内有效站点数过少造成订正代表性不足情况出现，需要满足分区内有效站点数至少为 3 个时才进行订正，否则保持原格点风场不变。

2.3 最优影响半径评估指标

风场极大值订正算法的影响半径在 0.3° 至 0.8° 之间取值，间隔 0.1° 。对每个影响半径进行风场极大值订正，然后用均方根误差 (RMSE) 和边界圆环梯度 (gradient) 两项定量指标综合评估不同影响半径的订正风场以确定最优影响半径。

(1) 均方根误差 (RMSE) 指标

针对影响区域，将订正后格点分析场的风速双线性插值到观测站点上，计算其与观测站点风速的 RMSE，用于定量评估影响区域内订正后格点风速相对观测的误差，计算公式如下：

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (F_i - O_i)^2} \quad (1)$$

其中 O_i 为影响区域内第 i 个站点的观测风速， F_i 为订正后格点分析场双线性插值到该观测站点上的风速， N 为影响区域内的观测站点总数。

(2) 边界圆环梯度 (gradient) 指标

我们定义边界圆环梯度 (gradient) 指标以评估订正后格点风场影响区域边界过渡的平滑程度。以风速极大值站点为原点，将圆环分为 4 个象限，则 gradient 为 4 个象限内外圆环 (图 1) 的平均绝对误差，计算公式如下：

$$gradient = \frac{(|N1 - W1| + |N2 - W2| + |N3 - W3| + |N4 - W4|)}{4} \quad (2)$$

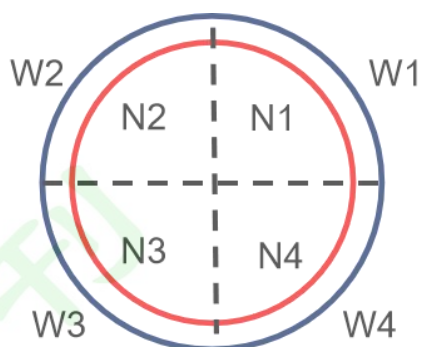


图 1 边界圆环梯度示意图（其中红色圈为极值订正影响区域最外圈，即影响区域边界，而蓝色圈为原始格点分析场最邻近影响区域边界的最内圈）

Fig1. Schematic diagram of gradient of boundary circle (the red circle is the outermost circle of the maximum wind correction influence area, that is, the boundary of the influence area, and the blue circle is the innermost circle of the original gridded analysis data nearest to the boundary of the influence area)

由于我们的订正方向性设计，即陆地格点在订正时保持不变，因此若某个象限订正区域涉及陆地，则涉及区域的格点在计算该象限边界圆环梯度时不计入。

Gradient 的意义是边界圆环梯度越小，订正后风场空间过渡越自然，订正效果越好。

（3）综合评估

确定最优影响半径时，将不同影响半径对应的 RMSE 和 gradient 按照从小到大排序，取两者排序之和达最小值时所对应的影响半径为最优影响半径。当有多个影响半径对应的排序之和并列最小时，以影响半径最小者为最优影响半径，使订正算法对原始风场影响最小。

2.4 算法应用示例

图 2 是风场极大值订正算法的一个应用示范。图中给出了 2023 年 1 月 5 日 05 时站点观测、CLDAS 原始格点风场、CLDAS 订正场及不同区域（闽东、闽中及闽南渔场）相应的 RMSE 和 gradient 评估结果。可以看到，CLDAS 对闽东、闽中及闽南渔场多个风速极大值均存在低估情况（图 2b）。根据 RMSE 和 gradient 按照从小到大排序，取两者排序之和达最小值时所对应的影响半径为最优影响半径的原则，闽东、闽中及闽南渔场在本例中对应的最优影响半径分别为 0.8° 、 0.6° 和 0.7° ，分别进行极值订正再二次融合，订正后的 CLDAS 格点场（图 2c）对闽东渔场西南部、闽中渔场中部以及闽南渔场西部的极大值均

有体现，不同程度改善了 CLDAS 对海峡区域极大风速的低估情况。

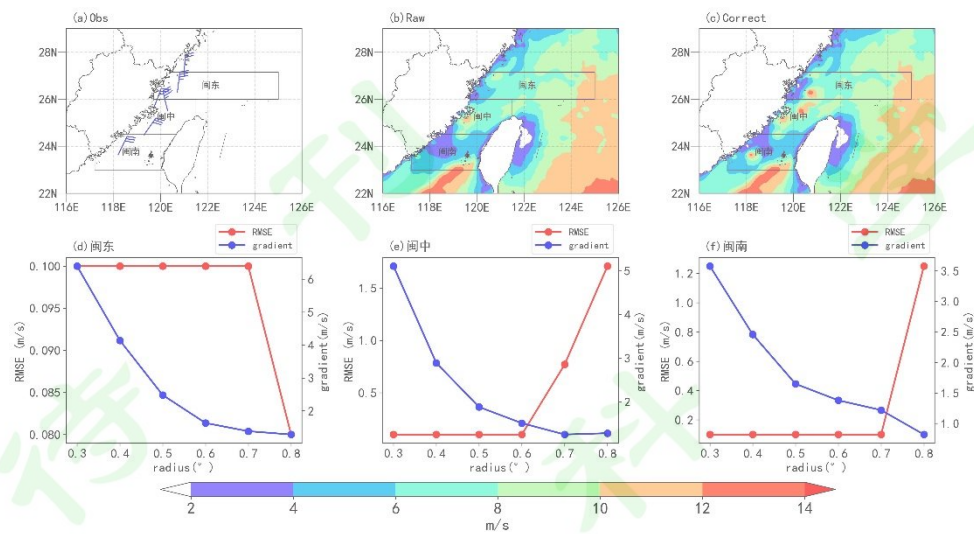


图 2 2023 年 1 月 5 日 05 时 (a) 站点观测 (风速 $>10\text{ m s}^{-1}$) (b) CLDAS 原始风场 (c) CLDAS 订正风场及 (d) 闽东渔场 (e) 闽中渔场及 (f) 闽南渔场对应的 RMSE (红线) 及 gradient (蓝线)

Fig2. (a) Observed wind fields (wind speed $> 10\text{ m s}^{-1}$), (b) CLDAS wind fields, (c) corrected CLDAS and RMSE (red line) and gradient (blue line) corresponding to (d) Mindong (e) Minzhong and (f) Minnan Fishing Ground at 05:00 on January 5th, 2023.

3 结果分析

应用极大值订算法，对 2021-2023 年 CLDAS 和 HRCLDAS 在台湾海峡区域的逐时格点分析风场的极大值进行订正试验，并利用陆基自动站和海上浮标站的风速观测分析及检验试验结果。下面给出台湾海峡区域三个渔场（闽东、闽中和闽南渔场）极大值订正的统计结果。

3.1 最优影响半径分布

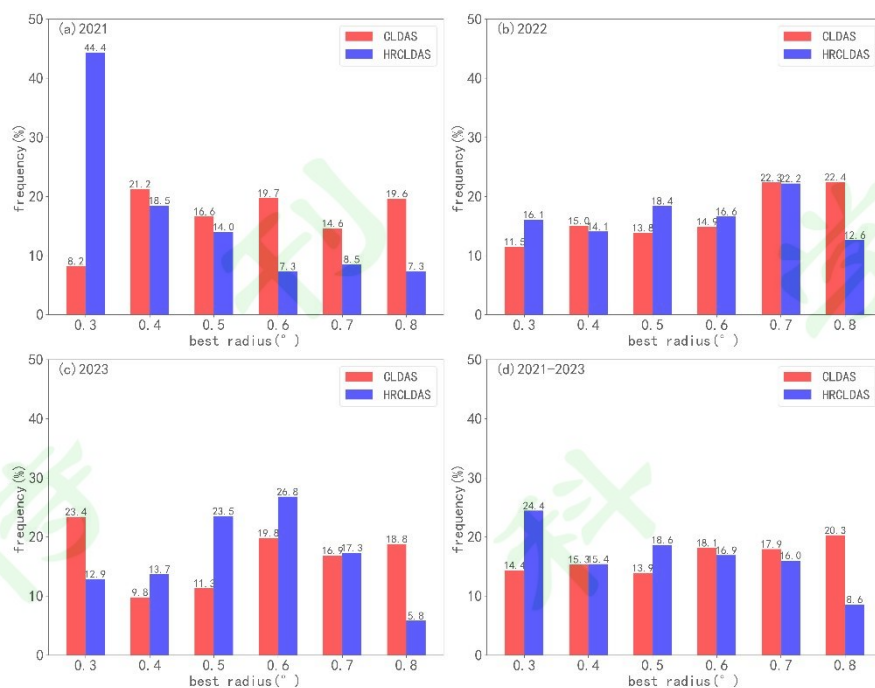


图3 (a) 2021年 (b) 2022年 (c) 2023年及 (d) 2021-2023年 CLDAS 和 HRCLDAS 风场极大值订正的最优影响半径频率分布

Fig3. Frequency distribution of the optimal influence radii for the correction of the maximum wind speeds of CLDAS and HRCLDAS in (a) 2021, (b) 2022, (c) 2023 and (d) 2021-2023.

受海湾地形、季节、风速等因素影响，不同时次格点风场极大值订正的最优影响半径可能不同。图3给出了2021-2023年逐年及三年平均的CLDAS和HRCLDAS最优影响半径频率分布。可以看到，不同年份最优影响半径出现频率差异较大，除了2021年HRCLDAS最优影响半径 0.3° 出现频率达到44.4%（图3a）较为显著外，其余年份最优影响半径出现频率都在30%以下。2021-2023年平均最优影响半径频率分布上，CLDAS高影响半径（ $0.6\sim 0.8^{\circ}$ ）出现频率整体高于低影响半径（ $0.3\sim 0.5^{\circ}$ ），其中出现频率最高的最优影响半径为 0.8° ，达到20.3%。而HRCLDAS出现频率最高影响半径为 0.3° ，达到24.4%，出现频率最低为 0.8° ，达到8.6%，影响半径越大出现频率相对越低，与CLDAS总体趋势相反，这可能与HRCLDAS格点分辨率高于CLDAS有关。

3.2 极值订正效果

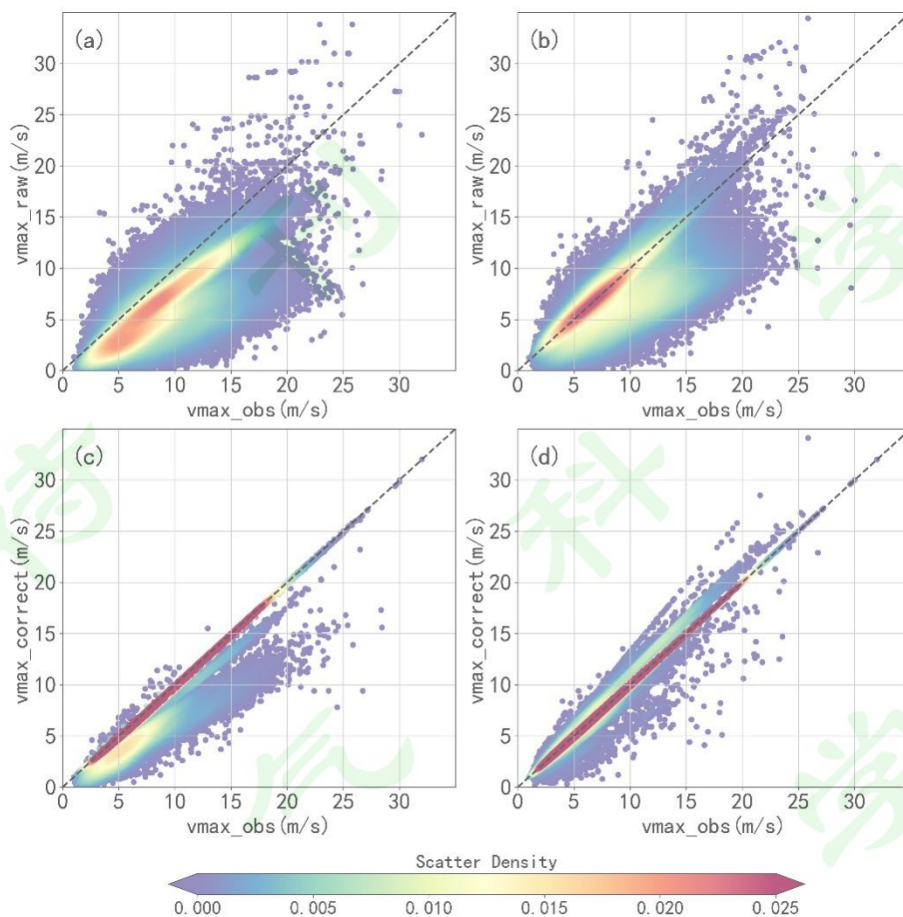


图 4 2021-2023 年格点风场 (a-b) 极值订正前, (c-d) 极值订正后与观测风速极大值对比散点密度图 (第一列为 CLDAS, 第二列为 HRCLDAS)

Fig4. Scatter density plots comparing the maximum observed wind speeds with the maximum gridded wind speeds (a-b) before correction and (c-d) after correction during 2021-2023 (The first column represents CLDAS, and the second column represents HRCLDAS).

图 4 给出了 2021-2023 年极值订正前后 CLDAS 和 HRCLDAS 与观测风速极大值对比散点密度图。在极值订正前, 无论是 CLDAS 还是 HRCLDAS, 散点都主要位于对角线下方区域 (图 4a、b), 即对观测风速极大值都存在低估。其中 CLDAS 偏离对角线的散点个数更多, 超过 0.01 的散点密度中心都位于对角线下方, 存在显著低估 (图 4a)。HRCLDAS 散点密度中心虽然也分布在对角线下方, 但是散点分布更加集中, 中心最大密度超过 0.025, 且更加贴近对角线位置 (图 4b), 对观测风速极大值的低估情况好于 CLDAS。

经过极值订正，CLDAS 不同最优影响半径下散点密度超过 0.025 的大值中心主要位于
 对角线附近区域，对于观测极大值的低估情况有不同程度的改善（图 4c）。但是对于偏离
 对角线区域过远，即对于部分超过 25m/s 的观测极端大值低估的情况仍存在改进空间（图
 4c）。HRCLDAS 订正后不同最优影响半径下散点密度大值中心基本都位于对角线上，位
 于对角线下方的离散点个数也少于 CLDAS，订正效果更优（图 4d）。

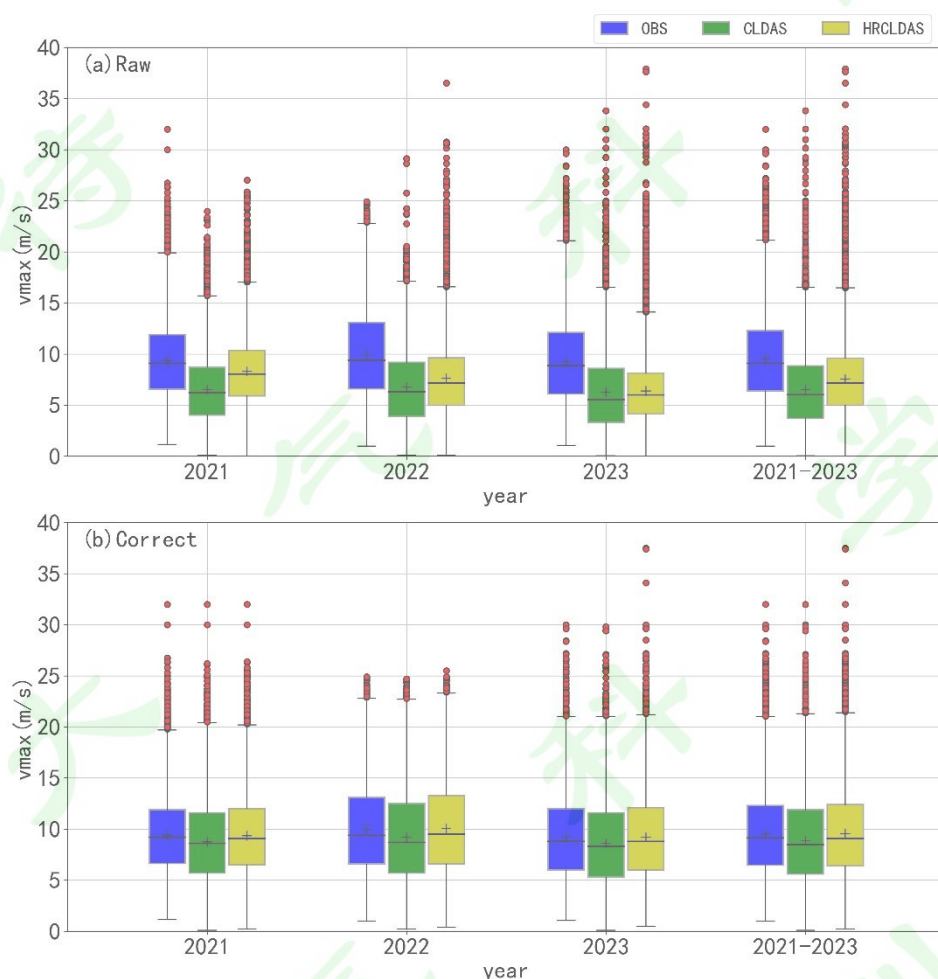


图 5 2021-2023 年 CLDAS 和 HRCLDAS 格点风场 (a) 极值订正前，(b) 极值订正后与观测风速极大值
 对比箱线图

Fig5. Boxplots of comparison between the maximum observed wind speeds and the maximum
 gridded wind speeds of CLDAS and HRCLDAS (a) before correction and (b) after correction
 during 2021-2023

从极值订正前 2021-2023 年箱线图的上四分位数、中位数及平均值分布来看（图
 5a），不同年份 CLDAS 和 HRCLDAS 在极值订正前风速极大值均小于观测风速极大值，

其中 CLDAS 在 2021-2023 年上四分位数均小于观测风速极大值的中位数，2021-2023 年平均风速低于观测风速极大值约 3 m s^{-1} ，对于观测风速极大值低估显著，而 HRCLDAS 上四分位数接近观测风速极大值的中位数，2021-2023 年平均风速低于观测风速极大值约 2 m s^{-1} 。

经过极值订正，CLDAS 和 HRCLDAS 风速极大值对应的上下四分位数、中位数及平均值（图 5b）均明显提高，其中 HRCLDAS 相比 CLDAS 在不同年份均更加接近观测，对风速极大值低估的改善效果更显著。

3.3 误差时空分布

将不同时次极值订正前后最优影响半径区域内的格点风场双线性插值到观测风速极大值站点上，用平均绝对误差（MAE）和平均绝对误差降低率（MAE_m）评估订正前后格点风速极大值的误差变化，具体计算公式如下：

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |F_i - O_i| \quad (3)$$

$$MAE_m = \frac{MAE_{\text{订正前}} - MAE_{\text{订正后}}}{MAE_{\text{订正前}}} \times 100\% \quad (4)$$

其中， O_i 为某个小时 i 对应的最优影响半径区域内的观测站点风速极大值， F_i 为订正前后格点分析场风速双线性插值到该观测风速极大值站点上的值， N 为统计时段内小时总数。

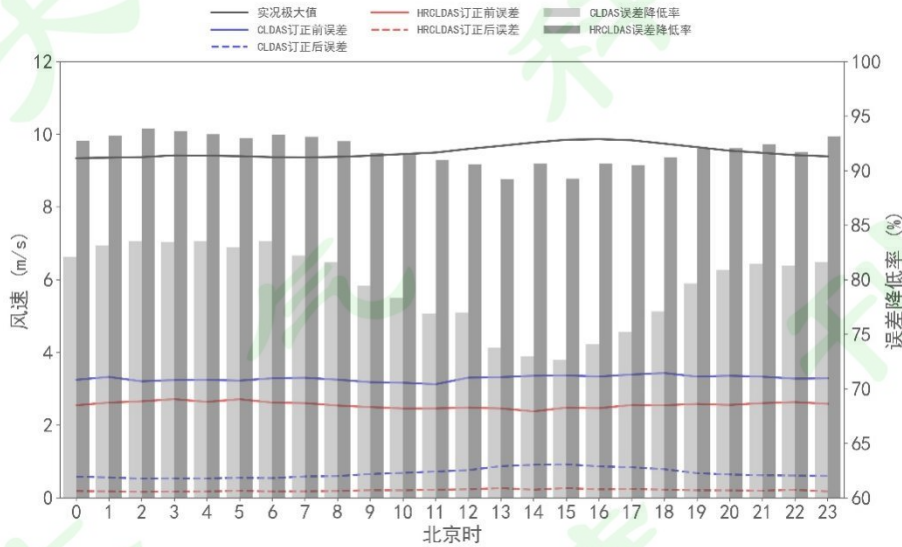


图 6 2021-2023 年实况风速极大值（黑色实线）、CLDAS（蓝色）和 HRCLDAS（红色）格点风场极值订正前（实线）、订正后（虚线）MAE（线条）和 MAE 降低率（柱状）日变化（灰色和黑色柱状分别表示 CLDAS 和 HRCLDAS 的 MAE 降低率）

Fig6. Daily variations of MAE (line) and MAE reduction rates (bar) for the maximum observed wind speeds (solid black line), the maximum gridded wind speeds of CLDAS (blue lines) and HRCLDAS (red lines) before correction (solid lines) and after correction (dashed lines) during 2021-2023. The gray and black bars represent the MAE reduction rates for CLDAS and HRCLDAS, respectively.

图 6 给出了 2021-2023 年站点观测风速极大值、CLDAS 和 HRCLDAS 格点风速极值订正前后 MAE 及 MAE 降低率的日变化。极值订正前，CLDAS 原始场逐小时 MAE 约为 3.5 m s^{-1} ，订正后误差下降至约 1 m s^{-1} ，MAE 降低率主要介于 70~85% 之间。HRCLDAS 逐小时风速极大值 MAE 从订正前的约 2.5 m s^{-1} 下降至订正后的 0.2 m s^{-1} 左右，MAE 降低率主要介于 90~95% 之间。订正前后 HRCLDAS 风速极大值误差均低于 CLDAS，且 MAE 降低率高于 CLDAS 约 15%。从误差分布日变化来看，CLDAS 在午后时段（13-18 时）订正前后 MAE 略高于其他时段，且 MAE 降低率也低于其他时段，这与实况风速极大值在午后高于其他时段的日变化趋势紧密相关，实况风速极大值越大，订正前后 MAE 越大，MAE 降低率越小。HRCLDAS 订正前后 MAE 日变化差异不大，订正后也存在午后时段（13-18 时）MAE 略高于其他时段，MAE 降低率较低的特征。

图 7 给出了 2021-2023 年站点观测风速极大值、CLDAS 和 HRCLDAS 格点风速极值订正前后 MAE 及 MAE 降低率的月变化。极值订正前，不同月份 MAE 差异显著，10 月至次年 2 月误差较大，3~9 月误差较小。极值订正后，不同月份 MAE 均显著减少，其中 CLDAS 各月 MAE 降至 1 m s^{-1} 以下，HRCLDAS 各月 MAE 降至 0.5 m s^{-1} 以下。不同月份 MAE 降低率均超过 60%，其中 10 月至次年 1 月极值订正效果最佳，CLDAS 和 HRCLDAS 的 MAE 降低率分别超过 85% 和 90%，极值改进效果明显，而 3~9 月 MAE 降低率相对较低，分别介于 65~75% 和 80~90%。误差的月变化同样与实况风速极大值月变化趋势关系紧密，但与日变化有所不同，实况极大值越大的月份（10 月至次年 1 月），订正前 MAE 越大，MAE 降低率也越大。

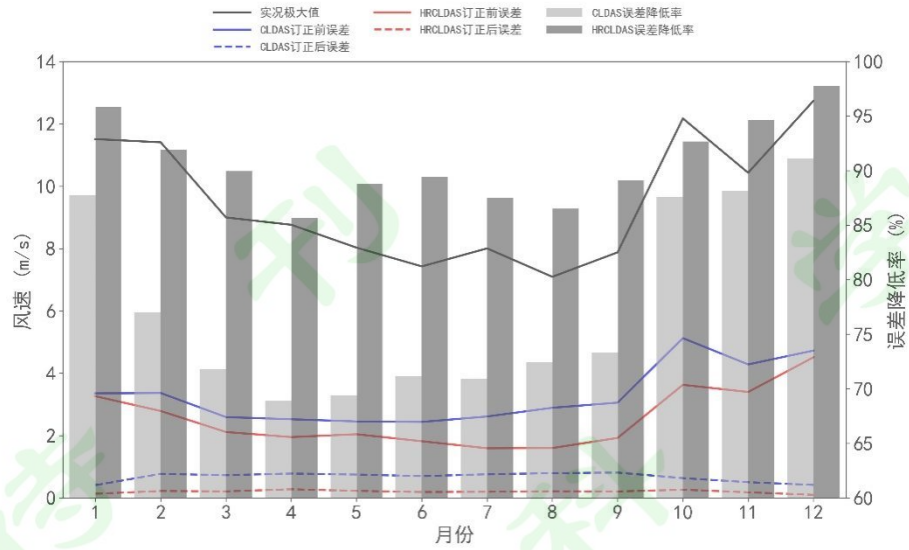


图 7 同图 6，但为月变化

Fig7. Same as Fig 6, but for monthly variation

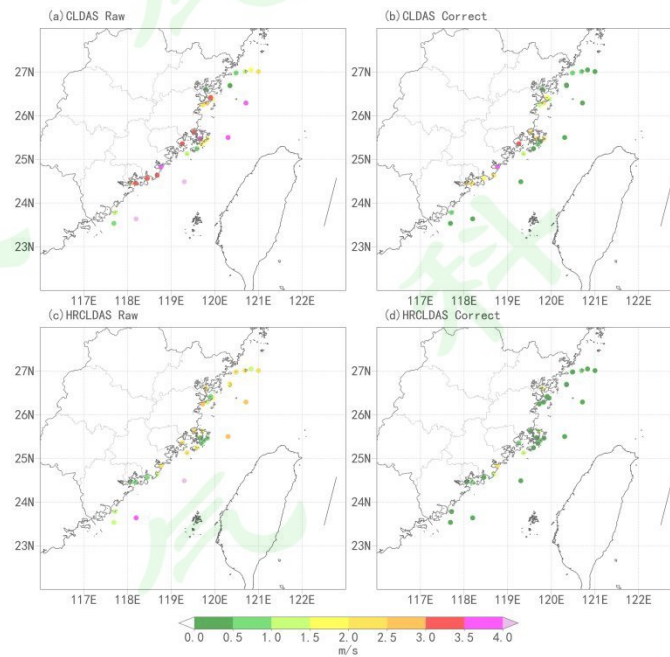


图 8 2021-2023 年台湾海峡区域 (a, b) CLDAS 和 (c, d) HRCLDAS 格点风场极大值 MAE 空间分布。

(a, c) 极值订正前, (b, d) 极值订正后

Fig8. Spatial distributions of MAE for the maximum gridded wind speeds of (a, b) CLDAS and (c, d) HRCLDAS in the Taiwan Strait region during 2021-2023. (a, c) Before correction and (b, d) after correction.

图 8 还给出了 2021-2023 年 CLDAS 和 HRCLDAS 风场极值订正前后台湾海峡区域各站点 MAE 的空间分布。极值订正前, CLDAS 原始风场极大值相对站点观测的 MAE 普遍超过 2 m s^{-1} , 其中台湾海峡中部海上浮标站点误差较大, 个别站点超过 4 m s^{-1} (图 8a)。极值订正后 CLDAS 误差空间分布整体呈现与海岸线平行, 自西向东减小, 福建沿海和台湾海峡区域海上浮标站点风速极大值相比订正前 MAE 明显降低, 普遍降至 1 m s^{-1} 以下, 而复杂海湾沿岸订正效果不明显, 仍有部分站点 MAE 超过 2 m s^{-1} (图 8b)。HRCLDAS 原始风场极大值相对大部分站点观测的 MAE 都小于 3 m s^{-1} (图 8c), 订正后改进区域主要集中在福建沿海和台湾海峡海上浮标站点, 订正后风场极大值的 MAE 降低至 1 m s^{-1} 以下 (图 8d)。

3.4 典型大风过程订正效果

台湾海峡区域大风主要由台风、冷空气和入海气旋等天气过程引起, 为了进一步验证极值订正技术在典型大风过程中的应用效果, 选取 2305 号台风“杜苏芮”和 2023 年 1 月一次冷空气大风过程进行极大值订正和检验。

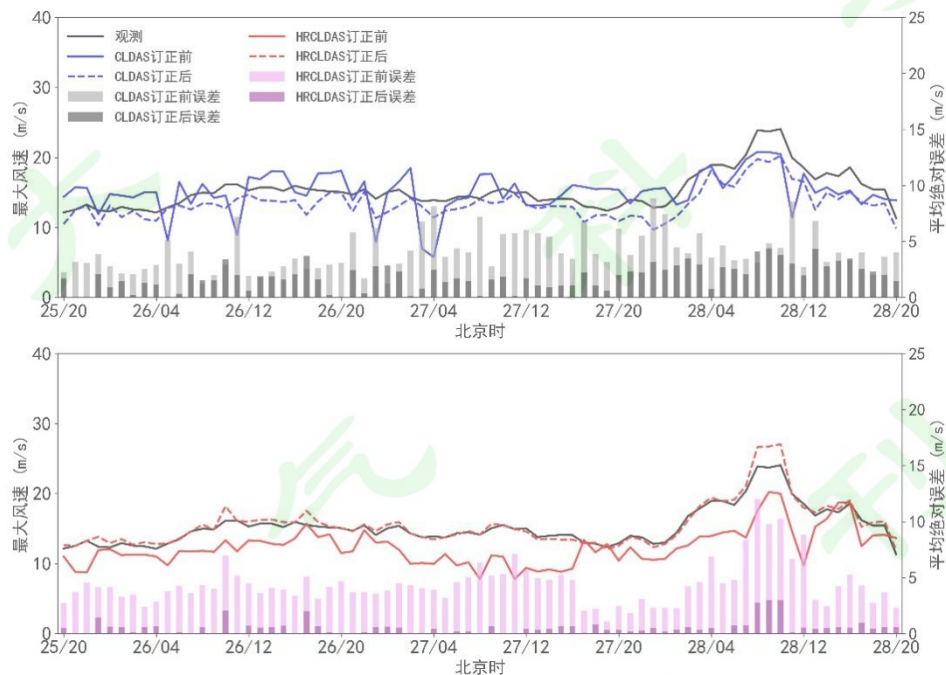


图 9 2023 年 7 月 25 日 20 时-28 日 20 时逐小时观测的沿海渔场风速极大值平均 (黑线)、CLDAS 和 HRCLDAS 极值订正前 (实线)、订正后 (虚线) 风速和 MAE (柱状) (蓝线表示 CLDAS, 红线表示 HRCLDAS, 灰色 (粉色) 和黑色 (紫色) 柱状分别表示 CLDAS (HRCLDAS) 订正前后 MAE)

Fig9. The hourly average of maximum observed wind speeds (black lines) of the Fishing

Ground, the MAE for CLDAS (blue lines) and HRCLDAS (red lines) before correction (solid lines) and after correction (dashed lines) from 20:00 on July 25th to 20:00 on July 28th, 2023. The gray (pink) and black (purple) bars represent the MAE before and after correction for CLDAS (HRCLDAS), respectively.

2305 号台风“杜苏芮”于 2023 年 7 月 21 日 08 时在西北太平洋洋面上生成，28 日 9 时 55 分以 45 m s^{-1} （强台风级）强度在福建省晋江沿海登陆。其造成的福建沿海大风自 25 日夜开始增大，28 日夜沿海平均风减弱至 8 级以下。图 9 给出了台风“杜苏芮”造成沿海大风期间 CLDAS 和 HRCLDAS 订正前后与实况沿海渔场风速极大值平均对比及 MAE 分布。台风“杜苏芮”在登陆前期位于洋面上（25 日 20 时~28 日 00 时）期间，风速相对平稳，CLDAS 对应风速在实况上下波动较大，MAE 在 3 m s^{-1} 上下。在临近登陆前后（28 日 01 时~20 时），CLDAS 则以低估为主，MAE 在 5 m s^{-1} 上下。极值订正后，误差有不同程度的下降，大部分时次下降至 3 m s^{-1} 以下。HRCLDAS 原始风场总体低估实况极大值，除了登陆前后几个小时 MAE 剧烈波动增长外，其余时次 MAE 大都小于 5 m s^{-1} 。极值订正后，接近一半时次极大值订正到与实况相同，误差为 0，其余时次 MAE 也控制在 3 m s^{-1} 以下，订正效果良好。

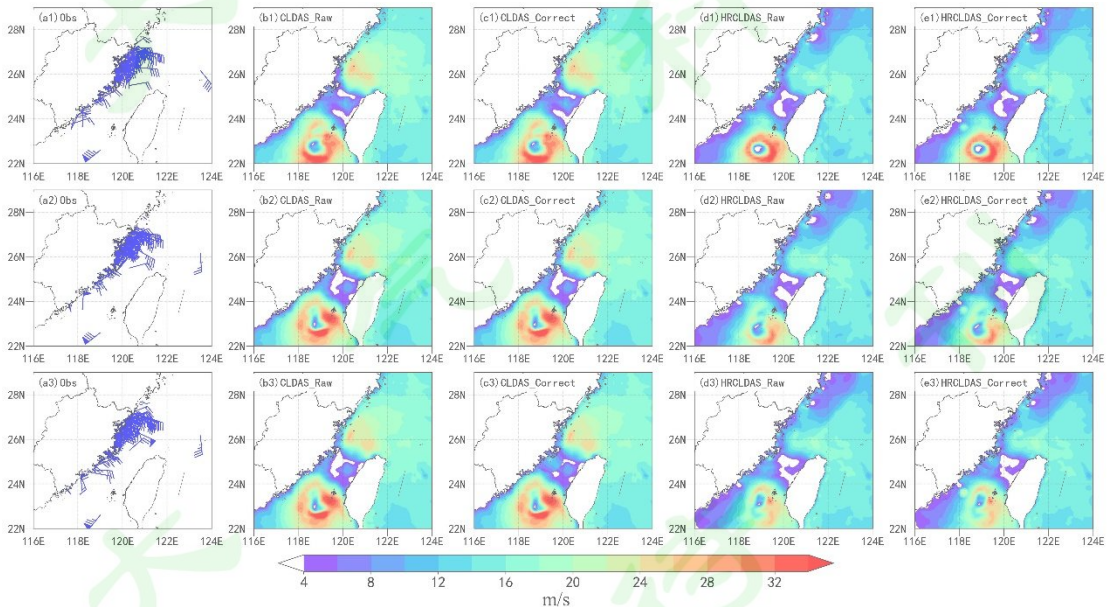


图 10 2023 年 7 月 28 日 02 时~04 时 (a1-a3) 站点观测 (风速 $> 5 \text{ m s}^{-1}$)、(b1-b3) CLDAS 极值订正前、(c1-c3) 订正后、(d1-d3) HRCLDAS 极值订正前和 (e1-e3) 订正后的风场分布

Fig10. The spatial distributions for (a1-a3) the observed wind (wind speeds $> 5 \text{ m s}^{-1}$), (b1-b3) CLDAS before correction, (c1-c3) CLDAS after correction, (d1-d3) HRCLDAS before correction, and (e1-e3) HRCLDAS after correction from 02:00 to 04:00 on July 28th, 2023.

图 10 给出了台风“杜苏芮”登陆前 7 月 28 日 02 时~04 时观测风场、CLDAS 和 HRCLDAS 极值订正前后的风场分布。由于 CLDAS 在这一阶段风场与实况较为接近，在不同渔场区域对应的最优影响半径整体不大，大部分时候为 0.3° ，因此 CLDAS 订正前后风场改变不大，主要在 7 月 28 日 03 时~04 时靠近闽南渔场西部区域台风“杜苏芮”外围风场，订正了高估实况风力情况（图 10b2, b3）以及在 7 月 28 日 04 时改善了低估闽中渔场西部区域实况风力情况（图 10b3）。HRCLDAS 在极大值订正后极大改善了对闽南渔场西部区域实况风力低估的情况，订正后风场与实况接近，同时保留台风“杜苏芮”整体环流结构完整。

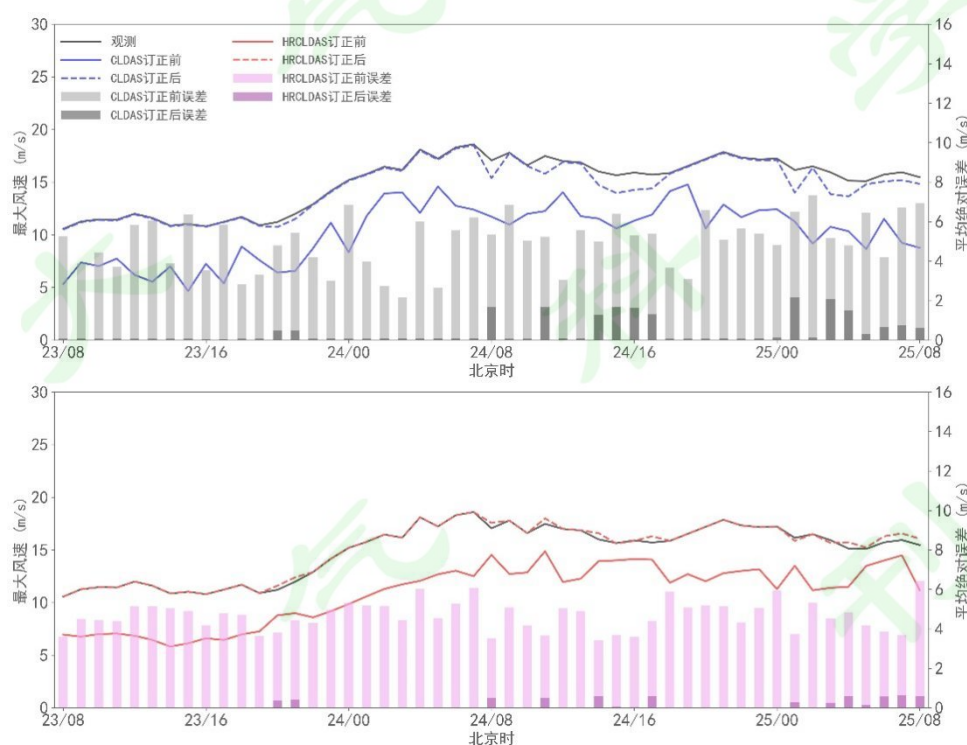


图 11 2023 年 1 月 23 日 08 时-25 日 08 时逐小时观测的沿海渔场风速极大值平均（黑线）、CLDAS 和 HRCLDAS 极值订正前（实线）、订正后（虚线）风速和 MAE（柱状）（蓝线表示 CLDAS，红线表示 HRCLDAS，灰色（粉色）和黑色（紫色）柱状分别表示 CLDAS（HRCLDAS）订正前后 MAE）

Fig11. The hourly average of maximum observed wind speeds (black lines) of the Fishing

Grounds, the MAE for CLDAS (blue lines) and HRCLDAS (red lines) before correction (solid lines) and after correction (dashed lines) from 08:00 on January 23rd to 08:00 on January 25th, 2023. The gray (pink) and black (purple) bars represent the MAE before and after correction for CLDAS (HRCLDAS), respectively.

除了台风系统外，冷空气过程也容易造成台湾海峡区域极端大风的出现。图 11 给出了 2023 年 1 月发生在福建沿海的一次冬季冷空气过程实况观测、CLDAS 和 HRCLDAS 订正前后沿海渔场风速极大值平均对比及 MAE 随时间分布。CLDAS 和 HRCLDAS 对于此次过程都存在不同程度的低估极大值情况，两者平均 MAE 都在 5 m s^{-1} 上下。经过极值订正，CLDAS 大多时候风场极大值都订正到与实况相同，个别时刻 MAE 也在 2 m s^{-1} 以下。HRCLDAS 订正效果更佳，基本上都订正到与实况相同。

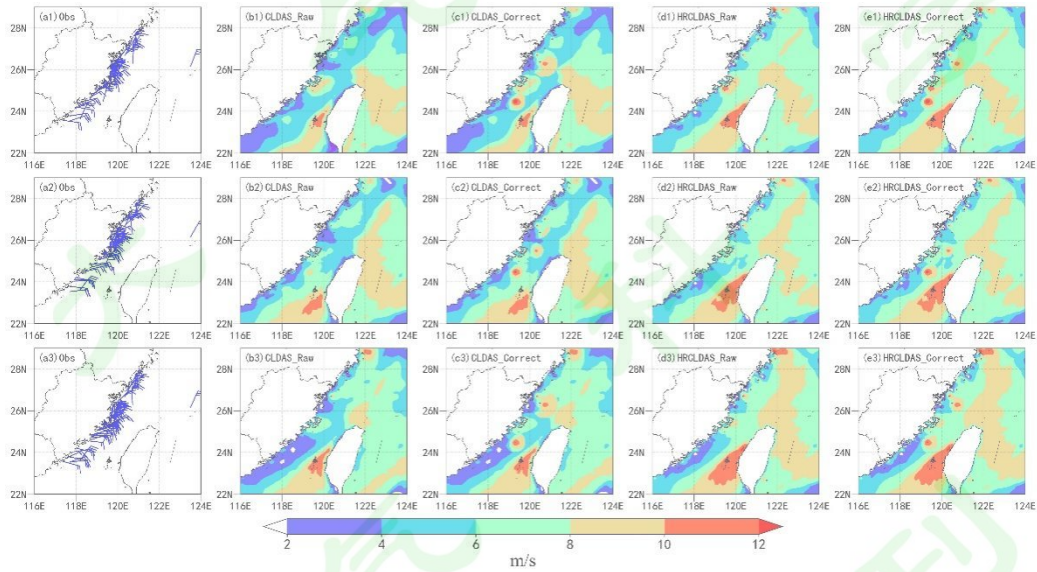


图 12 2023 年 1 月 23 日 13 时~15 时 (a1-a3) 站点观测 (风速 $> 5 \text{ m s}^{-1}$)、(b1-b3) CLDAS 极值订正前、(c1-c3) 订正后、(d1-d3) HRCLDAS 极值订正前和 (e1-e3) 订正后的风场分布 (a1-a3 红色方框内为风速极大值所在区域)

Fig12. The spatial distributions for (a1-a3) the observed wind (wind speeds $> 5 \text{ m s}^{-1}$), (b1-b3) CLDAS before correction, (c1-c3) CLDAS after correction, (d1-d3) HRCLDAS before correction, and (e1-e3) HRCLDAS after correction from 13:00 to 15:00 on January 23rd, 2023. The red boxes in (a1-a3) indicate the regions where the maximum wind speeds are observed.

图 12 给出了此次冷空气大风过程误差较大的 1 月 23 日 13 时~15 时站点观测风速、CLDAS 和 HRCLDAS 极值订正前后的风场分布。可以看到, 1 月 23 日 13 时站点观测在福建沿海存在多个风速极大值中心(图 12a1), CLDAS 和 HRCLDAS 原始风场只对中部风速极大值中心有所体现, 但是都严重低估了其北部和南部的风速极大值中心(图 12b1、d1)。经过极值订正, 福建北部和南部沿海的极大值中心开始有所体现, 订正至与实况相同风速大小(图 12c1、e1)。在 1 月 23 日 14 时~15 时也存在类似情况, 极值订正有效改善了对多个风速极大值低估的情况。

4 结论与讨论

本研究提出一种基于观测风速二次融合台湾海峡区域风场极大值订正技术, 通过综合权衡格点分析场相对站点观测风速极大值的误差及极值订正后空间平滑程度分区域(闽东、闽中及闽南渔场)确定观测风速极大值的最优影响半径订正后再二次融合, 并将该技术用于订正 2021-2023 年 CLDAS 和 HRCLDAS 格点风场极大值, 得到以下几点结论:

(1) 不同时次的最优影响半径存在差异, 随着格点分辨率提高, HRCLDAS 相较于 CLDAS 出现小值最优影响半径频率增加。

(2) CLDAS 和 HRCLDAS 对于台湾海峡区域风场极大值都存在低估倾向, 其中 CLDAS 低估更为严重。利用风场极大值订正算法订正最优影响半径范围内格点风速可有效改进这种低估倾向, HRCLDAS 的订正效果优于 CLDAS。

(3) 经过逐小时风场极大值订正后, CLDAS 的 MAE 降低率主要介于 70~85%之间, HRCLDAS 大部分时刻 MAE 降低率超过 90%。不同月份 MAE 降低率都超过 60%, 其中 10 月至次年 1 月极值订正效果最优, CLDAS 和 HRCLDAS 的 MAE 降低率分别超过 85%和 90%。订正前, 误差空间分布大值区集中在台湾海峡区域中部海域, 极值订正后, 误差分布与海岸线平行, 自西向东减少, 其中福建沿海及台湾海峡区域浮标站点周围格点风场的订正效果最为显著, 订正后 MAE 普遍降低至 1 m s^{-1} 以下。

(4) 选取 2305 号台风“杜苏芮”和 2023 年 1 月 23~25 日冬季冷空气过程作为典型大风个例检验评估表明, 极值订正可有效改善 CLDAS 在台风“杜苏芮”过程中风速波动过大及在冷空气过程对极大值低估问题; 此外可改善 HRCLDAS 在两次过程中对风速极大值的低估问题。

综上所述, 通过筛选最优影响半径建立观测极值订正地面风场分析技术可有效改进格

点分析场对台湾海峡区域风速极大值低估倾向, 订正后的格点分析场可用于对风速极大值较为敏感的渔业生产、航海运输和海事安全等行业气象服务, 不过对于部分风力超过25m/s 的观测极端大值仍存在低估。此外, 由于不同时刻风场对应的最优影响半径可能不同, 因此需要根据不同时刻重新计算最优影响半径。目前根据海区区划将台湾海峡区域分为闽东、闽中及闽南渔场区域进行分区域确定最优影响半径, 后续根据需求还可进一步细化分区进行极大值订正工作。

参考文献 (References)

- 韩帅,师春香,姜志伟,等. 2018.CMA 高分辨率陆面数据同化系统(HRCLDAS-V1.0)研发及进展[J].气象科技进展, 8(01):102-108+116. Han Shuai, Shi Chunxiang, Jiang Zhiwei, et al. 2018. Research and Development Progress of the CMA High-Resolution Land Data Assimilation System (HRCLDAS-V1.0) [J]. Advances in Meteorological Science and Technology (in Chinese), 8(01): 102-108+116.
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., et al. (2020). The ERA5 global reanalysis. [dataset]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 146(730), 1999–2049. doi:https://doi.org/10.1002/qj.3803.
- Kanamitsu M, Kistler R E, Reynolds R W.1997.NCEP/NCAR reanalysis and the use of satellite data[J].Advances in Space Research, 19(3):481-489.DOI:10.1016/S0273-1177(97)00059-8.
- Kobayashi C, Endo H, Ota Y,et al.2014. Preliminary Results of the JRA-55C, an Atmospheric Reanalysis Assimilating Conventional Observations Only[J].SOLA - Scientific Online Letters on the Atmosphere, 10(1):2014-2016.DOI:10.2151/sola.2014-016.
- 林小红,吴幸毓,陈淼,等. 2019.台湾海峡西岸台风大风特征及极端大风典型个例分析[J].气象与环境学报, 35(06):93-100. Lin Xiaohong, Wu Xingyu, Chen Miao, et al. 2019. Analysis of Typhoon Gale Characteristics and Typical Cases of Extreme Gale on the West Coast of the Taiwan Strait [J]. Journal of Meteorology and Environment (in Chinese), 35(06): 93-100.
- 渠鸿宇,黄彬,赵伟,等. 2022.HRCLDAS-V1.0 和 ERA5 海面风场对比评估分析[J].热带气象学报, 38(04):569-579.DOI:10.16032/j.issn.1004-4965.2022.051. Qu Hongyu, Huang Bin, Zhao Wei, et al. 2022. Comparative Evaluation and Analysis of Sea Surface Wind Fields between HRCLDAS-V1.0 and ERA5 [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 38(04): 569-579. DOI: 10.16032/j.issn.1004-4965.2022.051.
- Yi J ,Shuai H ,Chunxiang S , et al. 2021.Evaluation of HRCLDAS and ERA5 Datasets for Near-Surface Wind over

403 Hainan Island and South China Sea[J].Atmosphere, 12(6):766-766.

404 师春香,潘阳,谷军霞,等. 2019.多源气象数据融合格点实况产品研制进展[J].气象学报, 77(04):774-783. Shi

405 Chunxiang, Pan Yang, Gu Junxia, et al. 2019. Progress in the Development of Gridded Observation Products

406 Based on Multi-source Meteorological Data Fusion [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 77(04): 774-

407 783.

408 夏丽花,吴幸毓,陈敏艳. 2017.台湾海峡致灾大风气候特征分析[J].海峡科学, (06):3-8. Xia Lihua, Wu Xingyu,

409 Chen Minyan. 2017. Analysis of Climatic Characteristics of Disaster-Causing Gale in the Taiwan Strait [J].

410 Strait Science (in Chinese), (06): 3-8.