

刘晓燕, 宋晓姜, 郭安博宇, 等. 构建准实时海面风场的一种智能算法[J]. 海洋学报, 2024, 46(6): 51–65. doi:10.12284/hyxb2024051  
Liu Xiaoyan, Song Xiaojiang, Guo Anboyu, et al. An intelligent algorithm for constructing quasi-real-time sea surface wind field[J]. Haiyang Xuebao, 2024, 46(6): 51–65. doi:10.12284/hyxb2024051

# 构建准实时海面风场的一种智能算法

刘晓燕<sup>1,2</sup>, 宋晓姜<sup>1,2\*</sup>, 郭安博宇<sup>1,2</sup>, 郝赛<sup>1,2</sup>, 彭炜<sup>1,2</sup>

(1. 国家海洋环境预报中心, 北京 100081; 2. 自然资源部海洋灾害预报技术重点实验室, 北京 100081)

**摘要:** 本文基于深度学习 U-Net 网络构建了 CMA-GFS 数值模式风场订正模型, 并以此订正模型订正后的风场为背景场 (CMA-GFS\_Unet), 以 HY-2B/2C/2D 以及 MetOp-B 4 颗卫星的散射计海面风资料为观测资料, 采用插补法快速完成准实时海面风场的构建。此智能算法可实现滞后 3 h 准实时生成空间分辨率为 0.25°、时间分辨率为 6 h 的全球海面融合风场 (Fusion\_QRT)。分别使用 CCMP 融合风场数据和中国近海浮标 10 m 风矢量数据对 CMA-GFS、CMA-GFS\_Unet 和 Fusion\_QRT 3 组风场资料进行了评估, 结果表明, CMA-GFS\_Unet 风场质量得到显著提升, Fusion\_QRT 风场风速质量得到进一步改善, 但风向质量略有降低: 相较于 CCMP, 3 组风场的风速平均绝对误差 (MAE) 分别为 1.13 m/s、0.89 m/s 和 0.84 m/s, CMA-GFS\_Unet 和 Fusion\_QRT 相较于 CMA-GFS 分别提升了 21.3% 和 25.7%; 风向 MAE 分别为 17.5°、15.5° 和 16°, 分别提升了 11.3% 和 8.6%; 而相较于浮标, 风速 MAE 分别为 1.50 m/s、1.36 m/s 和 1.28 m/s, 分别提升了 9.3% 和 14.7%; 风向 MAE 分别为 23.3°、22.7° 和 24.0°, 分别提升了 3.0% 和 -3.9%。

**关键词:** U-Net; CCMP; CMA-GFS; HY-2B/2C/2D; MetOp-B; 准实时; 海面风场

中图分类号: P714<sup>+.2</sup>

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2024)06-0051-15

## 1 引言

海面风场是海洋上层运动的主要动力来源, 海洋灾害与海面风场密切相关, 海上大风是导致海上灾害的重要因素之一<sup>[1-6]</sup>, 因此海面风场的预报对海洋上的各类生产活动都有着十分重要的影响, 如海洋运输导航、海上工程建设、海洋防灾减灾等<sup>[7]</sup>。目前, 海面风场观测资料主要有浮标、船舶、海洋站等常规观测资料以及卫星遥感观测等非常规观测资料, 卫星遥感资料的出现, 极大地解决了海上观测资料匮乏的问题, 尤其是随着越来越多的卫星的发射, 观测资料也越来越丰富, 极大地提高了海上观测资料的覆盖率, 有效解决了海上观测资料稀缺的问题, 但是对于单一

的卫星而言, 其覆盖率依然是个问题, 无法提供时空连续的覆盖全场的海面风场资料, 为解决这一问题, 海面风场融合技术应运而生<sup>[8-9]</sup>。

目前, 国内外众多学者已经在数据融合技术方面进行了研究, 许多成熟的融合算法也已被学者研究开发并利用<sup>[10]</sup>。国外对数据融合技术的研究开始较早, 计算机硬件设备也较为先进, 因此海面风场融合的相关研究得以快速发展<sup>[8]</sup>, 而国内学者对海面风场融合的研究起步相对比较晚, 但对国际上各种先进的技术方法也都有研究和试验, 常用的方法主要有时空加权法、克里金法、最优插值法以及变分分析法等<sup>[11-17]</sup>。目前, 多家机构已实现海面风场资料融合的业务化<sup>[18-19]</sup>, 如美国国家大气研究中心的 NSCAT/NCEP 混合风场

收稿日期: 2024-01-24; 修订日期: 2024-05-10。

基金项目: 国家重点研发计划 (2023YFC3107901); 自然资源部空间海洋遥感与应用研究重点实验室开放基金 (202102004)。

作者简介: 刘晓燕 (1988—), 女, 山东省日照市人, 从事海面风场资料同化与融合研究。E-mail: liuxiaoyan-de@163.com

\* 通信作者: 宋晓姜 (1981—), 女, 北京市人, 正高级工程师, 从事海洋气象预报研究。E-mail: xjsong@nmefc.cn

及其后发布的 Q/N 混合风场,前者是对高分辨率的 NSCAT 卫星数据和美国国家环境预报中心再分析数据进行空间混合的分析产品,后者是对 QuikSCAT 卫星散射计观测数据和 NCEP 再分析数据进行时空混合的分析产品,不过这两种产品均因卫星的停止运行而停产<sup>[20]</sup>;而由美国宇航局物理海洋学数据分发存档中心开发的交叉检验多平台合成数据集(Cross-Calibrated Multi-Platform, CCMP),是国外业务上最常用的海洋矢量风分析产品,所使用的融合方法为变分同化分析方法,该产品空间分辨率为 0.25°,时间分辨率为 6 h<sup>[21]</sup>。目前,该融合产品有 v02.1.NRT 和 v03.1 两个版本,其中 CCMP v02.1.NRT 为近实时产品,时效性较好,可获取时间滞后不超过 48 h<sup>[22]</sup>,而 CCMP v03.1 产品为每月更新<sup>[23]</sup>(<https://www.remss.com/measurements/ccmp/>)。国家卫星海洋应用中心早在多年前就已经开始了多源卫星海面风场融合技术的研究<sup>[12]</sup>,并于 2023 年 3 月正式对外发布了自主海洋卫星融合产品,其中包含了海面风场融合产品,其空间分辨率为 0.25°,时间分辨率为 6 h([http://www.nsoas.org.cn/news/content/2023-03/24/24\\_13247.html](http://www.nsoas.org.cn/news/content/2023-03/24/24_13247.html)),其中 00 时和 12 时产品滞后 3 h 定时启动生产,06 时和 18 时产品滞后 5 h 定时生产。

综上,目前已业务化的且可获得的海面风场融合产品虽已有较高的时空分辨率,但时效性均较差,无法供海洋气象日常业务值班预报作参考,而实况风场对于指导海面风场的预报和检验有着极为重要的意义,因此,研制准实时海面风场,是一个亟需解决的问题,在这样的背景下,本文提出一种基于 U-Net 神经网络的深度学习智能算法,此算法可实现滞后 3 h 准实时生成空间分辨率为 0.25°、时间分辨率为 6 h 的全球海面融合风场,以较好地满足日常业务需要。

## 2 数据资料

### 2.1 CMA-GFS 数据

中国气象局全球同化预报系统(China Meteorological Administration-Global Forecast System, CMA-GFS)主要由同化分系统和全球模式分系统两部分组成,于 2016 年 6 月业务化运行,向全国实时分发产品;2020 年 CMA-GFS 升级为 3.0 版本,模式水平分辨率为 0.25°;2022 年 CMA-GFS 升级为 3.3 版本;2023 年 CMA-GFS 升级为 4.0 版本,模式水平分辨率为 0.125°(<http://cemc.cma.cn/intro.html?idx=1>),3.3 版本也随之停产。本文采用的是 CMA-GFS v3.3,该数值模式预报每天更新 4 次(00/06/12/18UTC),数据可覆盖全球。本文使用

CMA-GFS 的 6 h 预报结果作为构建风场订正模型的学习特征(2022 年全年)和构建准实时海面风场的原始背景场(2023 年 4 月)。

### 2.2 CCMP 融合风场数据

CCMP 海面融合风场数据由美国航空航天局的物理海洋学分布式存档中心发布的较高时空分辨率的全球海面融合风场产品(空间分辨率为 0.25°,空间范围为 78.375°S~78.375°N,180°W~180°E,时间分辨率为逐 6 h)。该产品是以欧洲中期天气预报中心的再分析数据为背景场,通过对卫星微波遥感和仪器观测的海面风数据进行交叉校准和同化得到的合成风场资料<sup>[14,23-24]</sup>。本文使用该数据作为背景场优化的标签数据(2022 年全年)和用于评估构建的准实时海面风场的质量(2023 年 4 月)。

### 2.3 HY-2B、HY-2C、HY-2D 卫星散射计海面风数据

HY-2B、HY-2C、HY-2D 3 颗卫星均为我国自主研发的海洋动力环境卫星,分别于 2018 年 10 月 25 日、2020 年 9 月 21 日和 2021 年 5 月 19 日成功发射,这 3 颗在轨 HY-2 系列卫星共同构成了我国海洋动力环境监测网,形成了全天候、全天时、高频次全球大中尺度的海洋动力环境监测体系<sup>[25-26]</sup>,这 3 颗卫星上搭载的微波散射计可获取 10 m 海面风资料,风速测量范围均为 2~24 m/s,风速精度为 2 m/s,风向为 20°(<http://www.nsoas.org.cn>)。本文使用的是该数据的 L2B 级产品,按轨道存储,每轨存储有 1 624 × 76 个风矢量单元,其中 1 624 是行数,76 是每行的风元数,空间分辨率为 25 km,时间段为 2023 年 4 月。

### 2.4 MetOp-B 卫星散射计海面风数据

欧洲航天局发射的第二颗气象卫星 MetOp-B 业务观测卫星于 2012 年 9 月成功发射,并在轨运行至今。该卫星上搭载的微波散射计 ASCAT 可获取 10 m 海面风资料,空间分辨率有 25 km 和 12.5 km 两种,风速有效测量范围为 0~25 m/s,风速精度为 2 m/s<sup>[27]</sup>。本文使用的同样是该数据的 L2B 级产品,且选取的是分辨率为 25 km 的数据,时间段为 2023 年 4 月。

### 2.5 浮标数据

本文使用的浮标资料为自然资源部在中国近海布放的 21 个业务化的浮标观测的 10 m 海面风矢量数据。浮标站点从北至南跨越中国大部分近海海域,最北位于 40°N 左右,最南位于 10°N 左右(见图 1),时间分辨率为逐小时,时间段为 2023 年 4 月。

## 3 准实时海面风场的构建

准实时海面风场的构建是基于业务工作的需要,

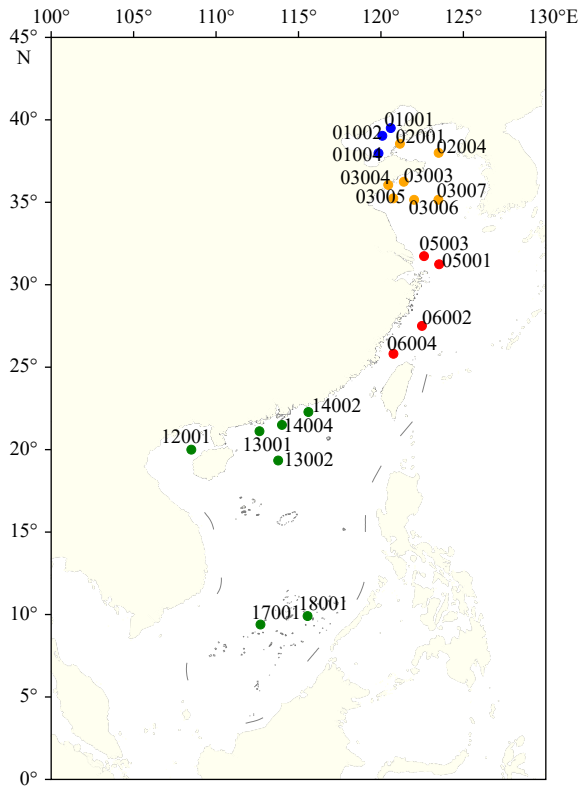


图1 浮标站点位置分布  
Fig. 1 Distribution of buoys location

所以风场的区域范围、时空分辨率以及其生成时效性均为重要的考核指标。为满足业务工作需要,同时考虑实际情况,本文构建的准实时海面风场为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 、逐6 h的全球范围的海面风场产品,且时效上允许滞后的时间为3 h以内,综合考虑各方面因素,本文将每个时刻的风场构建时间确定在滞后2.5 h定

时启动,半小时内完成。

### 3.1 风场构建算法

准实时海面风场的构建主要分为3部分进行,首先是CMA-GFS风场订正模型的构建,该部分依赖于历史数据,采用深度学习U-Net网络构建之后,便可以直接用于CMA-GFS风场的订正,以获得准实时海面风场的背景场(CMA-GFS\_Unet)(图2左半部分);然后对4颗卫星散射计海面风场数据进行插值处理,使其时空分辨率与背景场一致;为最大程度保留观测资料信息,同时提高风场构建速度,最后采用插补法将卫星散射计海面风场与背景场进行快速融合,最终完成准实时海面风场的构建(图2右半部分)。

其中,构建CMA-GFS风场订正模型使用的方法是U-Net,这是一种基于卷积神经网络(Convolutional Neural Network, CNN)发展而来的深度学习网络,因其独特的U型网络结构而得名,该方法最早应用于图像分割领域<sup>[28-29]</sup>。U-Net网络结构主要由两部分组成:编码器(Encoder)和解码器(Decoder),如图3。图中左边部分是Encoder部分,又称特征提取部分,为卷积和最大池化的堆叠,利用该部分我们可以获得5个初步有效特征层,用于后续加强特征提取部分的特征融合;Decoder又称加强特征提取部分,与编码器镜像对称,是利用主干特征提取部分获取到的5个初步有效特征层进行上采样,并且使用skip-connection进行特征融合,将浅层的位置信息与深层的语义信息进行拼接。Unet作为图像处理的经典网络结构,最初应用于医学图像分割且有较好的效果<sup>[30]</sup>,现在也常被应用在气象领域<sup>[31-33]</sup>。本文利用U-net深度学习网络

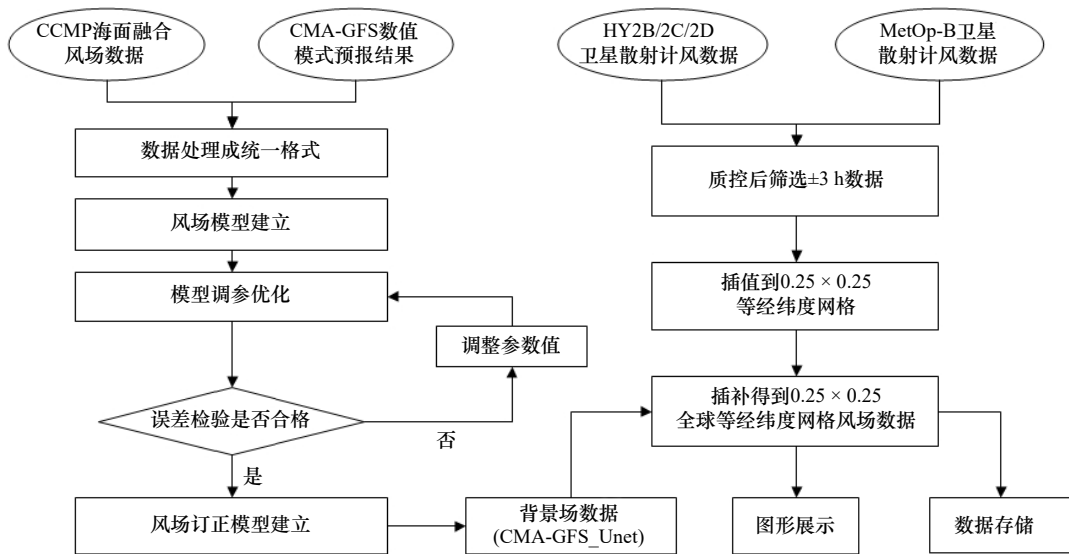


图2 准实时海面风场构建流程

Fig. 2 Flow chart of quasi-real-time surface wind field construction

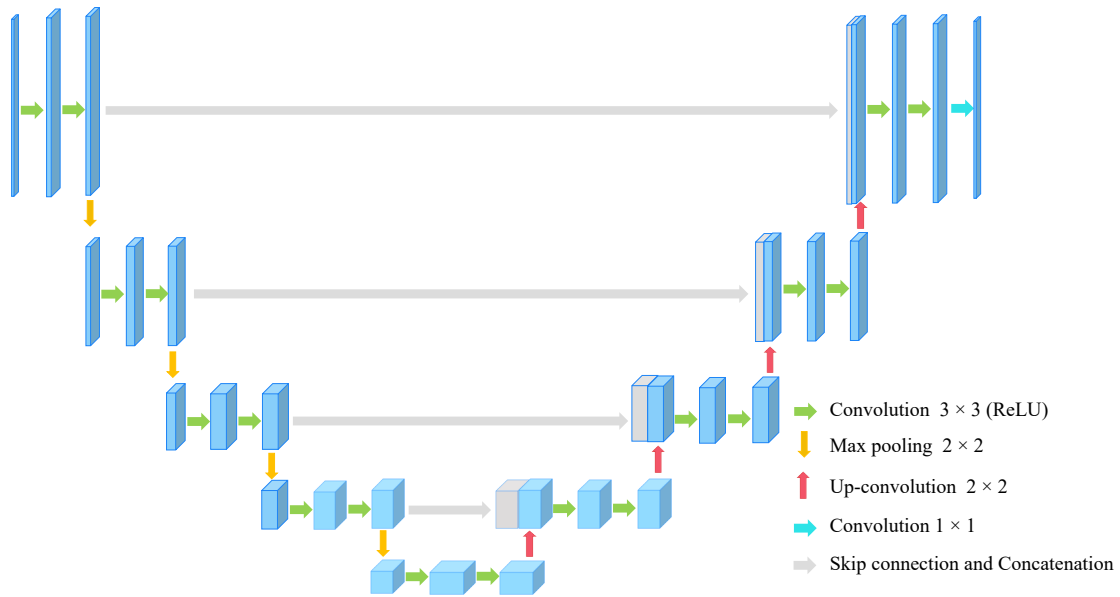


图3 U-Net网络结构示意图

Fig. 3 Diagram of U-Net network structure

对 CMA-GFS 风场进行偏差订正, 期望得到更优的融合风场背景场资料。

### 3.2 CMA-GFS 风场订正模型的构建及背景场生成

风场订正模型的构建是以 2022 年随机八成的 CCMP 融合风场数据为标签数据, 以对应时刻的 CMA-GFS 数值模式 6 h 预报结果作为训练特征, 剩余两成数据用于测试, 所以在进行训练之前, 需对两组数据进行格式统一处理成训练所需格式, 然后基于 U-Net 网络分别构建 U10 和 V10 的订正模型, 通过优化器的选择、学习率等参数的调整来不断优化模型, 通过反复训练、验证评估, 最终选定模型参数, 完成模型构建。

使用构建的风场订正模型对 CMA-GFS 模式风场进行订正, 便可以快速得到准实时海面风场的背景场 (CMA-GFS\_Unet), 该过程只需要几秒钟时间。图 4 是选取了 2023 年 4 月 29 日 00 时的风场进行效果展示, 其中图 4a 是 CMA-GFS 模式风场数据, 图 4b 是 CMA-GFS\_Unet 风场, 图 4c 是作为真值参考的 CCMP 融合风场数据。对比 3 张图, 可以明显看到, 在 60°S 及以南的区域范围内存在多个大风区, 而在这些大风区, CMA-GFS 相对于 CCMP 的风速偏小, CMA-GFS\_Unet 的风速更接近 CCMP, 所以风场订正使得 CMA-GFS 风场得到优化, 可以认为风场订正是有效的。

图 4 给出的是全球风场的订正效果展示, 图 5 则将区域缩小至西北太平洋区域, 这样可以更清晰地观察到订正效果, 选取的时间为 2023 年 4 月 21 日 12 时。同样是 CMA-GFS 模式风场数据、CMA-GFS\_Unet 风

场和作为真值参考的 CCMP 融合风场数据 3 组数据的一个对比图, 由图可以清晰看到, 图中标注的区域, CMA-GFS 风场预报出现了明显偏大的情况, 而风场订正过程使得此偏差得到了有效订正, 订正后的风场 CMA-GFS\_Unet 相较于 CMA-GFS 更接近 CCMP。

### 3.3 卫星散射计海面风场数据收集处理

由于 HY-2 系列卫星和 MetOp 卫星散射计海面风场数据均为 25 km × 25 km 空间分辨率的沿轨数据, 为便于与数值模式风场进行快速融合, 需对这 4 颗卫星数据进行插值处理。对任意风场生成时刻, 定时任务启动后, 首先获取卫星散射计海面风数据, 并对收集到的卫星散射计海面风数据进行时间判断, 只保留该时刻 ±3 h 以内的数据近似为该时刻的观测数据, 然后对观测数据采用就近插值方法进行空间插值, 最终处理成全球等经纬度网格数据, 观测数据未覆盖的网格点使用缺省值代替。该过程需要几分钟至十几分钟的时间, 主要取决于观测数据量的大小。

此外, 为了解在风场构建过程中观测数据的占比, 最后统计了 2023 年 4 月的逐 6 h 的观测数据的全球覆盖率情况 (滞后两个半小时定时启动), 如表 1, 由表中的信息可知, 不同时刻的覆盖率有所差异, 平均覆盖率最高的时刻为 06 UTC, 为 42.88%, 最低的时刻为 18 UTC, 仅为 16.51%。

### 3.4 准实时海面风场生成

准实时海面风场构建的最后一步是 3.2 节生成的背景场与 3.3 节生成的观测场的融合过程: 使用 CMA-GFS\_Unet 风场数据对观测风场进行插补处理, 即将

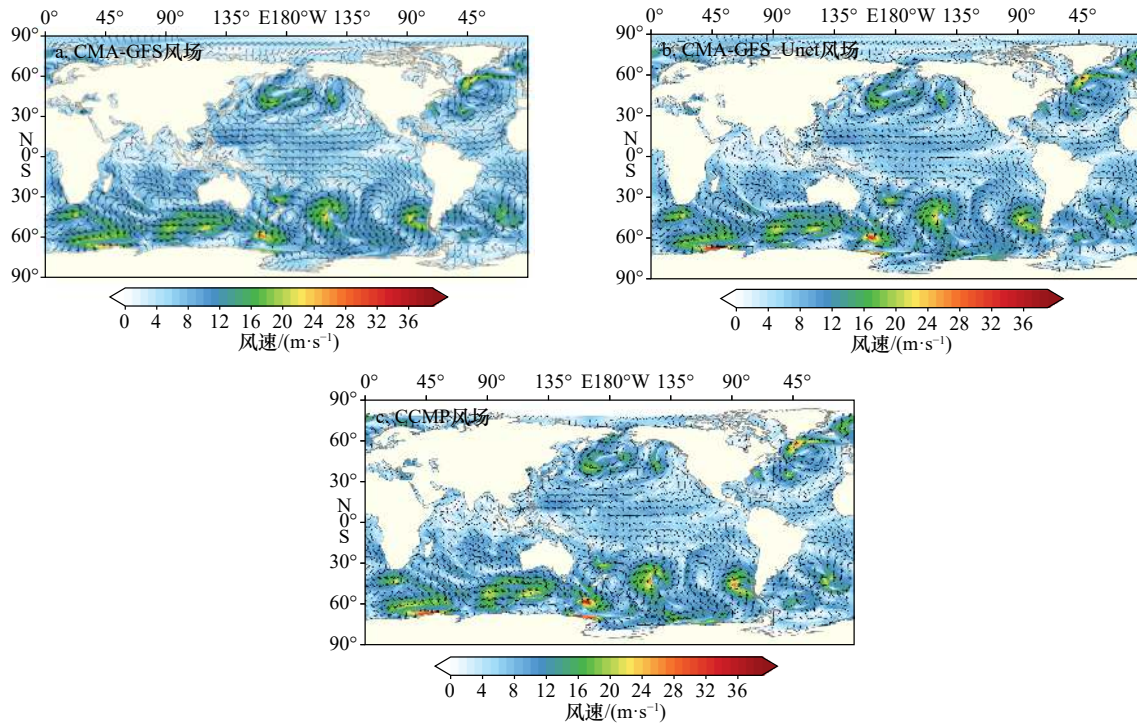


图4 CMA-GFS 风场订正效果  
Fig. 4 CMA-GFS wind field correction effect diagram

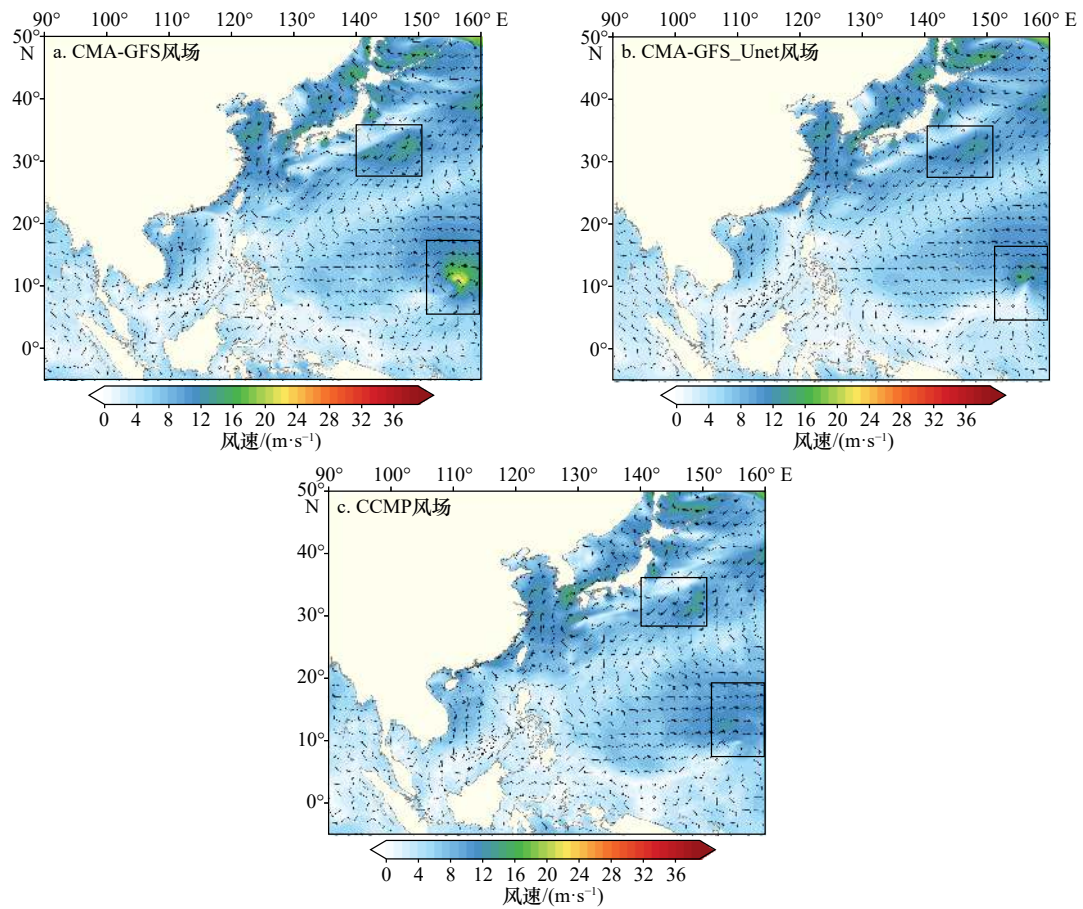


图5 CMA-GFS 风场订正效果(西北太平洋区域)  
Fig. 5 CMA-GFS wind field correction effect diagram (Northwest Pacific region)

表 1 卫星散射计数据平均覆盖率

Table 1 Average coverage of satellite scatterometer data

时间	00 UTC	06 UTC	12 UTC	18 UTC
覆盖率	33.05%	42.88%	28.38%	16.51%

观测场中的缺省值使用对应格点的 CMA-GFS\_Unet 的风场信息进行填补, 由于两种数据具有不同的属性, 为有一个更好的融合效果, 对插补后的融合风场采用高斯滤波法进行了滤波处理, 这样便可完成准实时海面风场的构建, 这个过程只需要不超过 1 min 的时间。

图 6 为准实时海面风场构建过程示意图, 其中 a、b、c 分别为该风场构建过程中需要的卫星散射计海面风观测资料场、背景场以及构建的准实时海面风场, 由图 6c 可以看到观测资料场和背景场很好地融合在一起, 既最大程度地保留了观测数据, 又很好地解决了观测数据覆盖率不足的问题。图 6a 中的观测数据的收集处理是滞后 2.5 h 定时启动的, 由于传输、接收等不确定因素, 会直接影响观测数据量的大小, 为明确定时启动获取的数据与实际观测数据量的关系, 图 7 给出了后补的观测数据的覆盖情况以及与同一背景场进行融合的效果图。对比图 6a 和图 7a 可以明显看到定时启动获取的观测数据量会明显小于同一时刻观测数据的实际数据量, 可见由于时效因

素筛掉了大量的观测数据。为进一步了解覆盖率对融合风场的影响, 本文在定时启动制作了 2023 年 4 月的准实时海面风场 (Fusion\_QRT) 的同时, 后补了另外一组同一时间段相同时刻的海面融合风场, 即背景场一致, 观测数据使用的是  $\pm 3$  小时内的所有观测数据。该组融合风场 (Fusion) 的质量评估将与准实时海面风场的评估在下文中一同进行。

#### 4 算法评估分析

上述工作构建了 CMA-GFS 数值模式风场订正模型, 期望由该模型订正后的数值模式 (CMA-GFS\_Unet) 风场相较于原始风场更接近 CCMP 融合风场, 即说明该模型是有效的; 同时, 完成卫星散射计海面风场数据与 CMA-GFS\_Unet 风场的快速融合, 同样期望该融合风场的质量得到进一步提升, 则可认为, 此融合过程是合理有效且经济实用的。所以本节对订正模型及融合方法开展了评估工作, 包括基于 CCMP 融合风场的场检验和基于中国近海浮标风矢量数据的单点检验。采用的误差统计方法如下:

平均误差 (Mean Error, ME):

$$ME = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N E^i, \quad (1)$$

平均绝对误差 (Mean Absolute Error, MAE):

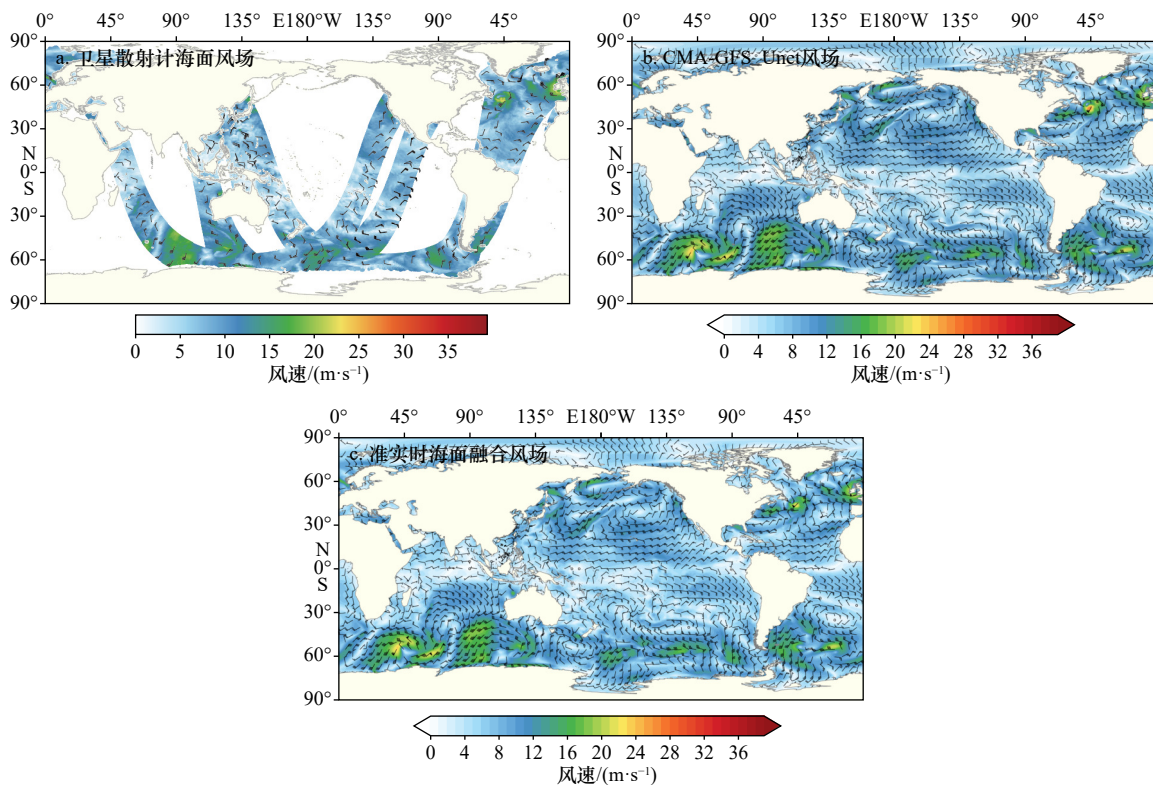


图 6 准实时海面风场构建过程示意

Fig. 6 Process of quasi-real-time surface wind field construction

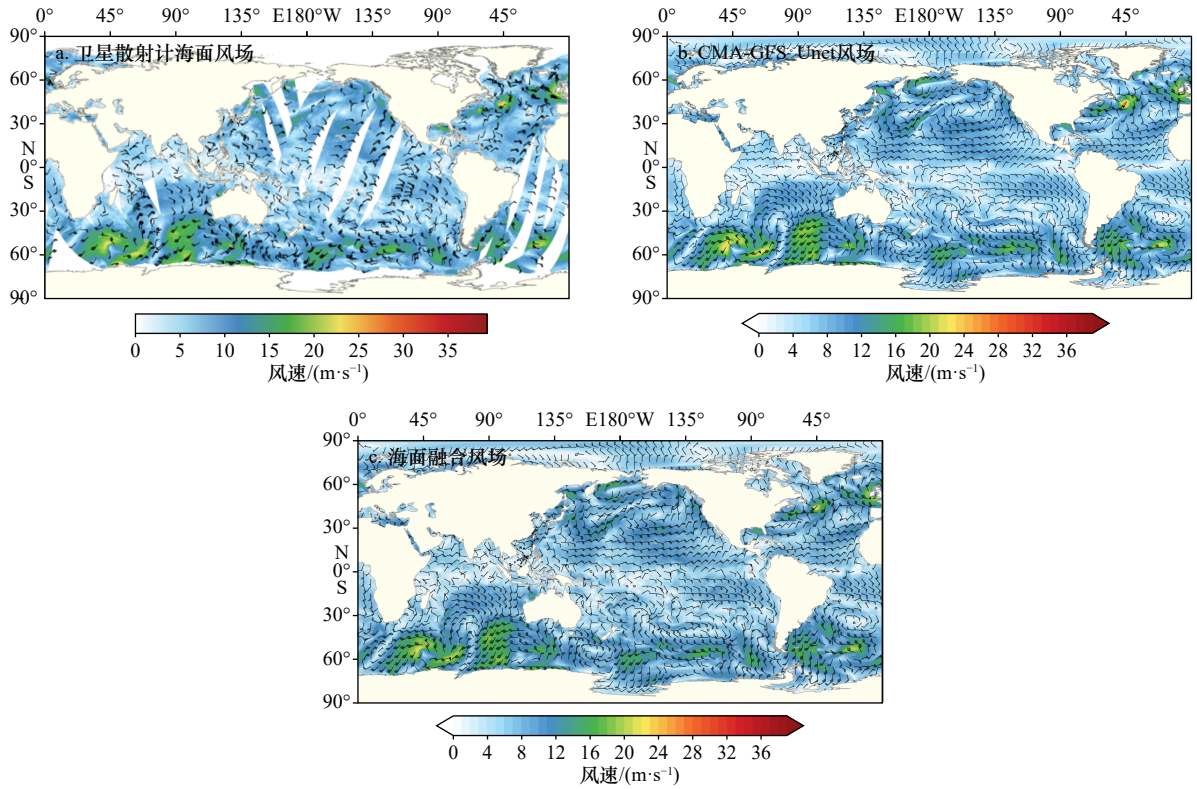


图7 海面融合风场构建过程示意

Fig. 7 Process of surface fusion wind field construction

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |E^i|, \quad (2)$$

均方根误差 (Root Mean Square Error, RMSE):

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (E^i)^2}, \quad (3)$$

相关系数 (Correlation Coefficient, CC):

$$CC = \frac{\sum_{i=1}^N (W_{mod}^i - \bar{W}_{mod}) (W_{obs}^i - \bar{W}_{obs})}{\left[ \sum_{i=1}^N (W_{mod}^i - \bar{W}_{mod})^2 \sum_{i=1}^N (W_{obs}^i - \bar{W}_{obs})^2 \right]^{\frac{1}{2}}}, \quad (4)$$

其中,  $W_{mod}^i$  是各组待检验的数据的风速/风向,  $\bar{W}_{mod}$  是各组待检验的数据的风速/风向的平均,  $W_{obs}^i$  是作为观

测值的数据的风速/风向,  $\bar{W}_{obs}$  是作为观测值的数据的风速/风向的平均。此外, 对于风速而言,  $E^i$  的计算公式为:  $E^i = W_{mod}^i - W_{obs}^i$ , 对于风向而言,  $E^i$  的计算公式为:

$$E^i = \begin{cases} W_{mod}^i - W_{obs}^i, & -180^\circ \leq W_{mod}^i - W_{obs}^i \leq 180^\circ, \\ W_{mod}^i - W_{obs}^i + 360^\circ, & W_{mod}^i - W_{obs}^i < -180^\circ, \\ W_{mod}^i - W_{obs}^i - 360^\circ, & W_{mod}^i - W_{obs}^i > 180^\circ. \end{cases} \quad (5)$$

#### 4.1 使用 CCMP 数据对各组风场进行评估

使用 CCMP 数据对数值模式风场 (CMA-GFS)、背景场 (CMA-GFS\_Unet)、准实时海面风场 (Fusion\_QRT) 以及后补的融合风场 (Fusion) 分别进行了检验, 表 2 给出了 4 组数据的一个整体检验结果, 相较于 CMA-GFS, 其他 3 组数据的风速、风向均得到了明显改善: 风速方面, Fusion 风场表现最好, 误差最小, 相

表 2 4 组风场数据风速风向检验结果

Table 2 Results of wind speed and direction for four sets of wind field data

检验数据	风速				风向		
	ME/(m·s <sup>-1</sup> )	MAE/(m·s <sup>-1</sup> )	RMSE/(m·s <sup>-1</sup> )	CC	ME/(°)	MAE/(°)	RMSE/(°)
CMA-GFS	-0.06	1.13	1.53	0.925	0.5	17.5	31.2
CMA-GFS_Unet	-0.06	0.89	1.21	0.955	0.2	15.5	28.1
Fusion_QRT	-0.06	0.84	1.16	0.958	0.3	16.0	28.8
Fusion	-0.05	0.78	1.09	0.963	0.3	16.4	29.5

关系数最高,其次是 Fusion\_QRT,而风向方面,CMA-GFS\_Unet 风场误差最小,表现最好,其次是 Fusion\_QRT。以 MAE 为例进行量化阐述:CMA-GFS\_Unet 风场的风速、风向 MAE 分别为 0.89 m/s 和 15.5°,相较于 CMA-GFS 分别提升了 21.3% 和 11.3%,Fusion\_QRT 风场风速 MAE 进一步减小,风向 MAE 略有增大,相较于 CMA-GFS 的提升率分别为 25.7% 和 8.6%,Fusion 的风速相较于 Fusion\_QRT 进一步得到优化,风速的提升率已超过 30%,风向略有变差,提升率降低至 6.3%。综上可知,风场订正模型可有效订正数值模式风场误差,使得背景场更接近于 CCMP;而卫星散射计的风速质量相较于背景场,更接近于 CCMP,而风向质量反之。

表 2 给出的是四组数据的整体误差情况,为进一步了解各组数据的误差随时间的变化特征,本文绘制了风速、风向 ME、MAE 和 RMSE 的时间序列图(图 8)。图 8a, b 分别是风速、风向的 ME 时间序列图,由图可

知,各组风场数据的风速 ME 分布在  $-0.2 \sim 0.1$  m/s 之间,风向 ME 分布在  $-1.0^\circ \sim 1.5^\circ$  之间,且各组数据之间不存在明显的优劣规律。图 8c, d 分别是风速、风向的 MAE 时间序列图,由图可以看到,无论是风速还是风向,CMA-GFS 的 MAE 在任意时刻均高于 CMA-GFS\_Unet,这说明了风场订正模型的稳定性。此外,风速方面,除个别时刻外,其他 3 组数据的 MAE 的大小关系为:CMA-GFS\_Unet > Fusion\_QRT > Fusion,这说明卫星散射计海面风观测资料的风速质量较稳定地优于背景场;而风向方面,在多数时刻其他 3 组数据的 MAE 的大小关系呈相反规律:CMA-GFS\_Unet < Fusion\_QRT < Fusion,这说明背景场的风向质量较稳定地优于卫星散射计海面风观测资料的风向质量。图 8e, f 分别是风速、风向的 RMSE 时间序列图,由图可以看到,无论是风速还是风向, RMSE 呈现的特征规律与 MAE 十分一致,因此不再赘述。综合表 2 和图 8 可知,背景场质量稳定地优于数值模式风

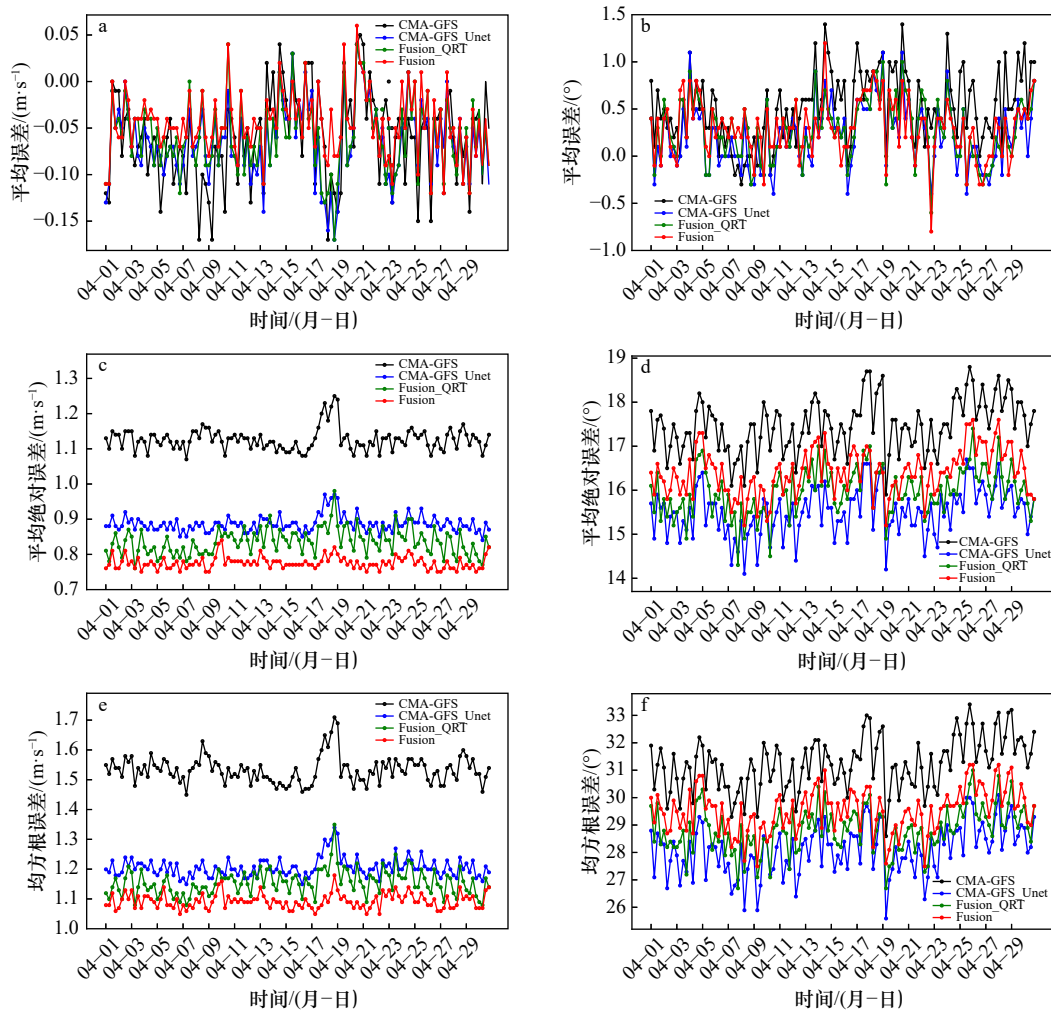


图 8 4 组数据风速/风向误差时间序列

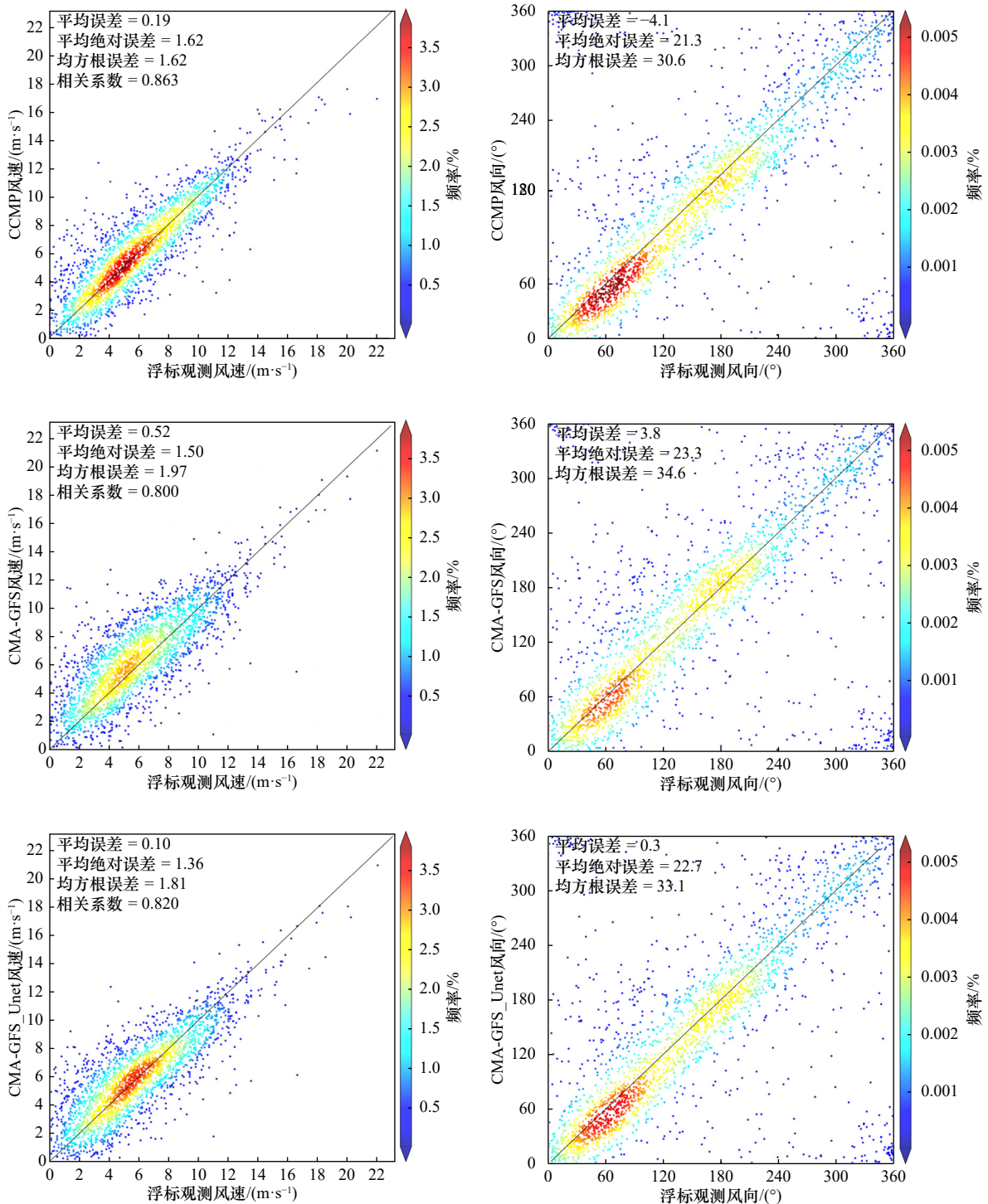
Fig. 8 Time series of wind speed/direction error for four sets of data

场,且风向质量优于两组融合风场风向质量,但风速质量不及融合风场;此外还可得知,卫星散射计海面风的风速质量优于背景场质量,风向相对略差。

#### 4.2 使用浮标数据对风场进行单点评估

4.1节使用CCMP海面融合风场数据对4种风场数据进行了全球范围的检验,本节则使用自然资源部在中国近海布放的21个浮标的10m风矢量观测数据对上述4种数据进行了单点检验,评估其在中国近海的质量,此外,还加入了CCMP数据和浮标的差异

性比较。图9给出了5组数据与所有浮标的风速、风向散点图,其中左列散点图为风速散点图,对比5张图可知,除CMA-GFS数据外,其他4组数据的风速与浮标风速有着很好的一致性,均较好地分布在对角线附近,且聚集性较好,只有在少数的浮标风速观测大值点出现了风速偏小的问题,而CMA-GFS数据的风速与浮标风速的聚合度相对偏低,且存在风速较小时风速偏大问题,此外还可以看出,风速分布区间主要以4~5级风为主;图9的右列5张图是对应的风向



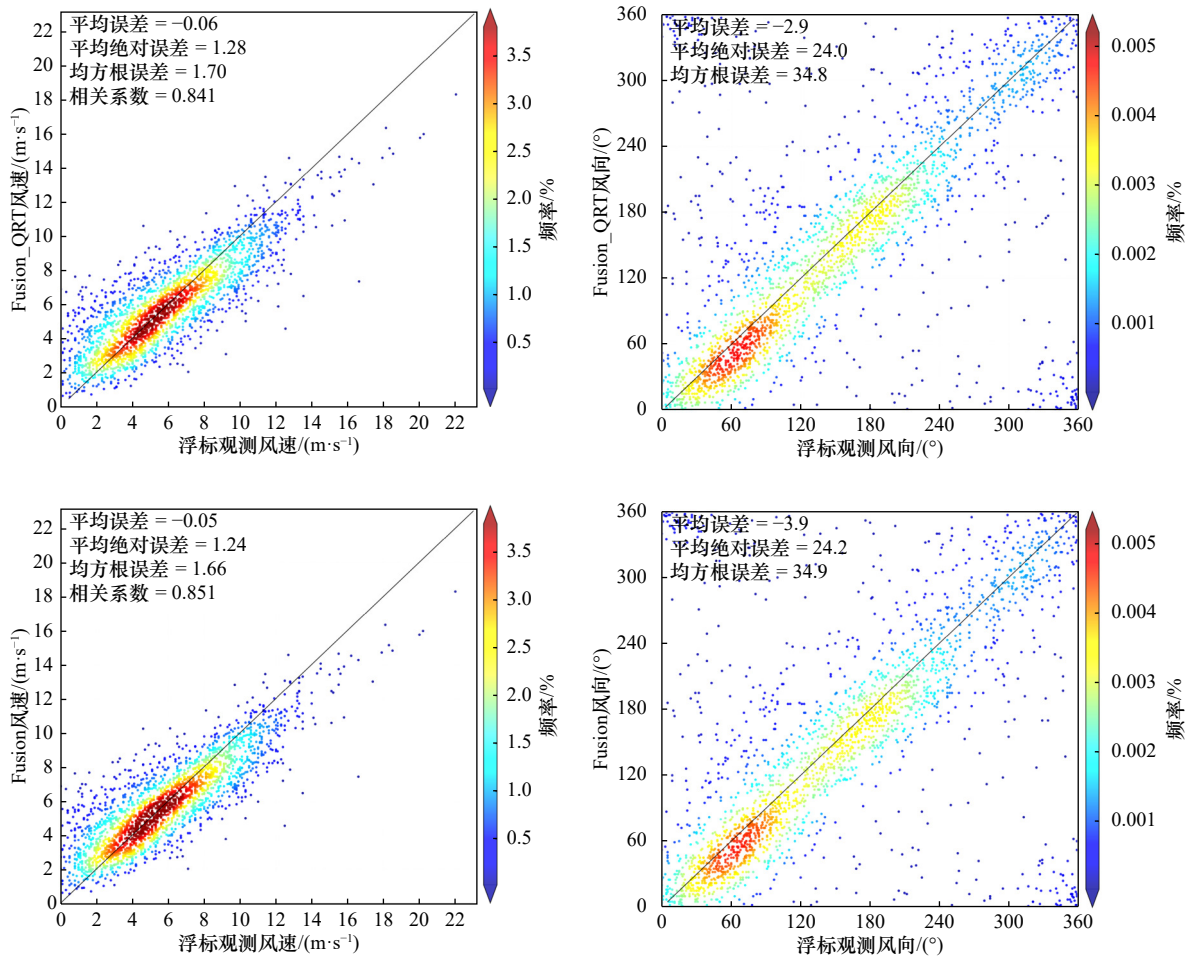


图9 5组数据与浮标观测的风速/风向散点图

Fig. 9 Scatter plots of wind speed/direction of five sets of data vs buoys

散点图,由图可以看到,相较于风速,风向的散点图的聚合度偏差,但大多数点仍然分布在对角线附近( $\pm 30^\circ$ )。同时,仍以MAE为例进行量化阐述:CMA-GFS相较于浮标,风速、风向的MAE分别为1.50 m/s和 $23.3^\circ$ ,而CMA-GFS\_Unet的MAE为1.36 m/s和 $22.7^\circ$ ,相较于CMA-GFS分别提升了9.3%和2.6%;而Fusion\_QRT风场的风速MAE进一步减小,风向MAE有所增大,相较于CMA-GFS的提升率分别为14.7%和 $-3.0\%$ ;Fusion的风速相较于Fusion\_QRT进一步得到优化,风速的提升率为17.3%,风向质量有所下降,提升率降至 $-3.9\%$ 。此外,CCMP相较于浮标的风速、风向的MAE分别为1.17 m/s和 $21.3^\circ$ ,明显优于其他4组数据,这也间接佐证了CCMP作为真值参照的合理性。

为评估5组数据风速在不同海域的质量,分别统计了这5组数据在各海域的误差情况,见表3,同时绘制了不同海域5组数据与浮标数据的泰勒图,见图10。综合表3和图10分析可得,CCMP风场数据

的风速除在黄海海域略差于Fusion\_QRT和Fusion外,在其他海域均为最优,同时风向在所有海域均为最优。对比其他4组数据的风速,综合多个误差统计方法的结果,在任意海域,CMA-GFS的风速质量相对最差,CMA-GFS\_Unet相较于CMA-GFS得到明显改善,Fusion\_QRT的风速得到进一步改善,Fusion风速质量相对最高。对比这4组数据的风向发现,在渤海和黄海海域,CMA-GFS\_Unet的风向质量最优,CMA-GFS次之,Fusion风向质量相对最差,而在东海和南海海域,CMA-GFS\_Unet的风向质量仍为最优,Fusion\_QRT次之,CMA-GFS的风向质量相对最差。

此外,本文还绘制了各个浮标站点的5组数据的风速、风向的MAE(图11),以便更直观地了解五组数据在各个浮标点位的误差情况。从图11可以看到不同的站点,各组数据的相对优劣是不固定的,尤其是风向。风速方面,由图11a可知,除03004和14002两个浮标站点外,在其他19个浮标站点位置,CMA-GFS的MAE均为最大,其次为CMA-GFS\_Unet;此外,

表3 5组数据风速风向检验结果  
Table 3 Results of wind speed and direction for five sets of wind field data

海区	检验数据	风速				风向		
		ME/(m·s <sup>-1</sup> )	MAE/(m·s <sup>-1</sup> )	RMSE/(m·s <sup>-1</sup> )	CC	ME/(°)	MAE/(°)	RMSE/(°)
渤海	CCMP	-0.51	1.19	1.55	0.92	-14.7	24.6	32.9
	CMA-GFS	0.71	1.53	1.99	0.85	-2.7	26	37.1
	CMA-GFS_Unet	-0.42	1.37	1.87	0.87	-4.3	25.6	36.3
	Fusion_QRT	-0.76	1.44	1.85	0.89	-9.6	28	39.1
	Fusion	-0.76	1.41	1.81	0.90	-12.2	28.7	39.1
黄海	CCMP	0.65	1.43	1.91	0.83	-2.1	19.5	25.9
	CMA-GFS	1.06	1.72	2.2	0.8	6.6	21.3	30.7
	CMA-GFS_Unet	0.64	1.55	2.05	0.79	3.2	21.1	29.5
	Fusion_QRT	0.5	1.4	1.86	0.81	-1.2	23.1	31.2
	Fusion	0.48	1.36	1.82	0.82	-2.4	23.5	31.6
东海	CCMP	0.04	1.01	1.31	0.89	4.3	23.6	37.7
	CMA-GFS	0.16	1.33	1.74	0.82	9.8	25.4	38.7
	CMA-GFS_Unet	-0.12	1.24	1.61	0.85	6.5	23.7	36.7
	Fusion_QRT	-0.24	1.13	1.5	0.87	2.6	24.3	37.3
	Fusion	-0.21	1.09	1.45	0.88	3.4	24.5	37.6
南海	CCMP	0.08	0.97	1.44	0.86	-7.1	19.7	28
	CMA-GFS	0.03	1.36	1.84	0.75	-0.5	22.8	34.3
	CMA-GFS_Unet	-0.14	1.2	1.6	0.82	-5.2	22.1	32.4
	Fusion_QRT	-0.26	1.15	1.54	0.85	-5.2	22.8	34.1
	Fusion	-0.20	1.12	1.50	0.86	-6.7	22.6	34.0

对比 Fusion\_QRT 和 Fusion 两组结果,发现二者有着较好的一致性,且二者的 MAE 大小关系表现为 Fusion\_QRT  $\geq$  Fusion。风向方面,由图 11b 可知,除 CCMP 数据外,在多数浮标站点位置,CMA-GFS\_Unet 的风向表现优于其他 3 组数据,整体表现最优;而 CMA-GFS 与两组融合风场数据的结果对比,优劣参半。

综上可得,风场订正模型的稳定性在单点检验中同样有着较好的表现,同时还可说明卫星散射计海面风观测资料的风速质量在中国近海较稳定地优于背景场,而风向质量不及背景场。

## 5 总结与展望

本文基于深度学习 U-Net 网络构建了 CMA-GFS 数值模式风场订正模型,并以此订正模型订正后的风场 CMA-GFS\_Unet 为背景场,以 HY-2B/2C/2D 以及 MetOp-B 4 颗卫星的散射计海面风资料为观测资料,

采用插补法快速完成准实时海面风场的构建。之后对订正模型及准实时海面风场质量进行了评估,得到如下结论:

(1)无论是使用 CCMP 海面融合风场进行的场检验,还是使用中国近海浮标 10 m 风矢量进行的单点检验,CMA-GFS\_Unet 的结果均稳定地优于 CMA-GFS,这证明了此风场订正模型的有效性及稳定性,且在场检验中表现更优。

(2)通过对比 CMA-GFS\_Unet 和 Fusion\_QRT 两组数据的检验结果,可知 Fusion\_QRT 的风速优于 CMA-GFS\_Unet,风向反之,这证明了卫星散射计风的风速更接近于观测,而风向略差。

(3)对比 Fusion\_QRT 和 Fusion 两组数据的检验结果,Fusion 的风速优于 Fusion\_QRT,风向方面两组数据质量相当,此结果再次证明了卫星散射计风的风速更接近于观测,而风向略差。

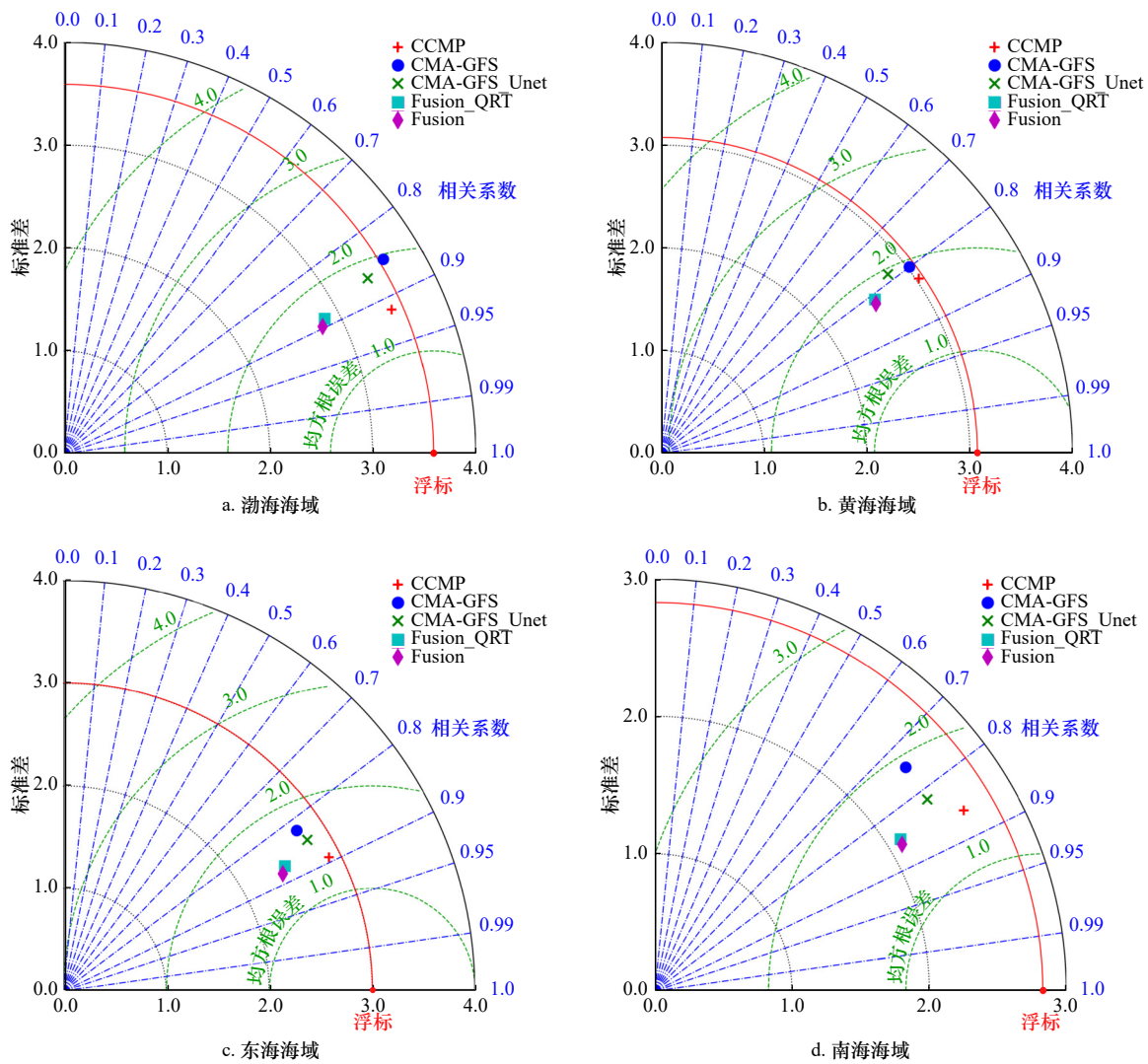


图 10 5 组数据与浮标观测风速在不同海域的泰勒图

Fig. 10 Tylar diagram of wind speed of five sets of data in different sea areas

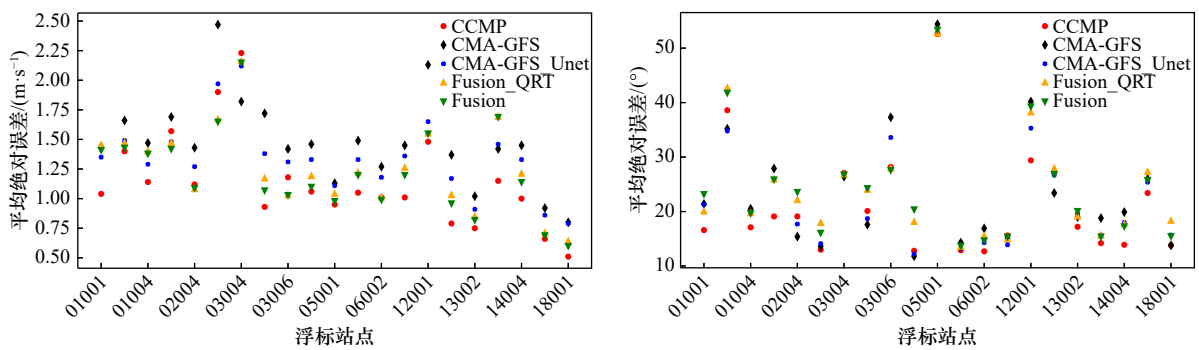


图 11 5 组数据在不同浮标站点的风速/风向平均绝对误差情况

Fig. 11 MAE of wind speed/direction at different buoy sites for five sets of data

基于上述结论, 本文认为文中使用的准实时海面风场构建的算法, 既科学合理, 又经济实用。从上述结论中还可得知, 卫星散射计海面风的风向质量存在较差的可能性, 所以未来计划针对卫星散射计海面风的风向质量做更为细致的评估分析, 期望改善准实时海

面风场风向质量; 此外, 上述结论证明了卫星散射计海面风覆盖率越高, 融合风场风速质量越高, 所以, 期望未来可以进一步提升风场生成速度, 这样便可以将启动时间后推以获取更多的卫星散射计海面风数据。同时, 由于本文使用的 CMA-GFS 版本的数据已停

产,所以本文的风场构建算法未能应用于更长时间段的数值模式数据中,未来计划将此算法应用于新版本的CMA-GFS数值模式数据中,尽快实现基于新版本

CMA-GFS数据的准实时海面风场的构建,弥补海面风场实况数据不足的问题,供海洋气象日常业务预报参考。

## 参考文献:

- [1] 张巍,杜超凡,郭安博宇,等.一种机器学习海面风场快速融合的方法[J].海洋学报,2022,44(11):144-158.  
Zhang Wei, Du Chaofan, Guo Anboyu, et al. Sea surface wind field smart fusion base on machine learning method[J]. HaiyangXuebao, 2022, 44(11): 144-158.
- [2] 柳婧,宋晓姜,王彰贵.海面风场融合技术综述[J].海洋预报,2018,35(3):81-87.  
Liu Jing, Song Xiaojiang, Wang Zhanggui. Review of fusion technology of sea surface wind[J]. Marine Forecasts, 2018, 35(3): 81-87.
- [3] 旷芳芳,张友权,张俊鹏,等.3种海面风场资料在台湾海峡的比较和评估[J].海洋学报,2015,37(5):44-53.  
Kuang Fangfang, Zhang Youquan, Zhang Junpeng, et al. Comparison and evaluation of three sea surface wind products in Taiwan Strait[J]. HaiyangXuebao, 2015, 37(5): 44-53.
- [4] 詹思琦,齐琳琳,卢伟.基于CCMP资料和现场观测资料的西北太平洋海面风场特征分析[J].海洋预报,2017,34(2):10-20.  
Zhan Siyu, Qi Linlin, Lu Wei. Analysis of sea surface wind in northwest Pacific based on CCMP satellite data[J]. Marine Forecasts, 2017, 34(2): 10-20.
- [5] 金铸钰,刘凯,郭安博宇,等.基于CCMP的西北太平洋海面风场特征分析[J].海洋预报,2022,39(2):20-33.  
Jin Zhuyu, Liu Kai, Guo Anboyu, et al. Characteristics analysis of the sea surface wind in the Northwest Pacific based on CCMP satellite data[J]. MarineForecasts, 2022, 39(2): 20-33.
- [6] 林晓娟,李响,刘晓燕,等. EC 预报数据在中国近海的适用性研究[J].海洋预报,2023,40(6):51-66.  
Lin Xiaojuan, Li Xiang, Liu Xiaoyan, et al. Applicability of EC forecast data in China's offshore waters[J]. Marine Forecasts, 2023, 40(6): 51-66.
- [7] 郑崇伟.基于CCMP风场的近22年中国海海面风场特征分析[J].气象与减灾研究,2011,34(3):41-46.  
Zheng Chongwei. Sea surface wind field analysis in the China seaduring the last 22 years with CCMP wind field[J]. Meteorology and Disaster Reduction Research, 2011, 34(3): 41-46.
- [8] 柳婧.基于最优插值方法的中国近海海面风场资料融合研究[D].北京:国家海洋环境预报中心,2018.  
Liu Jing. Research on data fusion of sea surface wind in China's offshore based on optimal interpolation method[D]. Beijing: National-Marine Environmental Forecasting Center, 2018.
- [9] 唐焕丽,姚琴,吕晓莹,等.多源卫星融合的广东海域海面风场特征[J].遥感信息,2020,35(1):117-122.  
Tang Huanli, Yao Qin, Lü Xiaoying, et al. Characteristics of sea surface wind field in Guangdong sea area with multi-source satellite fusion[J]. Remote Sensing Information, 2020, 35(1): 117-122.
- [10] 吕思睿.多源卫星海面风场融合研究[D].南京:南京信息工程大学,2023.  
Lü Sirui. Multi-source satellite sea surface wind field fusion study[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2023.
- [11] 齐亚琳,林明森.数据融合技术在海洋二号卫星数据中的应用[J].航天器工程,2012,21(3):117-123.  
Qi Yalin, Lin Mingsen. Application of the data fusion technique in HY-2 satellite data[J]. Spacecraft Engineering, 2012, 21(3): 117-123.
- [12] Zou Juhong, Lin Minsen, Zou Bin, et al. Fusion of sea surface wind vector data acquired by multi-source active and passive sensors in China sea[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2017, 38(23): 6477-6491.
- [13] 刘宇昕.星载微波散射计数据和数值模式产品海面风场混合分析研究[D].北京:国家海洋环境预报研究中心,2013.  
Liu Yuxin. A study on the mixing analysis of sea surface wind field with satellite microwave scatterometer data and numerical model products[D]. Beijing: NationalMarine Environmental Forecasting Center, 2013.
- [14] 李莎,舒红,徐正全.利用时空Kriging进行气温插值研究[J].武汉大学学报·信息科学版,2012,37(2):237-241.  
Li Sha, Shu Hong, Xu Zhengquan. Interpolation of temperature based on spatial-temporal kriging[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2012, 37(2): 237-241.
- [15] 许遐祯,高健,张康宇,等.基于多源数据的中国近海风场融合方法研究[J].杭州师范大学学报(自然科学版),2016,15(3):325-330.  
Xu Xiazhen, Gao Jian, Zhang Kangyu. Fusion method of China's offshore wind field based on multi-source data[J]. Journal of Hangzhou Normal University (Natural Science Edition), 2016, 15(3): 325-330.
- [16] 项杰,王慧鹏,王春明,等.南海海面风场变分融合的初步研究[J].热带气象学报,2015,31(2):153-160.  
Xiang Jie, Wang Huipeng, Wang Chunming, et al. Preliminary study on variational blending of surface vector winds in South China Sea[J]. Journal of Tropical Meteorology, 2015, 31(2): 153-160.
- [17] 邹婷.2DVAR算法在局地海表流场和风场融合中的应用[D].南京:南京信息工程大学,2020.  
Zou Ting. Application of 2DVAR algorithms to the fusion of localized sea surface current and wind fields[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology, 2020.
- [18] 吴新荣,王喜冬,李威,等.海洋数据同化与数据融合技术应用综述[J].海洋技术学报,2015,34(3):97-103.

- Wu Xinrong, Wang Xidong, Li Wei, et al. Review of the application of ocean data assimilation and data fusion techniques[J]. *Journal of Ocean Technology*, 2015, 34(3): 97–103.
- [19] 张东翔. 多源卫星海面风场产品检验及融合研究 [D]. 长沙: 国防科技大学, 2018.  
Zhang Dongxiang. Research of multi-source satellite sea surface wind validation and data fusion[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2018.
- [20] 李明悝, 侯一筠. 利用 QuikSCAT/NCEP 混合风场及 WAVEWATCH 模拟东中国海风浪场 [J]. *海洋科学*, 2005, 29(6): 9–12.  
Li Mingkui, HouYijun. Simulating wind-wave field of the East China Seas with QuikSCAT/NCEP blended wind and WAVEWATCH[J]. *Marine Sciences*, 2005, 29(6): 9–12.
- [21] Atlas R, Hoffman R N, Ardizzone J, et al. Across-calibrated, multiplatform ocean surface wind velocity product for meteorological and oceanographic applications[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2011, 92(2): 157–174.
- [22] Mears C A, Scott J, Wentz F J, et al. A near-real-time version of the Cross-Calibrated Multiplatform (CCMP) ocean surface wind velocity data set[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2019, 124(10): 6997–7010.
- [23] Mears C, Lee T, Ricciardulli L, et al. Improving the accuracy of the Cross-Calibrated Multi-Platform (CCMP) ocean vector winds[J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(17): 4230.
- [24] 王慧, 隋伟辉. 基于 CCMP 风场的中国近海 18 个海区海面大风季节变化特征分析 [J]. *气象科技*, 2013, 41(4): 720–725.  
Wang Hui, Sui Weihui. Seasonal variation analysis of sea surface winds in China Sea areas with CCMP wind field data[J]. *Meteorological Science and Technology*, 2013, 41(4): 720–725.
- [25] 刘建强, 叶小敏, 兰友国. 我国海洋卫星遥感大数据及其应用服务 [J]. *大数据*, 2022, 8(2): 75–88.  
Liu Jianqiang, Ye Xiaomin, Lan Youguo. Remote sensing big data from Chinese oceansatellites and its application service[J]. *Big Data Research*, 2022, 8(2): 75–88.
- [26] 林明森, 何贤强, 贾永君, 等. 中国海洋卫星遥感技术进展 [J]. *海洋学报*, 2019, 41(10): 99–112.  
Lin Mingsen, He Xianqiang, JiaYongjun, et al. Advances in marine satellite remote sensing technology in China[J]. *HaiyangXuebao*, 2019, 41(10): 99–112.
- [27] Park S H, Yoo J, Son D, et al. Improved calibration of wind estimates from advanced scatterometer MetOp-B in Korean Seas using deep neural network[J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(20): 4164.
- [28] Ronneberger O, Fischer P, Brox T. U-Net: convolutional networks for biomedical image segmentation[C]//Proceedings of the 18th International Conference on Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention-MICCAI 2015. Munich: Springer, 2015.
- [29] 朱延和. 基于 U-net 神经网络的新疆地面气温和风的预报订正研究 [D]. 南京: 南京信息工程大学, 2023.  
Zhu Yanhe. Prediction correction of surface temperature and wind in Xinjiang based on U-net neural network[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2023.
- [30] 张延彪, 陈明轩, 韩雷, 等. 数值天气预报多要素深度学习融合订正方法 [J]. *气象学报*, 2022, 80(1): 153–167.  
Zhang Yanbiao, Chen Mingxuan, Han Lei, et al. Multi-element deep learning fusion correction method for numerical weather prediction[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2022, 80(1): 153–167.
- [31] Han Lei, Chen Mingxuan, Chen Kangkai, et al. A deep learning method for bias correction of ECMWF 24-240 h forecasts[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2021, 38(9): 1444–1459.
- [32] 张延彪, 宋林焯, 陈明轩, 等. 基于卷积神经网络的京津冀地区高分辨率格点预报偏差订正试验 [J]. *大气科学学报*, 2022, 45(6): 850–862.  
Zhang Yanbiao, Song Linye, Chen Mingxuan, et al. A study of error correction for high-resolution gridded forecast based on a convolutional neural network in the Beijing-Tianjin-Hebei Region[J]. *Transactions of Atmospheric Sciences*, 2022, 45(6): 850–862.
- [33] Lagerquist R, Stewart J Q, Ebert-Uphoff I, et al. Using deep learning to nowcast the spatial coverage of convection from *Himawari-8* satellite data[J]. *Monthly Weather Review*, 2021, 149(12): 3897–3921.

## An intelligent algorithm for constructing quasi-real-time sea surface wind field

Liu Xiaoyan<sup>1,2</sup>, Song Xiaojiang<sup>1,2</sup>, Guo Anboyu<sup>1,2</sup>, Hao Sai<sup>1,2</sup>, Peng Wei<sup>1,2</sup>

(1. *National Marine Environment Forecasting Center, Beijing 100081 China*; 2. *Key Laboratory of Marine Hazards Forecasting, Ministry of Natural Resources, Beijing 100081, China*)

**Abstract:** In this paper, the correction model of CMA-GFS numerical model wind field is constructed based on the deep learning U-Net network, and the construction of the quasi-real-time sea surface wind field is rapidly accomplished by interpolation method using the corrected wind field with the correction model as the background field (CMA-GFS\_Unet), and using the scatterometer sea surface wind data from the four satellites, namely, HY-2B/2C/2D and MetOp-B as the observation data. This intelligent algorithm can realize the generation of global sea surface fusion wind field (Fusion\_QRT) with a spatial resolution of  $0.25^\circ$  and a temporal resolution of 6 hours in quasi-real time with a lag of 3 hours. The CMA-GFS, CMA-GFS\_Unet and Fusion\_QRT wind fields are evaluated using the CCMP fusion wind field data and the 10 m wind vector data from the Chinese offshore buoys, respectively. The results show that the quality of the CMA-GFS\_Unet wind field has been significantly improved, and the quality of the wind speed of the Fusion\_QRT wind field has been further improved but the quality of the wind direction has been slightly reduced. The mean absolute errors (MAEs) of wind speed are 1.13 m/s, 0.89 m/s and 0.84 m/s for the three wind fields by using CCMP data as reference, and the CMA-GFS\_Unet and Fusion\_QRT wind fields have improved by 21.3% and 25.7% compared to the CMA-GFS, respectively; while the MAEs of wind direction are  $17.5^\circ$ ,  $15.5^\circ$  and  $16^\circ$ , and have improved by 11.3% and 8.6%, respectively. The MAEs of wind speed are 1.50 m/s, 1.36 m/s and 1.28 m/s for the three wind fields by using buoy data as reference, and have improved by 9.5% and 14.7%, respectively; while the MAEs of wind direction are  $23.3^\circ$ ,  $22.7^\circ$  and  $24.0^\circ$ , and have improved by 3.0% and  $-3.9\%$ , respectively.

**Key words:** U-Net; CCMP; CMA-GFS; HY-2B/2C/2D; MetOp-B; quasi-real-time; sea surface wind field