

曲巧娜,吴炜,2024. 黄渤海海区风速推算方法及效果评估[J]. 气象,50(2):234-245. Qu Q N, Wu W, 2024. Calculation method for wind field in the Yellow Sea and Bohai Sea Area based on coastal actual condition and effect evaluation[J]. Meteor Mon, 50(2):234-245(in Chinese).

黄渤海海区风速推算方法及效果评估^{*}

曲巧娜^{1,2} 吴 炜^{1,2}

1 山东省气象防灾减灾重点实验室, 济南 250031

2 山东省气象科学研究所, 济南 250031

提 要: 为了弥补海上风场监测数据不足, 提高对黄渤海海上风场监测能力, 针对不同大气环流形势, 基于较为稳定的 74 个沿海和海岛站等陆基站 2017—2020 年风场观测资料, 以及同时段具有一定连续性的 21 个浮标站和船舶站等海基站观测数据, 采用多元线性回归方法, 建立由陆基站推算海区风速的模型。利用 2021 年实况资料对推算结果进行检验评估。结果表明: 分别针对全部风力等级和 6 级及以上大风建立的风速推算模型(以下分别简称 CM 模型和 HM 模型)均具有较高的可靠性, 其中 HM 模型对大风推算的准确率更高; 8 种天气类型中共 5 种类型发生大风的概率高于 60%, 其中对西北高东南低类型的推算效果最好, 对西高东低型、西南高东北低型和西北低东南高型的 6~7 级大风推算效果较好, 对 8 级及以上大风的推算效果略差; 不同海区大风的推算结果中, 对黄渤海大部分海区推算的风速略偏小, 仅对渤海西南部海区的部分站点推算的风速略偏大; 对黄海北部海区风速推算的平均绝对误差最小($0.95 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$), 对其他海区风速推算的平均绝对误差在 $1.32 \sim 1.70 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; 在海区观测不连续、不稳定的情况下, 推算的风速能够对海上风场资料进行有效的补充。该推算方法易于业务化应用, 可随不同海区观测资料的增加而进一步优化, 对海洋观测布局设计也有一定的参考作用。

关键词: 黄渤海, 大风实况, 天气分型, 推算, 检验

中图分类号: P456

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2023.050803

Calculation Method for Wind Field in the Yellow Sea and Bohai Sea Area Based on Coastal Actual Condition and Effect Evaluation

QU Qiaona^{1,2} WU Wei^{1,2}

1 Key Laboratory for Meteorological Disaster Prevention and Mitigation of Shandong, Jinan 250031

2 Shandong Institute of Meteorological Sciences, Jinan 250031

Abstract: To deal with the lack of marine observation data and enhance the monitoring ability of strong wind event in the Yellow Sea and Bohai Sea, a calculation method of wind speed in sea area under different atmospheric circulation patterns is developed, on the basis of multiple linear regression method and observation data from 74 coastal and island stations as well as 21 sea-based stations of buoy and ship stations from 2017 to 2020. The calculated results are tested by the observation data in 2021. The results show that the wind speed prediction models (CM model and HM model, respectively) established for all wind scales and winds stronger than scale 6 have higher reliability, and especially the HM model has higher accuracy for wind prediction. The probability of strong winds exceeds 60% for five out of the eight weather types. Among the five weather types with high frequency of gale, the calculation effect for the northwest

^{*} 山东省自然科学基金项目(ZR2022MD040)、环渤海区域科技协同创新基金项目(QYXM202202、QYXM202007)、中国气象局创新发展专项(CXFZ2022P012)、公益性行业(气象)科研专项(GYHY201206001)和山东省气象局面上课题(2020sdqxm7)共同资助

2022 年 10 月 15 日收稿; 2023 年 5 月 8 日收修定稿

第一作者: 曲巧娜, 主要从事灾害性天气预报技术研究. E-mail: quqiaona77@163.com

通讯作者: 吴炜, 主要从事海洋气象、数值预报研究. E-mail: wuwei_sd@163.com

high-southeast low type is the best, the calculation effects for winds at scales 6—7 of the west high-east low type, the southwest high-northeast low type and the northwest low-southeast high type are better, but the calculation effects for the three types of strong winds at scale 8 and above are slightly worse. In the calculation results of gale in different sea areas, the wind speed calculated for most sea areas of the Yellow Sea and the Bohai Sea is smaller than observation data, and the wind speed calculated for some stations in the southwest sea area of the Bohai Sea is larger than observation data. The minimum mean absolute error in the northern Yellow Sea is $0.95 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, and the mean absolute error in other sea areas is $1.32 - 1.70 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. The calculated wind speed can effectively supplement the marine wind observation in the case of discontinuous and unstable observation in the sea area. The calculating method is easy to be applied in operational work, and can be further optimized with increasing number of observation data in different sea areas. It also has a certain reference value in designating the layout of marine observation systems.

Key words: the Yellow Sea and Bohai Sea, observed strong wind field, weather classification, calculation, validation

引 言

黄渤海海区属于温带海洋性气候,是恶劣的海洋天气及衍生的海洋灾害频发的海区(解以扬等, 2014),其中海上大风是引发海难事故最活跃的风险因子,同时黄渤海海区是中国对外贸易往来的重要通道之一,海上经济活动活跃,精细化大风预报服务是海洋经济安全高效发展的重要保障,海洋防灾减灾和气象预报预警业务对实况资料的需求十分迫切。然而,广阔的海面上气象观测资料稀少。少量的浮标站、船舶站可直接获取海面风场资料,但保障较差;借助卫星可获得大范围风场反演资料,但时间不连续且易受天气影响,提高监测能力一直是研究的目标之一。实际业务中,沿海和海岛等陆基站资料的连续性好、质量较高,是海上大风的重要参考,在忽略海陆差异的前提下,常被作为邻近海区的“指标站”;另外,数值预报产品及再分析资料也是一个重要的参考,但是模式对于海区风的预报误差较大,再分析资料(ERA、CFSR等)的大风风速往往比实况偏小(敖雪等, 2018; 范苏丹等, 2017; 孟宪贵等, 2018; 陈君芝等, 2023)。渤海和黄海北部海岸线较长,尤其是渤海为我国内海,面积较小且被海岸环绕,沿海自动气象站较多。如何利用沿海、海岛等陆基站实况资料和数值预报产品,对海区的风场实况资料进行估算一直是科研和业务工作关心的重要课题。

以往的研究通过多种方法对海上大风风速进行订正,以海陆差异的定量分析及对模式产品的释用

为主。赵强等(2008)、李燕等(2013)和曲巧娜等(2016)通过将一段时间内不同影响系统或不同风向下的沿海站资料分别与大中型客货轮站、浮标站、救助船站等资料进行对比,得出了渤海、黄海北部等部分海域与陆地大风差异的定量分析;赵金霞等(2014)对塘沽站和A平台站分别建立了极大风速和日最大风速之间的回归方程。另外,何群英等(2007)采用动力推算和热力订正的方法对MM5模式模拟结果进行订正;吴曼丽等(2013)应用卡尔曼滤波原理对中尺度数值预报产品进行释用,制作环渤海风的客观化定量预报产品;王亚男等(2019)使用递减平均法和渤海28个石油平台站、浮标站资料,对ROAD模式渤海区域10 m风速预报进行误差订正;杨晓君等(2019)采用欧洲中期天气预报中心(ECMWF)数值预报等模式产品,建立渤海BP神经网络海风预报模型;申华羽等(2020)利用浙江沿海观测站资料与ECMWF细网格10 m风预报进行不同风向下大风误差对比,进而推测海上大风;刘彬贤等(2018)基于A平台资料,运用集合最优百分位法对ECMWF集合预报的大风进行了订正;胡海川和周军(2019)基于集合平均、第75%分位值等统计量及不同量级风速发生的频率建立了渤海极大风预报客观订正方法。以上研究中,有的使用沿海站资料与浮标站、救助船站等资料对比分析了在不同影响系统或风向下海陆大风的差异性,但以定量分析为主;有些通过订正模式产品以获取海区风场信息,较少考虑影响系统及不同环流下数值预报的误差特征;有些研究采用的海基站点较少,没有充分利用海区周边的实况信息,因此应用范围有限。本文利用

多年的浮标站、船舶站、石油平台站等海基观测资料,以连续、可靠的沿海和海岛等陆基站与数值预报产品等资料为基础,针对不同的大气环流类型,建立由沿海和海岛站风速实况推算海区风速实况的计算模型,从而实时获取黄渤海大范围、较为连续可靠的海区风场信息,作为海上监测的补充手段,更好地满足气象监测预警需求。

1 资料与检验指标

1.1 资料来源

使用的资料包括黄渤海沿海自动站、海岛站等陆基站以及海上浮标站、石油平台站、船舶站等海基站实况资料和 ECMWF 第五代全球再分析资料(以下简称 ERA5)。使用 2017—2021 年逐时观测资料进行陆基站推算海区风速模型的建立和检验,其中,2017 年 1 月至 2020 年 12 月的资料用于建立推算模型,2021 年 1—12 月的资料进行检验。ERA5 再分析资料用于天气分型和观测资料质量控制,选取 2017 年 1 月至 2021 年 12 月海平面气压场和 10 m 风场资料,空间范围为 $30^{\circ}\sim 42^{\circ}\text{N}$ 、 $117^{\circ}\sim 128^{\circ}\text{E}$,资料时间分辨率为 1 h,空间分辨率为 $0.25^{\circ}\times 0.25^{\circ}$ 。

1.2 站点资料特征分析

1.2.1 站点观测资料的时空分布特征

沿海自动站和大部分海岛站因维护较好,资料连续性好,较为可靠,将其作为“预报因子”推算海区

风速;浮标站、石油平台站、船舶站等海基站位于不同海区,是海上大风监测数据的主要来源,将其作为“预报量”,针对此类站点所在海区建立推算模型。海基站具有较好的海区代表性,但由于建设和运行成本高、保障难度大,因此站点数量少,资料连续性较差。如为避免海冰导致设备毁坏,部分浮标站冬季将返回厂家维护而停止观测,而冬季正是大风最为频繁的季节;船舶站为北海救助局的救助船观测资料,在一定时期内锚定在固定位置,经常根据需要进行调整。

本文初选了黄渤海地区共 109 个自动站资料,考虑到陆基站的数量相对较多,剔除了缺测率达 20% 以上的站点,入选的陆基站(沿海站 48 个、海岛站 26 个)共 74 个;由于海基站点稀缺,仅剔除 1 个缺测率达 90% 的站点。其余的 20 个海基站中,17 个站的位置稳定(图 1a 中绿色圆点);2 个站的位置变动分别为 0.16 个经度和 0.19 个经度(图 1a 中蓝色方形),由于变动较小,忽略其影响;1 个站的位置变动较大(图 1a 中红色三角形),将其作为 2 个站点处理,因此选取的海基站共计 21 个。最终共选取了 95 个自动站,具体位置如图 1b 所示。

1.2.2 海基站观测资料的质量控制

由于海陆分布、站点地理环境较为复杂,海上站点密度较小,观测资料质量控制的难度较大。而海基站观测系统维护保障较差,异常的风速和风向常被作为判断故障的依据。本文将以下显著不合理的数据认定为疑误数据予以剔除:一是风速过大并超过一定阈值,或风速持续为零;二是风速不太小的情况下,风向却与环境风场差异较大,与环流形势不匹

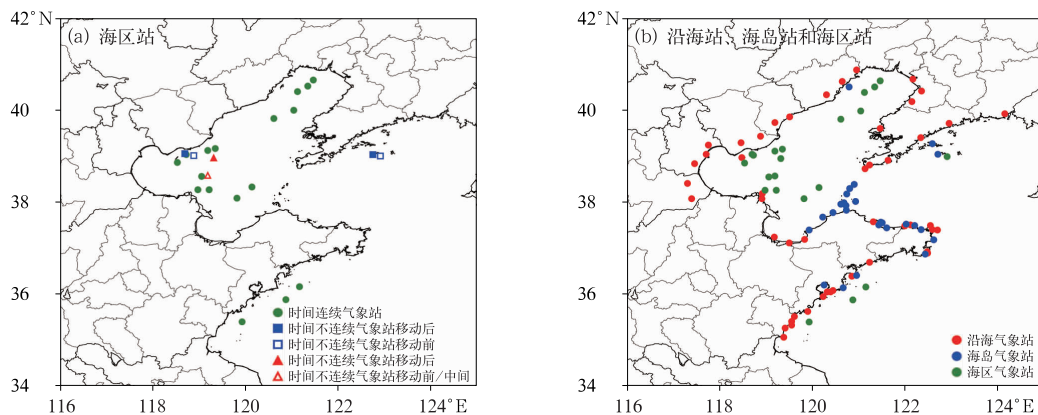


图 1 黄渤海地区自动站分布示意图

Fig. 1 Distribution of automatic stations around Yellow Sea and Bohai Sea Area

配。本文对 ERA5 2020—2021 年再分析资料检验表明,ERA5 风向具有较高的可靠性,在不区分风力的情况下,与海基站相比,59%样本风向差在 30° 以内,78%的样本风向差小于 60° ;在 6 级及以上大风条件下,风向差在 30° 以内的占 71%, 60° 以内的样本达 85%,未有超过 120° 的站点。判断海基站风向异常的具体做法是将 ERA5 风场资料采用双线性方法插值到观测站点,当 ERA5 风力 ≥ 6 级时,若观测风向与 ERA5 风向的夹角大于 120° ,则认为该观测资料是错误资料予以剔除。另外,本研究主要针对系统性大风进行推算,当有局地对流天气发生时,对流大风的风向可能与环境风场存在较大的差异,因此也可通过风向数据予以部分剔除。

1.3 检验指标

本文使用决定系数(R^2)、均方根误差(RMSE)、偏差(Bias)等指标进行检验和对比, R^2 定义如下:

$$R^2 = 1 - \frac{SS_{\text{res}}}{SS_{\text{tot}}} \quad (1)$$

式中: $SS_{\text{res}} = \sum_i (y_i - f_i)^2$ 为回归平方和, $SS_{\text{tot}} = \sum_i (y_i - \bar{y})^2$ 为总平方和, y_i 为实况值, f_i 为推算/预报值, $\bar{y}$ 为实况值的平均, R^2 反映因变量的全部变异能通过回归关系被自变量解释的比例。

2 推算方法

2.1 环流分型方法

黄渤海海岸线复杂,受海陆分布和地形影响,不同海区风场差异较大,在不同的大气环流下呈现不同的特征,因此需要将天气形势进行分型,对不同类型的环流分别建立推算模型。采用 ERA5 的海平面气压场进行环流分型,时间为 2017 年 1 月 1 日至 2020 年 12 月 31 日,时间间隔为 1 h,共 35 064 个样本。在计算天气形势分类之前对数据进行处理,为了部分消除中小尺度对天气形势分类的影响,降低了资料的空间分辨率,运用双线性插值方法将资料插值到 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 的规则格点上;另外,考虑不同季节海平面气压平均值存在一定差异,而风场主要与气压梯度有关,因此,将每个样本减去其空间平均值。天气形势分类的目的是找出气象要素场的若干

分布模型类型,同一类的气象要素场分布特征相似,而不同类型的气象要素场分布有显著的差别(Huth et al, 2008)。在欧洲国家科技领域合作研究(COST733)中,针对不同的天气形势分类方法开展了若干对比研究,结果表明,没有唯一最优的方法,其中 k -means 及相关方法得分较高(Huth, 2010; Beck and Philipp, 2010; Cahynová and Huth, 2010)。 k -means 方法是一种非层级聚类算法,将一定数量的样本分为相互独立、互不包含的类别。使用 k -means 方法计算得到的距离,既可以用于分类,也可以用于计算类型归属。本文的计算方法和符号表达主要参考了文献 Hoffmann and Schlünzen (2013)。

在 k -means 方法中,两个样本的相似性由欧拉距离平方 SED 来表示:

$$SED = \|x_1 - x_2\|^2 \quad (2)$$

式中: x_1 和 x_2 为两个气象要素场。样本簇内距离平方和记为 WSS:

$$WSS = \sum_{i=1}^k \sum_{x \in C_i} \|x - z_i\|^2 \quad (3)$$

式中: x 为簇 C_i 中的所有样本, z_i 为第 i 个簇的中心点(CC), k 为簇的数量。

k -means 方法在分类过程中,采用迭代方式,确定最小的 WSS。首先是初始划分,选择 k 个中心点,计算每个样本和中心点的距离 SED,所有的样本被指定属于离其最近的中心点;然后将属于同一簇的样本计算平均值,得到该簇新的中心点坐标;重复上述步骤,以新的中心点重新计算距离分配样本,并重新确定新的中心点坐标。如此迭代计算,直到各簇样本不再发生变化。

k -means 方法的结果受初始划分的影响,而初始划分没有最优方法,因此,本研究在初始划分时采用随机划分方法,对 k -means 天气分型采用不同的初始划分重复 3000 次, WSS 取值最低的划分被确定为最终的天气分型。 k -means 方法必须预先给定类别的数量 k ,即天气类型的数量,其取值介于 1 和样本数量之间,选择较优的 k 值是分类的基础。根据 $Y = \frac{WSS}{\min(\|z_i - z_j\|)}, (i, j \in k)$,并结合主观分析来确定 k 。随着 k 增加, Y 值将逐渐增大,其中出现的波谷(图 2)可以作为较优的 k 取值(Hoffmann and Schlünzen, 2013)。较大的 k 值意味着分型更

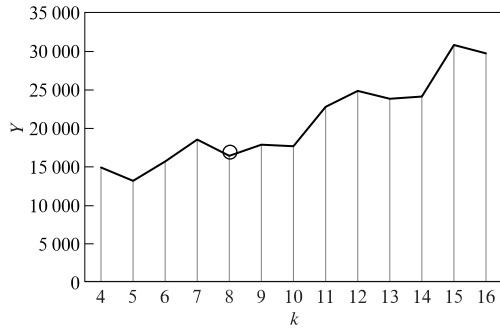


图 2 Y-天气类型数曲线图

Fig. 2 Graph of Y-weather type number

加细致,但每种类型样本的数量则更小,本文确定 $k=8$ (图 2 中圆圈标注的位置)为最优选择。

8 种天气类型的海平面气压距平分别呈现以下特征:Ⅰ型(图 3a)为西南低东北高;Ⅱ型(图 3b)为西高东低;Ⅲ型(图 3c)和Ⅵ型(图 3f)均为西北低东南高,Ⅲ型的气压梯度显著大于Ⅵ型;Ⅳ型(图 3d)

为均压场;Ⅴ型(图 3e)和Ⅷ型(图 3h)均为西北高东南低,Ⅷ型的气压梯度大于Ⅴ型,对应强冷空气;Ⅶ型(图 3g)为西南高东北低。

8 种天气类型中(全部样本),出现次数最多的天气类型是Ⅳ型,其次是Ⅵ型,占比最低的是Ⅱ型和Ⅷ型。以海基站中最大风力作为该时次的海上风力,统计得出不同风力下 8 种天气类型的占比(表 1)。风力 $\geq 6, 7$ 级时,均为Ⅲ型占比最高,其次分别是Ⅵ型(≥ 6 级, 13.3%)和Ⅴ型(≥ 7 级, 15.9%),偏南大风的占比较高;风力 $\geq 8, 9$ 级则是Ⅴ型占比最高,其次是Ⅷ型,偏北大风尤其是偏东北大风占比最高。此外,分别统计 8 种天气类型下发生 6 级及以上大风的概率可知,Ⅷ型发生大风的概率最高,达 94.7%,其次是Ⅲ型和Ⅱ型为 70%以上,Ⅴ型和Ⅶ型为 60%~70%,最少的是Ⅳ型(17.2%)。因此基于不同天气形势进行海区大风的推算是非常必要的。

表 1 2017—2021 年不同风力等级对应的 8 种天气类型占比

Table 1 Proportion of eight weather types at different wind force scales in 2017—2021

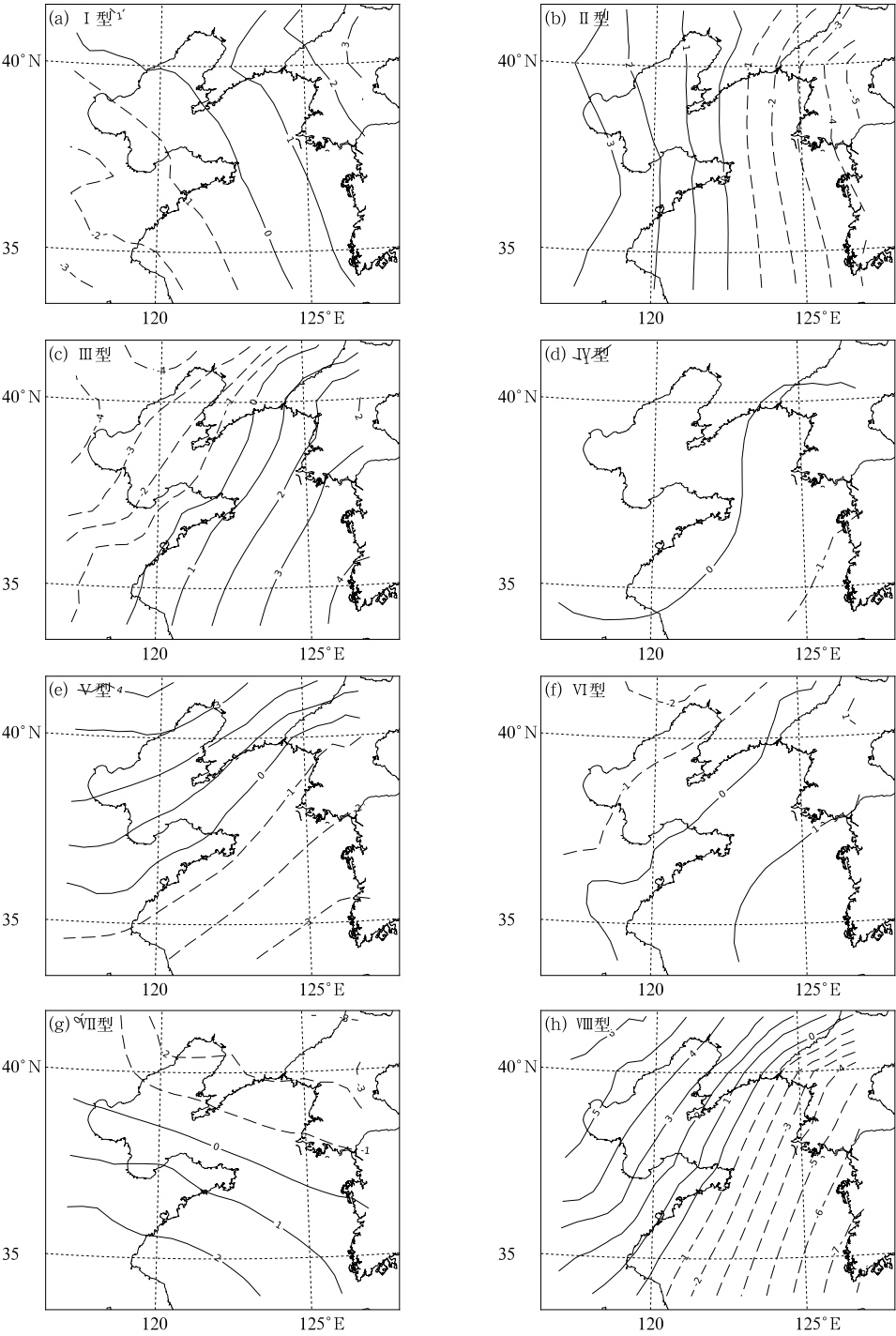
条件	样本数/个	天气类型占比/%							
		Ⅰ型	Ⅱ型	Ⅲ型	Ⅳ型	Ⅴ型	Ⅵ型	Ⅶ型	Ⅷ型
全部样本	43 777	15.2	9.5	13.3	19.8	10.3	17.0	10.5	4.3
风力 ≥ 6 级	22 721	12.6(43.3)	12.8(70.0)	21.5(83.7)	6.6(17.2)	13.1(65.8)	13.3(40.3)	12.2(60.4)	7.9(94.7)
风力 ≥ 7 级	10 436	11.3	13.8	26.1	3.7	15.9	6.7	9.7	12.8
风力 ≥ 8 级	3 641	12.6	11.6	20.4	2.2	24.1	2.5	5.5	21.0
风力 ≥ 9 级	895	14.4	9.2	9.3	2.0	34.1	1.2	3.0	26.8

注:括号内数字代表不同的天气类型条件下出现 6 级及以上大风的概率。

2.2 风速模型

使用 2017—2020 年的观测资料,针对海基站,逐站、逐环流类型建立沿岸风场向海区风场转化推算的模型,并使用 2021 年资料对推算模型的质量进行检验。本文尝试了多元线性回归、逐步回归等方法,经过试验对比,发现多元线性回归预报的误差最小,因此使用多元线性回归方法建立推算模型。由于在不同风速环境下,海基和陆基站风速的线性关系可能存在一定的差异,因此建立两种模型,并分别进行检验和分析:一是对全部风力等级建立模型(以下简称 CM 模型);二是针对海区大风的服务需求,将 6 级及以上的大风建立模型(以下简称 HM 模型)。推算模型的回归因子是 74 个陆基站风速,预

报因子是 21 个海基站风速。线性拟合对资料样本长度有一定的要求,如果样本数太小,模型质量可能不高,但如果要求样本数过高,建模则会存在困难。本文设定了最低样本数,若某海基站、某天气形势下样本数小于该值,则放弃建立推算方程。最小样本数是通过批量试验来确定的,从 100~800 以 10 为间隔逐一进行建模和预报试验。其中,当最低样本数为 400 个时,HM 模型的预报均方根误差最小;而对于 CM 模型,最小样本数为 540 个时,预报均方根误差为次小值,该样本数也较为合理。因此,将 540 个和 400 个分别作为 CM 和 HM 模型的最小样本值。CM 模型共建立了 161 个方程,由于大风仅出现在部分环流形势下,发生次数和样本数量少,方程数量大幅减少,HM 模型仅包含 31 个方程。以上方



注:黑线为海平面气压距平(单位: hPa)。

图 3 k -means 方法划分的 8 种天气类型

Fig. 3 Eight weather types divided by k -means method

程均通过了 F 显著性检验($P < 0.01$)。需要说明的是,受样本数量的限制,本文建立的模型数量有限,尚不能覆盖全部 21 个海基站和 8 种天气类型。以 CM 模型 2021 年应用试验为例,全年获取的 21 个

海基站逐 1 h 观测资料数量为 132 721 个,缺测率约为 27.9%,而风速推算的数据量为 181 531 个(推算率为 98.7%),推算数据对实际观测数据有显著的补充作用。

3 结果分析

3.1 不同天气类型下的风速推算效果对比检验

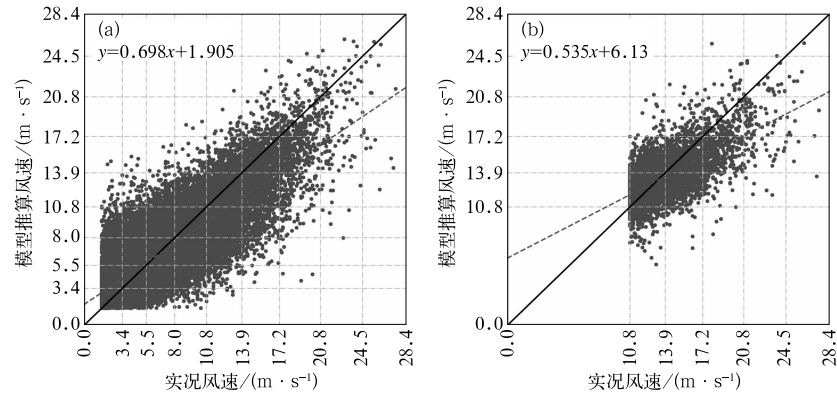
利用 2021 年 1—12 月海基站逐 1 h 实况资料对推算风速进行了检验,采用散点分布、决定系数(R^2)、均方根误差(RMSE)、偏差(Bias)等指标分别对 8 种天气类型下的风速推算结果进行分析。由 CM 和 HM 模型的检验指标对比分析(表 2)可知,CM 模型对全部样本推算的风速的 R^2 为 0.67, RMSE 为 $2.05\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, Bias 为 $0.01\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,整体比实况略偏小。对 6 级及以上大风推算, HM 模型的 RMSE 和 Bias 分别为 $2.11\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $-0.34\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,

均比 CM 模型推算的 RMSE 和 Bias(分别为 $3.25\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $-2.03\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) 偏小,可见, HM 模型对大风天气的预报质量明显高于 CM 模型。

由推算结果与实况风速的散点分布(图 4)可知, CM 模式对 4 级以下风速推算,在对角线上方的散点略多于下方,即推算比实况偏大的站次略偏多;对 4~6 级风速的推算,对角线下方的散点略多于上方,即推算风速比实况偏小的站次略偏多;对于 7 级及以上风速的推算,推算风速比实况偏小的站次大于偏大站次。 HM 模型对于 6~7 级风速的推算偏大和偏小的数量较为接近,且集中在对角线附近,对于 8 级风速推算的偏小散点大于偏大散点,对于 9~10 级的风速推算与 CM 模型相似,以偏小为主。

表 2 CM、HM 模型以及大风发生概率较高的 5 种天气类型风速推算结果检验指标
Table 2 Test index of wind speed calculation results by CM and HM models and five weather types with high probability of strong wind

类型	R^2		RMSE/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)		Bias/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	
	全部样本	风力 ≥ 6 级	全部样本	风力 ≥ 6 级	全部样本	风力 ≥ 6 级
CM 模型	0.67	-0.57	2.05	3.25	0.01	-2.03
HM 模型		-0.45		2.11		-0.34
CM-Ⅱ型	0.71	-0.35	5.35	9.24	-0.09	-1.73
HM-Ⅱ型		0.37		4.63		-0.46
CM-Ⅲ型	0.57	-1.10	5.62	12.28	-0.06	-2.37
HM-Ⅲ型		0.38		3.74		-0.40
CM-V型	0.75	0.17	4.66	8.46	-0.11	-1.62
HM-V型		0.61		4.10		-0.22
CM-VⅦ型	0.52	-2.43	5.15	11.74	-0.19	2.52
HM-VⅦ型		0.03		3.55		-0.08
CM-VⅧ型	0.72	0.25	6.31	5.70	-0.08	-0.72
HM-VⅧ型		0.34		5.11		-0.21



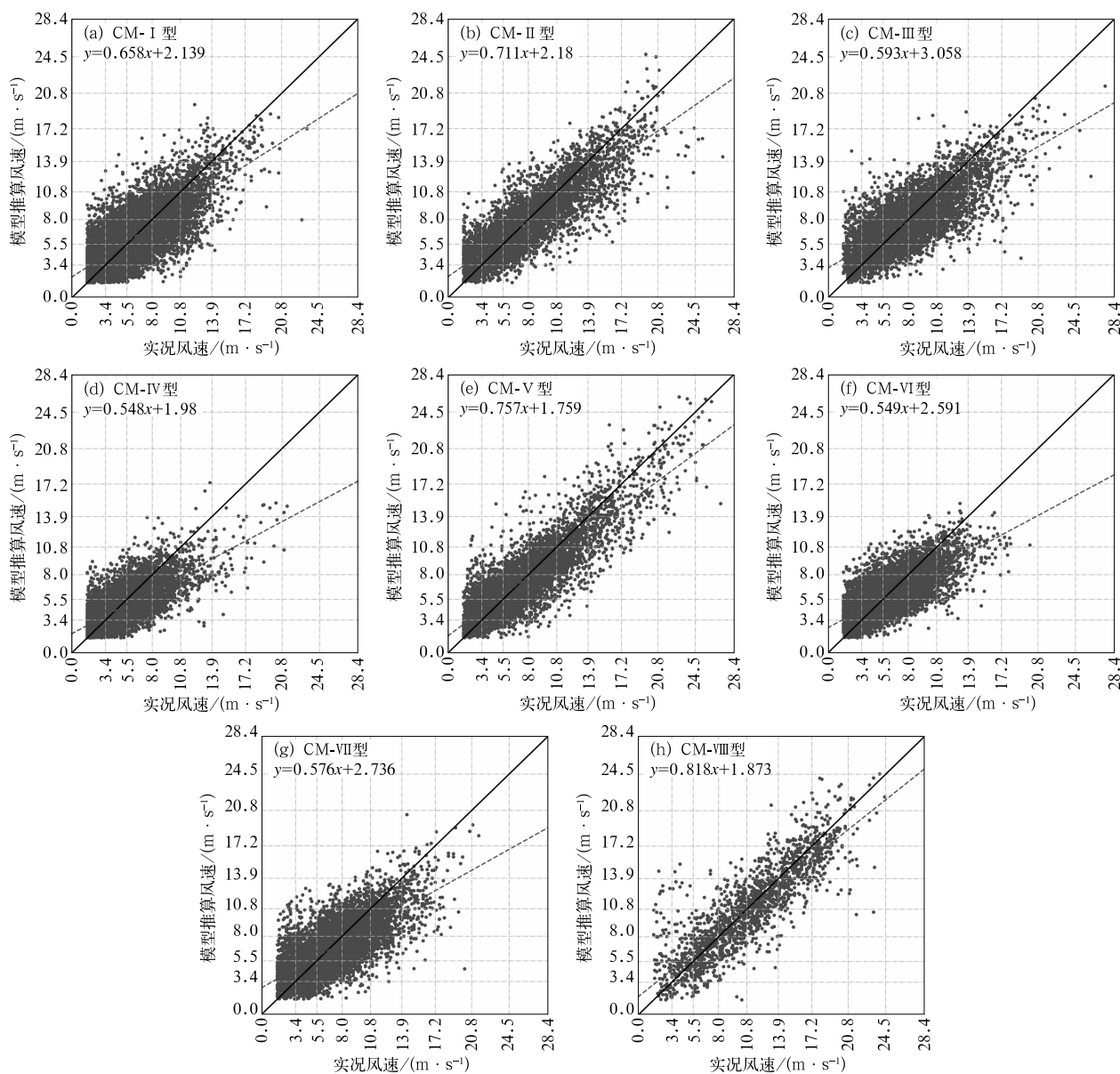
注:实线为对角线,虚线为拟合线。

图 4 2021 年(a)CM,(b)HM 模型推算与实况风速的散点分布

Fig. 4 Scatter distribution of wind speed calculation results by (a) CM and (b) HM models and observed wind speed in 2021

将8种天气类型的CM模型推算结果进行对比(图5)可看出,V型(图5e)和Ⅷ型(图5h)推算结果最接近对角线位置,效果最好;其次是Ⅱ型(图5b)对3~6级风速的推算接近对角线,效果非常好,对7~8级风速推算的偏小散点数量大于偏大散点,对9级风速推算的偏小散点数量大于偏大散点,对8级及以上风速的推

算基本偏小;推算效果较差的是Ⅳ型(图5d)和Ⅵ型(弱)(图5f),此两种类型出现6级以上大风的概率较小(分别为17.2%和40.3%,表1),对6级以下风速的推算效果较好,对6级及以上的推算基本以偏小为主。由表2可知,以上天气类型中 R^2 最大的为CM-V型(0.75),其次是CM-Ⅷ型(0.72)和CM-Ⅱ型(0.71);RMSE最小的为CM-V型($4.66 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)、CM-Ⅶ型($5.15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)和CM-Ⅱ型($5.35 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)较小;Bias仅CM-Ⅶ型较大($-0.19 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$),其



注:实线为对角线,虚线为拟合线。

图5 2021年8种天气类型对应的CM模型推算与实况风速的散点分布
Fig. 5 Scatter distribution of wind speed calculation results by CM model for eight weather types and observed wind speed in 2021

他类型均小于 0.11,且推算值均比实况偏小。

通过以上分析可得出,CM-V 型和 CM-Ⅷ型对全部样本的风速推算效果最好,其次是 CM-II 型,CM-I 型、CM-Ⅲ型和 CM-Ⅶ型相差不大,最差的是 CM-Ⅳ型和 CM-Ⅵ型。

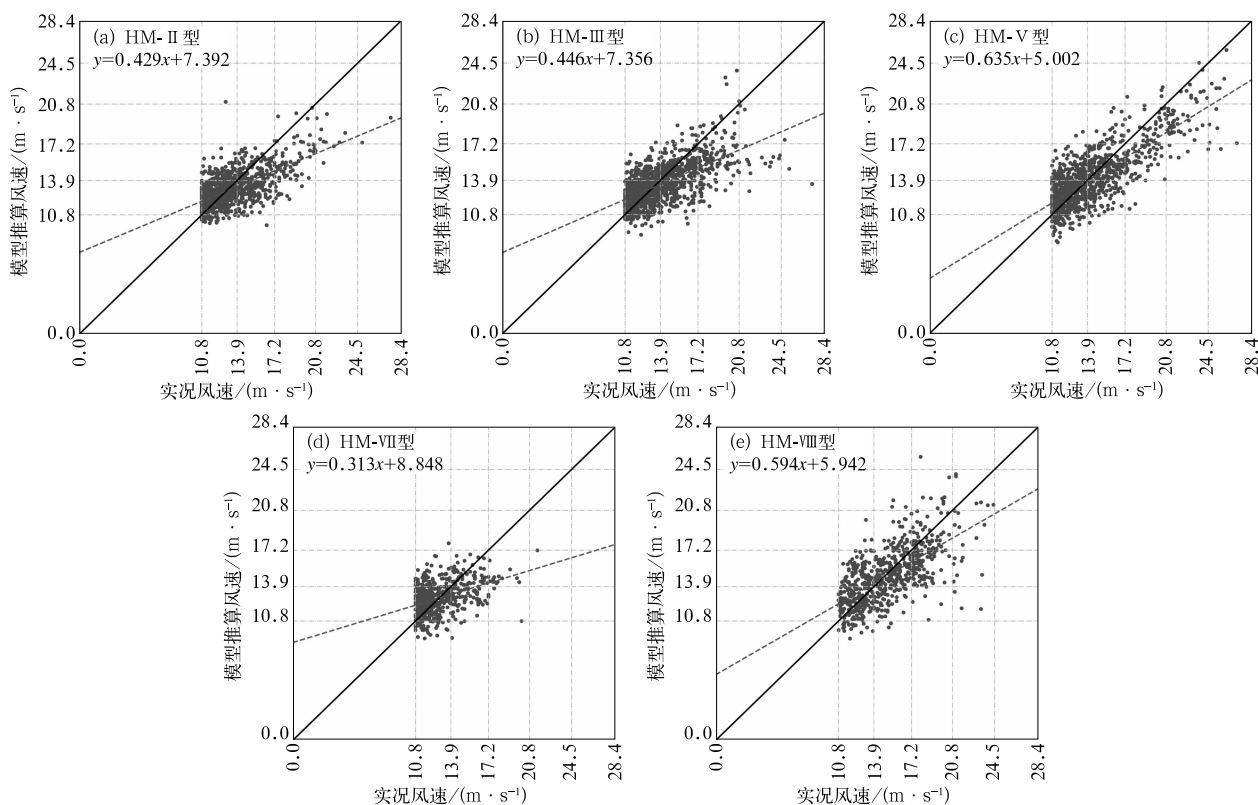
对比 5 种发生 6 级及以上大风概率较高天气类型(大于 60%)的 HM 模型推算结果可知,同样为对 Ⅷ型(图 6e)和 V 型(图 6c)的推算效果最好,推算的 6~8 级风速散点接近对角线位置,9~10 级风速以偏小为主;对 II 型(图 6a)、Ⅶ型(图 6d)和 Ⅲ型(图 6b)6~7 级风速的推算效果相差不大,均接近对角线位置,II 型推算的 8~9 级风速以偏小为主,Ⅶ型的 8 级及以上大风较少且推算的风速偏小,Ⅲ型的 8~10 级大风在 3 种类型中最多且推算的风速基本偏小。

表 2 给出了 CM 模型中对 6 级及以上大风推算的 RMSE 和 Bias 检验最小的是 CM-Ⅷ型($5.70 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $-0.72 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$),其次是 CM-V 型($8.46 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、

$-1.62 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)、CM-II 型($9.24 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $-1.73 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$),其他类型 RMSE 大于 $10.00 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,Bias 大于 $2.00 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,推算的风速均比实况偏小。HM 模型中推算的 R^2 较大的是 HM-V 型(0.61),RMSE 较小的是 HM-Ⅶ型($3.55 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)、HM-Ⅲ型($3.74 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)和 HM-V 型($4.10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$),Bias 较小的是 HM-Ⅶ型($-0.08 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)、HM-Ⅷ型($-0.21 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)和 HM-V 型($-0.22 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)。2 个模型均存在风速估计偏小的问题,HM 模型偏小的幅度显著小于 CM 模型。因此,对于海上大风使用 6 级及以上大风资料建立 HM 模型,可以得到更加准确的推算结果。

3.2 不同海区大风推算效果对比检验

为分析推算模型在不同海区大风过程中的应用效果,选取 2021 年海基站 6 级及以上大风观测数据,对推算结果进行检验。为保证统计的有效性,剔除缺测严重的站点,选取了样本数在 41~1090 的



注:实线为对角线,虚线为拟合线。

图 6 2021 年(a) II 型、(b) III 型、(c) V 型、(d) VII 型和(e) VIII 型天气类型对应的 HM 模型推算与实况风速的散点分布

Fig. 6 Scatter distribution of wind speed calculation results by HM model for weather types

(a) II, (b) III, (c) V, (d) VII and (e) VIII and observed wind speed in 2021

14个海基站点数据。从平均误差(图7a)和平均绝对误差(图7b)的分布可以看出,对渤海北部海区风速推算偏小,3个海基站的平均绝对误差为1.32、1.67、1.70 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$;位于渤海西南部的5个海基站的推算中2个偏小、3个偏大,平均绝对误差分别为1.37、1.78、1.36、1.48、1.67 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$;对渤海东部海区接近渤海海峡区域推算的风速偏小,2个海基站的平均绝对误差分别为1.54 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和1.61 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$;对黄海北部海区的推算偏小,平均绝对误差为0.95 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$;对黄海中部海区的推算偏小,3个海基站的平均绝对误差为1.41、1.58、1.67 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。由海基站的海区分布推算效果检验能够得出,对黄渤海大部分区域推算的风速偏小,仅对渤海西南部海区部分站点推算的风速偏大;推算的黄海北部海区风速平均绝对误差最小,对其他海区风速推算的平均绝对误差相差不大,在1.32~1.70 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

3.3 大风过程推算结果个例分析

在以上研究中,采用数值预报产品中的海平面气压场判断环流的类型,运用已建立的方程根据实时的沿海和海岛自动站风速推算海区风速,由此建立海区风速的实时推算模型,以下将推算的海区风速与数值预报产品中的风向结合,绘制海区的实时风场分布图。通过对比2021年5次大风过程,对推算的效果进行评估。

图8是推算的6级及以上大风发生概率较高的5种类型海区风场与实况对比。2021年1月28日13时(北京时,下同)Ⅱ型(图8a)个例中,推算多个站平均风速为15.8 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,实况风速为16.2 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,

平均绝对误差为1.6 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$;2021年4月15日18时Ⅲ型(图8b)推算的多个站平均风速为14.6 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,实况风速为14.4 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,平均绝对误差为1.1 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$;2021年10月4日18时Ⅴ型(图8c)推算的多个站平均风速为15.2 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,实况风速为15.9 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,平均绝对误差为1.1 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$;2021年5月7日04时Ⅶ型(图8d)个例中,推算的多个站平均风速为13.7 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,实况风速为12.8 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,平均绝对误差为1.6 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$;2021年10月16日09时Ⅷ型(图8e)推算的多个站平均风速为15.7 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,实况风速为15.9 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,平均绝对误差为0.9 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。可以看出,5次过程中3次推算的风速比实况偏小,2次偏大,平均绝对误差较小,在0.9~1.6 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,推算风速与实况风速基本一致。从推算的海区风场中能够直观地看出渤海、黄海北部和中部的海上大风分布,为海洋气象服务提供支持。

海区风速推算方法,除推算结果较为准确外,还具有以下优势:一是适应能力强,易于业务应用,由于采用的是多元拟合方法建立方程,建模耗时非常小,当某陆基站资料出现缺测等异常情况时,可以剔除后重新快速建立计算方程并完成海区风速推算,不影响业务实时应用;二是可扩展性强,对于尚未建立预报方程的海区,随着资料的积累,可不断补充和完善,对于已经有足够资料积累的海区,可以考虑适当调整船舶、浮标等观测系统的部设,如移动到资料缺乏的海区,以更好地发挥作用。在有条件的情况下,也可对部分海区开展一段时期的试验观测以积累数据集。

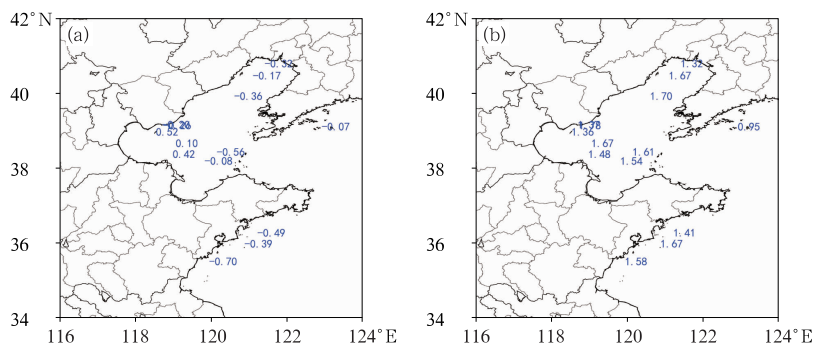
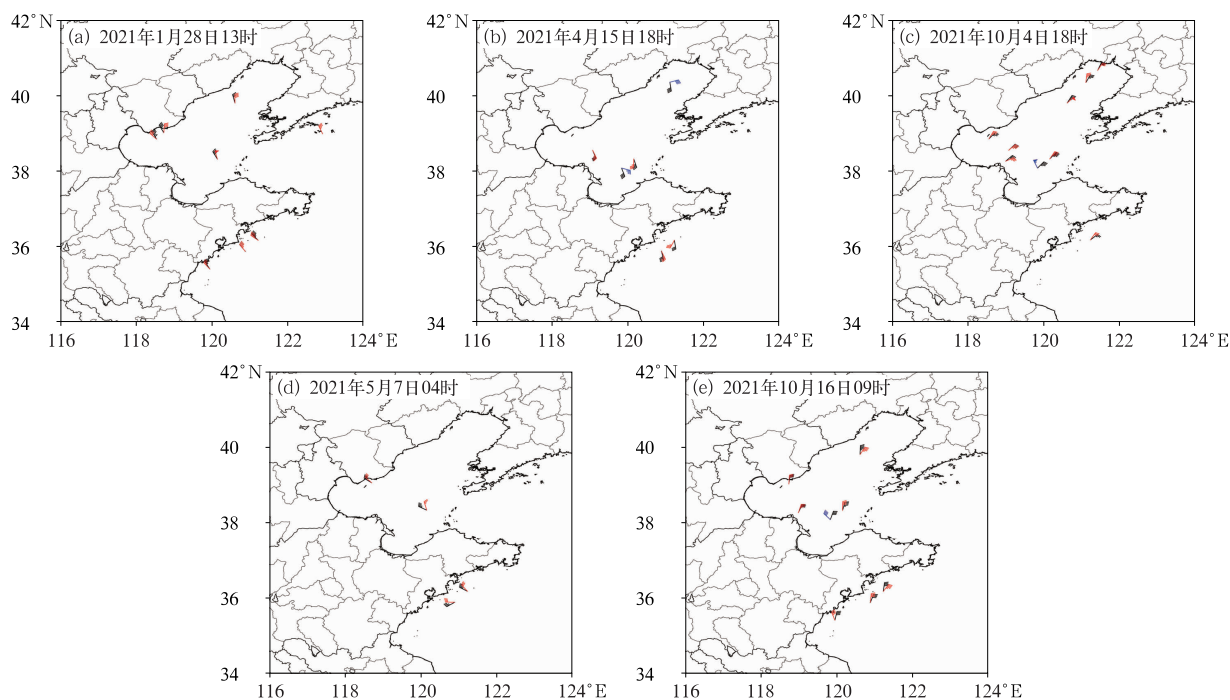


图7 海基站推算风速的(a)平均误差(单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)和
(b)平均绝对误差(单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

Fig. 7 (a) Average error (unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) and (b) mean absolute error (unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) of calculated wind speed at the sea-based station



注: 黑色风羽为推算风场, 红色和蓝色风羽为实况风场, 其中蓝色风羽为与预报及周围风向差异大于 50° 的可疑数据。

图 8 2021 年(a)Ⅱ型、(b)Ⅲ型、(c)Ⅴ型、(d)Ⅶ型和(e)Ⅷ型基于沿海、海岛基站风场实况推算的海区风场产品示意图

Fig. 8 Sketch maps of the calculated wind field in sea area based on observation at coastal stations and island stations under the weather of (a) type Ⅱ, (b) type Ⅲ, (c) type Ⅴ, (d) type Ⅶ and (e) type Ⅷ in 2021

4 结论与讨论

针对渤海和黄海海区海上大风观测资料稀缺问题,为有效补充海区风场实况获取能力,本文采用较为可靠的沿海和海岛等陆基站风速资料以及具有一定连续性的浮标站、船舶等海基站风场资料,建立了由陆基风场向海区风场的推算模型,并将推算结果进行检验,主要结论如下。

(1)在渤海和黄海北部被岸线环绕的海区,沿海气象站点较为密集的情况下,使用陆基站实况风速资料推算海区的风速是可行的。在海区观测不连续、不稳定的情况下,推算结果能够对海上风场资料进行有效的补充。以 2021 年 21 个海基站为例,使用 CM 模型可使海区数据获取率由 72.1% 提高到 98.7%。

(2)根据海平面气压场对渤海、黄海北部区域的环流形势进行分类,并针对每一类环流,使用 74 个陆基站采用多元线性回归方法建立了 21 个海区站点的风速推算模型。检验表明,CM 模型和 HM 模

型均具有较高的可靠性,推算得到的风速均方根误差较小;在大风条件下,HM 模型可得到更加准确的结果。

(3)8 种天气类型中共 5 种类型发生大风的概率高于 60%,其中对西北高东南低类型,尤其是受强冷空气影响的推算效果最好,对西高东低型、西南高东北低型和西北低东南高型的 6~7 级风速推算较好,对 8 级及以上大风的推算效果略差。不同海区的大风推算结果中,渤海西南部海区的部分站点推算的风速比实况略偏大,其他海区推算的风速均比实况略偏小;对黄海北部海区推算的平均绝对误差最小为 $0.95 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,对其他海区推算的平均绝对误差在 $1.32 \sim 1.70 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

本文提出的海区大风推算方法具有较好的业务应用能力,但需要指出的是,本文对天气类型的划分主要针对天气尺度环流,推算模型对系统性大风天气具有很好的推算效果,但是对于局地对流性大风不具备推算能力。随着海上观测资料不断增加,观测模型可进一步细化和完善,准确率进一步提高;随着观测站点布设范围不断扩大,可以为更多海区建

立推算模型,增强海上风场数据获取能力。

参考文献

- 敖雪,翟晴飞,崔妍,等,2018. 三种风场再分析资料在辽宁省海岸带的比较与评估[J]. 高原气象,37(1):275-285. Ao X, Zhai Q F, Cui Y, et al, 2018. Comparison and evaluation of three types of wind field reanalysis data in coastal zone of Liaoning Province [J]. Plateau Meteor, 37(1):275-285(in Chinese).
- 陈君芝,施晓晖,温敏,2023. ERA5 再分析 10 m 风速数据在“两洋一海”的适用性分析[J]. 气象,49(1):39-51. Chen J Z, Shi X H, Wen M, 2023. Applicability of ERA5 surface wind speed data in the region of “two oceans and one sea”[J]. Meteor Mon, 49(1): 39-51(in Chinese).
- 范苏丹,盛春岩,曲巧娜,等,2017. 利用春季黄渤海沿海大风观测资料评估 CFSR 风场再分析数据[J]. 气象科技,45(5):917-924. Fan S D, Sheng C Y, Qu Q N, et al, 2017. Evaluation and analysis of CFSR data based on spring gale observation over coastal areas of Yellow Sea and Bohai Sea[J]. Meteor Sci Technol, 45(5):917-924(in Chinese).
- 何群英,解以扬,孟冬梅,等,2007. 利用渤海风场推算模式对中尺度风场预报订正试验[J]. 冰川冻土,29(3):497-502. He Q Y, Xie Y Y, Meng D M, et al, 2007. A test of meso-scale wind field prediction modified by a calculating model of Bohai Sea wind-field [J]. J Glaciol Geocryol, 29(3):497-502(in Chinese).
- 胡海川,周军,2019. 集合预报在渤海极大风预报中的应用[J]. 气象,45(12):1747-1755. Hu H C, Zhou J, 2019. Application of ensemble extreme wind forecast in Bohai Sea[J]. Meteor Mon, 45(12):1747-1755(in Chinese).
- 李燕,程航,吴纪平,2013. 渤海大风特点以及海陆风力差异研究[J]. 高原气象,32(1):298-304. Li Y, Cheng H, Wu Q P, 2013. Study of the characteristic and difference between sea and land wind of Bohai[J]. Plateau Meteor, 32(1):298-304(in Chinese).
- 刘彬贤,陈宏,左涛,等,2018. 基于 EC 集合预报的渤海灾害性大风风速预报方法研究[J]. 海洋预报,35(2):19-26. Liu B X, Chen H, Zuo T, et al, 2018. EC ensemble forecast on severe gale speed in the Bohai Sea [J]. Marine Forecasts, 35(2):19-26(in Chinese).
- 孟宪贵,郭俊建,韩永清,2018. ERA5 再分析数据适用性初步评估[J]. 海洋气象学报,38(1):91-99. Meng X G, Guo J J, Han Y Q, 2018. Preliminary assessment of ERA5 reanalysis data[J]. J Marine Meteor, 38(1):91-99(in Chinese).
- 曲巧娜,盛春岩,阎丽凤,2016. 山东省沿海冬春季海陆大风对比分析[J]. 气象科学,36(3):418-424. Qu Q N, Sheng C Y, Yan L F, 2016. Comparative analysis on land-sea gale over coastal areas of Shandong Province in winter and spring[J]. J Meteor Sci, 36(3):418-424(in Chinese).
- 申华羽,方艳莹,涂小萍,等,2020. ECMWF 细网格 10 m 风预报在浙江沿海的评估与订正[J]. 气象,46(11):1485-1494. Shen H Y, Fang Y Y, Tu X P, et al, 2020. Verification of ECMWF 10 m wind forecast for coastal Zhejiang Province[J]. Meteor Mon, 46(11):1485-1494(in Chinese).
- 王亚男,苏杭,胡田田,等,2019. ROAD 模式渤海 10 m 风场预报误差订正[J]. 气象科技,47(6):934-940. Wang Y N, Su H, Hu T T, et al, 2019. Error-correction of 10 m wind forecast in ROAD model over Bohai Sea[J]. Meteor Sci Technol, 47(6):934-940(in Chinese).
- 吴曼丽,王瀛,袁子鹏,等,2013. 基于自动站资料的海上风客观预报方法[J]. 气象与环境学报,29(1):84-88. Wu M L, Wang Y, Yuan Z P, et al, 2013. An objective forecast method on sea wind based on data from automatic weather stations[J]. J Meteor Environ, 29(1):84-88(in Chinese).
- 解以扬,刘大刚,吴丹朱,等,2014. 黄、渤海恶劣天气影响船舶安全的风险预估技术初探[J]. 灾害学,29(1):136-143. Xie Y Y, Liu D G, Wu D Z, et al, 2014. Risk prediction technology of ship safety in the Yellow Sea and Bohai Sea during severe weathers[J]. J Catastrophol, 29(1):136-143(in Chinese).
- 杨晓君,张楠,陈宏,等,2019. 基于人工神经网络算法的渤海海风预报方法研究[J]. 干旱气象,37(1):146-152. Yang X J, Zhang N, Chen H, et al, 2019. Study on forecast method of sea wind in Bohai Sea based on artificial neural network algorithm[J]. J Arid Meteor, 37(1):146-152(in Chinese).
- 赵金霞,曲平,何志强,等,2014. 渤海湾大风的特征及其预报[J]. 气象科技,42(5):847-851. Zhao J X, Qu P, He Z Q, et al, 2014. Characteristics and forecasting of strong wind gusts in Bohai Bay[J]. Meteor Sci Technol, 42(5):847-851(in Chinese).
- 赵强,刘大刚,李杰,2008. 渤海秋冬季偏北大风海陆风力差异的研究[J]. 中国航海,31(2):197-201. Zhao Q, Liu D G, Li J, 2008. Study on partial north strong wind in Bohai Sea area in autumn-winter seasons[J]. Navigat China, 31(2):197-201(in Chinese).
- Beck C, Philipp A, 2010. Evaluation and comparison of circulation type classifications for the European domain[J]. Phys Chem Earth, Parts A/B/C, 35(9-12):374-387.
- Cahynová M, Huth R, 2010. Circulation vs. climatic changes over the Czech Republic: a comprehensive study based on the COST733 database of atmospheric circulation classifications [J]. Phys Chem Earth, Parts A/B/C, 35(9-12):422-428.
- Hoffmann P, Schlünzen K H, 2013. Weather pattern classification to represent the urban heat island in present and future climate [J]. J Appl Meteor Climatol, 52(12):2699-2714.
- Huth R, 2010. Synoptic-climatological applicability of circulation classifications from the COST733 collection: first results [J]. Phys Chem Earth, Parts A/B/C, 35(9-12):388-394.
- Huth R, Beck C, Philipp A, et al, 2008. Classifications of atmospheric circulation patterns: recent advances and applications [J]. Ann New York Acad Sci, 1146(1):105-152.

(本文责编:何晓欢 侯翠梅)