

黎玥君, 马昊, 勾亚彬, 等, 2024. 冷涡影响下杭州湾一次区域性极端大风的演变和机制分析[J]. 气象, 50(1): 71-83. Li Y J, Ma H, Gou Y B, et al, 2024. Evolution and formation mechanism of a regional extreme thunderstorm gale in Hangzhou Bay affected by cold vortex[J]. Meteor Mon, 50(1): 71-83(in Chinese).

冷涡影响下杭州湾一次区域性极端大风的演变和机制分析*

黎玥君¹ 马昊^{2,3} 勾亚彬⁴ 戴祥霖¹ 余贞寿¹

1 浙江省气象科学研究所, 杭州 310051

2 浙江省气象台, 杭州 310051

3 中国气象局水文气象重点开放实验室, 北京 100081

4 杭州市气象局, 杭州 310051

提 要: 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观测资料, 分析了 2021 年 4 月 30 日傍晚到夜间浙江北部和杭州湾沿海地区一次区域性极端大风的天气特征, 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地传至地面, 对于杭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。同时, 逐分钟变温相比于极大风出现时间提前了约 7~10 min, 对于局地极端大风监测预警有一定的指示意义。

关键词: 多源观测, 极端雷暴大风, 阵风锋, 冷池, 杭州湾

中图分类号: P458

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2023.091201

Evolution and Formation Mechanism of a Regional Extreme Thunderstorm Gale in Hangzhou Bay Affected by Cold Vortex

LI Yuejun¹ MA Hao^{2,3} GOU Yabin⁴ DAI Xianglin¹ YU Zhenshou¹

1 Zhejiang Institute of Meteorological Sciences, Hangzhou 310051

2 Zhejiang Meteorological Observatory, Hangzhou 310051

3 Key Laboratory of Hydro Meteorology, CMA, Beijing 100081

4 Hangzhou Meteorological Bureau, Hangzhou 310051

Abstract: Using the conventional sounding observation data, minutely automatic weather station (AWS) data, wind profile radar data, and Doppler weather radar, this paper analyzes the weather characteristics of a regional extreme gale in the northern Zhejiang and Hangzhou Bay coastal areas from the evening to the night of 30 April 2021, focusing on the evolution and mesoscale features of the severe squall line system after its moving into Hangzhou Bay. The analysis results show that this severe squall line system developed under a typical multi-scale interaction background of anomalously deep northeast cold vortex at relatively

* 国家自然科学基金联合基金项目(U2242204)、浙江省自然科学基金项目(LZJMY24D050005)和浙江省科技厅重点研发计划(2022C03150)共同资助

2023 年 3 月 6 日收稿; 2023 年 9 月 18 日收修定稿

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研究. E-mail: 275551891@qq.com

high altitude. The combination of the mid-level northwest jet and surface warm low pressure induced an enhancement of the local convection storms behind the squall line, resulting in thunderstorm and gale. After the convection cell passed through the Hangzhou Bay, its intensity was enhanced significantly. The warm-moist southwest air flew into the front of the gust front, the cold pool developed stronger in the rear of the gust front, barometric pressure surged with the land surface environmental wind field and the thermodynamic conditions of water surface of Hangzhou Bay. All these factors triggered unstable energy and enhanced the development of cells. The intensity of subsidence divergence outflow developed strongly after the cell's crossing the Hangzhou Bay, and it conveyed the momentum in the mid-high layers to the ground rapidly, which generated the enhancement effect of extreme winds in the south of Hangzhou Bay significantly. The lower friction on the water surface of Hangzhou Bay and the special topography of bellmouth were the important causes for the occurrence of extreme gale. At the same time, minute-by-minute temperature change was about 7–10 minutes earlier than the occurrence time of extreme gale. This finding has certain directive significance for local extreme wind monitoring and warning.

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

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义,业务系统科研人员达成的共识是:阵风超过 $17 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的对流性大风以及发生在陆地上所有级别的龙卷。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,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(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速发展。何娜等(2020)发现触发对流系统中67%的对流由阵风锋过程触发,并发现阵风锋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飏线大风过程,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;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)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。张弛等(2019)发现飏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,地面直线型风害主要由冷池密度流与动量下传引起。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 et al, 2013; Wen et al, 2015; Wu et al, 2019),与其他陆面覆盖类型不同,摩擦力更小有利于风速增强;白天水体吸收了太阳辐射,在夏季夜间,水体会加热表层大气并且增加感热潜热通量的释放,从而激发或加强对流(Xu and Liu, 2015; Xu et al, 2014);陈淑琴等(2017)指出东部沿海地区受海陆下垫面的影响存在加热和表面摩擦的差异,对

对流系统的演变起到关键作用,但是,浙江东部沿海地区处于杭州湾的海陆交界处,下垫面条件复杂,对于移入杭州湾后雷暴大风强度变化的研究较少。

2021年4月30日晚上,浙江北部(以下简称浙北)及杭州湾沿海一带出现了明显的强对流天气,其系统在30日23时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,其中余姚和象山的瞬时风速分别达到 $35.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $34.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,造成了“五一”长假出行期间沿海高速公路严重堵车及事故。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。本文利用再分析资料、逐分钟气象观测、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,本文还探索了逐分钟观测在极端大风预报预警中的指示意义。

1 资料与方法

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 $1^\circ \times 1^\circ$ 的FNL再分析资料。

由于此次过程存在明显的阵风锋,主要出现在大气低层,基于宁波多普勒雷达的 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,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,分析此次极端大风过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合而成。

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,得到区域自动站地面要素的客观分析资料,其空间分辨率为 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$,时间分辨率为5 min,以分析此次过程中杭州湾区域的热动力特征。

2 天气过程概述

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,飚线自北向南移动,其主体后半段于4月30日22:00(北京时,下同)左右移入浙北境内,30日半夜浙北地区出现大范围的雷雨大风天气,在嘉善、嘉兴城区、海盐、慈溪等地局部出现直径为1~2 cm的小冰雹。此次过程从30日21:00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级以上的极端大风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($35.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,12级),出现时间为5月1日00:42。湖州、嘉兴及宁波北部地区虽然出现了降水(图1b),但是降水整体偏弱,湖州、嘉兴地区单站最大降水量分别为8.1 mm和4.9 mm,降水量单站最大为慈溪新浦(11.7 mm)。

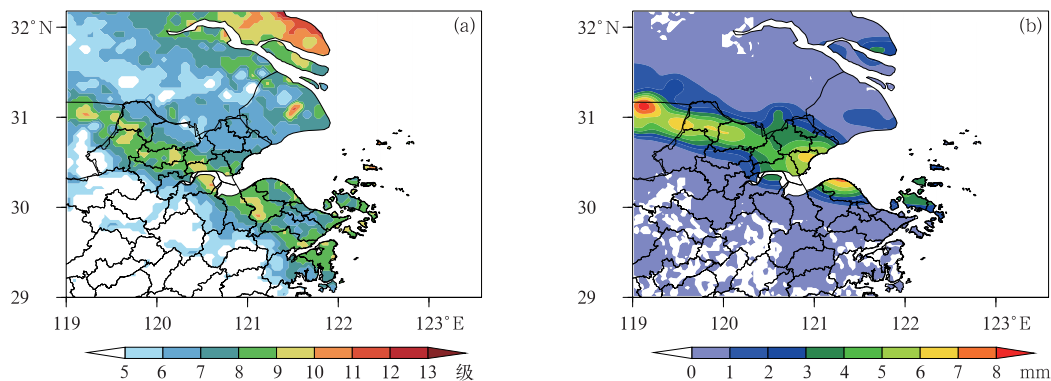


图1 2021年4月30日21:00至5月1日02:00浙北及沿海地区(a)极大风速等级和(b)总降水量分布

Fig. 1 Distribution of (a) extreme wind speed and (b) accumulated rainfall in north of Zhejiang Province and coastal area from 21:00 BT 30 April to 02:00 BT 1 May 2021

2.2 雷暴发展演变过程

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次雷暴发生的移动演变过程。4 月 30 日 21:00 之前江苏境内有西南—东北走向飑线向东南方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(陈圣劼等,2022)。从图 2 可以看到,21:42,飑线后部太湖流域有局地新对流单体生成,对流单体向东南方向移动并缓慢发展,在 22:30 对流单体经过太湖流域后明显增强,发展为风暴单体(Chen et al,2014),中心反射率因子达到 45 dBz 以上,此时在湖州北部等地出现了 7 级以上大风。22:30 后风暴单体逐步发展组织化,中心最大反射率因子达到 55 dBz,并向东南方向移动,自西北向东南对湖州、嘉兴等地造成了 8~9 级大风。23:50 左右强风暴单体开始移入杭州湾,此时陆地上最大反射率因子为 55 dBz,

之后移速明显增快,强度明显增强。5 月 1 日 00:30 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 60 dBz 以上,宁波、舟山部分地区随后出现了 10 级以上大风和冰雹天气,最大风力出现在余姚地区($35.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,12 级)。之后系统不断东移,01:50 后,对流主体基本入海并逐步消散,对浙江影响趋于结束。

3 大气环流形势

30 日 20:00,高空 500 hPa(图 3a)上冷涡中心位于 45°N ,后部有一支 $30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上的偏北风急流,500 hPa 西北急流中心风速超过 $40 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,浙北地区上部为高空冷平流(图 3a 红色虚线),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。700 hPa 和 850 hPa 可以发现浙北上空均有 $24 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的西风急流(图 3b 和 3c),

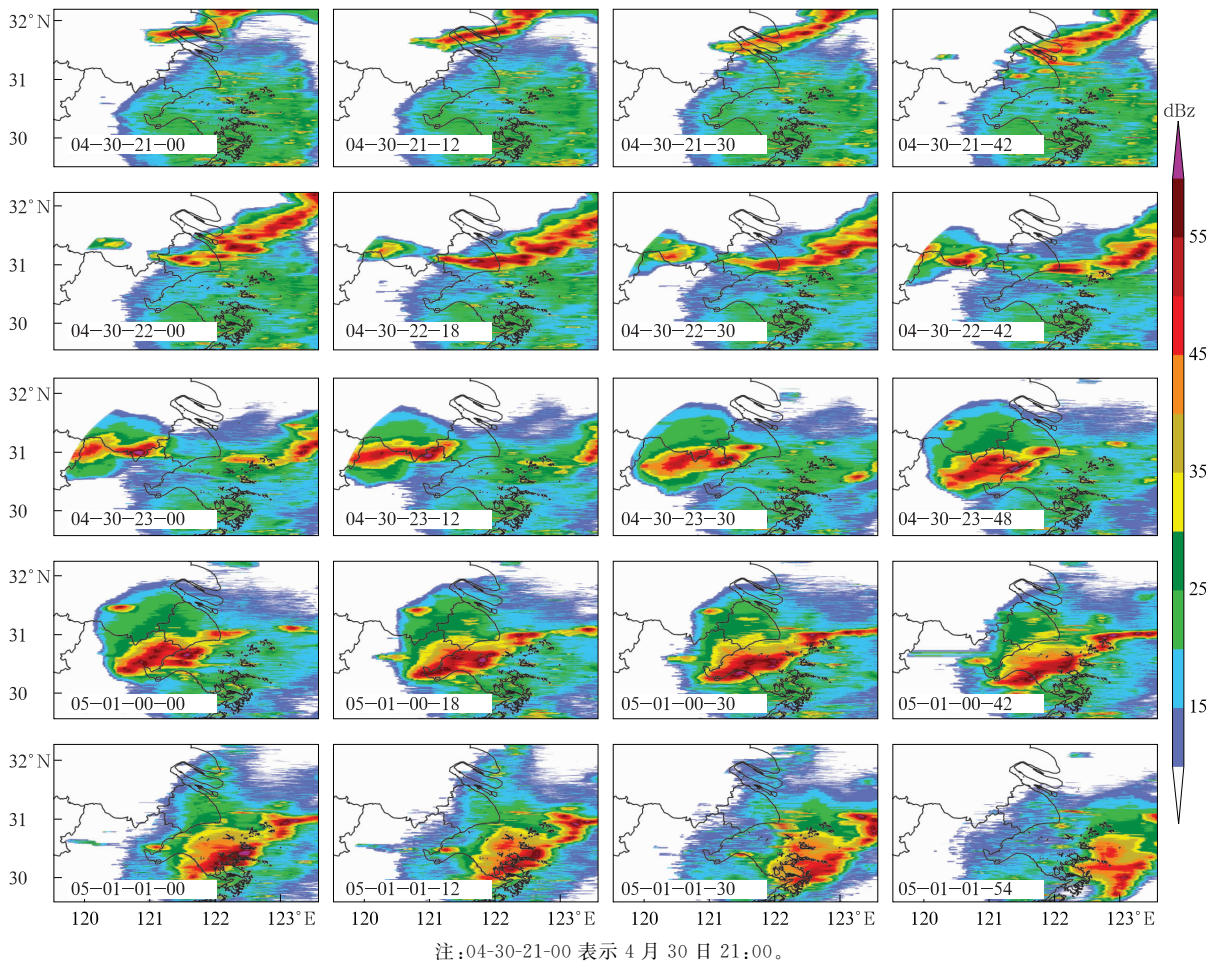


图 2 2021 年 4 月 30 日 21:00 至 5 月 1 日 02:00 雷达 0.5°仰角组合反射率因子的演变

Fig. 2 Evolution of radar composite reflectivity at 0.5° elevation from 21:00 BT 30 April to 02:00 BT 1 May 2021

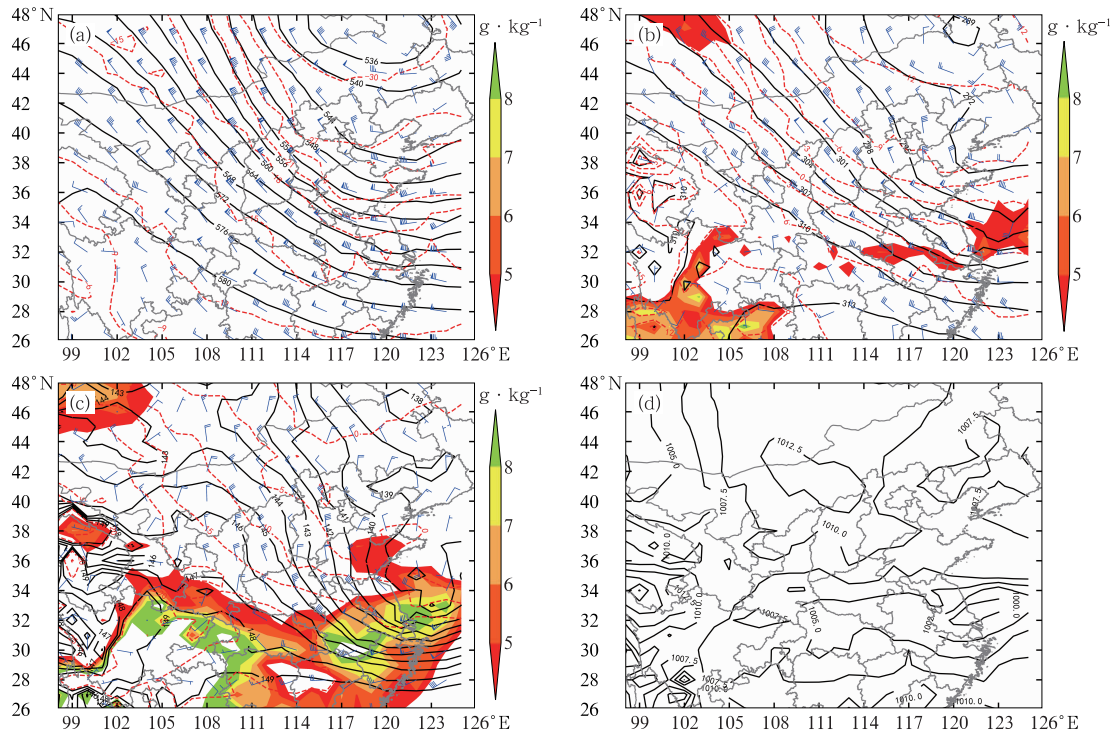


图 3 2021 年 4 月 30 日 20:00(a)500 hPa, (b)700 hPa, (c)850 hPa 位势高度场(等值线,单位: dagpm)、风场(风羽)、比湿(填色)和温度场(红色虚线,单位: $^{\circ}\text{C}$), (d)海平面气压场(单位: hPa)

Fig. 3 Geopotential height (contour, unit: dagpm), wind field (barb), specific humidity (colored) and temperature (red dashed line, unit: $^{\circ}\text{C}$) at (a) 500 hPa, (b) 700 hPa and (c) 850 hPa; (d) the sea level pressure (unit: hPa) and temperature at 20:00 BT 30 April 2021

低层 850 hPa 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 (32°N 、 121.5°E) 附近有一个低压中心, 在该大尺度环流结构下, 高层的急流增强了中下层垂直风切变, 强化了对流组织化的发展。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含量较低, 比湿均低于 $5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (图 3a, 3b), 从 850 hPa 比湿分布可以看出(图 3c), 浙北地区低层水汽含量较好, 比湿达到 $6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以上, 说明大气中层较干, 低层比较湿, 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要的环境条件。

4 中尺度环境特征

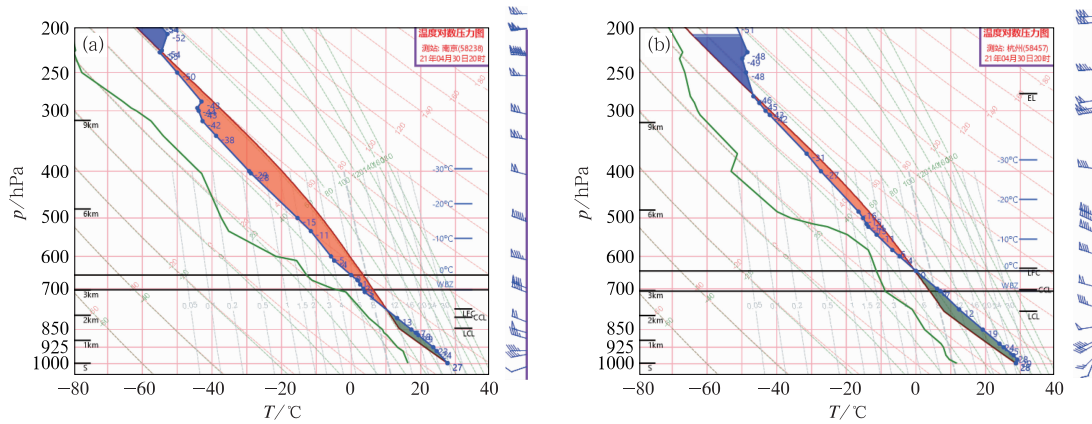
上文分析了天气尺度系统的高低空配置以及温湿度配置, 500 hPa 槽后存在较强烈的冷平流, 而对流层低层 850 hPa 仍然处于暖湿平流下, 在平流过程的作用下, “上冷下暖湿”的层结有利于不稳定能

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 20:00 的探空图可以看出(图 4, 表 1), 对流有效位能分别约为 $2005 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $550 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ (表 1), 高于江浙春季气候态的对流能量值(陈圣劫等, 2022), 有利于不稳定对流天气的发生发展, 并且中高层的风切变很强, 850 hPa 以下均为西南风, $0 \sim 3 \text{ km}$ 单站垂直风切变为 $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右, $0 \sim 6 \text{ km}$ 的垂直风切变超过 $30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 属于较强的垂直风切变(Weisman and Davis, 1998), 远超了常年春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), $1000 \sim 925 \text{ hPa}$ 有一定的逆温存在和蒸发条件, 利于下沉气流的发展。

5 风暴入海加强及造成极端大风成因分析

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



注:蓝色实线为温度层结曲线,红棕色实线为状态曲线,绿色实线为露点温度曲线,
绿色点虚线为等比湿线,红色点虚线为干绝热线。

图 4 2021 年 4 月 30 日 20:00(a)南京站,(b)杭州站 $T\text{-ln}p$ 图

Fig. 4 $T\text{-ln}p$ chart in (a) Nanjing and (b) Hangzhou stations at 20:00 BT 30 April 2021

表 1 2021 年 4 月 30 日 20:00 南京、杭州站主要的探空参数

Table 1 Primary sounding parameters at Nanjing and Hangzhou stations at 20:00 BT 30 April 2021

测站	CAPE/(J · kg ⁻¹)	CIN/(J · kg ⁻¹)	LI/K	LCL/hPa	$\Delta U_{0\sim 3\text{ km}}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$\Delta U_{0\sim 6\text{ km}}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$
南京	2004.8	138.6	-6.91	844.9	26.5	34.5
杭州	550.3	403.2	-3.25	778.5	19.8	30.8

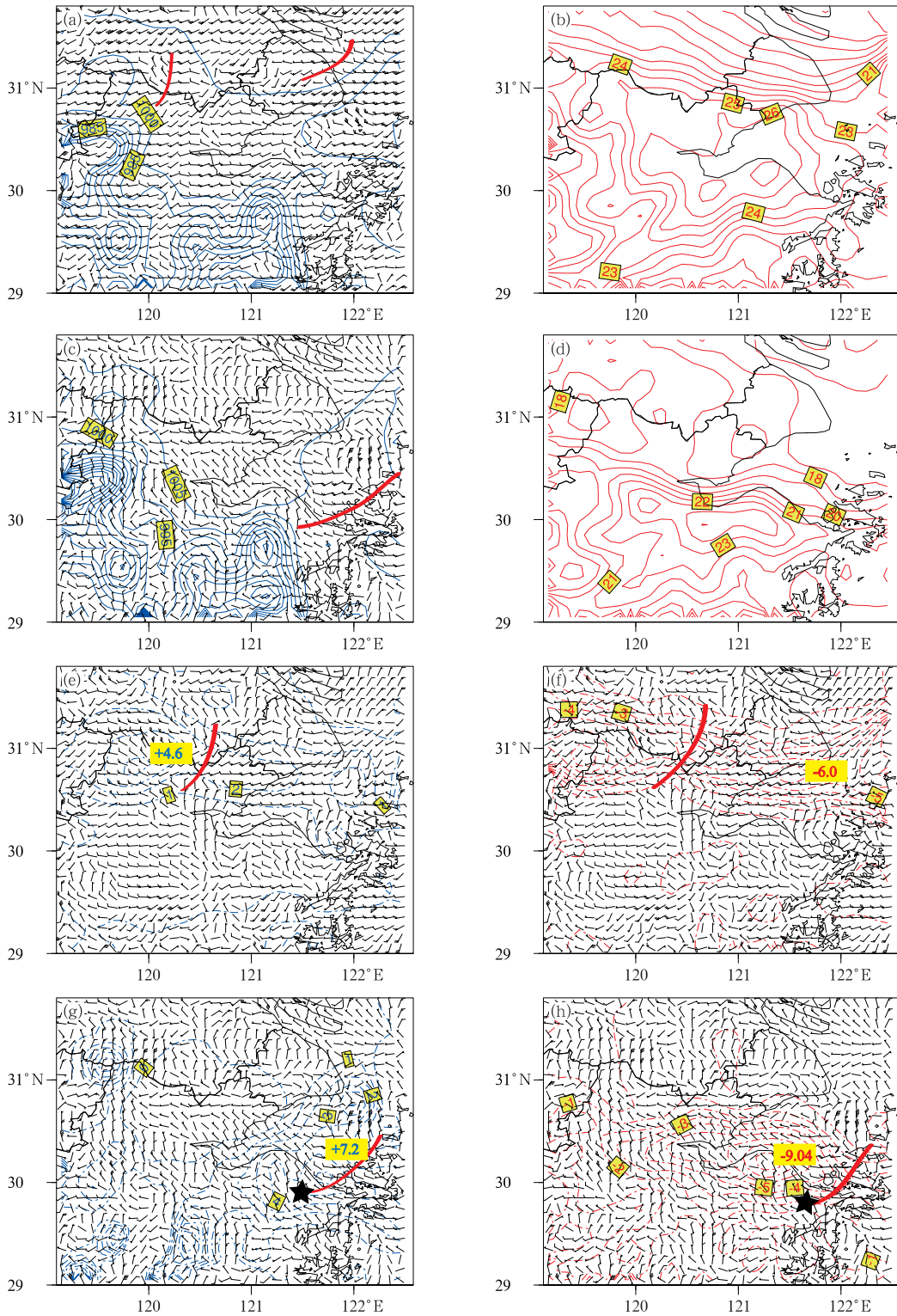
域新生孤立雷暴单体发展东移,随后经过杭州湾洋面后迅速增强的一次天气过程。图 5 是浙北、苏南、上海区域自动气象站各气象地面要素的格点化实况场。通过分析加密的观测再分析资料可知,4 月 30 日 22:00 至 5 月 1 日 01:00 为强对流发展增强时段。可以看到地面辐合线及低涡的中小尺度发展,在回波主体增强东移南下过程中,30 日 22:30 强对流产生的冷池高压前部出流的偏北风增强,与环境场的偏南风在上海以北出现风向辐合,即回波主体的辐合线(图 5a 中红色曲线),同时对应图 5b 的等温线密集带,经过太湖流域的新生孤立雷暴单体进入浙北德清县附近,在单体的前沿地面有偏北风和环境风场西南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

从图 5e~5h 分析变压场、变温场与地面辐合线的对应关系,由 23:30 的 1 h 变压场和变温场中可以看到,在湖州北部地区有偏北风和西南风的风向辐合(图 5e, 5f 中红色曲线),对应于雷达回波图 23:30 上(图 2),有 45 dBz 以上的回波中心,辐合线空间位置与实况的位置较为吻合。辐合线右侧有正变压中心,其中心强度分别为 +4.6 hPa,辐合线前

侧嘉兴地区有负变温中心,其中心强度达 -6.0°C;回波主体 23:30 之后进入杭州湾水面,1 h 后到达宁波地区(图 5g, 5h 中红色曲线),对比回波在杭州湾前后的 1 h 变压场(图 5e, 5g)和 1 h 变温场(图 5f, 5h)强度变化,对比发现,次日 01:00 正变压中心强度由 +4.6 hPa 增强至 +7.2 hPa,负变温中心由 -6.0°C 增强至 -9.04°C,可以看到加强的雷暴单体位于变温梯度密集带和变压梯度密集带的附近(图 5g, 5h 标记处),冷池强度增强,说明雷暴主体在经过杭州湾水面过程中,强度明显增强。

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; 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 4 月 30 日 22:00 左右经启东到达上海以北,次日 00:30(图 6e)经过杭州湾后到达宁波地界,平均移速为 $20.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,该过程的下垫面分为陆地和杭州湾两个部分。第一阶段未过杭州湾:30 日 22:00—23:00,此时冷池前部暖湿入流造成的负变压区最大为 -8.1 hPa,变温梯度为 $0.6^\circ\text{C} \cdot (10 \text{ km})^{-1}$,



注:红色曲线代表风向辐合,★代表加强雷暴单体位置。

图 5 2021 年 4 月 30 日至 5 月 1 日地面自动气象站客观分析要素场:(a,b)30 日 22:30,(c,d)1 日 00:30 的 (a,c)气压场(等值线,单位:hPa)和风场(风羽)以及(b,d)温度场(单位:℃);(e,f)30 日 23:30,(g,h)1 日 01:00 的 (e,g)1 h 变压场(虚线,单位:hPa)和风场(风羽)以及(f,h)1 h 变温场(虚线,单位:℃)和风场(风羽)

Fig. 5 The objective analysis element field of automatic weather stations from 30 April to 1 May 2021; (a, c) pressure field (solid line, unit: hPa), wind field (barb) and (b, d) surface air temperature (unit: ℃) at (a, b) 22:30 BT 30 April and (c, d) 00:30 BT 1 May; (e, g) 1 h allobaric field (dashed line, unit: hPa) and wind field (barb), and (f, h) 1 h variable temperature (dashed line, unit: ℃) and wind field (barb) at (e, f) 23:30 BT 30 April and (g, h) 01:00 BT 1 May

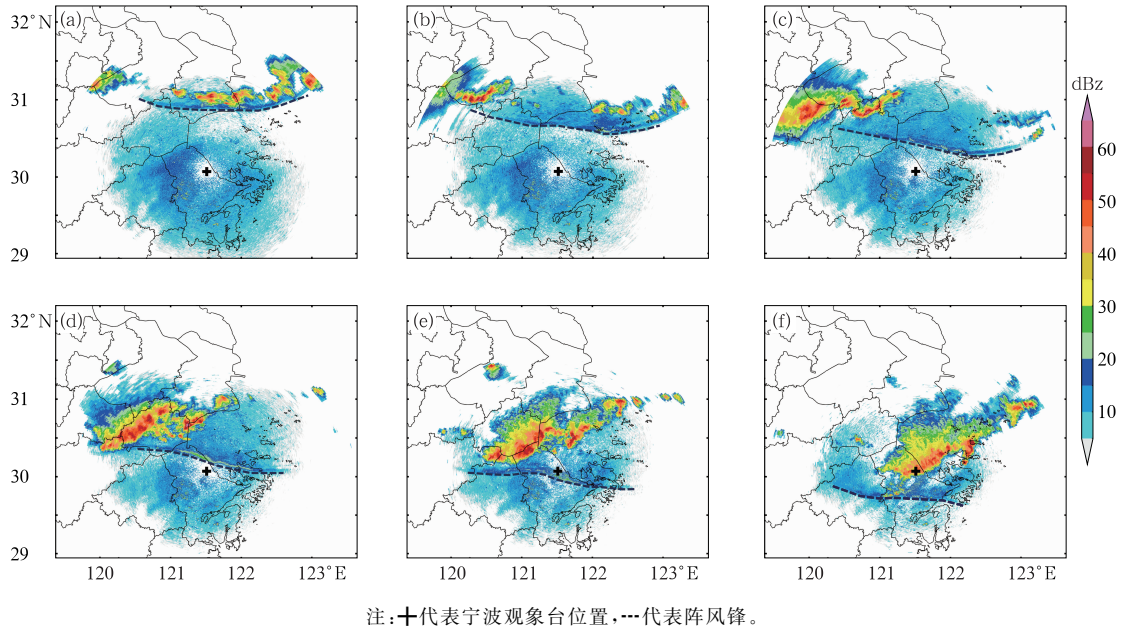


图 6 2021 年 4 月 30 日 (a)22:30, (b)23:00, (c)23:30, 5 月 1 日 (d)00:00, (e)00:30, (f)01:00 宁波观象台雷达 0.5° 仰角反射率因子演变

Fig. 6 Evolution of reflectivity factors at 0.5° elevation observed from Ningbo Meteorological Observatory at (a) 22:30 BT, (b) 23:00 BT, (c) 23:30 BT 30 April, (d) 00:00 BT, (e) 00:30 BT, (f) 01:00 BT 1 May 2021

变压梯度为 $1.4 \text{ hPa} \cdot (10 \text{ km})^{-1}$, 陆地上移速为 $13.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 伴随辐合线南下(图 6a, 6b), 00:00 的 1 h 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°C), 小时变压中心值达到 $+13.1 \text{ hPa}$, 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一侧, 且前沿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 至次日 02:00, 此时冷池前部暖湿入流造成的负变压区最大为 -2.5 hPa , 变温梯度为 $1.63^\circ\text{C} \cdot (10 \text{ km})^{-1}$, 变压梯度为 $1.74 \text{ hPa} \cdot (10 \text{ km})^{-1}$, 阵风锋经杭州湾时段为 22:30 至次日 00:30(图 6a~6e), 移速为 $21.9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 23:00 对流主体开始进入杭州湾地区(图 2), 01:00(图 7b), 对流主体位于舟山群岛(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°C (图 7b)。次日 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, 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, 并逐

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个原因(李强等, 2019; 许长义等, 2022)。

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兴站和余姚站逐 5 min 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, 30 日 00:00 之前系统影响嘉兴市, 小时变温、变压分别达到 -6°C 、 $+2.5 \text{ hPa}$ 。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°C 、 $+8 \text{ hPa}$, 半个小时内风速增强到 $35.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 系统过境后, 气压骤升、气温骤降, 雷暴“高压鼻”特征显著, 并且西南风在 20 min 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、变压以及风力变化的时间梯度上变快。

5.3 动量下传作用

高晓梅等(2018)、李彩铃等(2021)、高丽等(2021)研究发现, 风暴承载层平均风向、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下传的潜势大小, 通常采用 850、700、500、

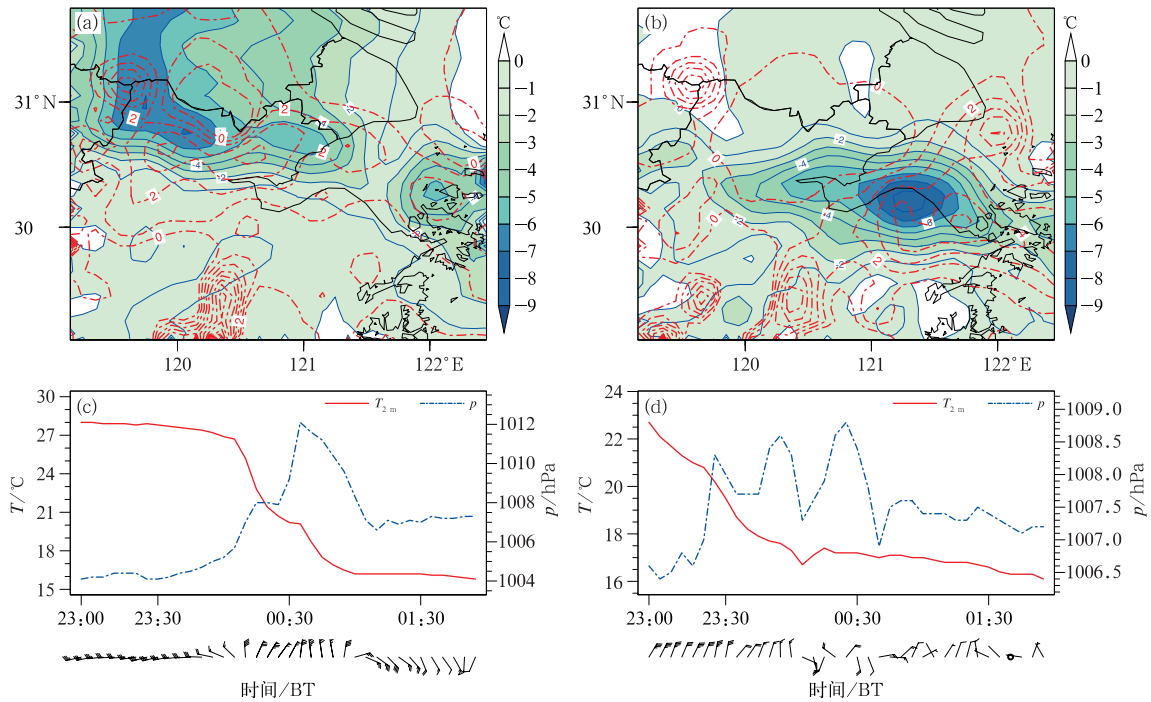


图 7 2021 年 5 月 1 日 (a)00:00, (b)01:00 的地面 1 h 变温(填色和等值线)和 1 h 变压(红虚线, 单位: hPa); 4 月 30 日 23:00 至 5 月 1 日 02:00 (c)余姚站和 (d)嘉兴站气压、气温、风速、风向时序图

Fig. 7 Variation of 1 h surface temperature (colored and solid line) and 1 h surface pressure (red dashed line, unit: hPa) at (a) 00:00 BT and (b) 01:00 BT 1 May; (c, d) evolution of sea level pressure, temperature, wind speed and direction at (c) Yuyao and (d) Jiaxing stations from 23:00 BT 30 April to 02:00 BT 1 May 2021

300 hPa 这四层的平均风向风速代表风暴承载层的风向、风速。4 月 30 日 20:00 杭州探空站风暴承载层平均风速为 $28.74 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 平均风向为 276.25° , 而雷暴单体的平均移速为 $20.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 方向为 282° , 相当于风暴承载层平均风的 72.03% , 偏向风暴承载层右侧约 6° 。同时, 风暴承载层风速明显大于 2002—2017 年我国 95 个极端雷暴大风个例(马淑萍等, 2019)统计的均值($14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)和 75% 分位数($20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)以上, 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, 对于风暴的移动、发展均起到了明显的正反馈作用(黄美金, 2022), 较大的风速更加有利于中层干冷空气的夹卷, 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。

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; 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, 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($35.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 12 级, 海拔高度为 38 m), 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脉之间, 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”和喇叭口效应, 使得风力也有一定的增强。

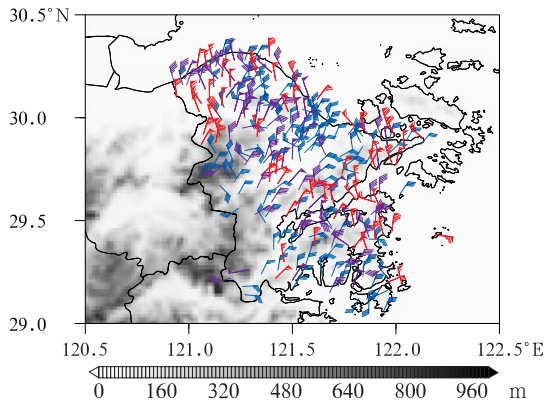


图 8 2021 年 5 月 1 日 00:00—02:00 地面 8 级以上大风(风羽)分布及地形高度(阴影)
Fig. 8 Distributions of hourly extreme gale exceeding scale 8 (barb) from 00:00 BT to 02:00 BT 1 May 2021 and topography height (shaded)

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强且深厚(图 3a~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织性的对流系统,杭州和南京观象台站点 0~6 km 垂直风切变达到 $30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上(表 1),说明风暴发生前,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。下文选取风暴移动路径上且离杭州湾较近、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。

嘉兴站从 23:01 起地面风速明显增强,并且伴随出现持续的 $0.2 \sim 0.3 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ 的负变温,风速于 23:18 达到最大 ($13.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 6 级)。在 23:00—00:00 嘉兴站出现五次明显的风速波动,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前后,嘉兴站 1 km 以下风速相对较小(约为 $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$),而之后 1 km 左右风速逐渐增强至 $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 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出现在风暴的前沿,而风暴后侧则为明显的后侧入流(约为 $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$),引导中层动量不断向下、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。

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存在明显的下沉入流区,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

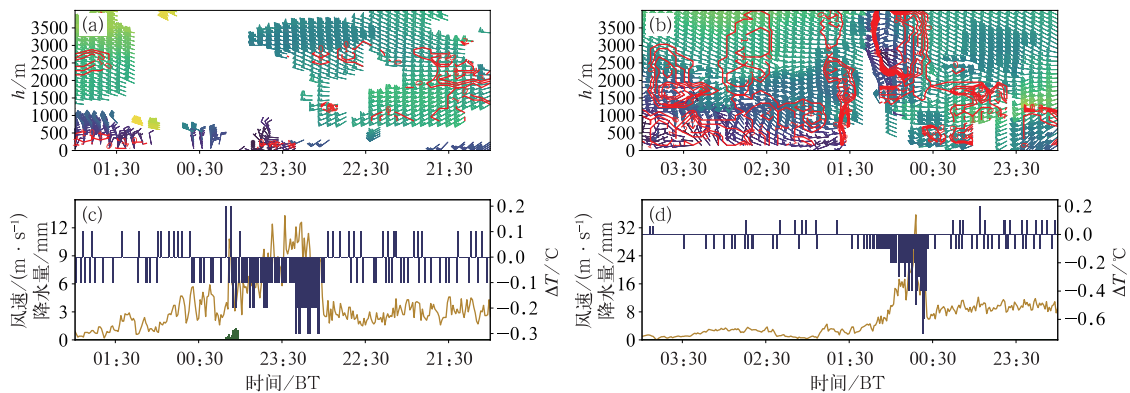


图 9 2021 年 4 月 30 日(a,c)嘉兴站和(b,d)余姚站(a,b)风廓线雷达和逐分钟地面自动站观测水平风演变(风羽)、垂直速度(红色实线,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), (c,d)逐分钟地面 10 m 瞬时风速(黄色实线)、地面降水量(绿色柱)、逐分钟变温(蓝色柱)

Fig. 9 (a, b) Wind profiler observation and minutely surface automatic weather observation of horizontal wind (barb), vertical velocity (red solid line, unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); (c, d) minutely 10 m instantaneous wind speed (yellow solid line), surface precipitation (green column) and temperature change (blue column) at (a, c) Jiaxing and (b, d) Yuyao stations on 30 April 2021

过杭州湾之后得到了明显的增强,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 $0.7\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$,相比于极大风出现时间提前了 $7\sim 10\text{ min}$ 。

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,在通过杭州湾水系后,风暴系统的强度明显增强, 1 km 以下的后侧入流急流强度由嘉兴的 $10\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 迅速增强至 $20\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,并且垂直下沉运动由 $0.2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 增强至 $1.2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,即后侧入流 10 min 下降距离由原来的 120 m 增强为 720 m ,这样短时间内中层的强水平动量快速传导至地面,造成余姚地区风速急剧增大。同时,通过对比两站逐分钟观测资料(图9c,9d),地面大风出现之前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 $7\sim 10\text{ min}$,这对于极大风的监测预警有着一定的指示意义。

6 结论与讨论

2021年4月30日夜,浙北和浙东北沿海受到自苏南的强飑线末端影响,并且强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,得到以下主要结论:

(1)本次大风天气过程发生在高空冷涡前部, 500 hPa 有干冷空气入侵,浙北上空 850 hPa 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 $550\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$,同时低层 $0\sim 3\text{ km}$ 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。

(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,后侧辐散下沉流出明显,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 and 风暴承载层的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,中层动量被更快地带到地面,造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,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”会使得地面风力有所加强。

(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,并且出现时间早于大风出现 $7\sim 10\text{ min}$,这对于极大风的监测预警有着一定的指示意义。

伴随着逐分钟分辨率地面观测业务的广泛应用,各类气象演变特征在强对流预警业务中提前量及指示意义,还需要进一步结合多个个例开展深入的研究。

参考文献

- 陈圣劼,刘梅,杨梦兮,等,2022.江苏“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).
- 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):357-368. Chen S Q, Zhang L N, Yu X D, et al, 2017. Environmental conditions of three squall lines in the north part of Zhejiang Province[J]. J Appl Meteor Sci, 28(3): 357-368(in Chinese).
- 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. Cheng Y X, Sun J S, Dai G J, et al, 2018. Study on a thunderstorm event over Beijing in 2016[J]. Meteor Mon, 44(12): 1529-1541(in Chinese).
- 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):1513-1521. Fei H Y, Wang X M, Zhou X G, et al, 2016. Climatic characteristics and environmental 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).
- 高晓梅,孙雪峰,秦瑜蓬,等,2018.山东一次强对流天气的环境条件和对流风暴特征[J].干旱气象,36(3):447-455. Gao X M, Sun X F, Qin Y P, et al, 2018. Environmental conditions and a convective storm features of a severe convective weather process in Shandong Province[J]. J Arid Meteor, 36(3):447-455 (in Chinese).
- 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. He N, Ding Q L, Yu X D, et al, 2020. Statistical analysis of thunderstorm gust front characteristics in Beijing and surrounding areas[J]. Acta Meteor Sin, 78(2):250-259(in Chinese).
- 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,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).
- 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):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).
- 李彩玲,蔡康龙,黄先香,等,2021.桂林一次强下击暴流成因分析[J].气象,47(2):242-252. Li C L, Cai K L, Huang X X, et al, 2021. Cause analysis of a severe downburst in Guilin[J]. Meteor Mon, 47(2):242-252(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).
- 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 J Y, Sun J H, 2012. The formation mechanism of damaging surface wind during the squall line in June 2009[J]. Chin J Atmos Sci, 36(2):316-336 (in Chinese).
- 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. Ma S P, Wang X M, Yu X D, 2019. Environmental parameter characteristics of severe wind with extreme thunderstorm[J]. J Appl Meteor Sci, 30(3):292-301(in Chinese).
- 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):719-728. Peng X Y, Zhang L N, Liu H H, et al, 2022. Formation mechanism of extreme winds in Hangzhou Bay caused by convection at the bottom of cold vortex[J]. Meteor Mon, 48(6):719-728(in Chinese).
- 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. 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).
- 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. Sheng C Y, Li J H, Fan S D, 2014. Numerical study of terrain and underlying surface effect on Bohai gale[J]. Meteor Mon, 40(11):1338-1344(in Chinese).
- 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):141-154. Sheng J, Zheng Y G, Shen X Y, et al, 2019. Evolution and mechanism of a rare squall line in early spring of 2018[J]. Meteor Mon, 45(2):141-154(in Chinese).
- 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. Tao L, Dai J H, Li B P, et al, 2016. Characteristics' statistical analysis of gust front generated by moving thunderstorms in Shanghai[J]. Meteor Mon, 42(10):1197-1212(in Chinese).
- 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):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).
- 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 Y, Bu Q J, Huang A N, 2022. Analyses on correlation and causes for the consecutive thunderstorm gust fronts over the Bohai Sea Bay[J]. Meteor Mon, 48(6):729-745(in Chinese).
- 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):788-799. Yue C J, Yuan Z H, Tao L, et al, 2016. Structure feature and momentum budget analysis of a gust front in Shanghai Region[J]. Plateau Meteor, 35(3):788-799(in Chinese).
- 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. 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).
- 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. Zhang Y, Zhao Z Y, 2012. Contrast of radar information between two destructive gales occurred in the east of 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.
- Chen M X, Wang Y C, Gao F, et al, 2014. Diurnal evolution and distribution of warm-season convective storms in different prevailing wind regimes over contiguous North China[J]. J Geophys Res: Atmos, 119(6):2742-2763.
- Meng Z Y, Yan D C, Zhang Y J, 2013. General features of squall lines in East China[J]. Mon Wea Rev, 141(5):1629-1647.

- Notaro M, Zarrin A, Vavrus S, et al, 2013. Simulation of heavy lake-effect snowstorms across the Great Lakes Basin by RegCM4: synoptic climatology and variability[J]. *Mon Wea Rev*, 141(6): 1990-2014.
- Quan W Q, Xu X, Wang Y, 2014. Observation of a straight-line wind case caused by a gust front and its associated 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 biggest lakes on local temperature and precipitation in the Yellow River source region of the Tibetan Plateau[J]. *Adv Meteor*, 2015: 248031. <http://doi.org/10.1155/2015/248031>.
- 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, 2015. Numerical simulation of the lake effect of Erhai in the Yunnan-Guizhou Plateau Area[J]. *Acta Meteor Sin*, 73(4): 789-802.
- 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.
- 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.

(本文责编:俞卫平)