

中国区域1 km逐时极大风实况分析产品研制

廖志宏 师春香 张冬斌 谷军霞 韩帅 张涛 徐宾 周鸿奎 徐艳琴

Development of a real-time hourly wind gust product at 1 km resolution over China

LIAO Zhihong, SHI Chunxiang, ZHANG Dongbin, GU Junxia, HAN Shuai, ZHANG Tao, XU Bin, ZHOU Hongkui, XU Yanqin

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11676/qxxb2025.20240117>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

全球多源海冰密集度融合资料研制试验

Development experiment of a global multi-source sea ice concentration fusion dataset

气象学报. 2021, 79(4): 703–715 doi: [10.11676/qxxb2021.040](https://doi.org/10.11676/qxxb2021.040)

基于阵风系数模型的百米级阵风客观预报算法研究

An algorithm for objective forecasting of gust winds at 100 m horizontal resolution based on a gust coefficient model

气象学报. 2023, 81(1): 94–109 doi: [10.11676/qxxb2023.20220052](https://doi.org/10.11676/qxxb2023.20220052)

“CMA北京模式”中三种不同阵风诊断方案在北京地区大风预报中的评估

Evaluation of three different gust diagnostic schemes in the CMA-BJ for gale forecasting over Beijing

气象学报. 2022, 80(1): 108–123 doi: [10.11676/qxxb2022.001](https://doi.org/10.11676/qxxb2022.001)

中国北方冬季降水的多源资料产品评估和融合优化

Assessment and merged optimization of multi-source winter precipitation products over northern China

气象学报. 2022, 80(6): 953–966 doi: [10.11676/qxxb2022.069](https://doi.org/10.11676/qxxb2022.069)

融合DEM与FY-4A数据的ECMWF预报产品深度学习订正方法

Deep learning based correction of ECMWF forecast products with fusion of DEM and FY-4A data

气象学报. 2024, 82(4): 539–553 doi: [10.11676/qxxb2024.20230061](https://doi.org/10.11676/qxxb2024.20230061)

利用深度学习融合NWP和多源观测数据的闪电落区短时预报方法

Very short-range lightning forecasting with NWP and observation data: A deep learning approach

气象学报. 2021, 79(1): 1–14 doi: [10.11676/qxxb2021.002](https://doi.org/10.11676/qxxb2021.002)



扫码关注公众号，获取更多信息！

中国区域 1 km 逐时极大风实况分析产品研制*

廖志宏¹ 师春香¹ 张冬斌¹ 谷军霞¹ 韩帅¹ 张涛¹

徐宾¹ 周鸿奎² 徐艳琴³

LIAO Zhihong¹ SHI Chunxiang¹ ZHANG Dongbin¹ GU Junxia¹ HAN Shuai¹ ZHANG Tao¹

XU Bin¹ ZHOU Hongkui² XU Yanqin³

1. 国家气象信息中心, 北京, 100081
 2. 新疆维吾尔自治区气象信息中心, 乌鲁木齐, 830002
 3. 内蒙古自治区气象数据中心, 呼和浩特, 010051
1. *National Meteorological Information Centre, Beijing 100081, China*
2. *Xinjiang Meteorological Information Center, Urumqi 830002, China*
3. *Inner Mongolia Meteorological Data Center, Hohhot 010051, China*
- 2024-09-23 收稿, 2025-03-05 改回.

廖志宏, 师春香, 张冬斌, 谷军霞, 韩帅, 张涛, 徐宾, 周鸿奎, 徐艳琴. 2025. 中国区域 1 km 逐时极大风实况分析产品研制. 气象学报, 83(5): 1329-1338

Liao Zhihong, Shi Chunxiang, Zhang Dongbin, Gu Junxia, Han Shuai, Zhang Tao, Xu Bin, Zhou Hongkui, Xu Yanqin. 2025. Development of a real-time hourly wind gust product at 1 km resolution over China. *Acta Meteorologica Sinica*, 83(5):1329-1338

Abstract To meet the need for weather forecasting, strong convection monitoring and warning services, an hourly 1 km wind gust product across China has been produced using hourly wind gust observations and model forecast data. These data are adopted after the procedure of quality control, space-time matching and fusion analysis. This product is updated at a 5 min lag with the overall RMSEs of 1.9 m/s for independent test and 0.68 m/s for the non-independent test. The results indicate that as the wind speed increases, the number of samples continuously declines, there is a relatively pronounced tendency for the product's error to rise, and the accuracy gradually decreases. However, the quality of this product improves effectively compared to model predictions of high speed of wind gusts. Specifically, the accuracy of wind speed above magnitude 9 has improved by 89.3%, and the relative error has dropped significantly with a reduction ratio of about 27.4%. The development of this product can support disaster mitigation and decision-making related to catastrophic gales and typhoons.

Key words Wind gust, Multi-source fusion, Model forecasts

摘要 围绕全国天气预报、强对流(大风)监测预警服务等业务需求,对逐时极大风风速观测资料与模式小时阵风风速预报资料进行质量控制、时空匹配等预处理,同时采用多重网格变分析方法,将极大风风速观测场与模式预报背景场进行融合,生成中国区域 1 km 逐时极大风实况分析产品(V1.0)。该产品滞后 5 min 更新,整体的独立检验均方根误差为 1.9 m/s,非独立检验均方根误差为 0.68 m/s。不同风速极大风产品的评价指标有较大差异,随着风速增大,样本数下降,产品的误差有较明显增大,且准确率逐步降低,但融合产品能够有效提升极大风速的数据质量。其中,9 级以上风速的准确率提高了 89.3%,相对误差下降了 27.4%。该产品的研制可为灾害性大风、台风等防范及决策制定提供数据支撑。

* 资助课题:第二批中国气象局科技项目“揭榜挂帅”(CMAJBGS202319)、国家气象信息中心重点创新团队“海洋实况分析”(NMIC-2024-ZD05)、中国气象局创新发展专项(CXFZ2024J063)、国家气象信息中心结余资金项目(NMICJY202312)、国家重点研发计划项目(2018YFC1506600、2022YFC3004201)、国家自然科学基金项目(41806213)。

作者简介:廖志宏,主要从事多源资料融合及卫星资料处理与分析研究。E-mail: liaozh@cma.gov.cn

通信作者:谷军霞,主要从事多源气象资料融合分析及产品研制。E-mail: gujx@cma.gov.cn

关键词 极大风, 多源融合, 模式预报

中图法分类号 P425

1 引言

大风是一种十分常见的灾害性天气, 常常对交通、电力、建筑、海上作业等造成严重破坏。由于灾害性大风一般持续时间较短且风力强劲, 而最大风速是给定时段内的 10 min 平均风速的最大值, 导致最大风速相比该时段内的极大风速会偏小很多, 难以准确反映灾害性大风的实际情况, 因此对于大风的破坏性, 比较好的考量指标是极大风速。极大风速亦称为阵风, 是指某个时段内出现的最大瞬时风速, 根据《地面气象自动观测规范》定义, 极大风指 3 s 的平均风速。当前, 中国地面逐时资料中风速包括 2 min 平均风速、10 min 平均风速、最大风速、瞬时风速、极大风速。其中, 逐时自动观测数据中, 极大风速观测站点数量可观, 总站数超 3.7 万个, 但分布离散, 且部分偏远及复杂地形区域站点分布特别稀疏, 无法保证极大风观测在空间上的连续性和完整性。极大风在模式预报中对应的变量为近地面阵风风速(wind speed gust), 虽然该变量能够提供完整的空间分布, 但该变量不直接输出, 一般通过当前预报时次风速的基础上, 根据大气情况利用模式输出的 10 m 平均风、边界层高度与高层风的经验公式统计得到。因此, 输出的极大风数据依赖于模式预报的频次, 且通过经验公式统计的极大风在数值上与极大风实际观测往往存在一定偏差。

目前, 针对大风的研究主要侧重于应用方面, 如区域强风区的分布、强雷暴大风特点、台风极端大风的分布等(Wang, et al, 2011; Shu, et al, 2015; 訾耀海, 2018; 纪玲玲等, 2020; 孔锋等, 2020), 特别是大风灾害方面的研究较多, 主要集中在大风的时空变化特征。如在全球尺度上, 陆地近地表风速下降最明显的区域主要分布在中纬度地区, 而南北纬大于 70°的地区风速则在增强。在中国区域无论大风日数还是最大风速均呈下降趋势(Cheng, et al, 2002; 孔锋等, 2020), 西部内陆地区强风主要出现在春、夏两季, 气压梯度力是形成西部内陆地区强风的根本动力, 且强风分布和地形有很大关系(Ngo, et al, 2008, 2009; 邱博, 2013; 李艳萍等, 2021)。针

对大风灾害风险方面的研究, 主要采用多种影响因素建立评估模型, 确定各级风险指标(呼津华等, 2009; 李艳萍等, 2021), 以及基于大风灾情资料分析大风的灾情分布特征, 建立大风灾害损失等级划分标准(张凯, 2019; 纪玲玲等, 2020)。针对风速预报结果偏差较大的问题, 当前主要研究是采用与站点观测的极大风速进行统计拟合分析, 利用拟合系数对风速预报进行订正(钱磊等, 2019)。同时, 考虑不同定义风速间的关联, 部分学者研究了最大风速与极大风速的关系, 并通过两者的关系建立模型, 模拟极大风在缺测情况下的变化与分布(林中鹏等, 2015; 王簧等, 2019; 吴素良等, 2020)。

在极大风数据产品方面, 当前的研究除了各区域获取的有限极大风观测资料外, 主要由模式预报提供相对完整的极大风产品资料, 详见表 1。而利用极大风观测和预报资料进行分析的融合实况产品相对匮乏, 如美国国家环境预报中心(NCEP)建立了基于中尺度的实时分析系统(RTMA)(De Pondecas, et al, 2011; Morris, et al, 2020; Purser, et al, 2022; Jones, et al, 2024), 该系统利用二维变分模式构建格点统计插值(GSI)系统, 同化了常规地面观测和卫星观测资料, 生成针对美国相关区域的逐时极大风分析产品, 该产品采用不同类型的观测数据获得非独立检验误差为 0.8—2.6 m/s, 但未提供全球分布的产品(https://www.emc.ncep.noaa.gov/mmb/rtma/prod/RTMA/03/RTMA_CONUS_gust_10m.php)。在中国可提供业务使用的高质量大风实况产品相对较少, 如国家气象信息中心构建了

表 1 极大风预报产品

Table 1 Wind gust data from Chinese and international model forecasts

产品	产品覆盖范围	时间分辨率	空间分辨率	产品滞后时间
CMA-MESO	10°—61°N, 70°—145°E	1 h	3 km	3 h 10 min
CMA-TYM	15°S—61°N, 40°—80°E	1 h	9 km	5 h 15 min
CMA-GFS	全球	3 h	25 km	4 h 35 min
全球大气实况 分析产品	全球	1 h	13 km	3 h 50 min
ERA5	全球	1 h	25 km	—

注: —表示未业务获取该数据。

ART-1km 业务系统(师春香等, 2019), 可实时获取逐时的 10 m 平均风产品(Han, et al, 2022), 但需求相对紧迫的极大风产品仍未提供业务使用。

国家气象信息中心气象实况分析团队采用多源数据融合分析技术方案, 充分发挥观测站点在精度和模式预报在空间分布上的优势, 研制中国区域 1 km 逐时分辨率的极大风实况分析产品, 空间覆盖(EQ—60°N, 70°—140°E), 为科学分析极大风的时空分布及应对大风灾害过程提供可靠的数据支撑。

2 数据简介

中国区域 1 km 逐时极大风实况分析产品的名称、作者、地理区域、数据年代、时间分辨率、空间分辨率、数据集组成、数据出版与共享服务平台、数据共享政策等信息见表 2。

3 数据研发方法

3.1 观测资料的质量控制

由于站点观测可能存在缺测或错误情形, 因此有必要在使用前对极大风资料进行质量控制, 剔除异常值。

极大风观测资料质量控制算法参考气象行业标准《气象观测资料质量控制 地面》(QX/T118—2020)(中国气象局, 2020), 具体流程如图 1 所示。

首先对观测时间与位置执行元数据信息检查, 然后对观测数据执行缺测与特征值、界限值、内部一致性等检查, 并标注质量控制码输出质量控制后的极大风观测数据。以 2021 年 5 月的观测数据为例, 共计 744 个时次, 通过界限值检查标注的错误观测共计 5717 条, 每个时次 3—17 条; 通过内部一致性检查剔除记录共 518924 条, 每个时次 400—1200 条, 具体结果如图 2 所示。

3.2 背景场数据选择

为了研制中国区域 1 km 逐时分辨率的极大风实况分析产品, 必须选择合适的极大风预报资料作为背景场, 通过调研对比分析 CMA-MESO(3 km)、CMA-TYM(9 km)、全球大气实况分析产品(13 km)、ERA5(25 km)、GFS(25 km)等预报分析产品, 发现部分预报系统提供的产品时效和空间分布不能满足实况业务需求, 如 ERA5 资料由于未业务接入, 通过网上获取滞后 4 d, CMA-MESO 资料未覆盖智能网格预报需要的 EQ—60°N 范围。因此, 在对预报产品的时效、空间范围及产品质量等进行细致分析的基础上, 本方案拟采用表 1 中符合条件的极大风预报数据作为融合分析的背景场数据, 通过对比分析, 选择最优的预报资料进行融合分析。同时, 为了有效推进极大风实况产品的研制, 对涉及的主要研究任务与具体的实时方案进行了明确与细化。

表 2 中国区域 1 km 逐时极大风实况分析产品数据简介
Table 2 Data profile of a real-time hourly wind gust product with 1 km resolution over China

条目	描述
数据集名称	中国区域 1 km 逐时极大风实况分析产品
数据集短名	CMA-ART-HRCLDAS_GUST
作者信息	廖志宏、师春香、张冬斌、谷军霞、韩帅、张涛、徐宾, 国家气象信息中心; 周鸿奎, 新疆维吾尔自治区气象信息中心; 徐艳琴, 内蒙古自治区气象数据中心
地理区域	EQ—60°N, 70°—140°E
数据年代	2021年5月至今(实时滞后 5 min)
数据格式	GRIB2
数据量	100 MB/时次
数据集组成	文件以“Z_NAFP_C_BABJ_YYYYMMDDHHMMSS_P_WIND_GUST_RT_CHN_OP01_HOR-yyyymmddhh.GRB2”的格式命名, 其中YYYYMMDDHHMMSS为生产时间, yyyymmddhh为产品时间, 变量名为wind_gust, 产品以二维数组的形式存储, 维度分别为纬度(lat)和经度(lon); 产品可由 NCL、Fortran 和 MATLAB 读取处理, 并由 Panoply 和 ARCGIS 可视化
基金项目	第二批中国气象局科技项目“揭榜挂帅”(CMAJBGS202319)、国家气象信息中心重点创新团队“海洋实况分析”(NMIC-2024-ZD05)、中国气象局创新发展专项(CXFZ2024J063)、国家气象信息中心结余资金项目(NMICJY202312)、国家重点研发计划项目(2018YFC1506604、2022YFC3004201)、国家自然科学基金项目(41806213)
出版与共享服务平台	国家气象数据科学中心(http://data.cma.cn)
地址	国家气象信息中心, 北京市海淀区中关村南大街46号, 100081
数据共享政策	(1) 数据产品可通过国家气象数据科学中心网站下载, 商业使用须与国家气象信息中心签订书面协议; (2) 必须按照特定的参考文献格式引用数据集的来源

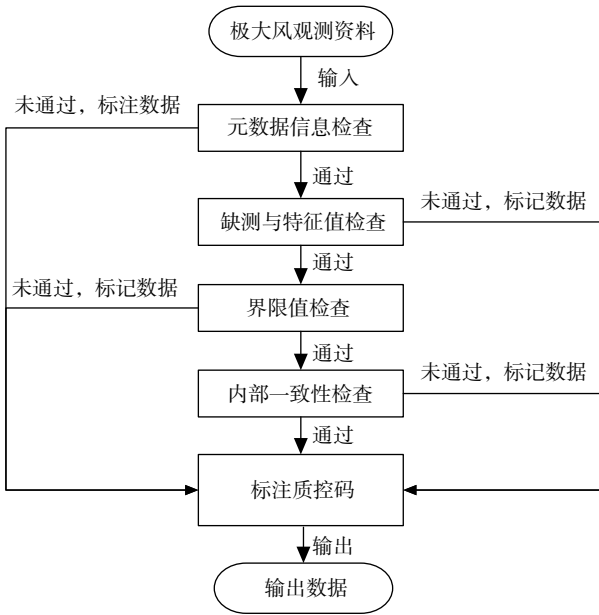


图1 极大风观测资料质量控制流程

Fig.1 Flow chart of quality control for wind gust observations

根据表1中可选的预报资料,选择符合逐时预报且空间分辨率较高的全球大气实况分析产品、CMA-TYM、CMA-GFS的极大风预报结果作为融合分析的备选背景场数据,通过极大风观测数据的评估分析,选择最优的预报资料作为背景场。采用2021年3月共744个时次的极大风观测资料对CMA-TYM、全球大气实况分析产品及CMA-GFS的预报资料进行评估分析,其中极大风观测资料选用第3.1节质量控制后的中国国家级气象观测站和区域气象观测站数据,每个时次获得的有效观测数据约3.5万条。采用的评估指标包括平均偏差(BIAS)、误差标准差(SD)、相关系数(COR)和均

方根误差(RMSE),计算公式如下

$$BIAS = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (G_i - O_i) \quad (1)$$

$$SD = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (G_i - \bar{G})^2} \quad (2)$$

$$COR = \frac{\sum_{i=1}^N (G_i - \bar{G})(O_i - \bar{O})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (G_i - \bar{G})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2}} \quad (3)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (G_i - O_i)^2} \quad (4)$$

式中, O_i 为站点观测值, G_i 为实况分析产品插值到检验站点得到的数值, \bar{O} 和 \bar{G} 分别为两者的平均值, N 为参与检验的总样本数(站次)。

从图3对各预报结果的评估可以发现,CMA-TYM预报存在较大偏差,且均方根误差最大,全球大气实况分析产品和CMA-GFS的各项指标表现更优,且两者接近。由表3中3种预报产品2021年3月统计指标可以看出,全球大气实况分析产品相关系数最大、均方根误差最小,该预报产品的指标最优。因此,文中选择全球大气实况分析产品预报资料作为中国区域1 km逐时极大风产品的主要背景场数据,同时考虑在实际业务中CMA-TYM更能够有效捕捉台风过程的大风特征,该模式预报资料选为海上极大风的主要背景场数据。

3.3 数据融合方法

极大风观测数据和背景场数据的融合采用多

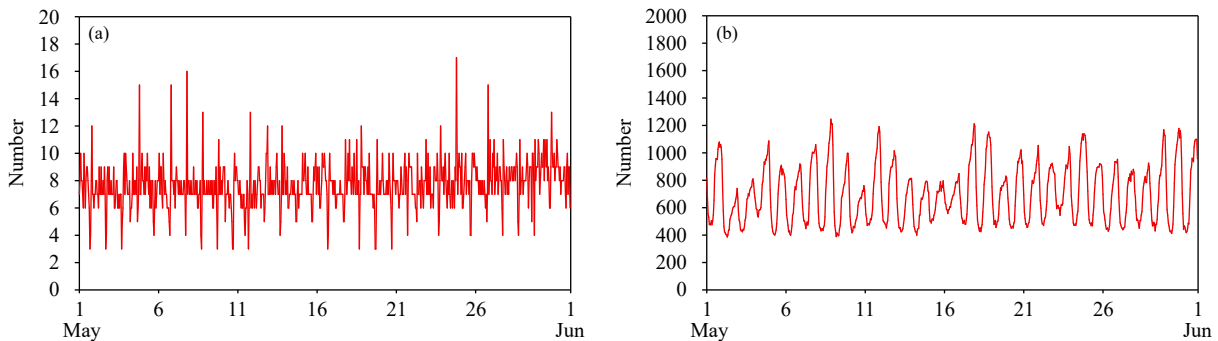


图2 2021年5月极大风数据通过界限值检查剔除的记录数(a)和内部一致性检查剔除的记录数(b)

Fig.2 Number of records excluded by boundary value check (a) and internal consistency check (b) for wind gust data in May 2021

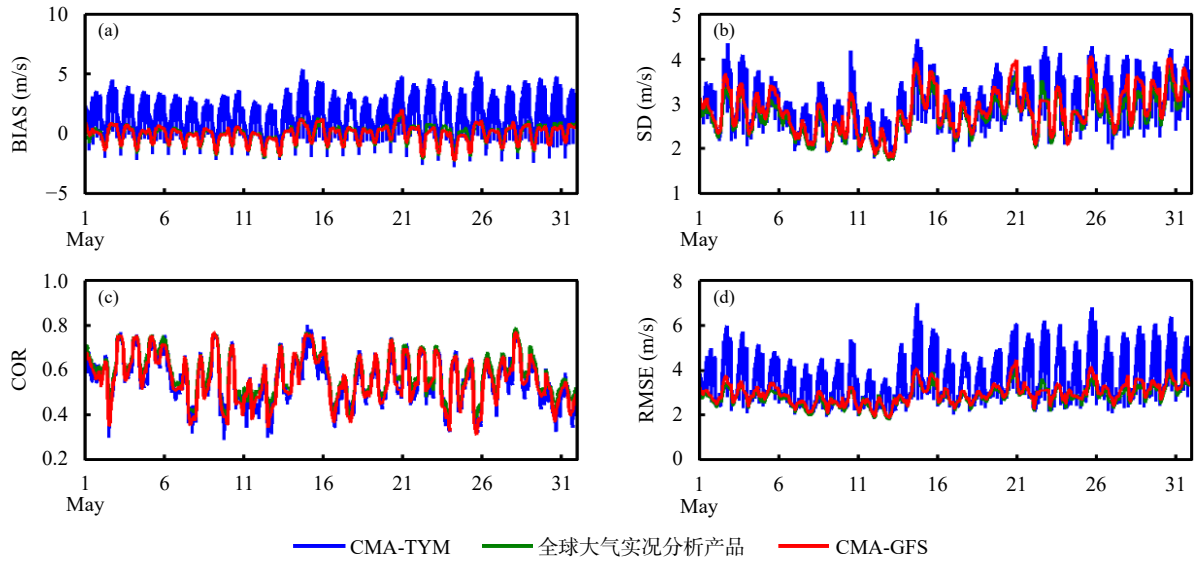


图 3 利用 2021 年 3 月极大风观测资料对 CMA-TYM、全球大气实况分析产品、CMA-GFS 结果的评估 (a. 平均偏差, b. 误差标准差, c. 相关系数, d. 均方根误差)

Fig. 3 Comparison of mean bias (a), standard deviation of errors (b), correlation coefficient (c) and root mean square error (d) of forecasts from CMA-TYM, global atmosphere analysis product, and CMA-GFS verified against wind gust observations in March 2021

表 3 采用 2021 年 3 月极大风观测资料统计的 CMA-TYM、全球大气实况分析产品、CMA-GFS 误差指标

Table 3 Statistic of error metrics of CMA-TYM, Global Atmosphere Analysis product, and CMA-GFS forecasts verified against wind gust observations in March 2021

	BIAS(m/s)	SD(m/s)	COR	RMSE(m/s)	样本数
CMA-TYM	1.464	2.940	0.552	3.593	25835768
全球大气实况分析产品	-0.092	2.714	0.580	2.819	25486833
CMA-GFS	-0.133	2.837	0.559	2.936	24742984

重网格三维变分 (STMAS) 方法 (Xie, et al, 2011), 该方法将传统三维变分同化分解为一系列不同网格上的三维变分同化, 在粗网格上提取观测资料中的长波信息, 在细网格上提取短波信息, 从而消除不同尺度间的混淆, 改善分析结果。STMAS 目标函数中除了观测项、背景项, 还有扩散项 $\gamma(\delta X^{(n)})^T S(\delta X^{(n)})$, 其中 γ 为扩散系数, S 采用拉格朗日滤波系数, 相当于惩罚函数的二次偏导, 融合时会平滑地接近观测值, 避免出现奇异值, 使分析结果更加真实。在每一重网格上的目标函数采用如下形式

$$J^{(n)} = \frac{1}{2} \delta X^{(n)T} \delta X^{(n)} + \frac{1}{2} [y^{(n)} - H^{(n)}(\delta X)^{(n)}]^T R^{(n)-1} [y^{(n)} - H^{(n)}(\delta X)^{(n)}] + \gamma(\delta X^{(n)})^T S(\delta X^{(n)})$$

$$n = 1, 2, 3, \dots, N \quad (5)$$

式中, n 表示第 n 重网格, N 为网格重数, $(\delta X)^n$ 为

n 重网格上的分析增量, 且观测通过下式迭代计算

$$\begin{cases} y^{(1)} = y^o - H^{(1)} X_b & n = 1 \\ y^{(n)} = y^{(n-1)} - H^{(n-1)} X^{(n-1)} & n = 2, 3, \dots, N \end{cases} \quad (6)$$

式中, y^o 为观测场, $H^{(n)}$ 为第 n 重网格到观测点的双线性插值算子, X_b 为背景场。多重网格 STMAS 从最粗网格开始分析, 当 $n=1$ 时, $y^{(1)}$ 为观测和背景场到观测位置映射的偏差, $X^{(n-1)}$ 是 $J^{(n-1)}$ 极小化的解或近似解。求解 $J^{(n-1)}$ 后, $X^{(n-1)}$ 被插值到第 n 重更细的网格上, $y^{(n)}$ 通过上式来计算, $X^{(n)}$ 通过 $J^{(n)}$ 极小化来求解。

通过改变网格粗细, 从长波到短波对观测资料进行依次分析, 从而达到提取各种尺度观测信息的目的。这相当于通过改变网格的粗细来调整观测信息的影响范围, 从而起到了调整背景场误差协方差矩阵。最终分析结果 X_a 为各重网格分析增量的叠加, 即

$$X_a = X_b + \sum_{n=1}^K \delta X^n \quad (7)$$

综上,通过对现场观测的质量控制、分辨率匹配等,根据误差权重分配,利用STMAS方法实现观测场和背景场数据的有效融合,生成极大风实况分析产品,主要技术路线与系统建设流程见图4。

4 数据结果与验证

4.1 验证数据与方法

采用国家级气象观测站(2480个)的极大风观测数据对2021年5月1日00时(世界时,下同)至5月31日23时共744个时次的实况分析产品进行验证。同时,为了分析不同风速下产品的数据质量,根据国家标准《风力等级》(GB/T 28591—2012,中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局等,2012)规定的大风等级进行分类。并按低风速(0—5级:[0, 10.8) m/s)、中风速(6—9级:[10.8, 20.8) m/s)、高风速(大于9级:≥20.8 m/s)以及所有风速情况进行对比分析,结果如图5所示。可以看出,各时次极大风速的独立检验样本共2460个,大部分的观测风速在低风速范围,中风速的个数为100—400,高风速样本很少,平均每时次4个,部分时次为0,而且各类风速样本数在不同时次有较大变化。

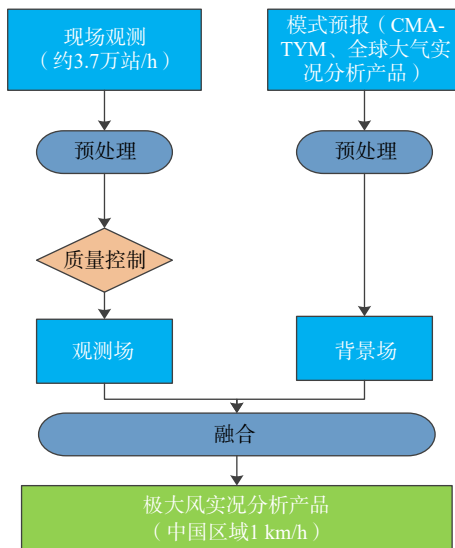


图4 极大风实况分析产品研制技术路线

Fig. 4 Technical route for the development of wind gust analysis product

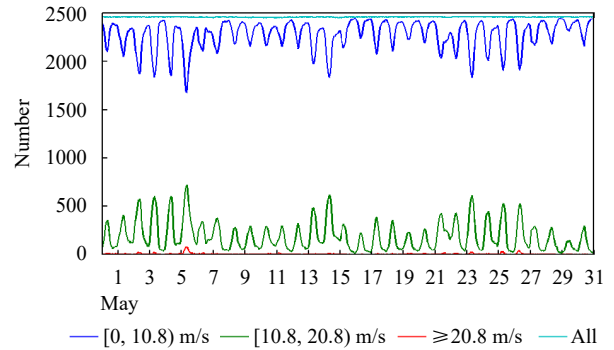


图5 中国区域2480个国家级气象观测站2021年5月不同等级极大风样本数统计

Fig. 5 Statistics of the number of wind gust observations at different wind levels in May 2021 using data from 2480 national stations in China

为了验证极大风产品的数据质量,采用国家级气象观测站的资料进行独立检验和非独立检验。由于极大风实况分析产品已包含了国家级气象观测站的实时观测,独立检验则将国家级气象观测站进行人为剔除,生成不包含该类观测数据的极大风融合分析产品,再对该数据进行网格化形成1 km逐时产品进行评估分析,非独立检验则不剔除该类资料直接进行评估分析。检验方法除了式(1)的平均偏差和式(4)的均方根误差以外,增加相对误差(ER)、准确率(AC)、偏强率(FS)、偏弱率(FW)等指标,同时重点分析BIAS和RMSE的时空变化。具体验证指标如下

$$ER = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (G_i - O_i)}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N O_i} \times 100\% \quad (8)$$

$$AC_k = \frac{NR_k}{NF_k} \times 100\% \quad (9)$$

$$FS_k = \frac{NS_k}{NF_k} \times 100\% \quad (10)$$

$$FW_k = \frac{NW_k}{NF_k} \times 100\% \quad (11)$$

式中, k 代表风力分级检验等级, NR_k 为 k 等级下风力等级检验正确站数, NS_k 为 k 等级下风力等级检验偏强站数, NW_k 为 k 等级下风力等级检验偏弱站数, NF_k 为 k 等级下风力等级检验总站数。

4.2 整体验证分析

图 6 为背景场、非独立检验和独立检验下极大风产品与观测的散点分布,从中可以发现,在非独立检验下,极大风观测与融合结果散点分布趋于一致,相关系数为 0.98,在独立检验情形下,融合产品与观测的匹配度相对较低,相关系数为 0.85,但明显优于原始背景场的 0.65。该结果表明融合观测后的极大风实况分析产品质量有了明显提高,与实际观测有较高的一致性。

图 7 为极大风背景场与产品在非独立检验和独立检验下的 BIAS 与 RMSE 空间分布情况,融合产品误差明显较背景场误差小,且区域分布差异较小,尤其是融合观测后的非独立检验结果,其偏差在全国范围内都较小,且分布在 0 附近,均方根误差也基本小于 1 m/s;独立检验下的极大风产品,虽然整体偏差和误差都要明显大于非独立检验结果,但其误差在数值上明显小于背景场,说明融合观测后的极大风整体质量有明显提升。

图 8 为 2021 年 5 月极大风逐日和逐时统计结果,从中可以发现融合后的极大风产品在独立检验和非独立检验情形下,平均偏差和均方根误差都明显减小,且变化幅度较小,产品质量更稳定,而背景场误差明显较大,且波动较大,这主要是因为背景场采用的模式预报资料并不是逐时更新,如全球大气实况分析产品是逐 6 h 更新,由于预报时次离更新时次越远则误差累积越大,导致了背景场误差呈现较明显的周期变化。

表 4 为非独立检验和独立检验下 2021 年 5 月 744 个时次不同风速极大风产品与背景场的误差统计对比。从中可以看出,融合结果的误差明显优于极大风背景场,且独立检验的误差明显大于非独立检验。其中,产品均方根误差在非独立检验下为 0.68 m/s,独立检验为 1.9 m/s,明显小于背景场的 3.1 m/s,同时产品的准确率、偏强率、偏弱率等指标较背景场有明显提升。此外,在较低风速下,误差较小、准确率较高,但随着风速增大,样本数量急剧减少,产品的误差明显变大,准确率逐渐下降,而极大风的融合产品能够有效提升极大风速数据质量,其中 9 级以上风速的准确率提高了 89.3%(从 13.1% 提高到 24.8%),相对误差下降了 27.4%(由 -35.8% 下降到 -26.0%),体现了极大风融合产品在不同风速下的产品优势与较高的可靠性。

5 结论

目前,中国区域 1 km 逐时极大风实况分析产品已实现业务准入,业务系统部署在派-曙光服务器,该系统在获取观测资料和模式预报资料后,通过完成对观测资料的质量控制、多模式资料集成分析、多源资料融合分析等处理,实现极大风观测资料与背景场的有效融合,生成极大风实况分析产品,同时该系统增加历史回算与关键流程实时评估分析功能,可实现对产品实时流程的监控与长序列产品的研制。

本研究通过对极大风预报数据的评估分析发

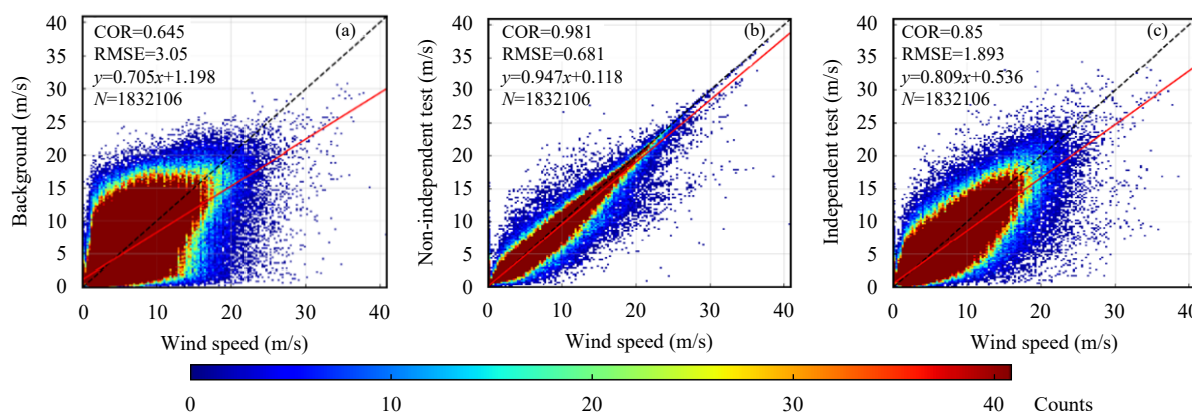


图 6 背景场 (a)、非独立检验 (b) 和独立检验 (c) 极大风产品与观测的散点分布 (红线为离散点的拟合回归线)
 Fig. 6 Scattered distributions of background field (a), wind gust product in non-independent tests (b) and independent tests (c) with observations (the red line shows the fitted regression line for discrete points)

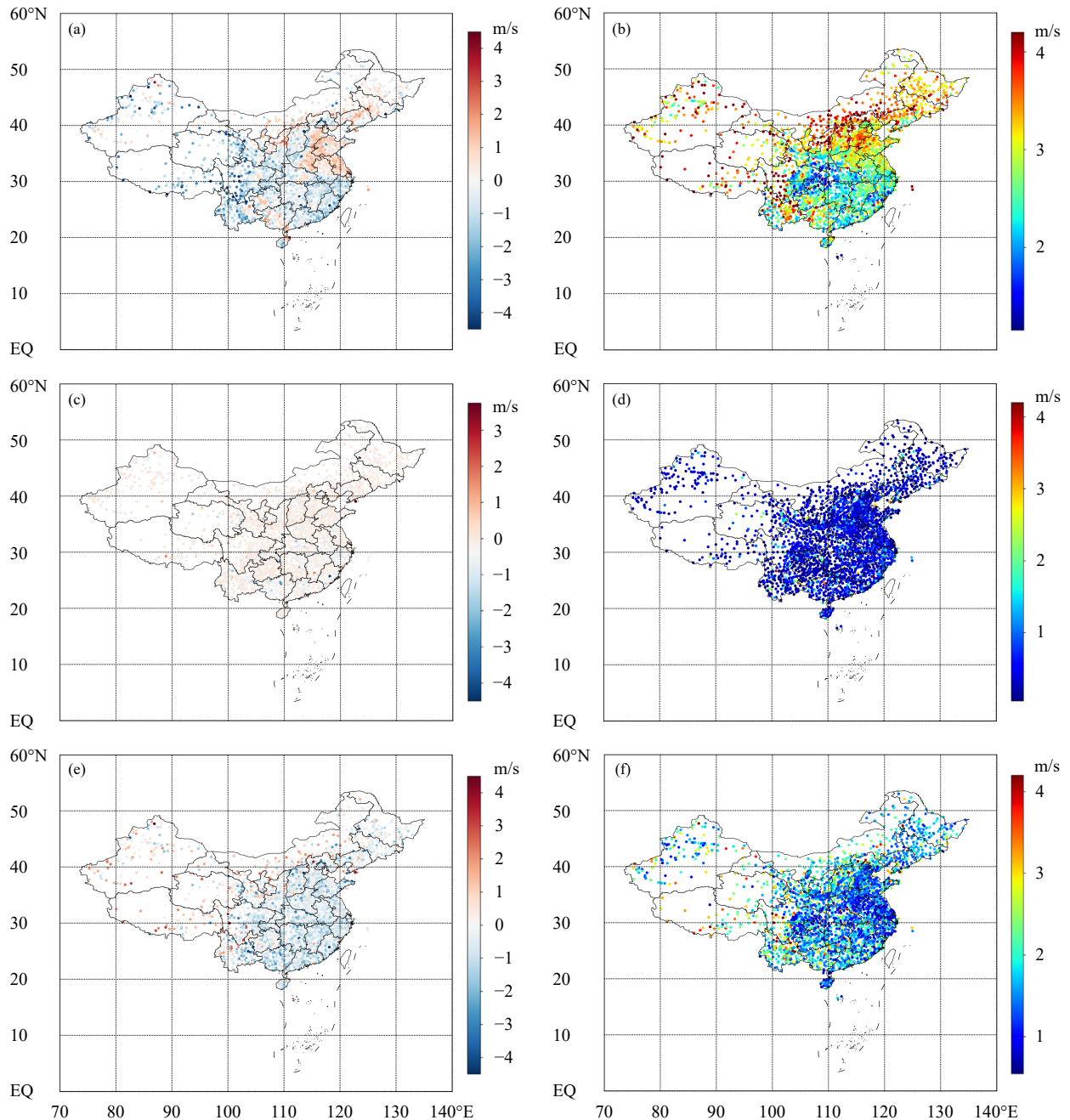


图7 极大风背景场 (a, b) 与产品在非独立检验 (c, d) 和独立检验 (e, f) 下的BIAS (a, c, e) 与RMSE (b, d, f) 空间分布

Fig. 7 Spatial distributions of BIAS (a, c, e) and RMSE (b, d, f) for wind gust background field (a, b) and products under non-independent tests (c, d) and independent tests (e, f)

现, 极大风预报均方根误差小于 3.1 m/s, 但 6—9 级和 9 级以上极大风预报均方根误差分别为 4.9 和 10.3 m/s。而通过多源融合分析获得的极大风实况分析产品质量明显提升, 其独立检验均方根误差为 1.9 m/s, 非独立检验为 0.68 m/s。该产品在不同风

速极大风产品的评价指标有较大差异, 随着风速增大, 样本数不断下降, 产品的误差有较明显增大趋势, 且准确率逐步降低, 但融合产品能够有效提升极大风速的数据质量。其中, 9 级以上风速的准确率提高了 89.3%, 相对误差下降了 27.4%。

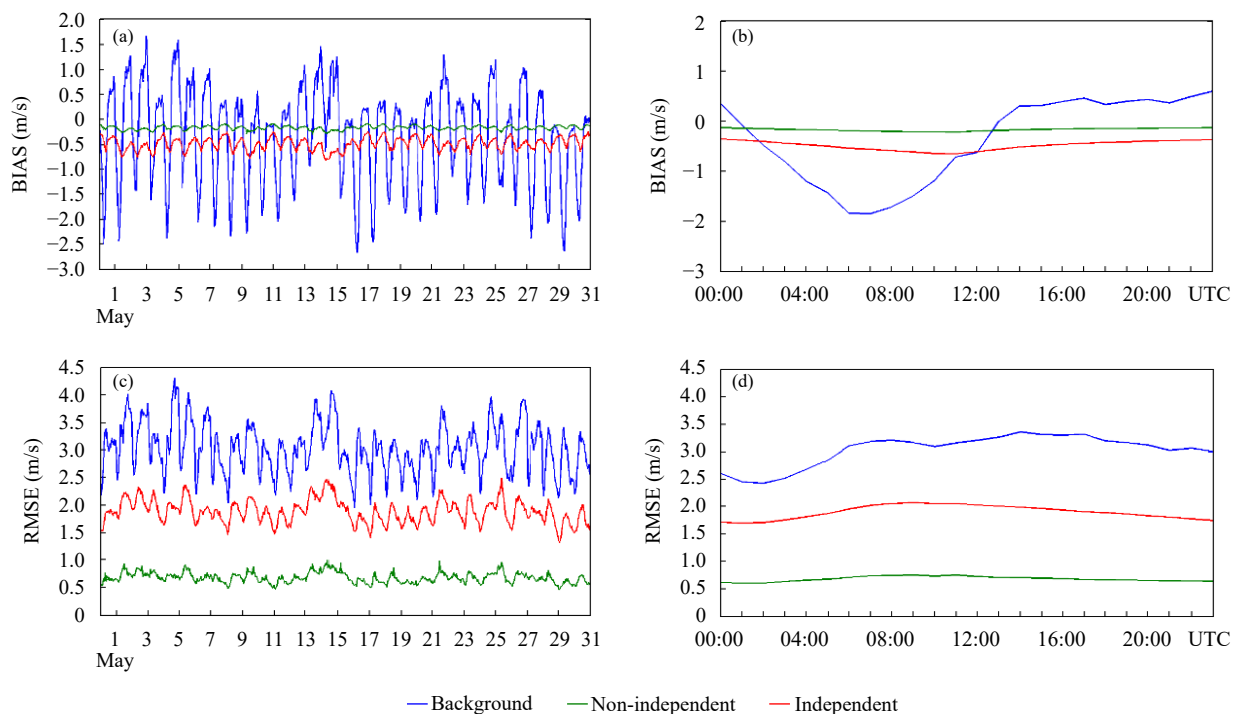


图 8 2021 年 5 月极大风产品和背景场的 BIAS (a, b) 及 RMSE (c, d) 的逐日 (a, c) 和逐时 (b, d) 变化
 Fig. 8 BIAS (a, b) and RMSE (c, d) of the wind gust product and background fields of time series (a, c) and their hourly variations in a day (b, d)

表 4 不同风速极大风产品误差统计

Table 4 Comparison of error statistics for the wind gust product at different wind speeds

检验	风速(m/s)	BIAS(m/s)	RMSE(m/s)	AC(%)	FS(%)	FW(%)	ER(%)	样本数
背景场		-0.374	3.05	90.6	5.4	4	-7.0	
非独立检验	[0, 56.0)	-0.165	0.681	98.5	0.3	1.3	-3.1	1832106
独立检验		-0.482	1.893	94.9	1.6	3.4	-9.1	
背景场		-0.162	2.813	94.2	5.8	0	-3.5	
非独立检验	[0, 10.8)	-0.132	0.578	99.7	0.3	0	-2.9	1690947
独立检验		-0.36	1.654	98.3	1.7	0	-7.8	
背景场		-2.795	4.912	47.8	0.5	51.7	-21.0	
非独立检验	[10.8, 20.8)	-0.53	1.32	84.1	0.1	15.8	-4.0	138015
独立检验		-1.844	3.532	55.4	0.8	43.8	-13.9	
背景场		-8.309	10.254	13.1	0	86.9	-35.8	
非独立检验	[20.8, 56.0)	-1.944	3.756	64.7	0	35.3	-8.4	3144
独立检验		-6.027	8.332	24.8	0	75.2	-26.0	

参考文献

呼津华, 王相明. 2009. 风电场不同高度的 50 年一遇最大和极大风速估算. *应用气象学报*, 20(1): 108-113. Hu J H, Wang X M. 2009. A method for estimating the extreme 10-minute average and 3-second wind speed with a recurrence period of 50 years at the different height in a wind farm. *J Appl Meteor Sci*, 20(1): 108-113 (in Chinese)

纪玲玲, 袁祝香, 刘玉汐等. 2020. 吉林省极大风速时空变化特征及其与气

候变暖的关系. *干旱气象*, 38(3): 388-395. Ji L L, Xi Z X, Liu Y X, et al. 2020. Spatio-temporal variation characteristics of extreme wind speed in Jilin province and its relationship with climate warming. *J Arid Meteor*, 38(3): 388-395 (in Chinese)

孔锋, 孙劭. 2020. 中国近地表不同重现期极大风速强度的时空差异特征研究. *干旱区资源与环境*, 34(12): 148-154. Kong F, Sun S. 2020. Spatial and temporal differential characteristics of near surface instantaneous maximum wind speed intensity in different return periods in China. *J*

- Arid Land Resour Environ*, 34(12): 148-154 (in Chinese)
- 李艳萍, 黎锦雷, 陶伟等. 2021. 临桂站极大风速观测值可靠性分析. *气象科技*, 49(3): 504-508. Li Y P, Li J L, Tao W, et al. 2021. Reliability analysis of observed maximum wind speed at Lingui station. *Meteor Sci Technol*, 49(3): 504-508 (in Chinese)
- 林中鹏, 林辉阳, 谢启杰. 2015. 福建沿海最大风速与极大风速线性回归分析. *农业灾害研究*, 5(11): 51-52. Lin Z P, Lin H Y, Xie Q J. 2015. Linear regression analysis between maximum 10-minute average wind speed and maximum instantaneous wind speed in the coastal area of Fujian province. *J Agric Catastrophol*, 5(11): 51-52 (in Chinese)
- 钱磊, 邱学兴, 郑淋淋. 2019. 基于概率密度匹配方法的 WRF 模式阵风风速误差订正. *气象科技*, 47(6): 916-926. Qian L, Qiu X X, Zheng L L. 2019. Error correction of WRF model gust speed based on probability density function matching method. *Meteor Sci Technol*, 47(6): 916-926 (in Chinese)
- 邱博, 张录军, 谭慧慧. 2013. 中国大风集中程度及气候趋势研究. *气象科学*, 33(5): 543-548. Qiu B, Zhang L J, Tan H H. 2013. Study on the gale concentration degree and climatic tendency in China. *J Meteor Sci*, 33(5): 543-548 (in Chinese)
- 荆春香, 潘畅, 谷军霞等. 2019. 多源气象数据融合格点实况产品研制进展. *气象学报*, 77(4): 774-783. Shi C X, Pan Y, Gu J X, et al. 2019. A review of multi-source meteorological data fusion products. *Acta Meteor Sinica*, 77(4): 774-783 (in Chinese)
- 王冀, 李英, 吴哲红等. 2019. 我国大风机理研究和预报技术进展. *气象科技*, 47(4): 600-607. Wang H, Li Y, Wu Z H, et al. 2019. Advances in researches on mechanisms and forecast techniques of high winds in China. *Meteor Sci Technol*, 47(4): 600-607 (in Chinese)
- 吴素良, 王琦, 张侠等. 2020. 陕西黄土高原地区日极大风速的统计推算方法. *陕西气象*, (2): 48-51. Wu S L, Wang Q, Zhang X, et al. 2020. Statistical calculation of daily maximum wind speed over the Loess Plateau in Shaanxi. *J Shaanxi Meteor*, (2): 48-51 (in Chinese)
- 张凯. 2019. 格库铁路青海段风沙灾害工程防治研究[D]. 兰州: 兰州交通大学. Zhang K. 2019. Study on the control engineering of wind-blown sand disasters along the Qinghai section of Golmud-Korla railway[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University (in Chinese)
- 中国气象局. 2020. 气象观测资料质量控制 地面(QX/T 118—2020). 北京: China Meteorological Administration. 2020. Quality control of meteorological observation data-Surface (QX/T 118—2020). Beijing (in Chinese)
- 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 2012. 风力等级(GB/T 28591—2012). 北京: General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. 2012. Wind scale (GB/T 28591—2012). Beijing (in Chinese)
- 曾耀海. 2018. 极大风速在强对流预报中的重要意义. *农业灾害研究*, 8(3): 66-67. Zi Y H. 2018. Significance of maximum wind speed in severe convection prediction. *J Agric Catastrophol*, 8(3): 66-67 (in Chinese)
- Cheng E, Yeung C. 2002. Generalized extreme gust wind speeds distributions. *J Wind Eng Ind Aerodyn*, 90(12-15): 1657-1669
- De Pondeca M S F V, Manikin G S, Dimego G, et al. 2011. The real-time mesoscale analysis at NOAA's national centers for environmental prediction: Current status and development. *Wea Forecasting*, 26(5): 593-612
- Han S, Shi C X, Sun S, et al. 2022. Development and evaluation of a real-time hourly one-kilometre gridded multisource fusion air temperature dataset in China based on remote sensing DEM. *Remote Sens*, 14(10): 2480
- Jones T A, Lindley T T, Skinner P, et al. 2024. A red flag threat index based on the real-time mesoscale analysis for use in the warn-on-forecast system. *Bull Amer Meteor Soc*, 105(12): E2405-E2416
- Morris M T, Carley J R, Colón E, et al. 2020. A quality assessment of the real-time mesoscale analysis (RTMA) for aviation. *Wea Forecasting*, 35(3): 977-996
- Ngo T, Letchford C. 2008. A comparison of topographic effects on gust wind speed. *J Wind Eng Ind Aerodyn*, 96(12): 2273-2293
- Ngo T, Letchford C E. 2009. Experimental study of topographic effects on gust wind speed. *J Wind Eng Ind Aerodyn*, 97(9-10): 426-438
- Purser R J, Rancic M, De Pondeca M S F V. 2022. The multigrid beta function approach for modeling of background error covariance in the real-time mesoscale analysis (RTMA). *Mon Wea Rev*, 150(4): 715-732
- Shu Z R, Li Q S, He Y C, et al. 2015. Gust factors for tropical cyclone, monsoon and thunderstorm winds. *J Wind Eng Ind Aerodyn*, 142: 1-14
- Wang B L, Hu F, Cheng X L. 2011. Wind gust and turbulence statistics of typhoons in South China. *Acta Meteor Sinica*, 25(1): 113-127
- Xie Y, Koch S, McGinley J, et al. 2011. A space-time multiscale analysis system: A sequential variational analysis approach. *Mon Wea Rev*, 139(4): 1224-1240