1	冷涡影响下杭州湾一次区域性极端大风的
2	演变和机制分析 ¹
3	黎玥君1,马昊24,勾亚彬3,戴祥霖1,余贞寿1
4	(1 浙江省气象科学研究所, 310008; 2 浙江省气象台, 310051; 3 杭州市气象局, 310051; 4 中国气象局
5	水文气象重点开放实验室,100081)
6	摘要: 本文利用常规气象探空观测、地面自动气象站逐分钟观测、风廓线雷达以及多普勒天气雷达等多源
7	观测资料,分析了 2021 年 4 月 30 日傍晚到夜间浙北和杭州湾沿海地区一次区域性极端大风的天气特征,
8	重点探讨了对流系统移入杭州湾后的中尺度演变特征和大风增强的原因。结果表明,此次过程是典型的多
9	尺度相互作用的结果,在高空深厚的东北冷涡影响下,配合中层西北急流和较强的地面暖低压促使飑线后
10	部对流系统发展,形成雷暴大风天气。对流单体在经过杭州湾水系后明显增强,其阵风锋前侧有西南暖湿
11	入流,后部冷池发展强盛,气压涌升,叠加地面环境风场和杭州湾水面的热动力条件,从而触发不稳定能
12	量促使单体发展。系统经过杭州湾后辐散下沉出流明显增强,将中高层的动量更快的下传至地面,对于杭
13	州湾南部风力增强效应显著。杭州湾光滑下垫面、喇叭口等特殊地形也是造成极端大风出现的原因之一。
14	同时,逐分钟变温相比于极大风出现时间提前约7-10分钟,对于局地极端大风监测预警有一定的指示意义。
15	1./X
16	关键词: 多源观测、极端雷暴大风、阵风锋、冷池、杭州湾
17	中图分类号: P48 文献标志码: A
18	Development and Formation Mechanism of Extreme Wind in
19	Hangzhou Bay Affected by cold vortex
20	Li Yue $iun^1 = Ma Hao^2 - Gou Ya hin3 Dai Yiang lin1$
20 21	(1.Zheijang Insititute of Meteorological Science, Hangzhou, 310008: 2.Zheijang Meteorological Observatory,
22	310051, Hangzhou: 3 Hangzhou Meleorological Bureau, 310051, Hangzhou: 4 Key Laboratory of Hydro -
23	meteorology China Meteorological Administration, 100081,Beijing)
24	Abstract To investigate the mesoscale features and formation mechanism of the thunderstorm that occurred on
25	30 April 2021 in Hangzhou Bay Area the data of conventional air sounding observation data, minute-level
26	automatic weather station(AWS) data, wind radar profile, Doppler weather radar are analyzed, and focuses on the
27	evolution and mesoscale features of the convective system after its moving into Hangzhou Bay. The case shows
28	that this severe squall line developed under a multiscale interaction background of anomalously deep northeast
29	cold vortex at relatively high altitude, extremely intensified northwest jet at mid-level and surface warm low
30	pressure, which induces an enhancement of the local convection storms behind the squall line, resulting in
31	thunderstorm.After the process of crossing the Hangzhou Bay,the convection cell intensity is enhancing,the
32	warm-moist southerly flow at front of the gust front and the cold pool at the rear of gust front developed stronger,
33	barometric pressure surged, with the thermodynamic conditions influence of surface of Hangzhou Bay and surface
34	environmental wind field, triggered unstable energy which contribute to enhance the development of cell. The
35	intensity of subsidence divergence outflow develop stronger after the cell crossing Hangzhou Bay contributing to
36	the high momentum in the middle layer was brought to the ground. Therefore the enhancement effect of extreme
37	winds which in the south of Hangzhou Bay is significant. The smaller friction on the water surface of Hangzhou

¹国家自然科学基金联合基金项目(U2242204)、浙江省科技厅重点研发计划(2022C03150)共同资助。 第一作者:黎玥君,主要从事模式评估检验和模式产品解释应用。E-mail: 275551891@qq.com

38 Bay and special topography of bell mouth, were the important reasons for the increasing of wind speed. At the same

time, minute-by-minute temperature change is about 7-10 minutes earlier than the occurrence time of extreme

40 wind, which has certain directive significance for local extreme wind monitoring and warning.

41 Key words: multi-source observation, extreme thunderstorm gale, gust front, cold pool, Hangzhou Bay

42 引言

浙江省处于长江中下游地区,该地区是春夏季节受冷涡环流和季风槽共同影响下的交汇 43 区,强对流天气频发,其伴随的雷暴大风、局地冰雹和短时强降水给人民的生命和财产造成 44 不同程度的损失,研究强对流天气的发生、发展机理,对于防灾、减灾意义重大。在主要的 45 三种强对流天气类型中,强对流大风出现的频率较高,也最容易漏报。对于强对流大风的定 46 义,中国业界达成的共识是: 阵风超过 17m/s 的对流性大风以及发生在陆地上所有级别的 47 龙卷。强对流大风主要有三类:下击暴流、雷暴大风和龙卷。历史数据统计分析表明:强雷 48 暴大风高频区位于中国中东部地区,强雷暴大风从 3 月开始在华南和江南地区出现,4 月 49 进入华中、华东地区,5月北进到华北、东北和西北地区(费海燕等,2016);春末夏初北方冷 50 涡影响下发展起来的对流系统是造成浙江省极端大风灾害性天气的主要天气形势(彭霞云等, 51 2022),根据浙江省所处的冷涡位置,结合 Meng et al(2013)的天气分型,造成浙江省强对 52 流大风的天气型为冷涡类西北气流型,主要是由上游苏皖地区触发的对流单体,经过合并发 53 54 展演变成新的对流系统,随槽后冷空气南下影响浙江。

在雷暴大风发生、发展和极端大风形成的机理方面,国内学者做过大量研究,程月星等 55 (2018)发现,在上游雷暴的冷池出流作用下,地面辐合抬升最强处将触发出新生单体并迅 56 速发展。何娜等(2020)总结了触发对流系统中67%的对流由阵风锋过程触发,发现阵风锋 57 的抬升作用是新生单体迅速发展的关键。盛杰等(2019)研究了一次早春冷涡底部的飑线大风 58 过程,认为低层高温高湿、中层干冷、高空大的温度垂直递减率是雷暴大风发生的有利条件; 59 梁建宇和孙建华(2012)模拟了商丘一次风暴的大风生成机制和结构特征,认为线性风暴的中 60 层入流加强了对流区的下沉气流,是形成极端大风的重要成因之一;张怡和赵志宇(2012) 61 指出高空动量下传使得对流发展、维持和传播,是造成低空及地面风速增大的重要因素之一。 62 张弛等(2019)发现飑线后侧入流急流的动量下传和蒸发作用共同引发下沉气流,从而影响 63 冷池的移速,引起了地面大风;王秀明等(2013)认为,地面直线型风害的主要由冷池密度 64 流与动量下传引起。冷池在阵风锋形成过程和强度维持上一定程度起到了主导作用(岳彩军 65 等,2016;雷蕾等,2021)。同时,下垫面条件也是影响对流强度和引起极端大风的作用 66 之一,一些国外学者研究发现,水体具有高比热容、低反照率、低的表面粗糙度等特性(Notaro 67 et al, 2013; Wen et al, 2015; Wu et al, 2019), 与其他陆面覆盖类型不同, 摩擦力更小有利于 68 风速增强; 白天水体吸收了太阳辐射, 在夏季的夜间, 水体会加热表层大气并且增加感热潜 69 热通量的释放,从而激发或加强对流(Xu and Liu, 2015; Xu et al, 2014); 陈淑琴等(2017)指 70 出东部沿海地区受海陆下垫面存在加热和表面摩擦的差异的影响,对对流系统的演变起到关 71 72 键作用,但是,浙东沿海地区处于杭州湾的海陆交界处,下垫面条件复杂,对于移入杭州湾 73 后雷暴大风强度变化的研究较少。

74 2021年4月30日晚上,浙江北部及杭州湾沿海一带出现了明显的强对流天气,系统在
75 30日23点前后经过杭州湾后快速增强,并在宁波部分地区造成了10级以上的雷暴大风,
76 其中余姚和象山的瞬时风速达到35.7m/s和34.1m/s,造成五一长假出行期间,沿海高速公
77 路严重堵车及事故。这次强对流天气过程发生在强冷涡背景下,并且系统移动过程中下垫面
条件复杂,对单体发展趋势以及极端大风的预报有较大难度。本文将利用再分析资料、逐分
79 钟气象观测、风廓线雷达、多普勒天气雷达等资料,分析本次雷暴大风过程的系统演变、中
80 尺度环境条件和雷达回波特征,重点揭示风暴在经过杭州湾后明显增强并造成宁波局地极端

81 大风的形成机制,同时,伴随着逐分钟观测资料在预报业务中的广泛应用,本文还探索了逐82 分钟观测在极端大风预报预警中的指示意义。

83

96

108

84 1、资料与方法

85 本文所用的资料包括:常规探空、逐分钟地面自动气象站、风廓线雷达以及多普勒天气
86 雷达等多源观测资料;美国环境预报中心(NCEP)一日四次、分辨率为1°×1°的 FNL 再
87 分析资料。

88 由于此次过程存在明显的阵风锋现象,阵风锋主要出现在大气低层,因而基于宁波多普
89 勒雷达的 0.5°仰角,采用最近邻近法处理单部雷达资料,并进行笛卡尔等经纬度坐标投影,
90 然后根据垂直反距离加权内插法拼接单部雷达 0.5°的 PPI 数据,从而分析此次极端大风过
91 程中阵风峰的演变特征。雷达组合反射率因子由宁波、南汇、嵊泗、舟山四部雷达基数据组
92 合而成,水平分辨率均为 0.0025°×0.0025°。

93 利用 cressman 插值方法,将不规则的区域自动站点数据插值到规则的网格上,得到区
94 域自动站地面要素的客观分析资料,其空间分辨率为 0.1°×0.1°,时间分辨率为 5min,
95 用以分析此次过程中杭州湾区域的热动力特征。

97 2、天气过程概述

98 2.1 局地强对流天气实况

这次强对流雷暴大风过程初始发生于江苏境内,飑线自北向南方向移动,飑线主体后半 99 段于 4 月 30 日晚 22 点左右移入浙北境内, 4 月 30 日半夜前后浙北地区出现大范围的雷雨 100 大风天气,在嘉善、嘉兴城区、海盐、慈溪等地局部出现直径1~2cm的小冰雹,此次过程 101 102 从4月30日21时起,自西北向东南先后在浙北及杭州湾一带地区出现了大范围8~10级局 地 11~12级的雷雨大风天气,从极大风分布(图 1a)和演变过程可以发现,10级以上的极 103 端大风分布主要集中在杭州湾两岸及宁波沿海、山区一带地区,最大出现在余姚站 35.7m/s 104 (12级),出现时间为1日0时42分,湖州、嘉兴及宁波北部地区虽然出现了降水(图1b), 105 但是降水整体偏弱,湖州、嘉兴地区面雨量分别为3.1毫米,4.9毫米,降雨量单站最大为 106 107 慈溪新浦 11.7mm。





111 112 Fig1 Distribution of exteme wind speed(a.unit:m/s) and accumulated rainfall(b.unit:mm)in north of Zhejiang Province and coastal area during 21:00—02:00 April 30 2021

113

2.2 雷暴发展演变过程 114

图 2 为宁波、南汇、嵊泗、舟山四部多普勒雷达 0.5° 仰角组合反射率因子监测到的本 115 次雷暴发生的移动演变过程。4月30日21点之前江苏境内有西南一东北走向飑线向东南方 116 向移动进入东海海域,飑线西段有一条明显的东西走向的阵风锋1(陈圣劼等,2022),从 117 图 2 可以看到, 21 点 42 分, 飑线后部太湖流域有局地新对流单体生成, 对流单体向东南方 118 向移动并缓慢发展,在22点30分对流单体经过太湖流域后明显增强,发展为风暴单体(Chen 119 et al,2014),中心回波反射率达到 45dBZ 以上,此时在湖州北部等地出现了 7 级以上大风。 120 22 点 30 分后风暴单体逐步发展组织化,中心最大反射率因子达到 55dBZ,并向东南方向移 121 动,自西北向东南对湖州、嘉兴等地造成了 8-9 级大风。23 点 50 分左右强风暴单体开始移 122 入杭州湾,此时陆地上最大反射率因子为55dBZ,之后移速明显增快,强度明显增强,1日 123 00:30 分强风暴单体开始影响宁波北部,此时陆地上最大反射率因子达 60dBZ 以上,宁波、 124 舟山部分地区随后出现了 10 级以上大风和冰雹天气,最大风力出现在余妙地区 (35.7m/s, 125 12级)。之后系统不断东移,1日01:50分后,对流主体基本入海并逐步消散,对浙江影响 126 127 趋于结束。



- 128 129
- 130

Fig2 Evolution of radar composite reflectivity from 21:00 30 April to 02:00 01 May 2021

131

3、大气环流形势 132

30 日 20 时,高空 500hPa(图 3a)上冷涡中心位于 45°N,后部有一支 30m/s 以上的 133 偏北风急流,500hPa 西北急流中心风速超过 40m/s,浙北地区上部为高空冷平流(图 3a 红 134 色虚线),高空槽后冷平流引导冷空气南下,华北地区的地面低涡系统快速向东南方向移动。 135

700 hPa 和 850 hPa 图可以发现浙北上空均有 24 m/s 的西风急流(图 3b 和 3c), 低层 850 hPa 136 上,32°N以南属于槽前西南气流控制下,为西南低空暖湿平流(图 3c 红色虚线),持续 137 向北输送暖湿气流,对流系统位于低空急流左侧辐合区内,同时,地面上 30°N 附近有一 138 低压(图 3d),在该大尺度环流结构下,高层的急流增强了中低层垂直风切变,强化了对 139 流组织化的发展。从各层水汽分布可以看出,500 hPa 和 700 hPa 上杭州湾及周边地区水汽 140 含量较低,相对湿度低于 30%(图 3a、b 填色),从 850 hPa 比湿分布可以看出(图 3c 填 141 色),浙北地区低层水汽含量较好,比湿达到 6 g/kg 以上,说明大气中层较干,低层比较湿, 142 从天气尺度环流背景来看,"上干冷下暖湿"的天气配置有利于形成雷暴大风发生发展所需 143 144 要的环境条件。



145

146 图 3 2021 年 4 月 30 日 20 时位势高度场(等值线.单位: dagpm)、风场、相对湿度(填色.单位: %)和
 147 温度场(红色虚线等值线.单位: ℃)、(a) 500hPa、(b) 700hPa、(c) 850hPa 位势高度场(等值线.单
 148 位: dagpm)、风场、比湿(填色.单位: g/kg)和温度场(红色虚线等值线.单位: ℃)、(d)海平面气
 149 压场(等值线.单位: hPa)和温度场(红色虚线等值线.单位: ℃)

Fig3(a-b)The 500hPa, 700hPa geopotential height(contours,unit:dagpm), the wind field, the relativity humidity
 (shadings, unit:%) and temperature (red contours,unit:°C); (c) 850 hPa geopotential height
 (contours,unit:dagpm), the wind field and the specific humidity (shadings, unit:g/kg) and temperature (red
 contours,unit:°C); (d) the sea level pressure (contours,unit:hPa) and temperature (red contours,unit:°C)
 at 20:00 on April 30

155

156 4、中尺度环境特征

157 前文分析了天气尺度系统的高低空配置以及温湿度配置,500hPa 槽后存在较强烈的冷
158 平流,而对流层低层 850hPa 仍然处于暖湿平流下,在平流过程的作用下,"上冷,下暖湿"
159 的层结有利于不稳定能量的增长,导致浙北地区具有大气层结不稳定条件。从南京、杭州
160 20时的探空站可以看出(图 4),对流有效位能分别为 2004.8 J/Kg 和 550 J/Kg, CAPE 值基

161 本高于江浙春季气候态的对流能量值,有利于不稳定对流天气的发生发展,并且中高层的风
162 切变很强,850hPa以下均为西南风,0~3km单站风垂直切变为20m/s左右,0~6km的垂直
163 切变超过30m/s,属于较强强度的垂直风切变(Weisman和Davis,1998),远超了常年春
164 季对流发生的经验性指标值,表现出较强的极端性;从杭州站探空曲线可以看到(图4b),

165



166	图 4 2021 年 4 月 30	日 20 时 T-log	p图(a)南京	、(b)杭州		
167	(其中蓝色实线为温度层结曲线、红棕色实	民线为状态曲线	、绿色实线为	露点温度曲线	、绿色点虚线为等	爭比
168	湿线、红色点虚线为干绝热线)					
169	Fig4 T-logp chart in (a)Nanjing and (b)Hangzhou at 20:00 on April 30,2021					
170	(blue solid, brown solid, light green lines represent the stratification curve of temperature, the state curve of					
171	temperature, the temperature-dew point separately. Green and red dotted lines represent the Isospecific					
172	humidity and dry adiabatic lines.)					
173	表 1. 南京、杭州站主要的探空参数					
174 Table1. Main characteristic parameters of Nanjing and Hangzhou rawinsonde stations						
	CAPE/Jkg ⁻¹ CIN/Jkg ⁻¹	LI/K	LCL/hPa	ΔU /0-3km	Δ U/ 0-6km	
	南京 2004.8 138.6	-6.91	844.9	26.5	34.5	
	杭州 5503 4032	-3.25	778 5	19.8	30.8	

175

176 5、风暴入海加强及造成极端大风成因分析

177 5.1 雷暴系统与环境风场的相互作用

此次浙北及沿海区域的雷暴大风主要是太湖流域新生孤立雷暴单体发展东移,随后经过 178 杭州湾洋面后迅速增强的一次天气过程。图5是浙北、苏南、上海区域自动站各气象地面要 179 素的格点化实况场。通过分析加密的观测再分析资料可知,4月30日22:00至5月1日01:00 180 为强对流发展增强时段,可以看到地面辐合线及低涡的中小尺度发展,在回波主体增强东移 181 南下过程中,30日晚22:30强对流产生的冷池高压前部出流的偏北风增强,与环境场的偏 182 南风在上海以北出现风向辐合,即回波主体的辐合线(图 5a 中红色曲线),同时对应图 5b 183 的等温线密集带,经过太湖流域的新生孤立雷暴单体进入浙北德清县附近,在单体的前沿地 184 面有偏北风和环境风场西南风的风向辐合(图 5a 中红色曲线)。00:30 左右,在强烈发展 185 的回波主体左后方的末端,有偏北风和偏西风风向的辐合(图 5c 中红色曲线),新生的雷 186 暴单体迅速加强。 187

从图 5e、f、g、h 分析变压场、变温场与地面辐合线的对应关系, 23:30 的 1h 变压场 188 和变温场中可以看到(图 5e、f 中红色曲线),在湖州北部地区有偏北风和西南风的风向辐 189 合, 对应于雷达回波图 23:30 上(图 2), 有 45dBZ 以上的回波中心, 辐合线空间位置与实 190 况的位置较为吻合。辐合线后侧有正变压中心,其中心强度分别为+4.6hPa,辐合线前侧嘉 191 兴地区有负变温中心,其中心强度达-6.0℃;回波主体 23:30 之后进入杭州湾水面,1h 后 192 到达宁波地区(图 5g、h 中红色曲线),对比回波在杭州湾前后的 1h 变压场(图 5e、g) 193 和 1h 变温场(图 5f、h)强度变化,对比发现,次日 01:00,正变压中心强度由+4.6hPa 增 194 强至+7.2hPa,负变温中心由-6.0℃增强至-9.04℃,可以看到加强的雷暴单体位于变温梯度 195 密集带和变压梯度密集带的附近(图 5g、h★标记处),冷池强度增强,说明雷暴主体在经 196 过杭州湾水面过程中,强度明显增强。 197



198	time time time cont time time
199	图 5 2021 年 4 月 30 日—5 月 1 日地面自动站客观分析要素场
200	(a)22:30的气压场(单位:hPa)和风场(单位:m/s),(b)22:30温度场(单位:℃),
201	(c)00:30 的气压场和风场,(d)00:30 的温度场,(e)23:30 的1小时变压场和风场,(f)23:30 的1h变温场和风
202	场, (g) 01:00 的 1 小时变压场和风场, (h) 01:00 的 1h 变温场和风场
203	Fig5 Distribution of (a)Pressure(unit:hPa) and wind field(unit:m/s) at 22:30,(b)surface air temperature(unit: $^{\circ}\!C$) at
204	22:30,(c)same as Fig5a,but at 00:30,(d)same as Fig5b,but at 00:30,(e)1 hour station press change and wind field
205	at 23:30,(f) 1 hour temperature-change and wind field at 23:30, (g)1 hour station press change and wind field at

206 207 01:00, (h) 1 hour temperature-change and wind field at 01:00 based on cressman interpolation of AWS 30 April

2021

208 5.2 阵风锋及强冷池作用

阵风锋和冷池是影响雷暴单体强度的一个重要因素(陶岚等,2016;岳彩军等,2016; 209 210 Browning et al,2007; Quan et al,2014)。此次过程前后在强风暴单体东侧的杭州湾地区能够 211 清楚观测到有一条东西走向的阵风锋(图 6),移速较快,阵风锋在越过长江后 22:00 左右 经启东到达上海以北,次日 00:30 分(图 6e)经过杭州湾后到达宁波地界,平均移速为 20.7m/s, 212 该过程的下垫面分为陆地和杭州湾两部分。第一阶段未经过杭州湾: 30 日 22:00-23:00, 213 此时冷池前部暖湿入流造成的负变压区最大为-8.1hPa,变温梯度 0.6℃(10km)⁻¹,变压梯 214 度为 1.4 hPa(10km)⁻¹,陆地上移速为 13.8m/s,伴随辐合线南下(图 6a、b),00 时的 1 小 215 时负变温和正变压大值区位于浙北地区(图 7a),小时变温大-7.55℃,小时变压中心值超 216 过+13.1hPa,可以看到浙北大风区的东移南下,主要位于地面辐合线偏冷空气,侧,且前沿 217 与变压梯度的密集带相配合; 第二阶段经过杭州湾后: 30 日 23:00 一次日 02:00, 此时冷池 218 前部暖湿入流造成的负变压区最大为-2.5hPa,变温梯度 1.63℃(10km)⁻¹ 变压梯度为 219 1.74hPa(10km)⁻¹, 阵风锋经杭州湾时段为 22:30一次日 00:30(图 6a—e), 移速为 21.9m/s, 220 23:00时对流主体开始进入杭州湾地区(图 2),01时(图 7b),对流主体位于舟山群岛 221 (图 2),负变温和正变压大值区也移至宁波市,小时变温中心值达-9.04℃(图 7b)。次 222 日 00:00—01:00, 冷池的变温梯度指向东南方向,表明冷池最强出流为西北风。可以发现, 223 不同下垫面的地表粗糙度不同,从而影响风暴系统的移速,杭州湾水系表面光滑,海面摩擦 224 225 作用小,因而阵风锋在海面上的移速明显快于陆地。同时,冷池强度对于阵风锋起到了重要 作用,在系统南下经过杭州湾后冷池发展强盛,促使雷暴单体内上升气流将低层暖湿空气经 226 阵风锋抬升并进入雷暴单体内,从而使得雷暴母体组织化发展,雷暴母体加强并且移速加快, 227 雷暴母体逐渐接近阵风锋。而冷池前后增强的变压梯度和变温梯度也是影响阵风锋移速的一 228 229 个原因(李强等, 2019; 许长义等, 2022)。



233 图 6 2021 年 4 月 30 日 (a) 22: 30, (b) 23: 00, (c) 23: 30, (d) 00:00, (e) 00:30, (f) 01:00 宁波观象台雷达

234 0.5°仰角反射率因子的演变图(阵风锋演变图)
 235 Fig6 Evolution of reflectivity factors at 0.5° elevation observed from Ningbo Meteorological Observatory at
 236 (a)22:30, (b)23:00, (c)23:30, (d)00:00, (e)00:30, (f)01:00 30 April 2021(Evolution of gust front track)
 237

257

为进一步研究对流系统经过杭州湾前后的气象要素变化特征,选取风暴移动路径上的嘉 238 239 兴站(58452)和余姚站(58468)逐 5min 观测资料,分析系统变化前后的气象要素演变特 征。嘉兴站位于杭州湾北侧,00:00 之前系统影响嘉兴市,小时变温、变压分别达到-6℃、 240 241 2.5hPa。系统移过杭州湾后明显增强,余姚站的降温和升压的梯度明显强于嘉兴站,小时变 温、变压分别达到-9℃、8hPa,半个小时内风速增强到 35.7m/s,系统过境后,气压骤升, 242 243 气温骤降, 雷暴"高压鼻"特征显著, 并且西南风在 20 分钟内转为东北风。通过两个站气 象要素演变特征分析表明,系统在经过杭州湾后明显增强,体现在变温、变压以及风力变化 244 245 的时间梯度上变快。



246 247



24

250

251 252

253

254 255

5.3 动量下传作用

256 高晓梅等(2018)、李彩铃等(2021)、高丽等(2021)学者发现,风暴承载层平均
257 风向、风速与风暴的维持有着关系,当雷暴大风发生时,存在中层干冷空气的夹卷过程,如
258 果风暴承载层风速越大,动量下传对于地面大风贡献也越大。风暴层平均风速能够代表动量
259 下传的潜势大小,通常采用 850、700、500、300hPa 这四层的平均风向风速代表风暴承载

图 7 2021 年 5 月 1 日 (a) 00 时、(b) 01 时的地面 lh 变温(填色,单位:℃) 和 lh 变压(红虚线等值

线,单位:hPa)、(c)单站(余姚站)、(d)单站(嘉兴站)气压、气温、风速风向时序图

Fig 7 Variations of 1h surface temperature (shaded, unit: $^{\circ}C$) and 1h surface pressure (red contour, unit: hPa)

at (a) 00:00 1 May 2021, (b) 01:00 1 May 2021, (c, d) Evolution of sea level pressure (unites: hPa), temperature (unites: $^{\circ}$ C), wind speed and direction by 5-minutes interval during April 30th 23:00-May 01th 02:00 in

Yuyao(c) and Jiaxing(d) Station

260 层的风向风速,4月30日20时杭州探空站风暴承载层平均风速为28.74m/s,平均风向为
276.25°,而雷暴单体的平均移速为20.7m/s,方向为282°,相当于风暴承载层平均风的
262 72.02%,偏向风暴承载层右侧6°。同时,风暴承载层风速明显大于2002-2017年我国95
263 个极端雷暴大风个例(马淑萍等,2019)统计的均值(14m/s)和上四分位数(20m/s),
264 这表明,此次过程中异常偏大的风暴承载层平均风速和与对流系统移向接近的平均风向,对
265 于风暴的移动、发展均起到了明显的正反馈作用,较大的风速更加有利于中层干冷空气的夹
266 卷,从而增强下沉气流的动量下传作用,对下游地区地面大风的出现有明显的贡献。

267 5.4 下垫面作用

盛春岩等(2014)研究表明极端大风的出现与下垫面条件也密不可分,特殊地形能够对 268 风速有增强作用。海洋下垫面较光滑,会对海上大风起到增强作用,引起"向岸风"效应; 269 同时,喇叭口地形的存在使喇叭口东北部风速增大,而喇叭口西南侧及渤海海面风速减小(沈 270 271 杭锋等.2019)。此次过程中风暴自西北向东南先后影响了浙江东北部地区,并且对宁波地 272 区造成了极端的雷暴大风天气(图8)。一方面杭州湾水面下垫面光滑,摩擦力小。 一定程 度有利于系统增强(彭霞云等, 2022);另一方面,从宁波地区过程极大风与地形的分布, 273 可以发现,宁波北部地区越接近于杭州湾水面的区域,风力高于内陆地区,这主要由于海洋 274 下垫面的摩擦较小,从而引起"向岸大风"增强效应(盛春岩等,2014)。另外,此次过程 275 在余姚西部北部、宁波东南部出现了10级以上的大风分布区域、最大出现在余姚(35.7m/s, 276 12级,海拔38米),结合地形分布可以发现,极端大风区一部分位于四明山和会稽山山脉 277 之间,另一部分位于天台山与四明山两个山脉之间,这两个区域特殊地形所产生"狭管效应" 278 和喇叭口效应, 使得风力也有一定的增强。 279



280 281

282 283 图 8 2021 年 5 月 1 日 00-02 时地面 8 级以上大风(风羽)及地形高度分布

Fig8 Hourly extreme gale exceeding scale 8(barb) during 00:00-02:00 1 May 2021 and topographic height

284 **5.5 风廓线及逐分钟观测特征**

通过前文的分析可以看出,此次强对流风暴发生前,环境风场在江苏浙江一带的西北风 285 强且深厚(图 3a、3b、3c、图 4),中层存在明显的西北风急流,其后侧入流有利于发展组 286 织性的对流系统,杭州和南京观象台站点 0—6km 垂直风切变达到 30m/s 以上(表 1),说 287 明风暴发生前,环境风场表现出强的垂直风切变特点。低时空分辨率的常规观测资料无法揭 288 示强风暴天气快速变化的特征,因此本文利用高时空分辨率的风廓线雷达资料和逐分钟自动 289 290 站观测资料,分析风暴发生前后其内部垂直剖面的风场特征及变化。下面选取风暴移动路径 291 上且离杭州湾较近、资料较为完整的嘉兴站和余姚站风廓线资料进行分析(图 9a、9b), 代表了风暴穿过杭州湾前后的垂直特征。 292

293 嘉兴站从 23 点 01 分起地面风速明显增强,并且伴随出现持续的 0. 2-0. 3℃/min 的负变

294 温,风速于 23 点 18 分达到最大(13.3m/s,6 级)。在 23 至 00 时嘉兴站出现明显五次的风
速波动,而逐分钟变温也对应出现了五次明显的负值波动。同时,在地面风速首次达到峰值
296 前后,嘉兴站 1km 以下风速相对较小(约为 4m/s),而之后 1km 左右风速逐渐增强至 12m/s
297 的偏北气流,伴随地面开始出现弱的降水。时间序列图也能够体现出沿着风暴移动路径上系
298 统的垂直空间分布特征,其中出现降水的时段作为风暴单体的位置,可以发现地面大风基本
299 出现在风暴的前沿,而风暴后侧则为明显的后侧入流(约 10m/s),引导中层动量不断向下、
300 向前传播,同时,从变温演变发现,地面冷池的传播速度早于风速的下传。

301 余姚站位于风暴穿过杭州湾后的影响区域,从风廓线图上,同样可以看到风暴系统后部
302 存在明显的下沉入流区,并且不论水平速度还是垂直速度都明显强于嘉兴站,并且风暴系统
303 后部的强西北风急流的厚度也明显高于嘉兴站,这一定程度表明系统在经过杭州湾之后得到
304 了明显的增强,从逐分钟要素演变可以发现,余姚站的逐分钟负变温更为明显,达到了 0.7℃
305 /min,相比于极大风出现时间提前时效提前了 7-10 分钟。





Fig9 Wind profiler observation and automatic surface weather observation of (a)Jiaxing and (b)Yuyao stations on
 30 April 2021[The upper half figures include horizontal wind(barb),vertical velocity(red line,unit:m/s),the lower
 half figures include instantaneous 10m wind speed(yellow line),precipitation(green column) and 2 m temperature
 change(blue column) at 1 min interval]

314 通过对比嘉兴站和余姚站风廓线雷达和自动站观测资料的时间演变可以发现,在通过杭
315 州湾水系后,风暴系统的强度明显增强,1km以下的后侧入流急流强度由嘉兴的10m/s迅
316 速增强至20m/s,并且垂直下沉运动由0.2m/s增强至1.2m/s,即后侧入流10分钟下降距离
317 由原来的120米增强为720米,这样短时间内中层的强水平动量快速传导至地面,造成余姚
318 地区风速急剧增大。同时,通过对比两站逐分钟观测资料(图9下图),地面大风出现之前
319 通常会提前伴有明显的负变温,并且出现时间早于大风出现7-10分钟,这对于极大风的监
320 测预警有着一定的指示意义。

321

306

322 6 总结与讨论

323 2021年4月30日夜间,浙江北部和东北部沿海受到自苏南的强飑线末端影响,并且强
324 风暴单体在经过杭州湾之后明显加强,出现了雷暴大风天气,就此本文对比分析了此次过程
325 的环境条件、中尺度特征、回波演变以及造成极端大风分布不均的机制成因,得到以下主要
326 结论:

327 (1)本次大风天气过程发生在高空冷涡前部,500hPa 有干冷空气入侵,浙北上空 850hPa

328 比湿较大且存在急流,对流系统位于高空急流左侧的辐合区内,CAPE为550J/Kg,同时低层
329 0-3km 具有明显风垂直切变,强化了对流组织化的发展,"上干冷下暖湿"的天气配置有利
330 于形成强对流天气发生发展所需要的不稳定能量环境条件。

331 (2)通过雷达回波及阵风锋的演变,可以清晰看到位于杭州湾上空,雷暴系统移动方
332 向前方有一条东西走向的阵风锋,并且与雷暴系统保持一定距离,在经过杭州湾后,阵风锋
333 移速明显加快,同时由于下垫面条件不同造成阵风锋的移速不同,23:00之前位于陆地移速
334 慢,23:00之后位于海面移速快。阵风锋前侧有西南暖湿入流,后侧辐散下沉出流明显,
335 造成阵风锋垂直环流加强,有利于雷暴母体组织化发展,雷暴母体逐渐接近阵风锋。

(3) 雷暴系统经过杭州湾后明显增强,从中尺度环境特征场来看,浙江东北部地区具 336 有不稳定能量,并存在中等强度垂直风切变,有利于海上形成有组织性的对流系统;在经过 337 杭州湾后,阵风锋移速加快,冷池发展强盛,促使雷暴单体内上升气流将低层暖湿空气经阵 338 风锋抬升并进入雷暴单体内,从而使得强对流风暴组织化快速发展。结合风廓线雷达资料和 339 340 风暴承载层平均风向风速可以发现,强的中层急流增强了对流系统后部入流的强度和厚度, 有利于风暴系统组织化和长时间维持,在下沉气流影响下,中层动量被更快的带到地面,造 341 成地面极端大风出现。同时,杭州湾作为特殊下垫面,由于水面的热力作用及摩擦力较小, 342 造成对流系统移入后加强或维持,宁波部分地区的喇叭口地形所产生"狭管效应"会使得地 343 344 面风力有所加强。

345 (4)通过逐分钟观测演变趋势发现地面大风出现之前通常会提前伴有明显的负变温,346 并且出现时间早于大风出现 7-10 分钟,这对于极大风的监测预警有着一定的指示意义。

347 伴随着逐分钟分辨率地面观测的广泛业务应用,各类气象演变特征在强对流预警业务中348 提前量及指示意义,还需要结合多个个例开展进一步深入的研究。

350 参考文献:

349

- 第圣劼,刘梅,杨梦兮,等,2022. 江东"4.30"强风雹成因及双偏振雷达特征分析[J]. 气象科学,42(5):
 638-649. Chen S J, Liu M, Yang M X, et al. 2022. Analysis on causes of '4.30' severe gales and hails event
 and associated characteristics of dual-polarization radar echoes over Jiangsu[J]. J Meteor Sci, 42(5): 638-649
 (in Chinese).
- 355 陈淑琴,章丽娜,俞小鼎,等,2017. 浙北沿海连续 3 次飑线演变过程的环境条件[J]. 应用气象学报,28(3):
 356 357-368. Chen S Q, Zhang L N, Yu X D, et al, 2017. Environmental conditions of three squall lines in the
 357 north part of Zhejiang province[J]. J Appl Meteor Sci, 28(3): 357-368 (in Chinese).
- 358 程月星,孙继松,戴高菊,等, 2018. 2016 年北京地区一次雷暴大风的观测研究[J]. 气象, 44(12): 1529-1541.
 359 Cheng Y X, Sun J S, Dai G J, et al, 2018. Study on a thunderstorm event over Beijing in 2016[J]. Meteor Mon,
 360 44(12): 1529-1541 (in Chinese).
- 361 费海燕,王秀明,周小刚,等,2016.中国强雷暴大风的气候特征和环境参数分析[J]. 气象,42(12):
 362 1513-1521. Fei H Y, Wang X M, Zhou X G, et al, 2016. Climatic characteristics and environmental
 363 parameters of severe thunderstorm gales in China[J]. Meteor Mon, 42(12): 1513-1521 (in Chinese).
- 高丽,潘佳文,蒋璐璐,等, 2021. 一次长生命史超级单体降雹演化机制及双偏振雷达回波分析[J]. 气象,
 47(2): 170-182. Gao L, Pan J W, Jiang L L, et al, 2021. Analysis of evolution mechanism and characteristics
 of dual polarization radar echo of a hail caused by long-life supercell[J]. Meteor Mon, 47(2): 170-182 (in
 Chinese).
- 368 何娜,丁青兰,俞小鼎,等,2020.北京及周边地区雷暴阵风锋特征统计分析[J]. 气象学报,78(2):250-259.
 369 He N, Ding Q L, Yu X D, et al, 2020. Statistical analysis of thunderstorm gust front characteristics in Beijing
 370 and surrounding areas[J]. Acta Meteor Sin, 78(2): 250-259 (in Chinese).

- 371 黄美金, 俞小鼎, 林文, 等, 2022. 福建沿海冷锋前暖区和季风槽大暴雨环境背景与对流系统特征[J]. 气象,
 372 48(5): 605-617. Huang M J, Yu X D, Lin W, et al, 2022. Environmental background and convective system
- characteristics of the prefrontal and the monsoon trough torrential rains in Fujian coastal area[J]. Meteor Mon,
 48(5): 605-617 (in Chinese).
- 375 雷蕾,孙继松,陈明轩,等,2021. 北京地区一次飑线的组织化过程及热动力结构特征[J]. 大气科学,45(2):
 376 287-299. Lei L, Sun J S, Chen M X, et al, 2021. Organization process and thermal dynamic structure of a squall line in Beijing[J]. Chin J Atmos Sci, 45(2): 287-299 (in Chinese).
- 李强,王秀明,张亚萍,等,2019. 一次副高影响下的局地强风暴触发及维持机制探析[J]. 气象,45(2):
 203-215. Li Q, Wang X M, Zhang Y P, et al, 2019. Analysis and explanation on triggering and maintaining
 mechanism of a localized severe storm under the influence of subtropical high[J]. Meteor Mon, 45(2):
 203-215 (in Chinese).
- 382 梁建宇,孙建华, 2012. 2009 年 6 月一次飑线过程灾害性大风的形成机制[J]. 大气科学, 36(2): 316-336. Liang
 383 J Y, Sun J H, 2012. The formation mechanism of damaging surface wind during the squall line in June
 384 2009[J]. Chin J Atmos Sci, 36(2): 316-336 (in Chinese).
- 385 马淑萍, 王秀明, 俞小鼎, 2019. 极端雷暴大风的环境参量特征[J]. 应用气象学报, 30(3): 292-301. MarS P,
 386 Wang X M, Yu X D, 2019. Environmental parameter characteristics of severe wind with extreme
 387 thunderstorm[J]. J Appl Meteor Sci, 30(3): 292-301 (in Chinese).
- 388 彭霞云,章丽娜,刘汉华,等,2022. 冷涡底部对流引起的杭州湾极端大风形成机制分析[J]. 气象,48(6):
 389 719-728. Peng X Y, Zhang L N, Liu H H, et al, 2022. Formation mechanism of extreme winds in Hangzhou
 390 Bay caused by convection at the bottom of cold vortex[J]. Meteor Mon, 48(6): 719-728 (in Chinese).
- 391 沈杭锋,方桃妮,蓝俊倩,等,2019. 一次强飑线过程极端大风的中尺度分析[J]. 气象学报,77(5): 806-822.
 392 Shen H F, Fang T N, Lan J Q, et al, 2019. Mesoscale analysis of the extremely damaging gale in a severe squall line[J]. Acta Meteor Sin, 77(5): 806-822 (in Chinese).
- 394 盛春岩,李建华,范苏丹, 2014. 地形及下垫面对渤海大风影响的数值研究[J]. 气象, 40(11): 1338-1344.
 395 Sheng C Y, Li J H, Fan S D, 2014. Numerical study of terrain and underlying surface effect on Bohai gale[J].
 396 Meteor Mon, 40(11): 1338-1344 (in Chinese).
- 397 盛杰,郑永光,沈新勇,等, 2019. 2018 年一次罕见早春飑线大风过程演变和机理分析[J]. 气象, 45(2):
 398 141-154. Sheng J, Zheng Y G, Shen X Y, et al, 2019. Evolution and mechanism of a rare squall line in early
 399 spring of 2018[J]. Meteor Mon, 45(2): 141-154 (in Chinese).
- 400 陶岚, 戴建华, 李佰平, 等, 2016. 上海地区移动型雷暴阵风锋特征统计分析[J]. 气象, 42(10): 1197-1212.
 401 Tao L, Dai J H, Li B P, et al, 2016. Characteristics' statistical analysis of gust front generated by moving
 402 thunderstorms in Shanghai[J]. Meteor Mon, 42(10): 1197-1212 (in Chinese).
- 403 王秀明,周小刚, 俞小鼎, 2013. 雷暴大风环境特征及其对风暴结构影响的对比研究[J]. 气象学报, 71(5):
 404 839-852. Wang X M, Zhou X G, Yu X D, 2013. Comparative study of environmental characteristics of a windstorm and their impacts on storm structures[J]. Acta Meteor Sin, 71(5): 839-852 (in Chinese).
- 406 许长义,卜清军,黄安宁,2022. 环渤海湾连续两条阵风锋的关联与成因分析[J]. 气象,48(6):729-745. Xu C
 407 Y, Bu Q J, Huang A N, 2022. Analyses on correlation and causes for the consecutive thunderstorm gust fronts
 408 over the Bohai Sea Bay[J]. Meteor Mon, 48(6): 729-745 (in Chinese).
- 409 许长义,章丽娜,肖现,等,2023. 冷涡背景下华北平原一次弓形回波致灾大风过程分析[J]. 气象学报,81(1):
 410 40-57. Xu C Y, Zhang L N, Xiao X, et al, 2023. Case analysis of damaging high winds generated by bow
 411 echoes in the presence of a cold vortex over the North China Plain[J]. Acta Meteor Sin, 81(1): 40-57 (in
 412 Chinese).
- 413 岳彩军,袁招洪,陶岚,等,2016. 上海地区一次阵风锋结构特征与动量收支诊断分析[J]. 高原气象,35(3):
 414 788-799. Yue C J, Yuan Z H, Tao L, et al, 2016. Structure feature and momentum budget analysis of a gust

- 415 front in Shanghai Region[J]. Plateau Meteor, 35(3): 788-799 (in Chinese).
- 416 岳彩军,袁招洪,陶岚,等,2016. 上海地区一次阵风锋结构特征与动量收支诊断分析[J]. 高原气象,35(3):
 417 788-799. Yue C J, Yuan Z H, Tao L, et al, 2016. Structure feature and momentum budget analysis of a gust
- 417 788-799. Tue C J, Tuan Z H, Tao L, et al. 2010. Structure reature and momentum budget analysis of a gust
 418 front in Shanghai Region[J]. Plateau Meteor, 35(3): 788-799 (in Chinese).
- 419 张弛, 支树林, 许爱华, 2019. 一次罕见强飑线 10 级大风的雷达回波特征分析[J]. 暴雨灾害, 38(2): 135-143.
 420 Zhang C, Zhi S L, Xu A H, 2019. Analysis of radar echo characteristics of rare force 10 gale with a strong squall line event in Jiangxi[J]. Torr Rain Dis, 38(2): 135-143 (in Chinese).
- 422 张怡,赵志宇, 2012. 豫东地区"6.3"与"7.17"两次致灾大风雷达资料对比分析[J]. 高原气象, 31(2): 515-529.
 423 Zhang Y, Zhao Z Y, 2012. Contrast of radar information between two destructive gales occurred in the East of
 424 Henan Province on June 3 and July 17[J]. Plateau Meteor, 31(2): 515-529 (in Chinese).
- Browning K A, Blyth A M, Clark P A, et al, 2007. The convective storm initiation project[J]. Bull Amer Meteor
 Soc, 88(12): 1939-1956.
- 427 Chen M X, Wang Y C, Gao F, et al, 2014. Diurnal evolution and distribution of warm-season convective storms in
 428 different prevailing wind regimes over contiguous North China[J]. J Geophys Res: Atmos, 119(6):
 429 2742-2763.
- 430 Meng Z Y, Yan D C, Zhang Y J, 2013. General features of squall lines in East China[J]. Mon Wea Rev, 141(5):
 431 1629-1647.
- 432 Notaro M, Zarrin A, Vavrus S, et al, 2013. Simulation of heavy lake-effect snowstorms across the Great Lakes
 433 basin by RegCM4: Synoptic climatology and variability[J]. Mon Wea Rev, 141(6); 1990-2014.
- 434 Quan W Q, Xu X, Wang Y, 2014. Observation of a straight-line wind case caused by a gust front and its associated
 435 fine-scale structures[J]. J Meteor Res, 28(6): 1137-1154.
- Weisman M L, Davis C A, 1998. Mechanisms for the generation of mesoscale vortices within quasi-linear
 convective systems[J]. J Atmos Sci, 55(16): 2603-2622.
- Wen L J, Lv S H, Li Z G, et al, 2015. Impacts of the two bigges lakes on local temperature and precipitation in the
 Yellow River source region of the Tibetan Plateau[J]. Advances in Meteorology, 2015: 248031.
- Wu Y, Huang A N, Yang B, et al, 2019, Numerical study on the climatic effect of the lake clusters over Tibetan
 Plateau in summer[J]. Climate Dyn, 53(9-10): 5215-5236.
- Xu L J, Liu H Z, Cao J, 2014 Numerical simulation of local circulation over the Cangshan Mountain-Erhai Lake
 area in Dali, Southwest China J. Chin J Atmos Sci, 38(6): 1198-1210.
- Xu L J, Liu H Z, 2015. Numerical simulation of the lake effect of Erhai in the Yunnan-Guizhou Plateau area[J].
 Acta Meteor Sin, 73(4): 789-802.
- Zhang M R, Meng Z Y, Huang Y P, et al, 2019. The mechanism and predictability of an elevated convection
 initiation event in a weak-lifting environment in central-eastern China[J]. Mon Wea Rev, 147(5): 1823-1841.