

椒江沿海大风特征分析及精细化预报方法研究

邱王泽禾¹, 章蓝文²

(1. 台州市椒江区气象局, 浙江 台州 318000; 2. 台州市黄岩区气象局, 浙江 台州 318020)

摘 要: 利用大陈气象站、椒江口和一江山自动站的观测资料及美国国家环境预报中心分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$ 的逐6 h再分析数据和欧洲中期天气预报中心的EC细网格(分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$)模式资料, 分析了椒江沿海大风月际、年际变化特征及影响因子, 构建预报模态, 提炼沿海大风预报思路, 并对EC细网格模式大风预报进行检验。结果表明: 冬季冷空气大风为椒江沿海大风的主要类型; 气压梯度和高空环流形势是冷空气大风的两大影响因素; 当椒江沿海存在负变压中心, 极有可能在未来24~36 h出现变压大风; 气旋北大风可划分为北槽南涡型和低涡切变型, 气旋南大风可划分为东亚大槽型和沿海高压型; 针对冷空气偏北大风和气旋偏北大风, EC细网格模式具有一定的可参考性, 与实况极大风速相比, 绝大多数情况下的预报风速偏小。

关键词: 沿海大风; 环流形势; 变压; 气旋环流; EC风场检验

中图分类号: P457.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2024)03-0098-12

0 引言

海上作业对海上大风、低能见度、强对流等灾害性天气尤为敏感, 尤其是海上大风, 四季频发, 严重影响海上航行与作业安全^[1]。大风是浙江中部沿海最常见的气象灾害之一, 统计结果表明由海上大风造成的海事灾难数量仅次于碰撞事故^[2], 因此, 提高沿海大风的预报能力对减少经济损失和人员伤亡有着非常重要的意义。李云法等^[3]对浙江中部沿海大风特征进行了统计分析, 结果表明该地区沿海大风具有典型的季风性气候特征, 冬季以偏北风为主, 春夏季偏南大风增多, 盛夏以偏南大风为主; 8~9级大风占大风总次数的92%; 连续大风的持续时间在3天内居多, 约占87%。

引起椒江沿海大风的因素多且复杂, 几乎各种天气系统均可出现, 预报难度较大。本文将利用美国国家环境预报中心(National Centers for Environmental Prediction, NCEP)分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$ 的

逐6 h再分析资料分别对不同天气形势下的大风过程进行分析, 提炼高影响因子, 构建预报模态, 为本地沿海大风预报提供思路。近几年数值模式逐渐成为研究和预报天气的主要方法之一。但是由于风要素本身具有非连续和非正态的分布特点^[4], 又具有较强的地域性, 因此, 在实际工作中需要对数值模式进行本地化检验和订正。孙逸涵等^[5]综合分析检验了全球天气预报系统(Global Forecasting System, GFS)、欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium - Range Weather Forecasts, ECMWF)的EC细网格模式和T639全球模式(台风)1~15 d集合预报系统资料在中国境内近地层的风速预报效果; 曾瑾瑜等^[6]对天气预报模式(Weather Research and Forecasting, WRF)、EC和T639这3种模式预报的福建沿海风场进行了对比检验。综合来看, EC模式评价总体较好。因此, 本文针对EC细网格模式大风预报进行本地化检验。

收稿日期: 2023-02-23。

基金项目: 台州市椒江区科技计划项目(202022)。

作者简介: 邱王泽禾(1991-), 男, 工程师, 本科, 主要从事海洋气象预报研究。E-mail: qwzh_bob@163.com

1 大风的年际变化和月际分布

有研究表明,2 min平均风速与极大风速具有近似线性的关系^[7]。在本文中,若无特殊说明,大风均指极大风力 ≥ 8 级(极大风速 ≥ 17.1 m/s)的风。选取2001—2019年大陈站、椒江口站和一江山站自建站以来风力 ≥ 8 级的大风天气过程作为研究样本,其中大陈站2001年1月因仪器故障,极大风速缺测,该月极大风速值用历年平均值代替。椒江口站自2003年12月建站,作为椒江沿海站点,全年大风日数较海岛站点少;一江山为海岛站,2015年8月建站,历史数据较少。统计2001—2019年大陈站的年大风日数可知(见图1),椒江沿海历年大风日数平均为94.6 d。大风年际变化较大,2005年大风日数最多,达114 d;2018年大风日数最少,为80 d。对大风日数进行线性回归和显著性检验后发现,椒江沿海年大风日数随时间呈不显著的减少。图2是大陈

站历年1—12月8级及以上大风日数的箱线图。从图中可以看出,由于冷空气活动频繁,10月—次年3月大风天气多,月平均在9 d及以上,其中12月和1月的大风最多,均在12 d以上,这两个时段的大风日数占全年大风日数的25.1%;4—6月大风天气相对较少,月大风日数为4~6 d,其中5月大风最少,仅有3.5 d;7—9月由于夏季热带气旋、强对流天气频繁,大风天气也随之增多,月大风日数达6~8 d。

2 冷空气大风和气旋大风

2.1 冷空气大风

2.1.1 环流形势

表1为3次不同冷空气过程中的地面冷高压强度和位置比较,表中时间均为北京时(下同)。由表可见,3次冷空气过程中地面冷高压中心位置相近,

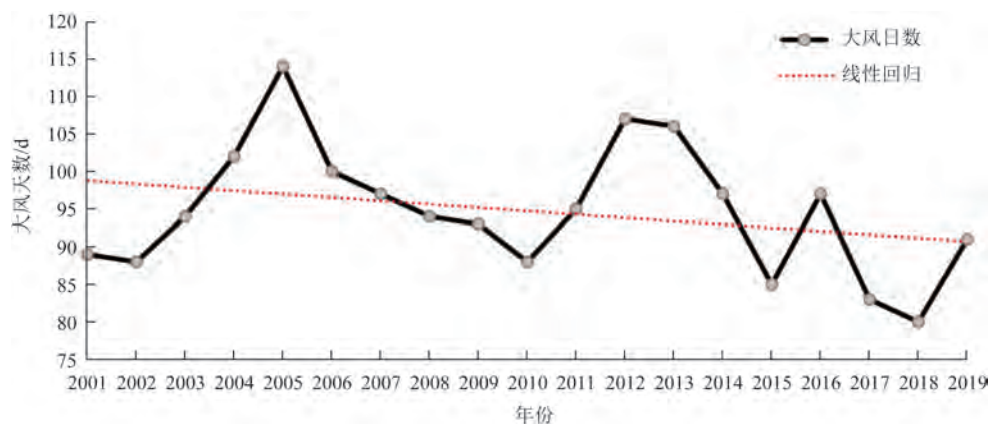


图1 2001—2019年大陈站大风天数时间序列及其线性回归

Fig.1 Time series and linear regression of gales at Dachen Station from 2001 to 2019

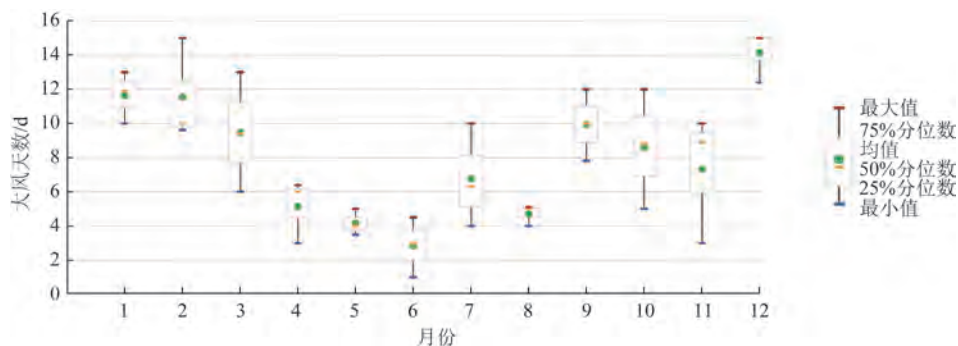


图2 1—12月8级及以上大风天数

Fig.2 Days of gale force 8 or above from January to December

表1 3次冷空气过程地面气压及高压位置

Tab.1 Surface pressure and high pressure positions during three cold air processes

日期	高压中心强度/hPa	位置(经纬度)	大陈站气压/hPa	中心-大陈气压差/hPa
2016年12月13日08时	1 035	96°E, 51°N	1 007.5	27.5
2018年1月27日08时	1 060	95°E, 50°N	1 015.9	44.1
2018年12月5日08时	1 055	90°E, 52°N	1 013.8	41.2

但是强度有所差异。根据台州本地对冷空气强度的判别标准,第一次过程中地面冷高压中心与大陈站的气压差为27.5 hPa,属于中等强度冷空气;第二次过程和第三次过程中两者的气压差分别为44.1 hPa和41.2 hPa,都已经达到寒潮级别,且第二次过程的强度更强。但是3次冷空气过程的实况极大风力却分别为9级(21.7 m/s)、8级(20.0 m/s)和9级(23.4 m/s)。因此预报冷空气大风不能仅看冷高压或冷锋的强度,高空形势分析同样重要。

对2001—2019年椒江冬季沿海大风的天气环流形式进行分析分类。冬季引起椒江沿海出现偏北强风的大尺度环流形式,按照不同流场的槽脊系统分布和南支锋区状况,大致可以划分为三类两型:第一类是乌拉尔山附近—我国沿海范围为两槽一脊;第二类是乌拉尔山附近—我国沿海范围为一槽一脊,该类又可分为西阻型和西北气流型;第三类是北支环流平直,但南支有锋区存在,诱导地面气旋发生发展。上述3次冷空气大风过程属于前两类。图3是这3次冷空气过程前24~48 h 500 hPa和850 hPa的环流特征。对比2016年12月14—15日冷空气过程和2018年12月6—9日冷空气过程,结果表明:2018年12月5日08时500 hPa为一槽一脊的西北气流型(见图3c),主脊位于55°E(乌拉尔山附近),中高纬度东亚环流较平直。根据长波理论,半波长不能超过60个经距,所以当主脊位于乌拉尔山附近时,脊前必定有一低槽发展,是一种不稳定形势。由于这个低槽发展,促使东亚沿岸的低槽东移北缩,冷空气影响也随之减弱,南下影响也不会太强烈。2016年12月13日08时500 hPa为两槽一脊型(见图3a),主脊位于95°E(蒙古附近),东亚经向环流较强,是一种相对稳定的形势,有利于促使东亚沿岸的低槽维持和发展。冷空气南下的征兆在850 hPa上更加明显,在冷锋到达之前,前锋的冷空气沿着850 hPa高压前部偏北气流向南移动,锋面

也向南压。因此,虽然该次冷高压强度最弱,但槽后西北气流推动冷空气向东南移,槽后冷平流有利于低层气压升高,因此出现大风。对比2018年12月6—9日冷空气过程和2018年1月28—29日冷空气过程,结果表明:2018年1月27日08时500 hPa为一槽一脊的西阻型(见图3b),此时寒潮冷空气在北方已经很明显,850 hPa可以看到明显的冷高压中心。预报这类寒潮的关键点是长波槽的移动以及长波脊的破坏和东移。从500 hPa温压场结构方面分析,温度场落后于高度场,脊的后部有强的暖平流使得高压脊发展。脊前偏北气流加大,槽后冷平流加强,有利于横槽稳定并发展,此时南支西风波动表现为孟加拉湾为低槽,我国东南沿海为弱的高压脊,黄河以南为西南气流控制,这种形式就更不利于冷空气的南下。此次过程,虽然冷高压中心强度最强,但是由于横槽稳定,堆积在槽内的寒冷空气并未向南爆发。

2.1.2 气压梯度

中高纬度大尺度运动符合准地转近似理论。预报冷空气大风的风向和风力大小,首先应该分析冷高压或冷锋的强度变化和移动路径。当冷高压或冷锋逼近时,风力往往增大,冷平流最强处的风力最大,冷高压加强或气压梯度增大时,风力亦加大。在基层预报业务工作中,两地的气压差往往被作为判别风力大小的一个指标,但是若仅依此来判断风力级数的大小又远远不够,究其原因,主要与气压梯度方向有关,影响气压梯度方向的一个直接原因便是冷空气路径。根据《浙江省天气预报手册》^[8]的介绍,以西安和北京为分界线,可将冷空气影响浙江的路径分为3种:西路、中路、东路。根据统计分析,影响浙江省的冷空气路径以中路为主,约占74%;西路和东路较少,分别约占14%和12%。

选取2001—2019年冬半年椒江沿海海面出现的8级以上大风天气过程进行分析,大风过程主要

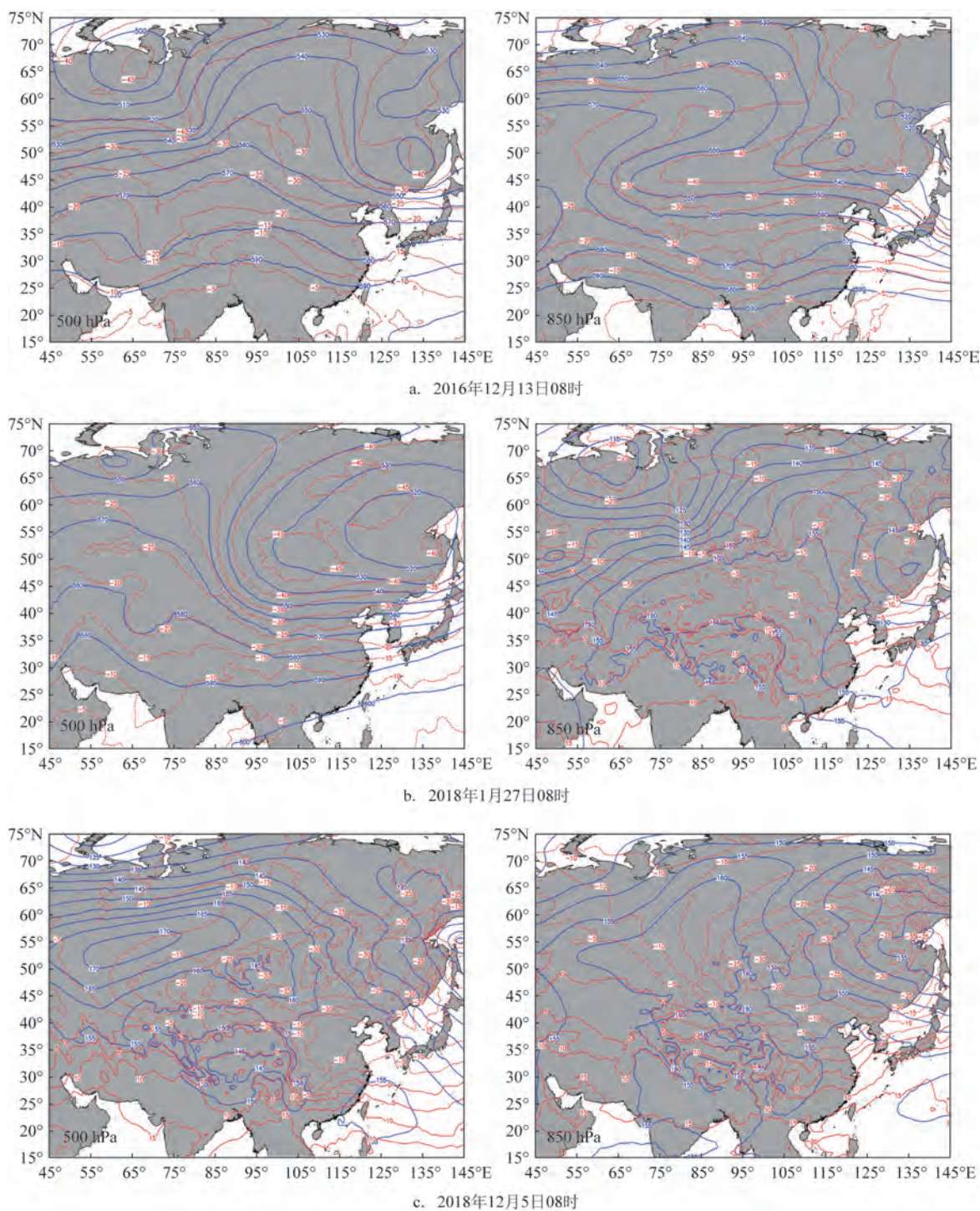


图3 500 hPa和850 hPa形势图

Fig.3 Geopotential height of 500 hPa and 850 hPa

发生在12月一次年2月(占60%左右),11月、3月、4月相对较少(共占40%左右)。将对应时次的海平面气压再分析数据插值到山东荣成站和大陈站,再将两个气压差的绝对值($|\Delta P|$)与大陈站的风力实

况进行对比分析,结果表明,椒江沿海风力的大小与 $|\Delta P|$ 有较为密切的关系(见表2), $|\Delta P|$ 越大,8级风以上所占的比重越大。但是也会发现,随着 $|\Delta P|$ 增大,7级及以下的风仍占大多数,风力与 $|\Delta P|$ 之间

表2 不同 $|\Delta P|$ 情况下大陈站风力等级的百分比(单位:%)

风力 (级数)	$\Delta P/\text{hPa}$				
	<3.0	[3.0, 5.0)	[5.0, 7.0)	[7.0, 9.0]	>9.0
<6	50.9	49.3	49.5	41.2	36.4
6	22.3	25.0	14.0	23.5	21.2
7	21.6	14.0	22.4	16.3	13.6
8	5.2	11.0	13.1	15.7	22.7
9	0	0.7	1.0	1.8	3.6
≥ 10	0	0	0	1.5	2.5

尚有一些不完全对应之处。由于本次选取的荣成站位于大陈站的偏北方向,当气压梯度方向由北指向南(或由东北指向西南)时,风力大小与 $|\Delta P|$ 的适应性较好;当气压梯度方向由西北指向东南时,沿海风力偏小。这是由边界层的摩擦作用引起的,粗糙下垫面的摩擦作用使风力减小,并使风向偏离等压线指向低压一侧。陆地上因摩擦作用较大,风向与等压线交角可达 $30^\circ \sim 45^\circ$,因此动能损耗大;海上因摩擦作用较小,实际风接近地转风,交角也只有 15° 左右,因此动能损耗小。

分析2004年4月3日20时东路冷空气影响过程(图略),此时荣成站和大陈站的气压差为6.41 hPa,梯度方向由北指向南,梯度层内盛行偏北—东北风,风从海上来,摩擦作用小,动能损耗小,该过程中大陈站的极大风力为10级(风速为25.5 m/s)。分析2010年3月9日08时中路冷空气影响过程(图略),此时荣成站和大陈站的气压差为8.18 hPa,梯度方向由西北指向东南,梯度层内盛行西北风,风从陆地来,摩擦作用大,动能损耗大,该过程中大陈站的极大风力为9级(风速为22.6 m/s)。虽然单从气压差来看,前一次冷空气过程小于后一次冷空气过程,但是沿海实况风力却是前者大于后者。

2.2 气旋大风

2.2.1 气旋大风统计分析

根据前一天气旋中心位置不同可将气旋大风分为3类^[9]:气旋环流中心在 32°N 以南为东海气旋大风;气旋环流中心在 32°N 以北为黄渤海气旋大风;气旋环流中心在江淮流域为江淮气旋大风。一个大风过程可以先先是东海气旋大风,后来转变成黄

渤海气旋大风,也可以是江淮气旋入海后变成黄渤海大风或东海大风。气旋主要在两种情况下产生大风,一种是气旋本身发展引起的大风,另一种是与高压系统相结合产生大风。因此,气旋有3种大风类型,即南大风型、北大风型、南转北大风型。气旋大风的预报难度较大,主要表现在两方面,一是气旋发展的位置和强度的预报较难,二是气旋大风的风力和风向预报较难。对2001—2019年4—6月椒江沿海的133次气旋大风进行统计,从结果可以看出(见表3),虽然气旋后部的偏北大风在气旋大风总数中的占比超过了半数,但是气旋前部的偏南大风也占相当一部分比例(34.6%)。下文将对气旋的移动发展条件做探讨,以此来探寻偏南大风和偏北大风的判别依据。

表3 2001—2019年椒江沿海气旋大风分布特点统计

Tab.3 Statistical analysis of cyclone-induced gale distribution in the Jiajiang coastal area from 2001 to 2019

类型	次数	百分率/%
仅有气旋前部的偏南大风	46	34.6
仅有气旋后部的偏北大风	74	55.6
气旋前后均有大风	13	9.8

2.2.2 气旋大风预报思路及模式

有研究表明^[10],850 hPa是否存在暖式切变线是气旋在初期阶段能否发展的一个重要条件。暖式切变线为气旋发展输送正涡度以及暖平流,而且在850 hPa暖式切变线附近,地面常常有大片雨区相伴,降水所释放的潜热有利于气旋的发展。卢敬华等^[11]认为,气旋的移动在很大程度上取决于中高层的引导气流,700 hPa高度附近大气的斜压性强度分布不均匀,使得气旋向700 hPa辐合中心及正涡度中心方向移动(图略)。500 hPa的高空槽为气旋发展提供了冷平流条件,也加强了斜压不稳定性。但是高空槽在东移过程中,由于受地形影响,特别是青藏高原的影响,高度槽往往会减弱,所以一般以500 hPa负24 h变温($-\Delta T_{24}$)中心来跟踪气旋的发展动态。

对133次气旋大风过程前24~36 h 500 hPa上 $-\Delta T_{24}$ 进行普查分析,在74次仅出现气旋后部偏北大风的过程中,有67次过程在500 hPa上存在明显的 $-\Delta T_{24}$ 中心东移,占比率高达90.5%,而在46次仅

出现气旋前部偏南大风的过程中,仅有6次过程的500 hPa上有较明显的 $-\Delta T_{24}$ 中心东移,占比率为13%。通过分析,可以对气旋大风的起始条件做一个假设:25°~40°N,95°~120°E范围内存在锋区,高空槽后有冷空气东移南下,可作为预报椒江沿海出现气旋后部偏北大风的一个起始条件;海上高压稳定少动,沿海低槽加深,大陆高压东移叠加导致低涡东移缓慢可作为预报气旋前部偏南大风的一个起始条件。

根据上述分析结果,对2001—2019年4—6月椒江沿海由气旋产生的大风过程划分天气类型,其中气旋北大风可划分为北槽南涡型和低涡切变型,气旋南大风可划分为东亚大槽型和沿海高压型。根据相同的天气类型找寻相似的预报条件,建立24~48 h椒江沿海气旋大风的预报模式。

①北槽南涡型气旋偏北大风预报模式

1) 35°~50°N, 105°~115°E内必须有高空槽,槽南北跨距≥10个纬距;30°~35°N, 100°~110°E内必须有低压环流存在。

2) 槽与槽之间无明显高压脊。

3) 25°~35°N, 105°~115°E内地面上有大片雨区;35°N以南有锋面存在。

②低涡切变型气旋偏北大风预报模式

1) 25°~35°N, 110°~120°E内在700 hPa或者850 hPa上有低涡切变存在(以暖式切变占绝大多数)。

2) 35°~46°N, 115°~125°E内在500 hPa上必须有高压脊。

3) 25°~35°N, 105°~115°E内地面上有大片雨区;35°N以南有锋面存在。

③东亚大槽型气旋偏南大风预报模式

1) 120°~130°E内必须有高空槽,槽南北跨距≥10个纬距。

2) 90°~120°E, 40°~50°N内有暖温脊存在。

3) 100°~110°E, 20°~30°N内存在南支锋区(或低涡)。

4) 120°~125°E, 30°~40°N内存在入海高压,中心强度不小于1 015 hPa。

④沿海高压型气旋偏南大风预报模式

1) 从日本—我国东北地区有高压脊延伸向华东沿海一带。

2) 河套—蒙古一带存在高温脊区。

3) 25°~35°N, 95°~110°E内在700 hPa或者850 hPa上有低涡存在。

2.2.3 个例验证

图4a—b分别是气旋偏北大风的北槽南涡型和低涡切变型。地面图上贝加尔湖附近有冷高压正在东移靠近,其中500 hPa上河套东侧有一较深的高空槽(见图4a),槽前、槽后分别有一支西南急流和西北急流。地面气旋位于高空槽前的西南急流下,西南急流有增湿减压作用,而且由于西南急流里有较强的上升气流,所以高空槽前的动力和热力条件均非常有利于地面气旋的发展。同时,高空槽后西北急流引导冷空气紧跟南下,冷锋前部的冷空气已经开始侵入气旋环流,气旋得到补充后进一步加强并加速移动,椒江沿海迅速从气旋的第一或第四象限转变为第二或第三象限,从而导致偏北大风的出现。往往气旋发展得越深,冷空气南下就越快,产生的大风也就越猛烈,甚至可以达到台风影响时的程度。

图4c—d分别是气旋偏南大风的东亚大槽型和沿海高压型。地面图上贝加尔湖南部—蒙古一带有低压在发展东移,与正在东移北抬的气旋环流逐渐靠近,形成一个互旋的状态,从而导致气旋移动变缓,椒江沿海长时间处于气旋环流的第一或第四象限,因此容易出现偏南大风。由于陆地上的摩擦作用较强,气旋在移动过程中动能损耗大,而又没有冷空气进行补充加强,使得气旋逐渐减弱。因此,即使椒江沿海处于气旋环流的第二或第三象限,也未必会出现偏北大风。

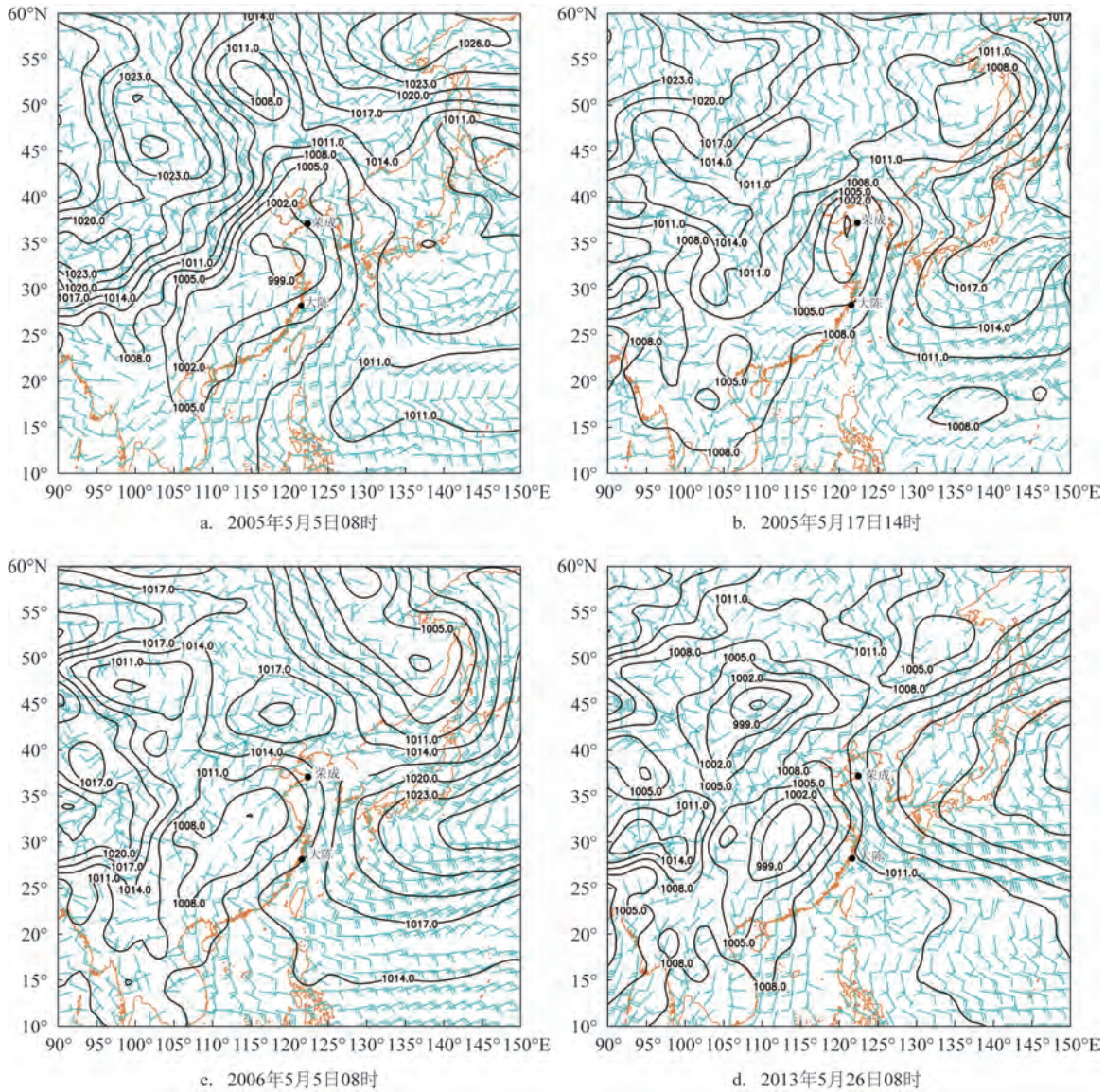
3 变压梯度的作用

地转风是地转偏向力和气压梯度力平衡时的空气水平运动。在实际大气中,气压梯度力与地转偏向力不平衡,必然会产生加速度,引起地转偏差,即:

$$\vec{D} = \vec{V} - \vec{V}_g = \frac{1}{f} \vec{k} \times \frac{d\vec{V}}{dt} \quad (1)$$

式中: \vec{D} 为地转偏差; \vec{V} 为实际风; \vec{V}_g 为地转风; f 为地转参数; \vec{k} 为球坐标系中任意一点指向天顶的单位向量。

取 u 、 v 、 w 分别表示 \vec{V} 在球坐标系 \vec{i} 、 \vec{j} 、 \vec{k} 3个方向



注:黑实线为地面气压,单位:hPa;蓝色风杆为10 m 风场

图4 地面气压场和10 m 风场

Fig.4 Surface pressure and 10 m wind fields

的分量,则式(1)可以改写为:

$$\vec{D} = \frac{1}{f} \vec{k} \times \left(\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + u \frac{\partial \vec{V}}{\partial x} + v \frac{\partial \vec{V}}{\partial y} + w \frac{\partial \vec{V}}{\partial z} \right) = \frac{1}{f} \vec{k} \times \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \frac{1}{f} \vec{k} \times \left(u \frac{\partial \vec{V}}{\partial x} + v \frac{\partial \vec{V}}{\partial y} \right) + \frac{1}{f} \vec{k} \times w \frac{\partial \vec{V}}{\partial z} \quad (2)$$

式中第一部分表示为变压风,即:

$$\vec{D}_1 = \frac{1}{f} \vec{k} \times \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} \quad (3)$$

将式(3)代入地转风方程可得:

$$\vec{D}_1 = -\frac{1}{f^2 \rho} \nabla \frac{\partial p}{\partial t} \quad (4)$$

式中: ρ 为空气密度; p 为气压。由式(4)可知,等变压风与等变压梯度有关。取自然坐标系,令X轴为沿等变压全风速度的方向,则:

$$\vec{u}_1 = -\frac{1}{f^2 \rho} \frac{\partial^2 p}{\partial s \partial t} \quad (5)$$

因此可知,等变压风的大小由式(5)决定,其方向则沿变压梯度的方向,由高值变压区吹向低值变压区,并且与 f^2 成反比,故等变压风和纬度的关系

比地转风和纬度的关系更加密切,特别是在低纬度地区,前者的关系更大,如果不考虑摩擦等其他因素的影响,这种变压风是相当大的。参考中纬度天气尺度系统的观测值^[3],各场变量的特征尺度为: $V \sim 10 \text{ m/s}$, $L \sim 10^6 \text{ m}$, $H \sim 10^4 \text{ m}$, $\Delta p/\rho \sim 10^3 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 。因此对式(5)进行尺度分析可得 $U_1 \sim 10^2 \text{ m/s}$,正是该原因,导致变压梯度产生的变压风比常规的梯度风大得多。

变压梯度对椒江沿海大风的作用非常明显,特别是在冷空气活动弱的5月,其作用更为突出。变压大风预报有两大困难,一是由于变压大风出现前,不管是地面形势还是高空环流所反映的大风征兆均不明显,预报难度大;二是风力级数预报难度大。表4选取了几次出现变压风的实况过程,从表

表4 5月实况大风前24 h极大风力变化情况(单位:m/s)

Tab.4 Maximums wind changes in 24 hours before the actual gale in May (unit:m/s)

时间	前24 h	前18 h	前12 h	前6 h	大风时
2005年5月1日	9.5	11.6	4.1	5.2	21.6
2012年5月30日	5.3	8.1	7.0	6.2	23.6
2015年5月18日	1.3	6.0	11.8	14.0	22.6
2016年5月16日	2.4	—	3.3	3.8	20.2
2017年5月24日	8.5	6.2	8.2	5.9	21.9

中可以看出,在实况大风出现前的几个小时风力均非常小,而当变压风出现时,风力迅速增大,由于预报预警难度较大,所以极易造成重大的海事事故。图5是4次变压大风过程前30 h的地面24 h变

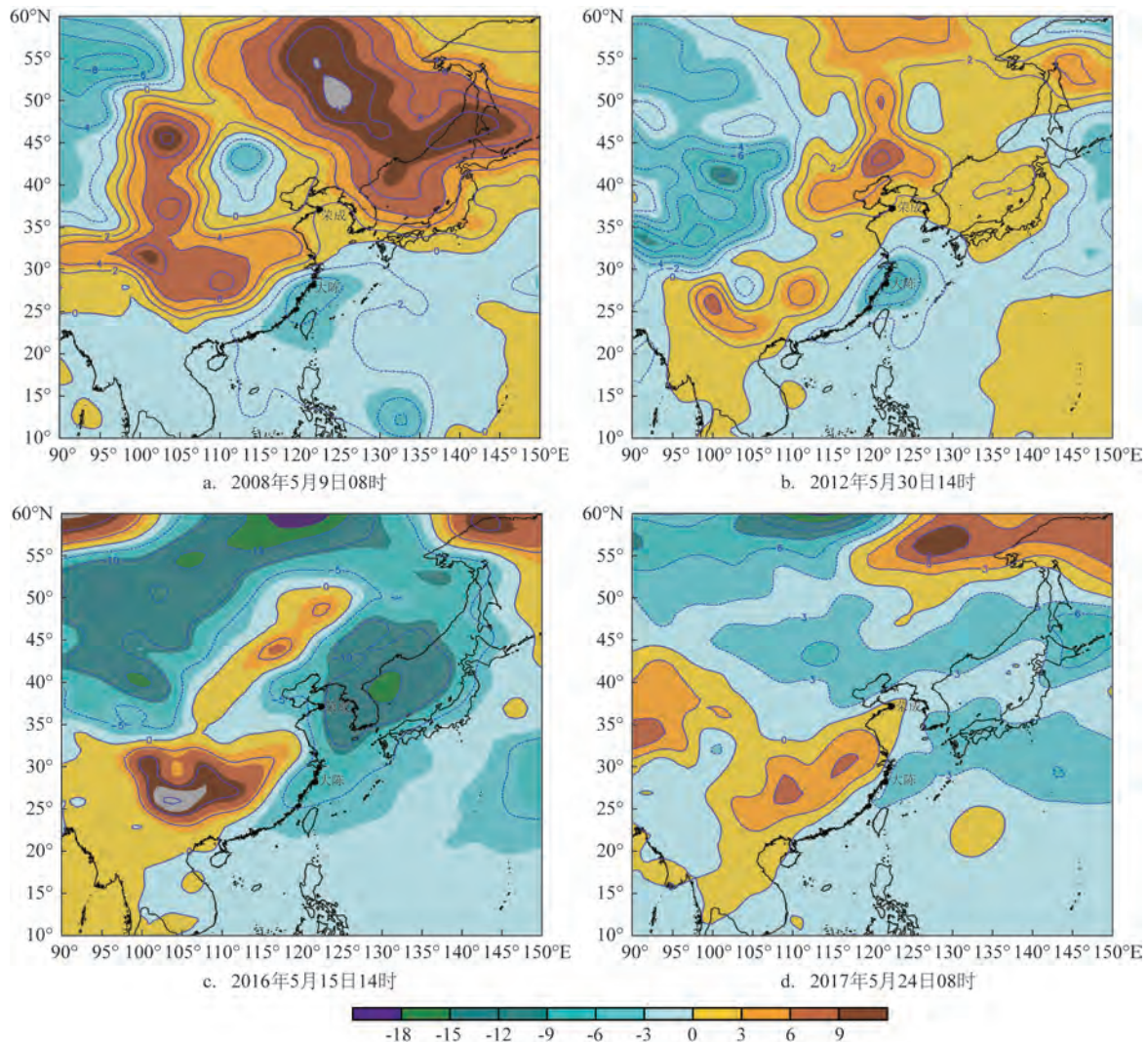


图5 地面24 h变压图(单位:hPa)

Fig.5 24 hours surface pressure changes (unit:hPa)

压(ΔP_{24})图,从图中可以看出4次过程都存在 $+\Delta P_{24}$ 中心,椒江沿海都出现 $-\Delta P_{24}$ 中心;在6 h变压图上(图略),椒江沿海负变压维持,正变压中心逐渐向椒江沿海靠近,两者之间的变压梯度增大;变压大风出现后(图略),椒江沿海被正变压区控制。因此,可以把变压图作为预报未来是否能出现变压风的参考,当椒江沿海存在 $-\Delta P_{24}$ 中心,并且与某地存在较大的变压梯度时,很大可能会在未来24~36 h出现变压大风,随着正负变压中心距离的靠近,变压梯度进一步增大,当出现实况大风后,沿海被正变压区控制。该结论需在今后的预报业务工作中不断实践加以验证。

4 EC细网格模式风力预报检验

目前在实际业务使用中,预报员多参考EC数值模式,因此本文选取EC细网格模式为主要分析对象,对其模式风力预报的误差进行分析。EC细网格模式数据为逐3 h输出,我们采用双线性内插法将模式的格点数据差值到大陈、一江山和椒江口3个站点上。又因模式输出的10 m风场是平均风,所以我们在24 h、48 h、72 h时效内分别取最大风速值代表该时效内的极大风速值,风向为最大风速值对应的风向。

由于变压大风存在突发性,目前数值模式对其的预报能力存在不足,故本文暂不进行检验。通过整理统计2016—2019年椒江沿海大风过程,将其分为冬半年冷空气偏北大风、气旋偏北大风和气旋偏南大风3类分别进行分析检验,其中大陈站和一江山站为海岛站,椒江口站为沿海站,将预报风速和实际风速之差的绝对值即绝对误差作为主要研究对象。

4.1 冷空气大风预报误差

沿海站冷空气大风风速预报的平均绝对误差小于海岛站(见图6a),并且平均误差随着时效的增大而增大,72 h的预报误差最大。大陈站和一江山站24 h风速预报的平均绝对误差分为4.6 m/s和4.5 m/s,椒江口站为3.9 m/s。统计结果表明,与实况极大风速相比,EC细网格模式的预报风速绝大部分偏小。该情况在海岛站中表现更为明显,24 h、48 h、72 h时效预报风速偏小的情况分别占93.0%、90.4%和87.2%。

基于以上结论,对EC细网格模式24 h时效的风速预报误差进行分级分析,结果表明,随着级数的增加,风速的平均绝对误差增大(见图7b)。大陈站和一江山站作为海岛站,两者误差接近,以大陈站为例,7级风、8级风、9级风和10级风的风速预报平均绝对误差分别为4.1 m/s、6.2 m/s、8.1 m/s和10.6 m/s。椒江口站4个级别风速预报的平均绝对误差分别为3.5 m/s、5.2 m/s、7.6 m/s和9.3 m/s。

综上所述,针对冬半年冷空气偏北大风,EC细网格模式的预报风速误差在离陆地越远的地方(如海岛),误差越大,而且与实况极大风速相比,绝大多数情况下预报风速偏小。就海岛站点来说,当EC细网格预报9~11 m/s风速时,考虑出现7级阵风;当预报12~14 m/s风速时,考虑出现8级阵风;当预报16 m/s风速时,考虑出现9~10级阵风。一般情况下沿海站点的风力比海岛站点小一级左右。

4.2 气旋偏北大风预报误差

沿海站气旋偏北大风风速预报的平均绝对误差小于海岛站(见图7a)。24 h风速预报的平均误差最小,48 h和72 h的预报误差持平。椒江口站24 h

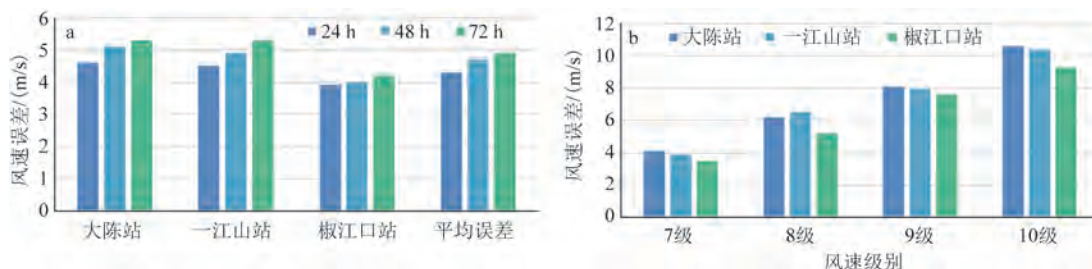


图6 冬半年冷空气偏北大风风速(a)和24 h时效风速分级(b)的绝对误差

Fig.6 Absolute errors of cold air northerly wind speed (a) and 24 h wind speed classification (b) in wintertime half-years

的风速预报的平均绝对误差为3.4 m/s,明显小于大陈站和一江山站。统计结果表明,在气旋偏北大风的预报中,EC细网格模式在沿海站点中表现较好,预报风速与实际站点极大风速的平均绝对误差为3~4 m/s,可参考性较高,但是在海岛站点中表现较差。

对EC细网格模式24 h时效的风速预报误差进行分级分析,结果表明,随着级数的增加,沿海站点风速预报的平均绝对误差增大(见图7b),但是海岛站点的误差起伏较大,且变化不尽相同。以椒江口为例,椒江口站7级风、8级风、9级风和10级风的风速预报平均绝对误差分别为3.2 m/s、4.9 m/s、6.8 m/s和9.1 m/s。

综上所述,针对气旋偏北大风,EC细网格模式的风速预报在沿海站点的表现要明显优于海岛站点。就沿海站点来说,当EC细网格预报10~12 m/s风速时,考虑出现7级阵风;当预报12~14 m/s风速时,考虑出现8级阵风;当预报14~16 m/s风速时,考虑出现9级阵风。一般情况下海岛站点的风力比沿海站点大一级左右,但是在气旋偏北大风过程中,也有极少数情况(占8.2%左右)出现海岛站点风力小于沿海站点。

4.3 气旋偏南大风预报误差

在各个站点以及每个站点不同预报时效下,

气旋偏南大风风速预报的平均绝对误差都相差较大(见图8a),但总体上看,海岛站风速预报的平均绝对误差小于沿海站。在气旋偏南大风的预报中,EC细网格模式在沿海站和海岛站中的表现不佳,以一江山站为例,24 h时效的预报风速与实际站点极大风速的平均绝对误差为3.5~4.5 m/s。

对EC细网格模式24 h时效的风速误差进行分级分析,结果表明,7~8级风的平均绝对误差较大(见图8b),9~10级风的平均绝对误差较小。以一江山站为例,7级风、8级风、9级风和10级风的风速预报平均绝对误差分别为7.9 m/s、8.3 m/s、6.5 m/s和5.1 m/s。

综上所述,针对气旋偏南大风,EC细网格模式风速预报的可参考性较低,预报风速往往比实际极大风速偏小。就海岛站点来说,当EC细网格预报8~10 m/s风速时,考虑出现7级阵风;当预报10~12 m/s风速时,考虑出现8级阵风;当预报13~15 m/s风速时,考虑出现9级阵风;当预报20~23 m/s风速时,考虑出现10级及以上阵风。在气旋偏南大风过程中,沿海站点经常出现风力大于海岛站点的情况,占比约45.8%。由于样本数量有限,今后还需增加样本数进一步验证。

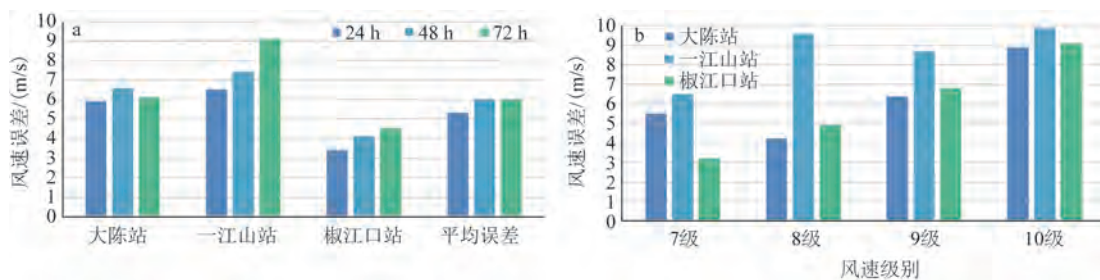


图7 气旋偏北大风风速(a)和24 h时效风速分级(b)的绝对误差

Fig.7 Absolute errors of cyclone northerly wind speed (a) and 24 h wind speed classification (b)

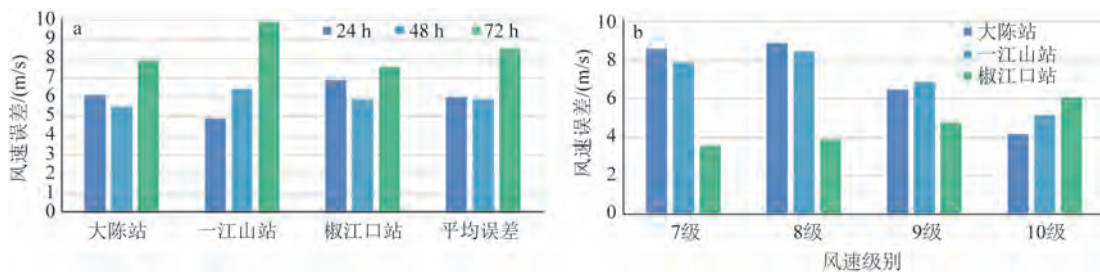


图8 气旋偏南大风风速(a)和24 h时效风速分级(b)的绝对误差

Fig.8 Absolute errors of cyclone southerly wind speed (a) and 24 h wind speed classification (b)

5 结论

本文选取2001—2019年椒江沿海地区风力 ≥ 8 级的天气过程为研究样本,对NCEP再分析数据和EC细网格模式资料进行分析研究和检验评估,为本地区精细化沿海大风预报提供思路和理论依据。主要结论如下:

①椒江沿海历年大风日数平均为94.6 d,大风年际变化较大。12月和1月冷空气大风最多,均在12 d以上,占全年大风日数的25.1%;5月大风最少,仅为3.5 d。

②冷空气大风有两个影响因素,分别是气压梯度和高空环流形势。当气压梯度方向由北指向南(或由东北指向西南)时,风力大小与 $|\Delta P|$ 的适应性较好;当气压梯度方向由西北指向东南时,沿海风力往往偏小。椒江冬季沿海偏北大风的环流形式分为三类两型。当一槽一脊的西北气流型主脊位于 55°E 附近时,是一种不稳定形势,冷高压强度在东移南下过程中影响趋于减小;当两槽一脊型的主脊位于 95°E 附近时,是一种相对稳定的形势,冷空气南下影响明显;对于一槽一脊的西阻型,预报的关键点在于长波槽的移动以及长波脊的破坏和东移上。

③变压梯度对椒江沿海大风的作用在5月表现较为突出且预报难度较大。通过分析可知,当椒江沿海存在负变压中心,并且与某地存在较大的变压梯度时,极大可能在未来24~36 h出现变压大风。

④影响椒江的气旋环流大风可分为东海气旋大风、黄渤海气旋大风和江淮气旋大风3类。气旋后部的偏北大风在气旋大风总数中占比超过半数。北大风可分为北槽南涡型和低涡切变型,南大风可分为东亚大槽型和沿海高压型。 $25^{\circ}\sim 40^{\circ}\text{N}$, $95^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{E}$ 内存在锋区,高空槽后有冷空气东移南下,可作为预报椒江沿海出现气旋后部偏北大风的一个起始条件。气旋前部的偏南大风则可将海上高压稳定少动、沿海低槽加深、大陆高压东移叠加导致低涡东移缓慢作为预报起始条件。

⑤EC细网格模式风力预报检验的结果表明,针对冬半年冷空气偏北大风,模式预报风速误差在离陆地越远的地区误差越大,与实况极大风速相比,预报风速往往偏小;针对气旋偏北大风,模式风速预报在沿海站点的表现明显优于海岛站点;针对气

旋偏南大风,模式风速预报的可参考性较低,预报风速往往比实际极大风速偏小。

参考文献:

- [1] 张霞, 吴彩霞, 缪燕, 等. 长江口沿海地区灾害性大风的时空分布特征[J]. 广州航海学院学报, 2014, 22(4): 8-10.
ZHANG X, WU C X, MIAO Y, et al. Time and space distribution of the severe winds in the Yangtze estuary coastal areas[J]. Journal of Guangzhou Maritime Institute, 2014, 22(4): 8-10.
- [2] 侯伟芬. 浙江沿海大风形势及其对渔船安全的影响[J]. 浙江海洋学院学报(自然科学版), 2004, 23(2): 130-133.
HOU W F. The wind situation its influence on navigation safety of fishing boats off Zhejiang[J]. Journal of Zhejiang Ocean University (Natural Science), 2004, 23(2): 130-133.
- [3] 李云法, 唐伟民, 杨万裕, 等. 浙江中部沿海大风特征及预报着眼点[C]//第27届中国气象学会年会气候资源应用研究分会场论文集. 北京: 中国气象学会, 2010: 358-362.
LI Y F, TANG W M, YANG W Y, et al. Characteristics and forecast focus of coastal gale in central Zhejiang province[C]//The 27th Annual Meeting of the Chinese Meteorological Society. Beijing: Chinese Meteorological Society, 2010: 358-362.
- [4] 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.
- [5] 孙逸涵, 何晓风, 周荣卫. 不同背景场近地层风速的预报效果检验[J]. 资源科学, 2013, 35(12): 2481-2490.
SUN Y H, HE X F, ZHOU R W. Evaluation of forecasting results of wind speed based on different background fields in the surface layer[J]. Resources Science, 2013, 35(12): 2481-2490.
- [6] 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.
- [7] 朱智慧, 郑运霞, 过霁冰. 上海沿海站点极大风速预报方程的细化和完善[J]. 海洋预报, 2022, 39(1): 32-38.
ZHU Z H, ZHENG Y X, GUO J B. Refinement and improvement of the maximum wind speed prediction equation for Shanghai coastal stations[J]. Marine Forecasts, 2022, 39(1): 32-38.
- [8] 王镇铭, 杜惠良, 杨诗芳. 浙江省天气预报手册[M]. 北京: 气象出版社, 2013.
WANG Z M, DU H L, YANG S F. Zhejiang province weather forecast manual[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2013.
- [9] 朱乾根, 林锦瑞, 寿绍文, 等. 天气学原理和方法[M]. 4版. 北京: 气象出版社, 2007.
ZHU Q G, LIN J R, SHOU S W, et al. Principles and methods of weather ology[M]. 4th ed. Beijing: China Meteorological Press,

- 2007.
- [10] 陈瑞闪. 福建沿海大风预报中的几个特殊问题[J]. 台湾海峡, 1983, 2(1): 9-19.
- CHEN R S. Several special questions about gale forecasting on Fujian coast[J]. Taiwan Strait, 1983, 2(1): 9-19.
- [11] 卢敬华, 雷小途. 西南低涡移动的初步分析[J]. 成都气象学院学报, 1996, 11(1-2): 40-49.
- LU J H, LEI X T. Preliminary analysis of movement of Southwest vortex[J]. Journal of Chengdu Institute of Meteorology, 1996, 11(1-2): 40-49.

Research on characteristic analysis and forecast method of gales in the Jiaojiang coastal area

QIU-WANG Zehe¹, ZHANG Lanwen²

(1. Jiaojiang Meteorological Bureau of Taizhou City, Taizhou 318000, China; 2. Huangyan Meteorological Bureau of Taizhou City, Taizhou 318020, China)

Abstract: This paper analyzes the monthly and annual variation characteristics of gales in the Jiaojiang coastal area, studies its influencing factors and forecasting modes, and tests the EC fine-grid model gales forecasting product, based on the observational data from Dachen meteorological station, Jiaojiangkou and Yijiangshan automatic weather stations, the 6-hour reanalysis data at $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ resolution from National Centers for Environmental Prediction, the EC fine-grid model data at $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ resolution from European Centre for Medium-range Weather Forecasts. The results show that cold air gales in winter is the majority of gales in the Jiaojiang coastal area. The pressure gradient and atmospheric circulation situation are two main influencing factors of cold air gales. A negative barotropic center over the Jiaojiang coastal area very likely leads to barotropic gale in the following 24~36 hours. Gales at the north side of cyclones can be divided into north trough south vortex type and low vortex shear type, while gales at the south side of cyclones can be divided into East Asia great trough type and coastal high type. The EC fine-grid model product has a certain degree of reference value on forecasting the northerly gales of cold air and cyclones. Compared to the observed maximum wind speed, the predicted wind speed is smaller in most cases.

Key words: coastal gales; circulation situation; pressure gradient; cyclone circulation; EC fine-grid wind test