

宁波舟山港南大风时空分布特征及EC细网格模式评估

诸葛丰林¹, 吕劲文^{1*}, 申华羽¹, 王冀¹, 王健捷²

(1. 浙江省宁波市气象服务中心, 浙江 宁波 315000; 2. 浙江省宁波市鄞州区气象台, 浙江 宁波 315100)

摘要: 利用气象观测站小时和分钟数据, 结合港口调度中心和海事局提供的封航资料, 挑选2013—2022年南大风过程, 探讨港区南大风时空分布特征, 归纳天气分型, 计算阵风系数, 最后评估EC细网格10 m风产品的预报性能。结果表明: 10年间南大风过程总计71次, 天气形势主要有低压入海型(26次)、高压后部型(26次)和热带气旋型(19次)。宁波舟山港南大风阵风系数为1.61, 略大于浙江沿海冷空气大风系数1.5, 而小于强对流大风系数1.8。南大风过程中偏南风 and 东南风较多, 西南风较少。从时间分布看, 7月、8月最易出现南大风, 4月、5月次之, 傍晚—上半夜最易出现南大风, 而早晨—上午出现较少。从空间分布看, 高频站点多出现在舟山片区, 而宁波片区极少, 可见宁波区域地理位置存在避风特性, 有利于在南大风过程中开展生产作业。EC细网格对南大风过程的最大风速预报总体偏小, 其中热带气旋型12 h预报的平均误差为-3.5 m/s, 均方根误差为4.9 m/s, 风速预报误差最小, 预报稳定性最好, 预报水平总体优于低压入海型和高压后部型; 分区预报中, 宁波片区的预报效果略优于舟山片区; 无论是分区域或是分型, EC细网格的预报水平从72 h起明显下降。EC细网格对东南风向的预报效果最优, 且宁波片区的预报效果略优于舟山片区, 对低压入海型和高压后部型的风向预报稳定性优于热带低压型。

关键词: 宁波舟山港; 南大风; 站点时空分布; 天气分型; EC细网格预报评估; 阵风系数

中图分类号: P445 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2024)06-0032-12

0 引言

海上大风是威胁海上作业的主要海洋灾害^[1], 对船舶海上航行及港口靠离泊构成潜在风险。近年来我国航运业快速发展, 宁波舟山港作为世界上货物吞吐量最大的港口, 生产调度日趋繁忙, 对港航气象服务有更精细化的需求。国家气象局的业务规定, 瞬时最大风力 ≥ 8 级的大风被定义为灾害性大风, 而宁波海事局的业务规定指出平均最大风力 ≥ 6 级的大风会对其作业产生不同程度的影响, 因此需进行大风管制。通过分析2013—2022年宁波舟山港封航数据发现, 该港口因天气原因造成的封航时长年平均约为800 h, 其中因大风造成的占80%以上。

影响浙江沿海的大风主要有冬季的冷空气大风、春季及初夏的低压大风、夏季的热带气旋大风以及强对流大风。此前学者对浙江沿海大风的特征进行了广泛研究^[2-6], 结果表明其季风特征明显, 大风日数具有一定的地域特性, 浙北沿海大风4月最多, 9月最少, 而浙中南则是1月最多, 5月最少, 浙北沿海西南偏南大风最多, 偏北大风次之, 而浙中南沿海东北偏北大风最多, 东北大风次之。宁波地处浙北沿海, 每年海域内8级以上大风日数超过120天^[1], 在春夏季南大风是较常见的气象灾害之一。由于南大风常出现在暖区天气中, 而暖区天气常伴有明显的水汽和能量输送^[7], 同时还可能和小尺度天气系统相互作用形成正反馈带来风力增

收稿日期: 2023-10-05。

基金项目: 浙江省“尖兵”“领雁”研发攻关计划项目(2024C03256); 浙江省气象科技计划项目(2021YB21); 宁波市气象科技重点项目(NBQX2022002A)。

作者简介: 诸葛丰林(1989-), 男, 工程师, 硕士, 主要从事专业气象服务研究工作。E-mail: espnss@qq.com

*通信作者: 吕劲文(1985-), 男, 高级工程师, 硕士, 主要从事专业气象服务研究工作。E-mail: jwlv1985@126.com

幅^[8],或受下垫面影响带来小区域风力增大等情况^[9],数值模式对上述天气的预报能力相对有限。相比而言,冷区天气系统较稳定,数值模式预报的可信度相对更高,研究表明^[10]模式对于冷空气的风力预报水平明显优于热带气旋和低压倒槽等天气系统带来的大风。因此,基于数值预报在有限区域内开展精准的南大风预报是当前业务服务中的难点。

欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)细网格模式(简称EC细网格)数值预报产品是当前气象业务重点参考的数值模式产品之一,预报科研人员对细网格风预报产品在不同区域的应用进行了初步检验评估。结果表明^[11-13],该模式对渤海海区、大连和福建沿海的10 m风场预报与实测风速的相关性较好;浙江沿海站点的预报误差与离岸距离密切相关,离岸较远站点预报与观测的一致性较高,但风速预报偏小,风向预报有逆时针偏差^[10]。学者也基于EC细网格模式输出产品,采用智能网格订正释用技术^[14]和机器学习等方法^[15]对舟山和华北等地的10 m风速进行订正释用,均在一定程度上提升了预报准确率。目前针对宁波舟山港的EC细网格南大风的评估工作还比较有限,该模式的10 m风产品已积累多年,为系统检验其预报性能提供了可能。

宁波舟山港附近岛屿众多、地形地貌复杂,不同港口片区的南大风表现出一定的空间差异。近年来,港区及周边岛屿合理布置了逾百台(套)气象站点,为研究上述差异提供了可能。利用宁波舟山港所属范围内的甬舟沿海气象观测资料,针对南大风在港区的时空分布特征开展分析,同时探讨天气分型,计算阵风系数,帮助预报员了解区域内南大风的气候背景。开展的EC细网格10 m风产品的南大风预报评估,将为日后应用该产品进行主观订正提供客观参考。研究成果有助于提升宁波舟山港南大风的预报服务质量,提高港口运输、作业及管控的气象保障水平。

1 资料与方法

1.1 资料

所用资料包括浙江省气象信息中心提供的2013—2022年宁波舟山港沿海和海岛气象观测站

的逐小时最大(极大)风速和风向及其出现的时间以及宁波舟山港调度中心和宁波海事局提供的同时段封航资料信息。所有气象站资料已通过资料质量控制(主要包括气候学界限值检查、气候极值检查、资料完整性检查、资料内部一致性检查、资料时间一致性检查、资料空间一致性检查和人机交互检查等)并保存至数据库,同时考虑到港口作业及相关设备的海拔高度普遍在100 m以下,分析海拔较高气象站点的风在实际业务中参考意义不大,因此研究中除极少数地理位置特殊的站点外,选取的绝大多数站点海拔高度在100 m以下,最终进行研究分析的为宁波舟山港区域117个气象观测站(宁波35个,舟山82个,见图1a)。参考宁波地方标准《港航分区气象服务规范》中提及的港航区划,将港区分为宁波和舟山两个片区,图1a中黑虚线为两个片区的分界线。

EC细网格预报产品于2011年9月由中央气象台开始下发,前72 h的时间分辨率达到3 h,72~240 h的时间分辨率为6 h,空间分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$,2015年1月开始进一步细化到 $0.125^{\circ} \times 0.125^{\circ}$ 。本研究预报时效选取前72 h,时间分辨率为3 h,每日08时(北京时,下同)和20时两次起报,考虑到2015年以前的模式产品空间分辨率不够细致,因此主要对2015年以后的南大风过程开展评估。

1.2 南大风过程判别及预报评估方法

实测南大风过程定义为:根据业务预报要求和气象服务经验,当风向 φ 满足 $135^{\circ} < \varphi \leq 225^{\circ}$ 定义为南风^[16],且观测站点1 h最大风力 ≥ 6 级(风速10.8 m/s)或1 h极大风力 ≥ 8 级(风速17.2 m/s)的站点数达到总站点数的10%及以上,定义为一个南大风时次;任意时段内南大风时次 ≥ 1 h、相邻两个南大风时次间隔 ≤ 12 h,且以第一个南大风时次为过程开始时间、最后一个南大风时次为过程结束时间。再结合封航资料、欧洲中期天气预报中心的ERA5再分析资料和历史地面天气图判别所有南大风过程的天气分型。

宁波舟山港区域对应的EC细网格预报共75个格点(见图1a蓝色格点),全部覆盖了参与评估的气象自动观测站点。依据前述的实况南大风过程,从实测过程开始检索不同起报时次的EC细网格预

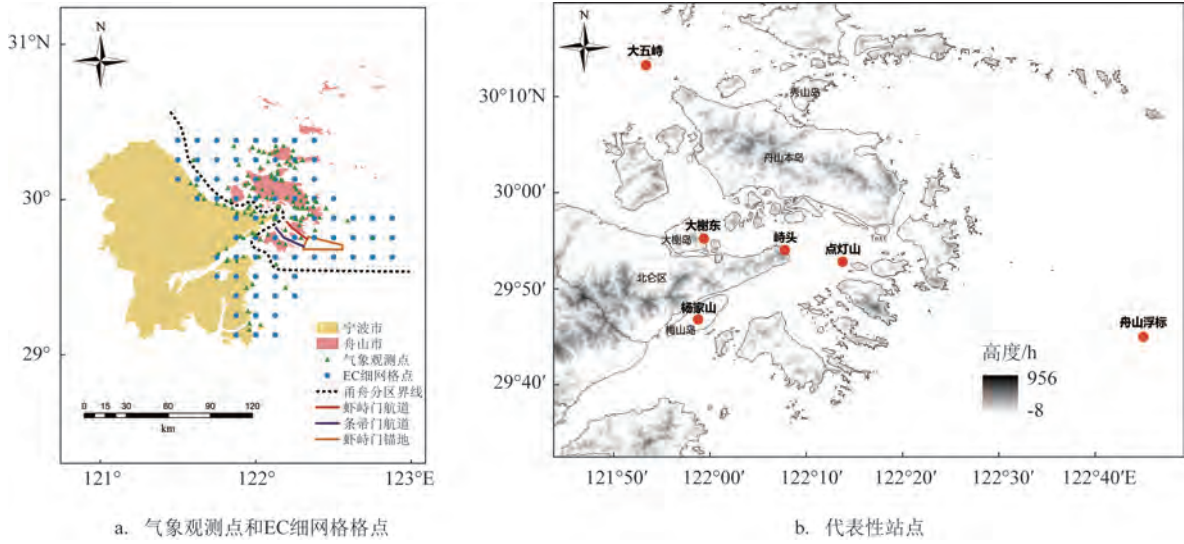


图1 宁波舟山港所属区域站点分布图

Fig.1 Distribution of stations in Ningbo-Zhoushan port

报,如实况起始时间在距离起报时间12 h以内,称为12 h预报,当距离起报时间在12~24 h时,称为24 h预报,以此类推。研究中主要检验EC细网格预报对于过程最大风速的预报效果。通过计算平均误差(E_M)、平均绝对误差(E_{MA})和均方根误差(E_{RMS})这3个统计指标^[17]开展评估。计算公式为:

$$E_M = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (V_{fst} - V_{ob}) \quad (1)$$

$$E_{MA} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |V_{fst} - V_{ob}| \quad (2)$$

$$E_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (V_{fst} - V_{ob})^2} \quad (3)$$

式中: V_{fst} 表示EC模式预报风速, V_{ob} 表示实况风速,前者与后者的差值即为偏差; N 代表对应南大风总过程数。

1.3 阵风系数计算方法

世界气象组织(World Meteorological Organization, WMO)给出的阵风系数公式^[18]为:

$$G_{\tau, T_0} = V_{\tau, T_0} / V_{T_0} \quad (4)$$

式中: G_{τ, T_0} 为观测周期 T_0 中持续时间为 τ 的风速最大值(极大风速); V_{T_0} 为观测周期 T_0 中风速平均值(最大风速)。按照观测和预报业务规定(1 h最大风速为1 h内10 min滑动平均风速的最大值,1 h极大风速为1 h内3 s平均风速的最大值), T_0 取10 min, τ 取

3 s,并根据极大风速出现的时间确定对应10 min内的最大风速来计算阵风系数。

2 宁波舟山港南大风特征

2.1 天气分型及阵风系数

根据资料分析得到2013—2022年宁波舟山港区域南大风过程总计71次,造成南大风的天气形势主要有低压入海型(Type of Depression Move onto the Sea,简称D型)、高压后部型(Type of Ground High Back,简称G型)和热带气旋型(Type of Tropical Cyclone,简称T型),3种天气系统形成的南大风过程次数和过程总时数占比见表1。相对而言,G型出现的次数(26次)最多且影响时长最长,总时数占比为37.1%;T型过程数相对较少,但影响总时数占比超过33%,表明其单次过程的影响时长相对较长;D型次数虽与G型相当,但影响总时数最少,占比不足30%。由此可见,宁波舟山港受D型和G型南大风过程最多,而T型过程最少,3种分型的总影响时长整体差异不大。

图2为3种天气分型的地面流场示意。D型在中高层伴有高空槽东移南压(图略),而地面图(见图2a)则显示浙北沿海地面有闭合低压或倒槽发展东移,宁波舟山港受低压东侧偏南气流影响先出现南大风,低压入海后转为偏北风。有研究表明^[19],浙

表1 2013—2022年宁波舟山港所属区域的南大风过程统计及南大风阵风系数

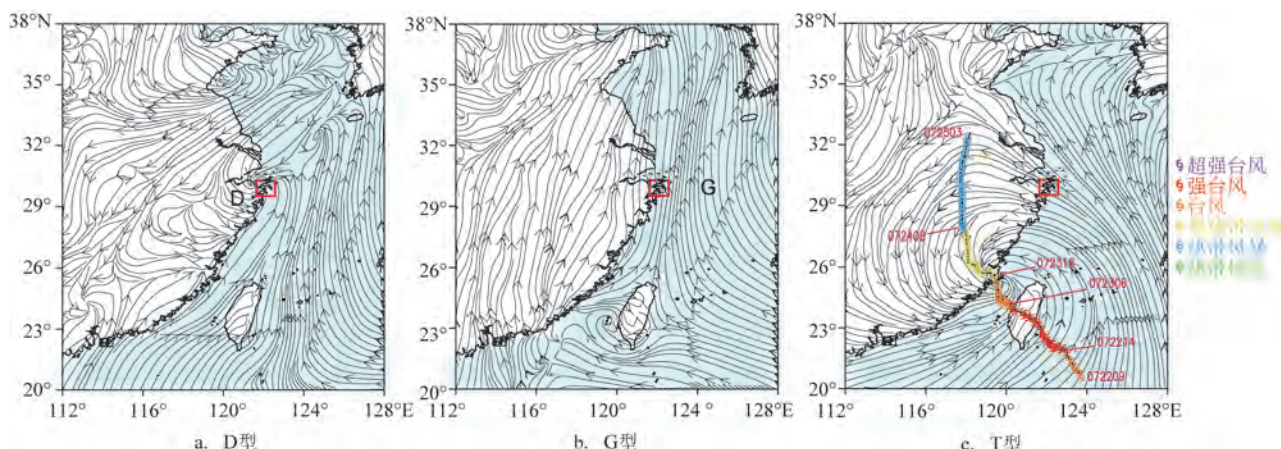
Tab.1 The number of times, time proportion and gust factors of all and three different weather situations during south gale processes in Ningbo-Zhoushan port from 2013 to 2022

类别	全部	D型	G型	T型
过程次数	71	26	26	19
过程总时数占比/%	100	29.5	37.1	33.4
阵风系数	1.61(平均)	1.59	1.52	1.69

江低压入海过程多发生于春季,而由于当前对其结构研究不够深入,入海后很难准确预报其强度变化。在本研究选取的26次由低压入海引发的港区南大风过程中,有73%的过程发生在3—5月,因此春季需特别关注该系统引发的南大风天气。在G型背景下,中纬度高空会形成东高西低的形势,地面在东北有锋面气旋发展加深或气旋从渤海入海时,海上高压和地面气旋之间会形成明显的气压梯度(见图2b),浙江沿海主要受高压后部偏南气流影响形成南大风。此类过程多发生在春末—夏季的5—8月,发生在该时段的个例占69%,由于天气形势变化不大,有时过程可维持较长时间,并表现出一定的日变化特征,即中午—凌晨前后风速较大,而下半夜一次日上午风速有所减小。在T型过程中,台风多从闽浙沿海登陆,宁波舟山港位于台风第一象限或第四象限,受其外围环流或本体影响

形成南大风。从图2c可见,1410号台风“麦德姆”先后登陆台湾和福建后沿119°E附近北上,宁波舟山港位于台风路径的东侧象限,形成南—东南大风。此类过程均发生在夏秋季节,其中94%在7—9月,在台风影响下宁波舟山港常出现较大范围的南大风,全港区达到南大风标准的站点比例明显高于前两种天气型。由于台风本体结构以及和副热带高压等天气系统的相互作用较复杂,且相对港区的位置也不相同,因此此类过程的南大风预报常存在不确定性,尤其是减风阶段风速多表现出波动减弱的特征。

由式(4)计算出宁波舟山港区域南大风的阵风系数(见表1),得到区域平均阵风系数为1.61,该结果大于此前学者研究的浙江近海海区冷空气大风的阵风系数(一般小于1.5)^[20],同时小于强对流大风的阵风系数(约为1.8),表明相较于冷空气大风,各类系统带来的南大风具有更明显的阵性特征,但弱于强对流带来的雷暴大风。区分不同天气型的南大风阵风系数发现,T型最大,为1.69,D型和G型分别为1.59和1.52。在T型过程中,港区常受南北向或西北—东南向螺旋雨带的影响,大风表现出明显的阵性,这与日常预报认知接近,而G型由于天气形势总体稳定,风的阵性表现最弱,D型介于上述两种天气分型之间。因此,日后开展不同形势下南大风预报时,可适当参考上述结论,同时重点关注T型过程的阵风预报。



注: □代表宁波舟山港区域位置

图2 宁波舟山港所属区域不同形势下南大风过程地面流场图

Fig.2 The surface air flows in different weather situations during south gale processes in Ningbo-Zhoushan port

2.2 风向分析

将南大风分为东南(Southeast,简称SE)、偏南(South,简称S)和西南(Southwest,简称SW)3个风向,分析宁波舟山港区域各风向分布。数据表明,在南大风过程中该区域所有站点的偏南风比重接近50%(见图3a),而东南风和西南风的比重分别为30.9%和21.0%,舟山片区站点各风向的分布比例和宁波舟山港区域总体相近(见图3c),而宁波片区各风向的比例则有所不同(见图3b),42.3%左右为东南风,偏南风的比例次之,为33.5%,和舟山片区相似的是西南风的比例最低,仅为24.2%。这表明宁波舟山港的南大风过程更多的是偏南风 and 东南风,西南风总体较少,而宁波片区东南风多于偏南风,舟山片区偏南风多于东南风。从不同级别南大风的极大风风向分布看,宁波舟山港区8级阵风的各风向分布比例和南大风过程总体风向比例没有明显差异,9级和10级及以上阵风同样为偏南风比例最大,西南风的比例略大于东南风,这与港区总体风向比例略有差异,舟山片区9级及以上极端南大风也表现出类似的分布特征,而宁波片区的分布特征与该片区总体南大风各风向比例较一致。因此,舟山片区和宁波片区需要分别重点关注偏南和东南风向的极端南大风防御工作。

2.3 时间变化

将10年间宁波舟山港区域出现南大风过程的

所有站点小时数进行累积统计,得到南大风年均风总时数为1 659.9 h(其中6级为1 173.4 h,7级为401.6 h,8级及以上为84.9 h),年均极大风总时数为1 502.1 h(其中8级为1 077.5 h,9级为318.9 h,10级及以上为105.7 h)。南大风的平均风总时数最多(2 695 h)的年份为2018年,这与当年影响宁波的台风个例较多有关,7月有“玛利亚”(1808)和“安比”(1810)两个台风,8月有“云雀”(1812)、“摩羯”(1814)和“温比亚”(1818)3个台风。南大风的极大风总时数最多(2 169 h)的年份为2022年,这主要由于2022年春季有两次低压入海过程,而6月底—8月中旬受5次高压后部天气型影响,均出现了较长时间的南大风。南大风的逐年总时数(图略)表明,宁波舟山港区域南大风频数的年际差异不大,随着风级增大,各级南大风总时数逐渐减少,出现7级及以上的平均风仅占南大风平均风总时数的29.3%,而9级及以上极大风的总时数仅占南大风极大风总时数的28.3%。

2013—2022年宁波舟山港南大风过程和8级及以上极大风累积小时数的逐月分布见图4。从图中可见宁波舟山港区域除12月和1月外,其他月份均有南大风出现,且总时数分布为双峰型特征。总时数的最大峰值出现在7月(平均风总时数为4 238 h,极大风总时数为3 828 h),而8月(平均风总时数为3 051 h,极大风总时数为3 225 h)略有减少,7月和8月既有热带气旋影响,又有高压后部影响,总体较容易出现南大风;另一个峰值出现在5月(平均风总

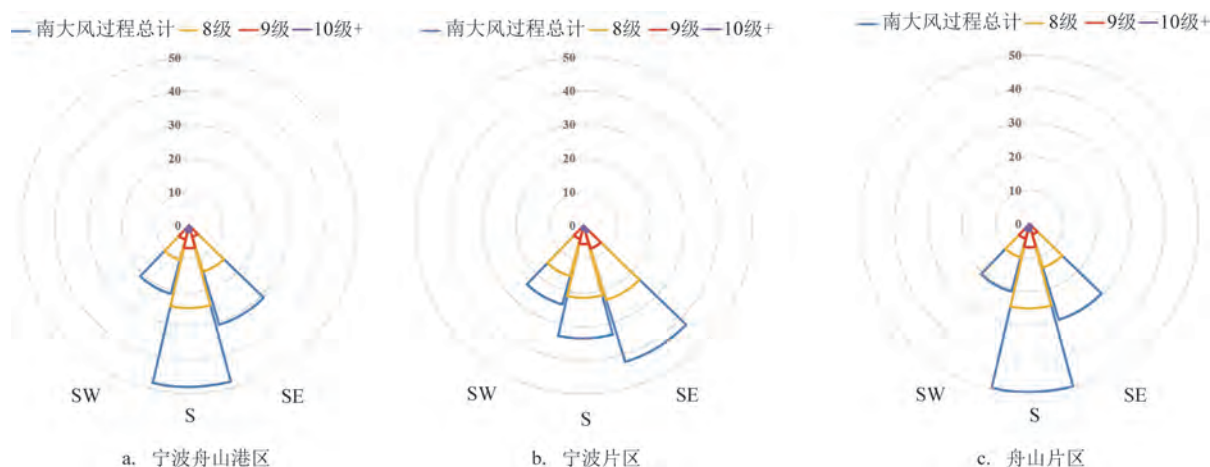


图3 宁波舟山港南大风过程总体和各级极大风3种风向玫瑰图(单位:%)

Fig.3 The wind direction rose maps of all south gale processes and varied grades of extreme south wind in Ningbo-Zhoushan port (unit:%)

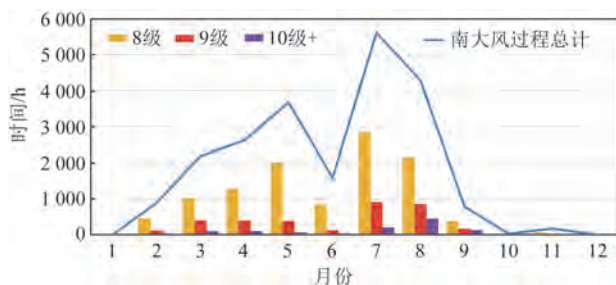


图4 宁波舟山港南大风过程总体和各级极大风的累积小时数的逐月分布

Fig.4 Monthly variation of all-hours south gale processes and varied grades of extreme south wind in Ningbo-Zhoushan port

时数为2 891 h,极大风总时数为2 378 h),2—5月随着暖湿气流趋于活跃,宁波舟山港受低压入海和高压后部环流影响,南大风时数逐月增多,而6月由于梅雨带影响浙北,静止锋条件下港区南大风时数相对较少。7级及以上的平均风和9级及以上的极大风总时数最多分别出现在7月(1 224 h)和8月(1 179 h),表明台风季港区出现极端南大风的概率明显高于其他月份。

2013—2022年宁波舟山港南大风过程和8级及以上极大风累积小时数的日变化见图5。数据分析表明,该区域南大风具有一定的日变化特征,17时—次日00时相对较易出现南大风,其中平均风总时数最多出现在19时(876 h),21时(847 h)次之,极大风总时数最多出现在00时(747 h),23时(745 h)次之。7级及以上平均风和9级及以上极大风总时数最多分别出现在22时(260 h)和23时(254 h)。相比而言,每日06—09时南大风出现时数较少,其中06时平均风总时数仅为519 h,而极大风总时数最少为08时(461 h)。这表明港区在傍晚—上半夜容易出现南大风,而早晨—上午出现南大风的概率相对较低。

2.4 空间分布

计算每个站点在所有南大风过程中满足南大风标准的总时数占该站点有效数据总时数的比例,以此表征各站点南大风的出现概率。图6a为宁波舟山港站点南大风概率空间分布图,可见南大风高频站点多位于舟山片区,除港区主航道(主要包括虾峙门航道和条帚门航道及其北侧和西侧的甬舟交界线航道,下同)舟山一侧的少数站点外,绝大多

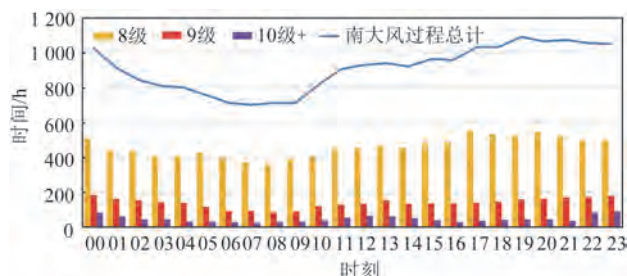


图5 宁波舟山港南大风过程总体和各级极大风的累积小时数的日变化分布

Fig.5 Hourly variation of all-hours south gale processes and varied grades of extreme south wind in Ningbo-Zhoushan port

数站点的概率均在20%以上,最高为大五峙站的84.3%,该站点靠近港区北缘,位于舟山本岛西北侧的岛礁上(见图1b),海域周围相对开阔;舟山的高概率站点可大致划分为本岛北侧、秀山附近区域以及虾峙门、条帚门航道东侧的片区,前者的南大风不利于附近散杂货、矿石码头和危化品船舶的靠离泊作业,而后的南大风对于大型船舶通过主航道进出港口有一定影响,舟山片区的次大概率站点为点灯山站(75.5%),其位于主航道附近。相比而言,宁波片区南大风高频站点极少,绝大多数站点的概率在15%以内,最高的峙头站概率为61.3%,该站点为北仑区最东端,地形向东突出,其东侧和南侧相对较开阔,有利于南风增大,该站点可表征主航道的西侧风速,而站点西侧宁波片区码头站点的概率均相对较小,可见宁波片区的码头位置存在避风特性,有利于南大风过程中船舶的靠离泊作业;另外关注到宁波大榭岛东侧以及梅山岛各有一个站点概率较高,分别为14.1%(大榭东站)和10.5%(杨家山站),表明上述两个岛屿附近在南大风过程中风速容易增大,在日常预报中需加以关注。

如2.1节所述,宁波舟山港南大风阵风系数较大,在台风等过程的影响下,大风具有较明显的阵性特征,考虑到较大的阵风不利于船舶航行和靠离泊安全,因此单独探讨站点较大阵风量级(8级、9级和10级及以上)的空间分布情况,各级别站点概率见图6b—d。由图可见,8级和9级南大风站点的空间概率分布特征与港区整体分布较接近,均表现为舟山片区站点概率大于宁波片区,同时舟山片区的高概率站点主要分布在南侧虾峙门航道附近和舟山本岛及北部岛屿区域;而10级及以上高概率站点

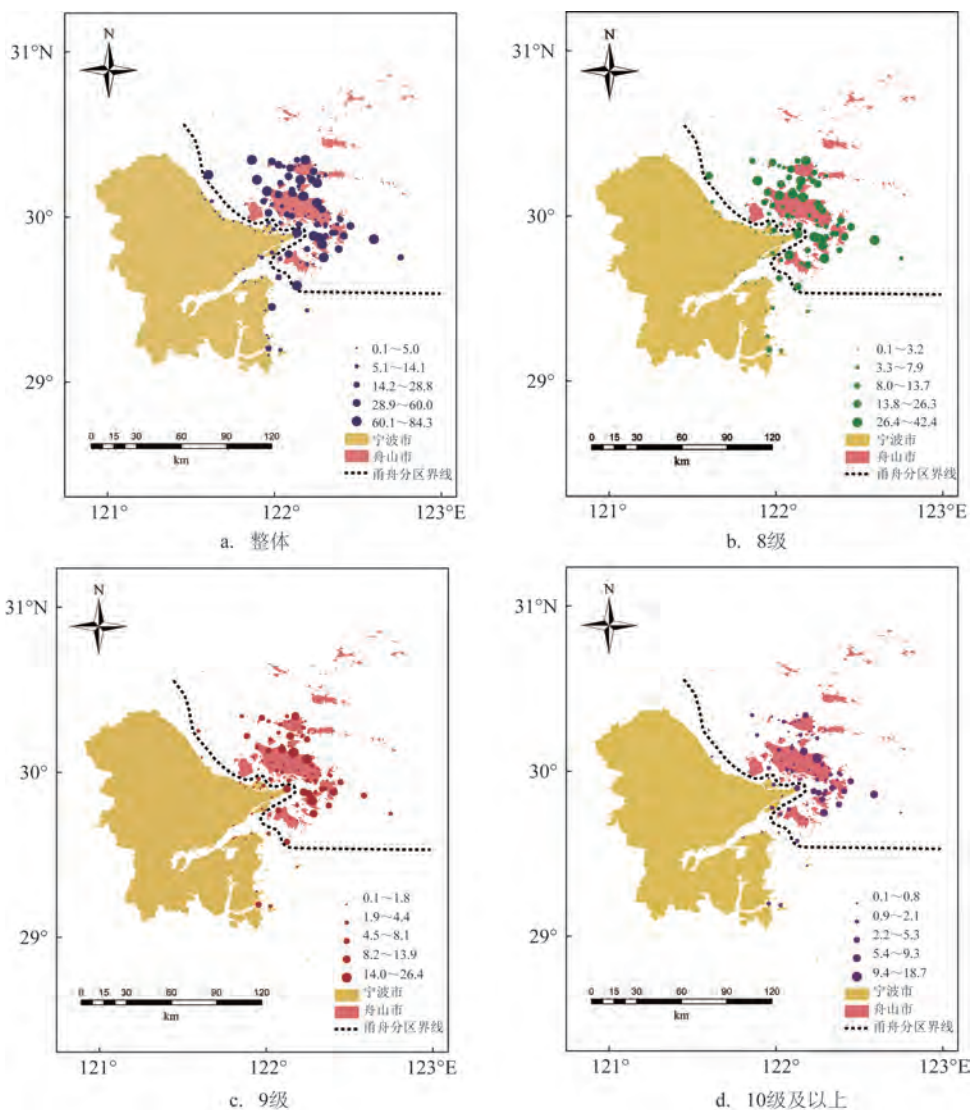


图6 宁波舟山港南大风过程站点的总体和各级极大风概率(单位:%)

Fig.6 The occurrence probability of all south gale processes and varied grades of extreme south wind in Ningbo-Zhoushan port (unit:%)

的分布略有不同,在舟山本岛及北部岛屿明显减少,更多的分布在虾峙门航道东侧的岛屿上,表明极端的南大风更容易出现在宁波舟山港东南侧,而该区域的南大风对于由主航道进出以及抛锚在虾峙门锚地附近的船舶有一定影响,需在日后预报中予以关注。另外注意到最东边的舟山浮标站点中各级别的南大风阵风概率都不大,表明由于受地形和其他下垫面因素影响,在南大风过程中舟山港风速比近海海面风速更大。随着南大风阵风量级的不断增大,宁波片区和舟山片区站点的大风概率有所减小,港区内站点8级阵风的最高概率为42.4%,

9级阵风的最高概率减小至26.4%,而10级及以上阵风最高概率仅为18.7%。

3 EC细网格10 m风预报检验评估

学者针对不同天气分型下黄渤海^[21]和浙江沿海^[10]大风过程的数值模式预报效果开展检验,研究中采用大风过程时段的最大风速进行分析,该方法同样适用于南大风过程的模式预报评估。实况南大风过程定义如1.2节所述,一个过程中所有站点的最大风速即为此过程的南大风实况最大风速,过

程预报最大风速为过程时段前后12 h内EC细网格在宁波舟山港片区格点预报的最大风速,将对应时间的实况最大风速及风向与预报最大风速及风向进行对比。由于2015年1月以前EC细网格产品的空间分辨率相对较低,仅为 0.25° ,此后升级为 0.125° ,因此本研究主要评估2015年以来57次南大风过程的风速、风向预报水平。

3.1 风速评估

3种天气形势下的南大风风速评估结果见表2。EC细网格预报的过程最大风速总体小于实况,所有天气型的平均误差均小于0,其中T型预报效果与实况误差最小,12 h平均误差仅为 -3.5 m/s,明显优于D型的 -7.5 m/s和G型的 -7.4 m/s,且平均绝对误差也有相似特征;T型12 h的均方根误差为4.9 m/s,24~60 h的为5~7 m/s,而D型和G型12~60 h的

均方根误差均为7~8 m/s,表明在风速预报的稳定性方面T型同样优于其他两种天气型。与此前学者得到的浙江沿海冷空气大风过程的均方根误差(2~3.5 m/s)^[10]相比,EC细网格对于南大风的预报稳定性不及冷空气大风,后续在南大风过程的风速预报服务中可适当对数值预报结果进行针对性地订正。

进一步研究比较EC细网格在宁波和舟山两个片区的南大风预报性能。由表3可以看出,宁波片区12~60 h的平均绝对误差为4~5 m/s,均方根误差为5~6 m/s,而舟山片区分别为6~7 m/s和7~8 m/s,表明模式对于宁波片区的南大风预报效果略优于舟山片区。对比不同片区3种天气形势的预报结果发现,模式在宁波片区不同天气形势下的预报性能不相上下,但在舟山片区T型天气形势下的预报性能略优于其他两种天气形势(表略)。另外,3种天气形势下舟山片区72 h的均方根误差均增大

表2 EC细网格模式对3种天气形势下的南大风最大风速预报评估(单位:m/s)

Tab.2 Maximum south wind speed forecasts under three weather situations from EC fine grids model during south gale processes (unit: m/s)

时效/h	D型			G型			T型		
	平均误差	平均绝对误差	均方根误差	平均误差	平均绝对误差	均方根误差	平均误差	平均绝对误差	均方根误差
12	-7.5	7.5	7.6	-7.4	7.4	7.6	-3.5	4.4	4.9
24	-7.4	7.4	7.6	-7.4	7.4	7.6	-3.7	5.6	6.1
36	-7.3	7.3	7.6	-7.3	7.5	7.7	-3.7	4.5	5.4
48	-7.1	7.1	7.3	-7.4	7.4	7.7	-3.6	4.6	5.5
60	-7.3	7.3	7.5	-7.7	7.7	7.9	-4.5	6.1	6.8
72	-8.2	8.2	8.4	-8.2	8.2	8.4	-4.3	8.0	9.5

表3 EC细网格模式对宁波片区和舟山片区的南大风最大风速预报误差评估(单位:m/s)

Tab.3 Maximum south wind speed forecasts in two sections from EC fine grids model during south gale processes (unit: m/s)

时效/h	宁波片区			舟山片区		
	平均误差	平均绝对误差	均方根误差	平均误差	平均绝对误差	均方根误差
12	-4.5	4.5	5.1	-6.5	6.7	7.0
24	-4.2	4.5	5.0	-6.5	6.8	7.2
36	-4.3	4.5	5.0	-6.4	6.7	7.1
48	-4.0	4.4	5.0	-6.3	6.6	7.0
60	-4.4	4.9	5.6	-6.7	7.1	7.5
72	-5.4	5.5	6.3	-7.1	8.1	8.6

至8 m/s以上,宁波片区增大至6 m/s以上,说明不论是分区域或是分型,模式预报水平从72 h起明显下降。

3.2 风向评估

通过箱线图可以比较不同预报时效下宁波舟山港南大风风向预报偏差的离散度和数据的集中趋势。如图7所示,EC模式对于东南风向的预报偏差总体为正,约为 $0^{\circ}\sim 21^{\circ}$,表明模式对东南风向的预报有顺时针偏差(即预报风向相对略偏南),但偏差角度总体较小;而偏南风向的预报没有明显趋势,既存在顺时针偏差,也存在逆时针偏差,个例间的偏差角度为 $-28^{\circ}\sim 13^{\circ}$,略大于东南风向的预报偏差;西南风向的偏差总体为负且偏差角度最大,约为 $-42^{\circ}\sim -15^{\circ}$,表明模式预报有较明显的逆时针偏差。同时还注意到,东南风向的预报偏差离散度总体小于其他两个风向,西南风向的预报偏差最大且存在奇异值(见图7中 \cdot),故相较而言EC模式对于

东南风向的预报效果最优,偏南风向次之,西南风向最差。对比不同片区的风向预报性能发现,宁波片区各风向的预报效果略优于舟山片区,且模式对宁波片区偏南风向以及舟山片区东南风向12~48 h预报偏差离散度较小,中位数分别为 $7^{\circ}\sim 12^{\circ}$ 和 $7^{\circ}\sim 17^{\circ}$,预报效果相对较好。进一步比较3种天气形势下的风向预报性能发现,D型和G型的预报偏差离散度相对较小,T型较大,尤其是偏南风 and 西南风过程,因此模式对于D型和G型的风向预报稳定性优于T型;不同天气形势下不同风向预报偏差的趋势也有一定的相似性,即东南风有顺时针偏差,偏南风的偏差趋势不显著,而西南风有逆时针偏差。

在不同时效的EC模式风向预报对比中发现,宁波舟山港整体和分片区东南风的预报偏差差异不明显,总体偏差中位数为 $0^{\circ}\sim 17^{\circ}$;而偏南风预报略有差异,尤其是在宁波舟山港整体以及舟山片区,随着时效的临近,预报效果逐渐改善;西南风预报同样有差异,尤其是在宁波片区,12 h和24 h的预

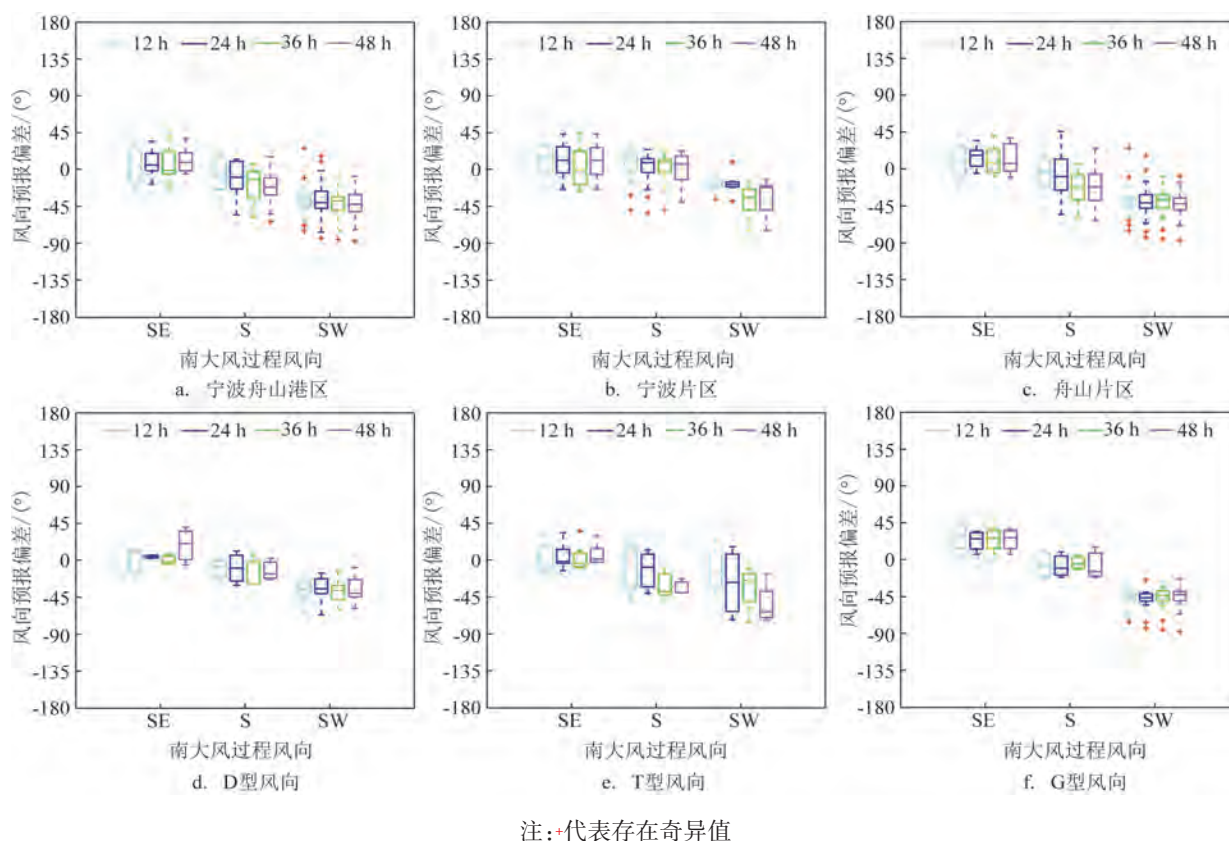


图7 EC细网格模式对宁波舟山港12~48 h南大风最大风速的风向预报偏差箱线图

Fig.7 Prediction bias boxplots of maximum wind directions during south gale processes and different weather situations concerning 12~48 h forecasts from EC fine grids model in Ningbo-Zhoushan port

报偏差中位数仅为 $-15^{\circ}\sim-18^{\circ}$,而 $36\sim48\text{ h}$ 的预报偏差扩大到 $-21^{\circ}\sim-33^{\circ}$,同时随着时效临近,预报的离散度也明显减小。在不同天气分型中,不同时效的EC模式风向预报部分表现出随着时效的临近,预报与实况偏差更小即可信度更高的趋势,例如D型过程中东南风 $12\sim36\text{ h}$ 的偏差为 $-1^{\circ}\sim10^{\circ}$,而 48 h 的预报偏差中位数增大到 21° ;部分则表现出随着预报时效临近偏差趋势并不显著的特征,例如D型和G型过程的西南风,前者4个起报时次的偏差较小,均为 $-34^{\circ}\sim-40^{\circ}$,而后者同样表现出明显的逆时针偏差,并且不同时次的偏差中位数差异小,离散度也小。总体而言,EC模式对于不同风向的预报表现出随着预报时效的临近,预报偏差减小的趋势, $12\sim24\text{ h}$ 的风向预报总体略优于 $36\sim48\text{ h}$ 预报,并且 12 h 与 24 h 的风向预报总体差异不大。

4 结论与讨论

对2013—2022年宁波舟山港的南大风时空分布特征进行研究,归纳天气分型,同时计算阵风系数,最后检验评估EC细网格 10 m 风产品的预报性能。主要结论如下:

①宁波舟山港区域南大风过程总计有71次,D型和G型过程带来的南大风过程最多,而T型最少,3种分型的总影响时长整体差异不大。宁波舟山港区整体南大风阵风系数为1.61,略大于此前学者研究的浙江沿海冷空气大风,而小于强对流大风;区分不同天气型发现,T型阵风系数最大,D型次之,G型最小。通过风向分析发现,宁波舟山港南大风过程中偏南风或东南风出现较多,西南风较少,相较而言宁波片区东南风多于偏南风,舟山片区偏南风多于东南风。

②从时间分布看,宁波舟山港区域南大风的年际差异不大;逐月分布呈双峰型特征,两个峰值分别出现在7月和5月,台风季的7月和8月港区出现极端南大风的概率明显高于其他月份。港区在傍晚一上半夜容易出现南大风,而早晨一上午出现南大风的概率相对较低。南大风的年变化、月变化和日变化均表现出随着风级增大,各级总时数逐渐减少的特征。

③空间分布看,宁波舟山港区域南大风高频站

点多位于舟山片区,且主要分布在南侧虾峙门航道附近以及舟山本岛和北部岛屿区域,宁波片区的地理位置存在避风特性,有利于南大风过程中港口较好地开展作业。宁波片区的高概率站点主要位于大榭岛东侧以及梅山岛附近,南大风过程中需关注上述两个区域的风力订正预报。随着阵风量级增大,舟山港区域内南大风高概率站点逐渐减少,极端南大风容易出现在虾峙门航道以东的岛屿和海域。

④EC细网格南大风过程预报的最大风速总体偏小。模式对T型过程 12 h 预报的平均误差为 -3.5 m/s ,明显优于D型的 -7.5 m/s 和G型的 -7.4 m/s ;平均绝对误差也有相似特征,T型 12 h 的为 4.9 m/s , $24\sim60\text{ h}$ 的为 $5\sim7\text{ m/s}$,D型和G型 $12\sim60\text{ h}$ 的均在 $7\sim8\text{ m/s}$,可见模式对T型的预报偏差更小,稳定性更好,总体预报水平优于其他两种天气型,但对南大风的预报偏差及稳定性总体不及浙江沿海冷空气大风。另外,模式在宁波片区的预报效果略优于舟山片区,对于分区域以及不同分型,模式预报水平从 72 h 起明显下降。分析EC模式南大风过程最大风速的风向预报偏差发现,模式对东南风向的预报有顺时针偏差,偏南风向没有明显趋势,而西南风向则为较明显的逆时针偏差,整体而言模式对东南风向的预报效果最优,且宁波片区的预报效果略优于舟山片区,对D型和G型的预报稳定性优于T型。

参考文献:

- [1] 涂小萍,姚日升,廉亮,等. 宁波沿海灾害性大风特征[M]. 北京:气象出版社,2018.
TU X P, YAO R S, LIAN L, et al. Characteristics of catastrophic gale in the coast of Ningbo[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2018.
- [2] 卢美,朱业. 浙江沿海大风的天气气候特征[J]. 杭州师范大学学报(自然科学版), 2011, 10(5): 474-480.
LU M, ZHU Y. Weather and climate characteristics of the coastal gale in Zhejiang[J]. Journal of Hangzhou Normal University (Natural Science Edition), 2011, 10(5): 474-480.
- [3] 姚霞,王杰,史学凡. 1993—2020年北仑大风特征及天气分型的分析[J]. 农业灾害研究, 2021, 11(9): 40-43.
YAO X, WANG J, SHI X F. Analysis of gale characteristics and weather classification in Beilun from 1993 to 2020[J]. Journal of Agricultural Catastrophology, 2021, 11(9): 40-43.
- [4] 曹宗元,王坚侃,何晴,等. 浙江沿海大风气候特征及影响系统分

- 析[J]. 海洋预报, 2023, 40(2): 89-97.
- CAO Z Y, WANG J K, HE Q, et al. Analysis of the climatic characteristics and influence system of strong wind along the coast of Zhejiang[J]. Marine Forecasts, 2023, 40(2): 89-97.
- [5] 项素清. 浙北沿海南大风过程诊断分析[J]. 海洋预报, 2004, 21(1): 75-80.
- XIANG S Q. Diagnostic analysis of the south gale in the north coast of Zhejiang Province[J]. Marine Forecasts, 2004, 21(1): 75-80.
- [6] 董加斌, 胡波. 浙江沿海大风的天气气候概况[J]. 台湾海峡, 2007, 26(4): 476-483.
- DONG J B, HU B. Synoptic and climatic survey of the gale in the coast of Zhejiang Province[J]. Journal of Oceanography in Taiwan Strait, 2007, 26(4): 476-483.
- [7] 许爱华, 张瑛, 刘献耀. 江西“暖区”强对流天气的热力和动力条件诊断分析[J]. 气象, 2001, 27(5): 30-34.
- XU A H, ZHANG Y, LIU X Y. Diagnosis of thermal and dynamic conditions of warm area severe convection in Jiangxi Province[J]. Meteorological Monthly, 2001, 27(5): 30-34.
- [8] 于波, 荆浩, 孙继松, 等. 北京夏季一次罕见偏南大风天气的成因分析[J]. 高原气象, 2017, 36(6): 1674-1681.
- YU B, JING H, SUN J S, et al. The analysis on an infrequent southerly gust of Beijing in summer[J]. Plateau Meteorology, 2017, 36(6): 1674-1681.
- [9] 唐毓玲. 四川白鹤滩一次罕见秋冬10级偏南大风过程分析[J]. 成都信息工程大学学报, 2023, 38(1): 70-74.
- TANG Y L. Diagnosis and analysis of a rare 10-level southerly windy weather at Sichuan Baihetan Hydropower Station[J]. Journal of Chengdu University of Information Technology, 2023, 38(1): 70-74.
- [10] 申华羽, 方艳莹, 涂小萍, 等. ECMWF细网格10 m风预报在浙江沿海的评估与订正[J]. 气象, 2020, 46(11): 1485-1494.
- SHEN H Y, FANG Y Y, TU X P, et al. Verification of ECMWF 10 m wind forecast for coastal Zhejiang Province[J]. Meteorological Monthly, 2020, 46(11): 1485-1494.
- [11] 连喜虎, 刘桂艳, 高松, 等. EC细网格10 m风场产品在渤、黄海域的预报能力检验与评估[J]. 海洋预报, 2020, 37(6): 74-82.
- LIAN X H, LIU G Y, GAO S, et al. Evaluation of the ECMWF forecast skills for the 10 m wind field in the Bohai Sea and the Yellow Sea[J]. Marine Forecasts, 2020, 37(6): 74-82.
- [12] 曾瑾瑜, 刘爱鸣, 高珊, 等. 福建省沿海冬半年东北大风的数值预报释用方法研究[J]. 海洋预报, 2015, 32(5): 61-68.
- ZENG J Y, LIU A M, GAO S, et al. Study on interpretation of numerical prediction method on northeast winds along the coast of Fujian Province in winter half year[J]. Marine Forecasts, 2015, 32(5): 61-68.
- [13] 隋玉秀, 杨景泰, 常慧琳, 等. 大连地区ECMWF细网格风向与实况的对比检验[J]. 海洋预报, 2022, 39(1): 21-31.
- SUI Y X, YANG J T, CHANG H L, et al. Comparison and validation of ECMWF fine-grid wind direction and observation data in Dalian area[J]. Marine Forecasts, 2022, 39(1): 21-31.
- [14] 於敏佳, 刘茜, 李晓丽. 舟山风力智能网格精细化订正释用技术[J]. 海洋预报, 2021, 38(6): 48-55.
- YU M J, LIU H, LI X L. Refined intelligent grid correction and interpretation technology for the wind field in Zhoushan area[J]. Marine Forecasts, 2021, 38(6): 48-55.
- [15] 孙全德, 焦瑞莉, 夏江江, 等. 基于机器学习的数值天气预报风速订正研究[J]. 气象, 2019, 45(3): 426-436.
- SUN Q D, JIAO R L, XIA J J, et al. Adjusting wind speed prediction of numerical weather forecast model based on machine learning methods[J]. Meteorological Monthly, 2019, 45(3): 426-436.
- [16] 刘敏, 漆梁波. 嵊泗站大风的统计特征及其与平均风的关系[J]. 大气科学研究与应用, 2010(2): 83-92.
- LIU M, QI L B. Statistic characteristics of gale in Shengsi station and the relationship between gale and average wind force[J]. Atmospheric Science Research and Application, 2010(2): 83-92.
- [17] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 3版. 北京: 气象出版社, 2022.
- WEI F Y. Modern climate statistical diagnosis and prediction technology[M]. 3rd ed. Beijing: China Meteorological Press, 2022.
- [18] World Meteorological Organization. Guidelines for converting between various wind averaging periods in tropical cyclone conditions[R]. Geneva: WMO, 2010.
- [19] 杨忠恩, 陈淑琴, 黄辉. 舟山群岛冬半年灾害性大风的成因与预报[J]. 应用气象学报, 2007, 18(1): 80-85.
- YANG Z E, CHEN S Q, HUANG H. The causes of catastrophic gales in Zhoushan Islands with their forecasting[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2007, 18(1): 80-85.
- [20] 周福, 蒋璐璐, 涂小萍, 等. 浙江省几种灾害性大风近地面阵风系数特征[J]. 应用气象学报, 2017, 28(1): 119-128.
- ZHOU F, JIANG L L, TU X P, et al. Near-surface gust factor characteristics in several disastrous winds over Zhejiang Province[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2017, 28(1): 119-128.
- [21] 侯淑梅, 张少林, 盛春岩, 等. T639数值预报产品对黄渤海沿海大风预报效果检验[J]. 海洋预报, 2014, 31(6): 48-56.
- HOU S M, ZHANG S L, SHENG C Y, et al. Evaluation of T639 numerical forecast products during the strong gales in the Yellow Sea and Bohai Sea[J]. Marine Forecasts, 2014, 31(6): 48-56.

Characteristics analysis of temporal-spatial distribution and evaluation of EC forecasts for south gale in Ningbo-Zhoushan port

ZHUGE Fenglin¹, LYU Jingwen^{1*}, SHEN Huayu¹, WANG Hong¹, WANG Jianjie²

(1. Ningbo Meteorological Service Center, Ningbo 315000, China; 2. Yinzhou Meteorological observatory, Ningbo 315100, China)

Abstract: Hourly and minute data from meteorological observations, sealing data provided by the port dispatch center and maritime bureau are used to discuss temporal-spatial distribution of south gale in Ningbo-Zhoushan port during 2013–2022, with emphasize on south gale processes, the associated weather situations, gust factors, as well as evaluation of 10 m wind forecasts from the EC fine model. The results show that there are 71 south gale processes in the 10 years under three weather situations, including depression move onto the sea (26 times), ground high back (26 times), and tropical cyclone (19 times). Gust factor of south gale in Ningbo-Zhoushan Port is 1.61, slightly higher than 1.5 of cold air mass and lower than 1.8 of abruptly severe convection. During south gale processes, the proportion of south–southeast wind direction is higher than that of southwest. Temporal distribution analysis reveals that south gale is most likely to occur in July–August followed by April–May, with high frequency in the evening while low frequency in the morning. As the wind speed grade increases, the total hour for each grade decreases gradually. Spatial distribution analysis reflects that stations with high frequency report of south gale locate in Zhoushan, the stations in Ningbo area are less affected by south gale which is suitable for production operation. Evaluation of the EC model reveals that the predicted wind speeds are lower than the observation, with the best performance under tropical cyclone (E_M and E_{RMS} for 12 h forecasts is -3.5 m/s and 4.9 m/s respectively), and the errors are relatively higher and the stability is relatively lower for the other two weather types. The EC forecasting performance in Ningbo is slightly better than that in Zhoushan, and the forecasting accuracy significant decreases from 72 h onward. The EC forecasts have the best performance for southeast wind direction. In addition, the wind direction forecasting stability in types of depression move onto the sea and ground high back are better than that of tropical cyclone.

Key words: Ningbo-Zhoushan port; south gale; temporal-spatial distribution of observations; weather situations; EC forecasts; gust factors