

# 上海沿海站点极大风速预报方程的细化和完善

朱智慧<sup>1</sup>, 郑运霞<sup>2</sup>, 过霁冰<sup>3</sup>

(1.上海海洋中心气象台,上海 201306; 2.中国气象局上海台风研究所,上海 200030; 3.上海市奉贤区气象局,上海 201416)

**摘要:** 利用上海沿海14个站点2012—2019年的观测资料,分析了2 min平均风速和极大风速的关系,对沿海站点极大风速预报方程进行了细化和完善。结果表明:2 min平均风速与极大风速具有近似线性的关系;2 min平均风速和极大风速的关系不是均一分布,各站点极大风速回归方程的回归系数从沿岸到近海基本呈递减趋势;对4级以上的平均风,各站点极大风速回归方程的回归系数随风级增大基本保持不变;独立样本检验结果表明,建立的各站点极大风速回归方程能够较好地用来估计各站点的极大风速;台风影响上海沿海期间与全时间段的极大风速回归方程基本一致。

**关键词:** 沿海;精细化;极大风速;预报方程

**中图分类号:** P732.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2022)01-0032-07

## 1 引言

大风灾害严重威胁航运、港口、海上石油平台和邮轮等的作业安全<sup>[1-3]</sup>。作为中国沿海最大城市,上海有丰富的港口航道、滨海旅游和海洋能源等资源,海洋运输业、船舶制造业和滨海旅游业等处于全国领先地位。上海地处江海陆交界处,地形复杂,海上大风频发,也是我国受大风天气灾害影响较为显著的海域之一。随着海洋经济的发展,沿海大风预报精细化和准确性的需求也越来越大。

日常海洋气象业务中,海上大风预报主要依靠数值模式的风预报产品<sup>[4-5]</sup>。部分研究基于数值预报产品,利用概率密度匹配<sup>[6]</sup>、主成分分析<sup>[7]</sup>、神经网络<sup>[8-9]</sup>和K最近邻算法<sup>[10]</sup>等方法建立了沿海大风的预报方法。数值模式预报的风为平均风,而沿海作业更关心极大风速能达到多少<sup>[11]</sup>,数值模式缺少对应的预报产品,根据平均风来预报极大风主要依靠预报员的主观分析,缺少客观量化的预报技术。因此,建立上海沿海精细化极大风速预报方程,对于提高沿海大风预报能力,避免或减轻大风灾害的影

响具有重要意义。一些研究分析了10 min平均最大风速与极大风速的关系,发现两者存在近似线性的关系<sup>[12]</sup>。基于测风塔数据的研究也表明,在近地面层中,最大风速和极大风速普遍具有较好的线性关系<sup>[13]</sup>,但直接建立2 min平均风速和极大风速关系的研究依然较少。针对上海沿海极大风速预报技术已开展了初步研究<sup>[14]</sup>,但该研究只使用了3个浮标站1 a左右的数据,站点数量和观测数据都偏少,而且浮标站靠近外海,不能代表沿岸海域的情况。随着海洋气象预报业务精细化要求的不断提高,有必要对上海沿海站点的极大风速预报方程进一步细化。因此,本文利用上海沿海14个观测站点的观测资料,重新建立了从沿岸到近海各站点极大风速预报方程,为利用数值模式预报的平均风速进行上海沿海精细化极大风速预报奠定了基础。

## 2 资料与方法

### 2.1 资料

本文使用的资料为上海沿海14个站点的观测资

收稿日期: 2020-12-29; 修回日期: 2021-05-25。

基金项目: 上海台风研究基金项目(TFJJ202017);上海市气象局科技开发项目(TD202011)。

作者简介: 朱智慧(1984-),男,高级工程师,硕士,主要从事天气预报技术研究。E-mail: zhuzhihui83@qq.com

料,14个站点包括10个岸基站(省级气象观测站)和4个浮标/船标站。资料时间段为2012年1月1日—2019年12月31日,时间间隔为1 h。观测要素为2 min平均风速和极大风速。14个站点的分布见图1。

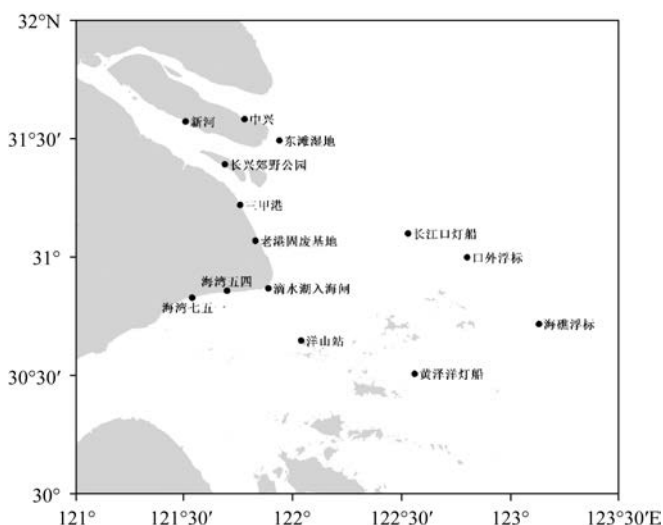


图1 站点分布图

Fig.1 Map of sites distribution

本研究将14个站点的原始观测数据分为两个时间段的数据集:2012年1月1日—2018年12月31日为建模时间段,这部分数据用来建立极大风速预报方程;2019年1月1日—12月31日为检验时间段,这部分数据作为独立样本来检验极大风速预报方程的应用效果。剔除缺测和错误数据,14个站点的总样本数、建模时间段样本数和检验时间段样本数见表1。

## 2.2 方法

本文分析2 min平均风速、回归极大风速和观测极大风速关系时,使用的检验统计量为相关系数和平均绝对误差。

本文使用的建模方法有两种:线性回归分析和人工神经网络。

(1)线性回归分析:设 $y$ 为极大风速, $x$ 为2 min平均风速, $x, y$ 的关系由一元线性回归方程确定,即:

$$y = a_0 + a_1x$$

式中, $a_0$ 和 $a_1$ 统称为回归方程的参数。 $a_0$ 是回归方

表1 14个站点的样本数

Tab. 1 Sample number of 14 stations

站点	总样本数	建模时间段 样本数	检验时间段 样本数
新河	34 576	27 356	7 220
海湾七五一	63 354	55 661	7 693
长兴郊野公园	58 060	51 570	6 490
海湾五四	60 282	53 416	6 866
三甲港	55 573	47 366	8 207
中兴	62 566	55 598	6 968
老港固废基地	25 755	19 100	6 655
滴水湖入海闸	65 001	56 837	8 164
东滩湿地	60 257	52 231	8 026
洋山站	38 072	29 441	8 631
长江口灯船	44 366	40 543	3 823
黄泽洋灯船	49 477	40 852	8 625
口外浮标	49 010	45 147	3 863
海礁浮标	57 544	49 708	7 836

程的常数项,也是回归直线在 $y$ 轴上的截距; $a_1$ 是回归系数,也是回归方程的斜率。

(2)人工神经网络:本文采用标准的反向传播(Back Propagation, BP)网络<sup>[15]</sup>,由3个神经元层次组成,即输入层、隐层和输出层。其训练函数为最速下降BP算法。选择人工神经网络结构时,采用了1个隐层、2个节点的建模方案,输入层为2 min平均风速,输出层为极大风速。

## 3 结果分析

利用14个站点建模时间段的观测数据,基于回归分析方法,得到了各站点的2 min平均风速和极大风速回归方程,这14个站点的2 min平均风速和极大风速回归方程如下:

$$y = 1.52x + 1.64 \text{ (新河)}$$

$$y = 1.44x + 1.46 \text{ (海湾七五一)}$$

$$y = 1.53x + 1.63 \text{ (长兴郊野公园)}$$

$$y = 1.33x + 1.86 \text{ (海湾五四)}$$

$$y = 1.30x + 2.11 \text{ (三甲港)}$$

$$y = 1.56x + 1.55 \text{ (中兴)}$$

$$y = 1.25x + 2.23 \text{ (老港固废基地)}$$

$$y = 1.28x + 1.51 \text{ (滴水湖入海闸)}$$

$$y = 1.25x + 1.32 \text{ (东滩湿地)}$$

$$y = 1.23x + 2.50 \text{ (洋山站)}$$

$$y = 1.03x + 0.46 \text{ (长江口灯船)}$$

$$y = 1.04x + 0.40 \text{ (黄泽洋灯船)}$$

$$y = 1.03x + 0.57 \text{ (口外浮标)}$$

$$y = 1.05x + 0.39 \text{ (海礁浮标)}$$

14个站点的回归极大风速、BP神经网络预报极大风速与观测极大风速的误差分析见表2。表中可见,两种建模方法得到的14个站点的极大风速 $y$ 与观测极大风速的平均绝对误差都较小,在1.34 m/s以下,而且对于每个站点,两种建模方法的平均绝对误差值十分接近,这说明回归分析方法和BP神经网络方法都能较好地应用于极大风速的业务预报。此外,从表中也可以看到,在受地形影响较小的海面,两种建模方法的误差更小。

BP神经网络作为一种有效的建模方法,在很多领域得到了应用。但这种方法也存在一些缺点和不足,主要表现为:学习过程收敛速度慢、效率低和

表2 建模时间段回归极大风速、BP神经网络预报极大风速与观测极大风速平均绝对误差(单位:m/s)

Tab. 2 Average absolute error between regression maximum wind speed, BP neural network predicted maximum wind speed and observed maximum wind speed in modeling time period (unit: m/s)

站点	回归分析	BP神经网络
新河	1.05	1.01
海湾七五一	1.12	1.11
长兴郊野公园	1.04	1.04
海湾五四	1.09	1.10
三甲港	1.22	1.27
中兴	1.07	1.12
老港固废基地	1.20	1.20
滴水湖入海闸	1.02	1.03
东滩湿地	0.94	0.86
洋山站	1.33	1.34
长江口灯船	0.42	0.48
黄泽洋灯船	0.39	0.37
口外浮标	0.57	0.50
海礁浮标	0.42	0.41

学习率不稳定等。相比之下,利用线性回归方法建立的极大风速预报模型简捷高效,作为日常业务应用技术更合适,因此,本文后面的研究使用的是线性回归分析模型。

各站点 $a_1$ 的空间分布见图2。图中可见,各站点 $a_1$ 从沿岸到近海基本呈递减趋势, $a_1$ 最大的站点在长江口和杭州湾内,最小的站点为沿海4个浮标站。这说明在上海沿岸水域,2 min平均风速和极大风速的关系不是均一的分布。这种不均一的分布可能与地形对阵风的增强作用有关,这与前人研究一致<sup>[16]</sup>。此外,对比前期利用3个浮标站得出的研究结果<sup>[14]</sup>可以发现,从沿岸到近海的不同站点建立独立的回归方程,才能满足沿岸精细化大风预报的需求。

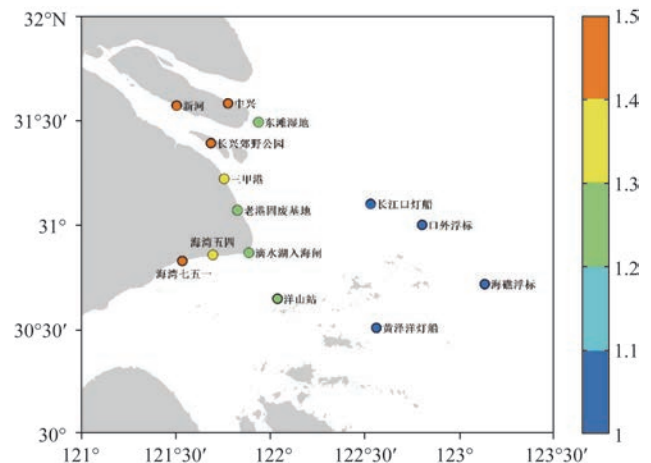
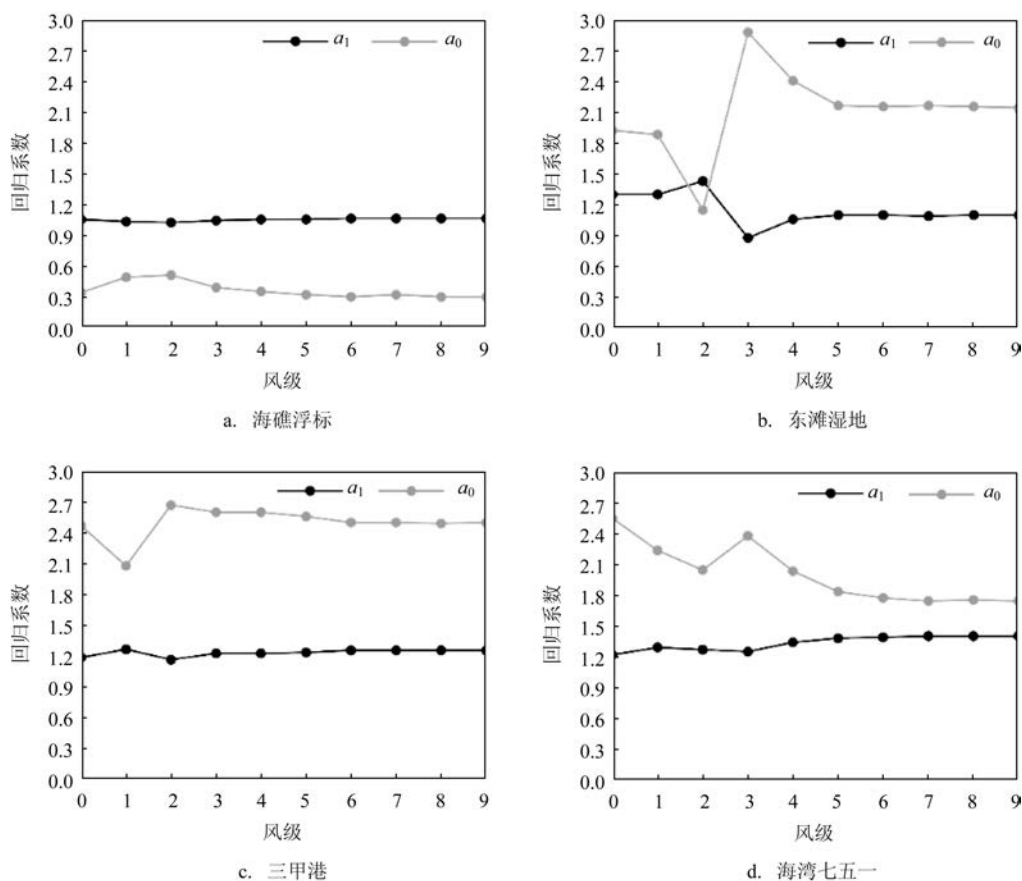


图2 回归系数 $a_1$ 的空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of regression coefficients  $a_1$

为了分析不同风级的2 min平均风速和极大风速的关系,本文按2 min平均风速将14个站点的风力分为0~9级,分别进行了回归分析(10级以上样本极少,因此本文未做统计分析)。以图2中 $a_1$ 大小不同的区域为依据,选取海礁浮标、东滩湿地、三甲港和海湾七五一4个站点为代表进行分析,不同风级 $a_1$ 和 $a_0$ 的大小见图3。图中可见,4个站点4级以上平均风力, $a_1$ 和 $a_0$ 大小基本保持不变,这说明,2 min平均风速和极大风速保持稳定的线性关系。对于离海岸较远的海礁浮标而言,平均风力4级以下的回归系数与4级以上相比数值变化很小,而沿岸站点东滩湿地、三甲港和海湾七五一的回归系数变化较大,尤其是长江口区的东滩湿地站点,两个

图3 不同风级回归系数 $a_1$ 和常数项 $a_0$ 的大小Fig.3 Regression coefficients  $a_1$  and constant terms  $a_0$  of different wind levels

回归系数都有较大变化,这可能与较小的风受地形影响较大有关。

以2019年观测数据作为独立样本,分析各站点回归方程的有效性。基于建立的各站点回归方程,首先计算回归极大风速 $y$ ,然后与观测极大风速 $y_{obs}$ 进行相关性分析和误差分析,结果见表4。表中可见,14个站点的 $y$ 和 $y_{obs}$ 相关性都在0.82以上,通过了显著水平 $\alpha = 0.01$ 的显著性检验,同时也可以看到,越靠近外海,两者的相关性越好。14个站点的 $y$ 和 $y_{obs}$ 的平均绝对误差较小,绝大部分在2 m/s以下,这也说明建立的极大风速回归方程能够较好地估计各站点的极大风速。

台风对沿海影响极大,在日常预报业务中,准确预报台风极大风速还缺乏十分有效的方法。为了分析台风2 min平均风速与极大风速是否存在独特的关系,本文选取了2012—2019年影响上海沿海

的15个台风个例,使用平均风力在7级以上时次的的数据进行了2 min平均风速和极大风速的回归分析。台风基本信息见表5。

如果站点的台风大风次数和样本数较少,则建立的回归方程的可信度不高,因此本文只选取了2012—2019年台风大风(平均风力在7级以上)样本数在80个以上的5个站点进行了回归分析,选取的站点和样本数信息见表6。这5个站点在台风影响期间的2 min平均风速和极大风速回归方程如下:

$$y = 1.15x + 1.49 \text{ (滴水湖入海闸)}$$

$$y = 1.14x + 1.37 \text{ (东滩湿地)}$$

$$y = 1.05x + 0.38 \text{ (长江口灯船)}$$

$$y = 0.98x + 1.52 \text{ (黄泽洋灯船)}$$

$$y = 1.06x + 0.22 \text{ (海礁浮标)}$$

对比5个站点在台风影响期间的回归方程和利



表 4 检验时间段回归极大风速与观测极大风速相关性和误差分析

Tab. 4 Correlation and error analysis between regression maximum wind speed and observed maximum wind speed in test time period

站点	相关系数	平均绝对误差/(m/s)
新河	0.83	1.59
海湾七五一	0.85	1.25
长兴郊野公园	0.82	2.09
海湾五四	0.84	1.18
三甲港	0.86	1.16
中兴	0.83	1.86
老港固废基地	0.88	1.24
滴水湖入海闸	0.90	1.06
东滩湿地	0.94	1.20
洋山站	0.91	1.35
长江口灯船	0.99	0.41
黄泽洋灯船	0.99	0.37
口外浮标	0.88	1.78
海礁浮标	0.94	0.43

表 5 2012—2019 年影响上海沿海的台风基本信息

Tab. 5 Basic information of typhoons affecting Shanghai coast from 2012 to 2019

年份	编号	名称	编号时间	停编时间
2012	201210	“达维”	201207282000	201208040800
	201211	“海葵”	201208030800	201208092000
	201214	“天秤”	201208181400	201208301000
	201215	“布拉万”	201208200800	201208291400
2013	201323	“菲特”	201309302000	201310070900
2014	201416	“凤凰”	201409180200	201409241000
2015	201509	“灿鸿”	201506302000	201507130200
	201810	“安比”	201807172000	201807242300
	201812	“云雀”	201807250200	201808032000
2018	201814	“摩羯”	201808071400	201808140500
	201818	“温比亚”	201808150800	201808232000
	201909	“利奇马”	201908041400	201908131100
	201913	“玲玲”	201909012100	201909081000
2019	201917	“塔巴”	201909182300	201909230800
	201918	“米娜”	201909280800	201910031400

表 6 进行台风极大风速回归分析的站点和样本数

Tab. 6 Number of stations and samples for regression analysis of typhoon maximum wind speed

站点	样本数
滴水湖入海闸	122
东滩湿地	161
长江口灯船	82
黄泽洋灯船	178
海礁浮标	276

用建模时间段所有数据建立的回归方程可以看到,两组方程的 $a_1$ 和 $a_0$ 变化不大,说明尽管台风影响期间风力较大,2 min 平均风速和极大风速的关系并没有特别的变化,利用建模时间段所有数据建立的回归方程同样适用于台风大风预报。台风影响期间 $y$ 与 $y_{obs}$ 的相关性和误差分析见图 4,图中可以看到,利用回归方程得到的两者的相关性都在 0.64 以上,通过了显著水平 $\alpha = 0.01$ 的显著性检验,说明建立的方程能较好地反映台风影响期间 2 min 平均风速和极大风速的关系。此外,靠近外海的浮标/灯船站的相关系数都在 0.92 以上,远高于沿岸站点,平均绝对误差也在 0.7 m/s 以下,说明台风极大风同样受到地形的显著影响,在地形影响越小的区域,台风大风的回归效果越好。

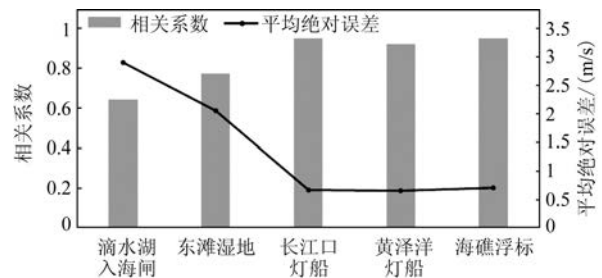


图 4 台风影响期间 5 个站点回归极大风速与观测极大风速相关性和误差分析

Fig.4 Correlation and error analysis between regression maximum wind speed and observed maximum wind speed at five stations during the period of typhoon influence

## 4 结论与讨论

本文利用上海沿海 14 个站点的观测资料,对沿海站点的极大风速预报方程进行了细化和完善。主要结论如下:

(1)在上海沿海水域,2 min 平均风速和极大风速的关系不是均一的分布,各站点的回归系数 $a_1$ 从陆地到近海基本呈递减的趋势。在受地形影响较小的海面,回归极大风速与观测极大风速的相关性更好,平均绝对误差更小,能够更好地反映2 min 平均风速和极大风速的关系。通过对沿海站点极大风速预报方程进行细化,可以满足日常海洋气象精细化业务预报的需求。

(2)上海沿海各站点在4级以上平均风下,2 min 平均风速和极大风速的关系基本保持不变,回归系数不会因风力变大发生较大变化。

(3)2019年独立样本的检验结果表明,建立的各站点极大风速回归方程能够较好地估计站点的极大风速。

(4)挑选台风影响期间的大风样本进行分析,可以发现,上海沿海建模时间段的2 min 平均风速和极大风速回归方程基本一致,不存在特殊的回归关系,建模时间段建立的极大风速预报方程可以作为通用方程在日常预报业务中应用。此外,台风极大风同样受到地形的显著影响,在地形影响越小的区域,台风极大风速的回归效果越好。

## 参考文献:

- [1] 于志明,王骊鹂,马冬亮.渤海海洋气象灾害天气分型与预报指标研究[J].气象与环境学报,2018,34(1): 106-111.  
Yu Z M, Wang S Y, Ma D L. Study on weather classification and forecasting index of marine meteorological disasters in the Bohai sea[J]. Journal of Meteorology and Environment, 2018, 34(1): 106-111.
- [2] 解以扬,刘大刚,吴丹朱,等.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,2014,29(1): 136-143.  
XIE Y Y, LIU D G, WU D Z, et al. Risk prediction technology of ship safety in the yellow sea and Bohai sea during severe weathers [J]. Journal of Catastrophology, 2014, 29(1): 136-143.
- [3] 于善娟,刘学萍,栾东红.烟台北部海域大风与海难事故分析及预防对策[J].中国水运,2011(6): 56.  
Yu S J, Liu X P, Luan D H. Analysis and preventive countermeasures of gale and shipwreck in the northern sea area of Yantai[J]. China Water Transport, 2011(6): 56.
- [4] 曾瑾瑜,韩美,吴幸毓,等.WRF、EC和T639模式在福建沿海冬半年大风预报中的检验与应用[J].海洋科学,2015,39(7): 75-85.  
Zeng J Y, Han M, Wu X Y, et al. Test and application of WRF, EC and T639 Models in strong wind forecasting in Fujian Coast in winter half year[J]. Marine Sciences, 2015, 39(7): 75-85.
- [5] 连喜虎,刘桂艳,高松,等. EC细网格10m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.
- [6] 钱磊,邱学兴,郑淋淋.基于概率密度匹配方法的WRF模式阵风风速误差订正[J].气象科技,2019,47(6): 916-926.  
Qian L, Qiu X X, Zheng L L. Error correction of WRF model gust speed based on probability density function matching method[J]. Meteorological Science and Technology, 2019, 47(6): 916-926.
- [7] 黄海平,陈伟斌,黄海洪.基于主成分分析的北部湾冬季大风预报方法研究[J].海洋预报,2013,30(6): 28-31.  
Huang H P, Chen W B, Huang H H. Study on the prediction methods of winter gale base on principal component analysis in Beibu Gulf[J]. Marine Forecasts, 2013, 30(6): 28-31.
- [8] 胡波,杜惠良.浙江省沿海海面日极大风预报[J].海洋预报,2006,9: 64-67.  
Hu B, Du H L. Daily maximum wind velocity forecast on the Zhejiang coastal sea surface[J]. Marine Forecasts, 2006, 23(S1): 64-67.
- [9] 陈德花,刘铭,苏卫东,等. BP神经网络在MM5预报福建沿海大风中的释用[J].暴雨灾害,2010,29(3): 263-267.  
Chen D H, Liu M, Su W D, et al. Interpretation and application of BP artificial neural network in MM5 model forecasting gale for coastal regions of Fujian province[J]. Torrential Rain and Disasters, 2010, 29(3): 263-267.
- [10] 涂小萍,赵声蓉,曾晓青,等. KNN方法在11-3月中国近海测站日最大风速预报中的应用[J].气象,2008,34(6): 67-73.  
Tu X P, Zhao S R, Guan X Q, et al. Application of an updated KNN method to daily maximum wind forecast for coastal weather station from November to March[J]. Meteorological Monthly, 2008, 34(6): 67-73.
- [11] 薛霖.我国沿海台风大风及其风工程参数特性研究[D].北京:中国气象科学研究院,2018.  
Xue L. Tropical cyclone-induced strong wind and its engineering parameter characteristics in the coastal areas of China[D]. Beijing: Chinese Academy of Meteorological Sciences, 2018.
- [12] 陈锦冠,林少冰.10分钟平均最大风速与极大风速评估方程的建立[J].气象,2001,27(10): 38-41.  
Chen J G, Lin S B. Relationship between maximum 10-minute average wind speed and maximum instantaneous wind speed and estimating equation[J]. Meteorological Monthly, 2001, 27(10): 38-41.
- [13] 汪宏宇,龚强,杨洪斌.基于测风塔数据的最大风速与极大风速关系研究[J].气象与环境科学,2019,42(3): 110-117.  
Wang H Y, Gong Q, Yang H B. Study on the relationship between maximum and extreme wind speed based on the wind towers data [J]. Meteorological and Environmental Sciences, 2019, 42(3): 110-117.
- [14] 朱智慧,黄宁立,秦婷.上海沿海极大风速预报方程的建立和应

- 用[J]. 海洋预报, 2014, 31(1): 58-62.
- Zhu Z H, Huang N L, Qin T. Establishment and application of extreme wind speed prediction equation in Shanghai coastal area [J]. Marine Forecasts, 2014, 31(1): 58-62.
- [15] 金龙. 神经网络气象预报建模理论方法与应用[M]. 北京: 气象出版社, 2004, 39-47.
- Jin L. Theory, method and application of neural network weather forecast modeling[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2004: 39-47.
- [16] 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.

## Refinement and improvement of the maximum wind speed prediction equation for Shanghai coastal stations

ZHU Zhihui<sup>1</sup>, ZHENG Yunxia<sup>2</sup>, Guo Jibing<sup>3</sup>

(1. Shanghai Marine Meteorological Center, Shanghai 201306 China; 2. Shanghai Typhoon Institute, China Meteorological Administration, Shanghai 200030 China; 3. Shanghai Fengxian District Meteorological Office, Shanghai 201416 China)

**Abstract:** Based on the observation data of 14 coastal stations in Shanghai from 2012 to 2019, the relationship between 2-minute average wind speed and the maximum wind speed is analyzed, and the maximum wind speed prediction equation of coastal stations is refined and improved. The results show that there is an approximate linear relationship between the 2-minute average wind speed and the maximum wind speed. However, the relationship between the 2-minute average wind speed and the maximum wind speed reveals inhomogeneous distribution, and the regression coefficient of the regression equation of the maximum wind speed at each station basically decreases from the coastal to the offshore area. For the average wind over category 4, the regression coefficient of the regression equation of the maximum wind speed at each station is basically unchanged with the increase of wind category. Moreover, the results of independent sample validation show that the established regression equation of the maximum wind speed can be used to estimate the maximum wind speed of each station. The regression equation of the maximum wind speed during the period of typhoons affecting Shanghai coast is basically consistent with that of modeling period.

**Key words:** coast; refined; maximum wind speed; prediction equation